EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE TALCA
CHILE



GEOMÁTICA APLICADA

Servicio Aerofotogramétrico, Fuerza Aérea de Chile
Centro de Geomática, Universidad de Talca

GEOMÁTICA APLICADA

Carlos Mena Frau
Yony Ormazábal Rojas
Viviana Barrientos Lardinois

EDITORIAL
UNIVERSIDAD DE TALCA
CHILE

EDITORES

Dr. Carlos Mena Frau
(Centro de Geomática, Universidad de Talca)

Ms. Yony Ormazábal Rojas
(Centro de Geomática, Universidad de Talca)

Geógrafa Viviana Barrientos Lardinois
(Servicio Aerofotogramétrico, Fuerza Aérea de Chile)

COMITÉ EDITORIAL

Dr. João Roberto Dos Santos
(Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales, Brasil)

Dr. Alfonso Condal Beretta
(Universidad de Laval, Canadá)

Dr. Fernando Peña Cortés
(Universidad Católica de Temuco, Chile)

Dra. María Mireya González Leiva
(Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile)

Dr. Rómulo Santelices
(Universidad Católica del Maule, Chile)

Mg. Juan Carlos Cantillana Reyes
(Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile)

Dr. John Gajardo Valenzuela
(Universidad de Talca, Chile)

Dra. Marcia Vásquez Sandoval
(Universidad de Talca, Chile)

Mg. Gabriel Olivares Jansana
(Servicio Aerofotogramétrico, Chile)

ISBN: 978-956-7717-23-1

EDITORIAL UNIVERSIDAD DE TALCA

Abril de 2018

Impreso por el Instituto Geográfico Militar

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PRÓLOGO 11

PRESENTACIÓN 13

INSTITUCIONES PARTICIPANTES 15

SECCIÓN I 25
ESTADO DEL ARTE DE LA GEOINFORMACIÓN 27
1.1. INFORMACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES: VISIÓN CIENTÍFICA Y AGENDA DE INVESTIGACIÓN DEL ISPRS 31
1.1.1. Introducción 31
1.1.1.1. Antecedentes 31
1.1.1.2. Información desde imágenes 32
1.1.1.3. El rol de la ISPRS 34
1.1.2. Desafíos mayores 34
1.1.2.1. Información espacial de alta calidad 35
1.1.2.2. Computación geoespacial avanzada 36
1.1.2.3. Soporte de decisión colaborativo 37
1.1.3. Estado del arte de la información desde imágenes 37
1.1.3.1. Adquisición de imágenes 38
1.1.3.2. Modelación y orientación del sensor 39
1.1.3.3. Reconstrucción de superficie 40
1.1.3.4. Extracción de información temática 41
1.1.3.5. Detección de cambios 42
1.1.3.6. Mapeo global y planetario 43
1.1.3.7. Modelado y análisis de datos espaciales 43
1.1.3.8. Visualización y representación múltiple 44
1.1.3.9. Servicios web geoespaciales 44
1.1.4. Agenda de investigación científica 45
1.1.4.1. Sistemas de sensores 45
1.1.4.2. Fotogrametría 48
1.1.4.3. Percepción remota 50
1.1.4.4. Ciencia de la información espacial 51
1.1.5. Conclusiones 54
1.1.6. Agradecimientos 55
1.2. AVANCES DEL SISTEMA NACIONAL DE COORDINACIÓN DE INFORMACIÓN TERRITORIAL (SNIT), LA INFRAESTRUCTURA DE DATOS GEOESPACIALES (IDE) DE CHILE 56
1.2.1. Introducción 56
1.2.2. Grupos de trabajo y Comité Nacional de Estándares de Información Geográfica 57
1.2.3. Comité Nacional de Normas de Información Geográfica 58
1.2.3.1. Publicación de Normas Chilenas ISO de Información Geográfica (NCh-ISO) 59
1.2.3.2. Publicación de recomendaciones técnicas para facilitar el uso de las Normas Chilenas de Información Geográfica 59

1.2.3.3. Capacitación permanente en materias de Gestión de Información Geográfica mediante la aplicación de normas ISO 59
1.2.3.4. Participación en la discusión internacional de las Normas de Información Geográfica actualmente en desarrollo por ISO 59
1.2.3.5. Participación internacional en reuniones presenciales de ISO 59
1.2.3.6. Publicación del libro Aplicación de Normas Chilenas de Información Geográfica 59
1.2.3.7. Acceso para los organismos públicos a las normas geográficas ISO consideradas fundamentales 60
1.2.3.8. Participación en el desarrollo del Glosario multilingüe ISO/TC 211 60
1.2.4. Modelo de gestión de información territorial para el desarrollo de una IDE 61
1.2.5. Aplicaciones del SNIT para el acceso a la información geográfica pública 61
1.2.6. Actividad internacional SNIT 63
1.2.7. Conclusión 64

SECCIÓN II 67
TECNOLOGÍA PARA LA CAPTURA DE DATOS 69
2.1. CALIBRACIÓN ABSOLUTA DE SENSORES SATELITALES EN EL RANGO VNIR: REVISIÓN DE MÉTODOS EMPLEADOS Y ACTIVIDADES CAL/VAL DESARROLLADAS EN EL MARCO DEL MONITOREO DE FASAT-CHARLIE 73
2.1.1. Introducción 73
2.1.2. Calibración absoluta de un sensor satelital: ¿Qué es y por qué es necesaria? 74
2.1.3. Métodos de calibración absoluta empleados 75
2.1.3.1. Calibración prevuelo en laboratorio 75
2.1.3.2. Calibración en vuelo o in-flight calibration 76
2.1.3.3. Sitios de calibración y sus características 79
2.1.3.4. Metodologías vicarias basadas en datos remotos 81
2.1.4. Actividades en Chile: Caracterización de sitio en Sudamérica y calibración del satélite chileno FASat Charlie 88
2.1.4.1. Ejecución de las primeras calibraciones en vuelo y cruzada 88
2.1.4.2. Campañas de caracterización y calibración en el desierto de Atacama 89
2.1.5. Comentarios finales 92
2.1.6. Listado de acrónimos 93
2.2. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA RADAR 96
2.2.1. Introducción 96
2.2.2. Los sensores activos 97
2.2.2.1. Fundamentos de un sistema de radar 97
2.2.2.2. La ecuación de radar 98
2.2.2.3. Detección de objetivos de interés mediante un radar 101
2.2.2.4. La resolución de un sistema de radar 101
2.2.2.5. Control del rango de resolución 102
2.2.2.6. Sistemas de radar de apertura sintética 102
2.2.3. Polarimetría: Aplicación utilizando imágenes de radar 103
2.2.4. Conclusiones 106

SECCIÓN III 109
CLASIFICACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DE SENSORES REMOTOS 111
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE DOSEL DE LA VEGETACIÓN MEDIANTE DATOS DE ESCÁNER LÁSER AEROTRANSPORTADO 117
3.1.1. Introducción 117
3.1.1.1. Caracterización de la estructura del dosel de la vegetación 117
3.1.1.2. Medición de las variables estructurales del dosel de la vegetación 118
3.1.1.3. Estimación de la estructura del dosel de la vegetación usando escáneres láser aerotransportados 119
3.1.2. Métodos 121
3.1.2.1. Zona de estudio Jasper Ridge 121
3.1.2.2. Descripción del equipo, recopilación de datos y preprocesamiento de las HP 121
3.1.2.3. Descripción del sensor ALS, recopilación de datos y preprocesamiento 123
3.1.2.4. Cálculo de GF desde las HP 126
3.1.2.5. Cálculo de métricas ALS para estimar GF 127
3.1.2.6. Cálculo de los modelos de GF a partir de las métricas de ALS 128
3.1.3. Resultados 129
3.1.4. Discusión 130
3.1.5. Conclusiones 132
3.1.6. Agradecimientos 132
3.2. SEPARACIÓN AUTOMÁTICA DE ÁREAS DE BOSQUE A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN TEMÁTICA POR FRECUENCIA TEMPORAL DE CLASES CON ÍNDICE SAVI BAJO 133
3.2.1. Introducción 133
3.2.2. Material y método 134
3.2.3. Resultados y discusión 137
3.2.4. Conclusiones y recomendaciones 138
3.3. USO DE TECNOLOGÍA DE DATOS LIDAR EN INVENTARIOS FORESTALES REMOTOS 139
3.3.1. Introducción 139
3.3.2. Metodología 140
3.3.2.1. Área de estudio y datos LiDAR 140
3.3.2.2. Método de Detección de Árboles (MDA) 141
3.3.2.3. Evaluación 143
3.3.2.4. Estrategia de procesamiento paralelo de datos 143
3.3.3. Resultados y discusión 144
3.3.3.1. Evaluación de la calidad de resultados del MDA 144
3.3.3.2. Aplicación de la estrategia de procesamiento paralelo de datos a Robinson Forest 146
3.3.4. Conclusión 147
3.3.5. Agradecimientos 148
3.4. CLASIFICACIÓN DE CUBIERTAS DE SUELO A PARTIR DE IMAGEN LANDSAT-8 Y MEDIANTE ALGORITMO DE MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL: EL CASO DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS LINGUE Y BUDI 149
3.4.1. Introducción 149
3.4.2. Desarrollo 150
3.4.2.1. Área de estudio 150
3.4.2.2. Metodología 150
3.4.2.3. Sitios de entrenamiento 151
3.4.2.4. Máquina de soporte vectorial 153
3.4.3. Resultados 154

3.4.3.1. Clasificaciones 154
3.4.3.2. Validación 155
3.4.4. Discusión 157
3.4.5. Consideraciones finales 157
3.4.6. Agradecimientos 158

SECCIÓN IV 161
RECURSOS HÍDRICOS Y SUELOS 163
4.1. HACIA EL MONITOREO DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN CHILE 169
4.1.1. Introducción 169
4.1.2. Caso estudio de Chile 170
4.1.2.1. Área de estudio 170
4.1.2.2. Datos 171
4.1.3. Método 172
4.1.3.1. Procesamiento espacial de datos 172
4.1.3.2. Calibración 172
4.1.3.3. Validación 173
4.1.4. Resultados 173
4.1.4.1. Coeficiente de determinación 173
4.1.4.2. Variabilidad temporal de los coeficientes 175
4.1.4.3. Validación del método óptico microondas pasivo de Mattar et al. (2012) 176
4.1.4.4. Series de tiempo. 179
4.1.5. Discusión y conclusiones 180
4.1.6. Agradecimientos 182
4.2. USO DE HERRAMIENTAS DE TELEDETECCIÓN PARA ESTIMAR REQUERIMIENTOS HÍDRICOS EN ZONAS DE SECANO 183
4.2.1. Introducción 183
4.2.2. Desarrollo 184
4.2.2.1. Bases teóricas 184
4.2.2.2. Modelos basados en Indices Vegetativos (IV) 184
4.2.2.3. Modelos basados en el Residuo del Balance de Energía Superficial (RBES) 185
4.2.3. Principales resultados y un ejemplo de la aplicación de la teledetección en zonas de secano 186
4.2.4. Conclusiones 187
4.3. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LA MICROCUENCA DEL ESTERO YERBA LOCA MEDIANTE IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN 188
4.3.1. Introducción 188
4.3.2. Material y métodos 188
4.3.2.1. Área de estudio 188
4.3.2.2. Datos remotos (Pléiades/ERS) 189
4.3.2.3. Cálculo de parámetros morfométricos 189
4.3.2.4. Definición de sistemas y geoformas 190
4.3.2.5. Interpretación visual, digitalización y validación en terreno 191
4.3.3. Resultados 192
4.3.3.1. Morfometría de la microcuenca del estero Yerba Loca 192
4.3.3.2. Sistemas y geoformas de la microcuenca del estero Yerba Loca 194
4.3.4. Conclusiones 195

4.4. VARIACIONES EN LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA FOSA DE PERÚ-CHILE DURANTE PERÍODOS DE ACTIVIDAD SÍSMICA 197
4.4.1. Introducción 197
4.4.2. Datos y metodología 198
4.4.2.1. Adquisición de los datos 198
4.4.2.2. Metodología 199
4.4.3. Resultados 200
4.4.3.1. Eventos sísmicos en febrero, marzo y abril de 2010 200
4.4.3.2. Eventos sísmicos de febrero, marzo y abril de 2014 202
4.4.3.3. Transectos de ΔT 202
4.4.4. Análisis y conclusiones 203
4.4.5. Agradecimientos 204

SECCIÓN V 207
ESTUDIO DE DESASTRES AMBIENTALES 209
5.1. PERCEPCIÓN REMOTA DE INCENDIOS FORESTALES 215
5.1.1. Introducción 215
5.1.2. Evaluación preincendio 215
5.1.3. Detección de incendios activos 217
5.1.4. Evaluación postincendio 218
5.1.5. Productos satelitales para el monitoreo global 219
5.1.6. El caso chileno 220
5.1.7. Conclusiones 222
5.2. SEVERIDAD DEL DAÑO POR INCENDIOS EN UN BOSQUE DE ALTO VALOR DE CONSERVACIÓN DOMINADO POR NOTHOFAGUS ALESSANDRII (RUIL) EN LA CORDILLERA DE LA COSTA, REGIÓN DEL MAULE, CHILE CENTRAL 223
5.2.1. Introducción 223
5.2.2. Metodología 224
5.2.3. Resultados 225
5.2.4. Conclusiones 227
5.3. MAPEO DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE REMOCIÓN EN MASA USANDO MODELOS PROBABILÍSTICOS Y HEURÍSTICOS 228
5.3.1. Introducción 228
5.3.2. Metodología 229
5.3.2.1. Modelo aditivo generalizado (GAM) 229
5.3.2.2. Evaluación Multicriterio (EMC) 231
5.3.3. Resultados 232
5.3.4. Conclusiones 234
5.3.5. Agradecimientos 234
5.4. EFECTOS DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL Y ESPECTRAL DE LOS SENSORES ESPACIALES EN LA ESTIMACIÓN DE LA SEVERIDAD DE LOS INCENDIOS FORESTALES 235
5.4.1. Introducción 235
5.4.2. Materiales y métodos 236
5.4.2.1. Área de estudio 236
5.4.2.2. Trabajo de campo 236
5.4.2.3. Imágenes de satélite 237

5.4.2.4. Modelos de simulación 238
5.4.2.5. Validación 239
5.4.3. Resultados 239
5.4.3.1. Validación de resultados 239
5.4.3.2. Discusión 240
5.4.4. Conclusiones 240
5.5. PERCEPCIÓN REMOTA HIPERESPECTRAL Y DE RADAR PARA EVALUACIÓN DE SABANAS BRASILEÑAS 242
5.5.1. Introducción 242
5.5.2. Caso 1: Contribución de los datos hiperespectrales al mapeo de la sabana en el centro de Brasil 243
5.5.3. Caso 2: Combinación de SAR y datos ópticos para mapeo de sabana en el norte de Brasil 245
5.5.4. Conclusiones 247
5.5.5. Agradecimientos 248

SECCIÓN VI 251
POBLACIÓN Y TERRITORIO 253
6.1. GEOMÁTICA Y ANÁLISIS GEOESPACIAL EN EL ESTUDIO DE ENFERMEDADES Y CONDICIONES DE SALUD 257
6.1.1. Introducción 257
6.1.2. Geomática y el análisis geoespacial 257
6.1.3. Componentes de la epidemiología geoespacial 257
6.1.3.1. Mapeo como una técnica geoespacial de fácil interpretación 258
6.1.3.2. Autocorrelación geoespacial y clusters en la detección de determinantes ambientales de salud 259
6.1.4. Técnicas geoespaciales y enfermedades transmisibles 261
6.1.5. Técnicas geoespaciales y enfermedades no transmisibles 261
6.1.5.1. Uso de técnicas geoespaciales en enfermedades cardiovasculares 262
6.1.5.2. Uso de técnicas geoespaciales en diabetes 264
6.1.5.3. Uso de técnicas geoespaciales en el estudio de cáncer 265
6.1.6. Técnicas espaciales y acceso a servicios de salud 265
6.1.7. Conclusiones 267
6.2. LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL ORDENAMIENTO ECOLÓGICO LOCAL: CASO IXTLAHUACÁN DEL RÍO, JALISCO, MÉXICO 269
6.2.1. Introducción 269
6.2.1.1 Participación de la universidad 269
6.2.1.2. Área de estudio: Municipio de Ixtlahuacán del Río 270
6.2.1.3. Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) 270
6.2.2. Etapas del ordenamiento ecológico local: caracterización, diagnóstico, pronóstico y propuesta (SEMARNAT, 2015) 271
6.2.2.1. Etapa de caracterización 271
6.2.2.2. Etapa de diagnóstico 272
6.2.3. Resultados previstos 275
6.2.4. Agradecimientos 275
6.3. EXPERIENCIAS EN GEOMÁTICA APLICADA EN LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE 278
6.3.1. Introducción 278
6.3.2. Desarrollo 278
6.3.2.1. Caso 1 278
6.3.2.2. Caso 2 279
6.3.3. Metodologías 280

6.3.3.1. Caso 1 ... 280
6.3.3.2. Caso 2 ... 283
6.3.4. Conclusiones ... 284
6.4. IDENTIFICACIÓN DE ASENTAMIENTOS POPULARES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA, JALISCO 2016, A TRAVÉS DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA ... 286
6.4.1. Introducción ... 286
6.4.2. Metodología para la detección remota de los asentamientos populares en el área metropolitana de Guadalajara ... 287
6.4.3. Clasificación de la ocupación de suelo del área metropolitana de Guadalajara, por municipio ... 287
6.4.4. Conclusiones ... 291
6.5. EL ATLAS NACIONAL DE ESPAÑA DEL SIGLO XXI: UNA OBRA INSTITUCIONAL, DE EJECUCIÓN MULTIDISCIPLINAR Y DE USO PLURIFUNCIONAL ... 292
6.5.1. Introducción ... 292
6.5.2. Planteamientos previos a la ejecución del proyecto ... 293
6.5.2.1. Objetivos ... 293
6.5.2.2. La estructura temática ... 295
6.5.2.3. La Red ANEXXI ... 295
6.5.2.4. El Sistema de Información del Atlas Nacional de España (SIANE) ... 296
6.5.3. El desarrollo del proyecto ... 298
6.5.3.1. Constitución de los grupos de trabajo temático (GTT) ... 298
6.5.3.2. Definición de los recursos ... 299
6.5.3.3. Primer producto del ANEXXI: Publicación impresa España en mapas. Una síntesis geográfica de la serie Compendios del ANE ... 299
6.5.3.4. Próximos desarrollos del ANEXXI ... 300
6.5.4. Conclusión ... 302
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ... 303

PRÓLOGO

El libro Geomática Aplicada se fundamenta en el estrecho vínculo que existe entre el Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile y el Centro de Geomática de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Talca. Un lazo nacido en el año 1997 a la luz de un convenio de colaboración científico-académico establecido entre ambas instituciones y cuyo objetivo es propiciar el intercambio del conocimiento, la colaboración académica y el desarrollo tecnológico. Esta colaboración mutua ha posibilitado desarrollar proyectos de investigación, actividades de capacitación y el desarrollo de diversas iniciativas en apoyo a la comunidad, además ha permitido publicar previamente dos textos de divulgación científica, cuyo foco central han sido las geociencias, que hoy son utilizados como textos académicos tanto en Chile como en el extranjero.

La geomática es un término moderno que reúne disciplinas como la cartografía, la teledetección, la geodesia y la geografía, que posee un fuerte componente tecnológico que las relaciona e integra. Se caracteriza por la captura de datos geoespaciales, el análisis de variables geográficas, el desarrollo de procesos y modelos altamente sistematizados por medio de softwares, cuyo objetivo es contar con productos, servicios y aplicaciones que faciliten la vida del hombre y su relación con el espacio geográfico.

En nuestro quehacer diario somos usuarios directos o indirectos de la geomática. Un número cada vez mayor de labores requieren de datos geográficos actualizados, interoperables y disponibles en tiempo real. Es así como actividades tan diversas como el turismo, la arqueología, el marketing o la medicina, los han convertido en una materia prima fundamental para las tareas que realizan. La información geográfica ya no solo son datos de uso exclusivo para la evaluación del impacto ambiental, la gestión territorial, la planificación urbana, la cartografía, sino que nos permiten desplazarnos por las carreteras, seleccionar el restaurante más próximo, ver el estado del tiempo, entre tantas otras aplicaciones. De ellos, es posible extraer de forma rápida, fácil y oportuna, información relevante a la hora de tomar decisiones.

El actual texto titulado Geomática Aplicada ha sido desarrollado a partir de la colaboración de prestigiosas instituciones nacionales e internacionales, entre las que han participado más de 75 destacados investigadores provenientes de diversas entidades académicas e instituciones vinculadas con la gestión del conocimiento geográfico.

En este contexto, agradecemos los aportes realizados por el Centro Regional de Geomática de la Universidad Autónoma de Entre Ríos; la Universidad Nacional de Luján; el Departamento de Geomática de la Universidad de Laval; la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle; el Centro Regional Fundación CEQUA; el Departamento de Geología, Geografía y Medioambiente de la Universidad de Alcalá; el área de Cartografía Temática y Atlas Nacional en Instituto Geográfico Nacional de España; el Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial SNIT; el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales INPE; la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota ISPRS; el Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad de Kentucky; el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Kentucky; el Departamento de Geografía y Ordenación Territorial de la Universidad de Guadalajara; el Departamento de Estudios Regionales-INESER de la Universidad de Guadalajara; el Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile; el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable; el Institut für Geographie Friedrich-Schiller de la Universidad de Jena; el Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje de la Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de Naturaleza de la Universidad de Chile; el Laboratorio para el Análisis de la Biósfera de la Universidad de Chile; la Dirección de Programas Antárticos y Subantárticos de la Universidad de Magallanes; el Centro del Secano del Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Católica del Maule; el Departamento de Ciencias Agrarias de la Universidad Católica del Maule; el Centro de Observación de la Tierra-Hémera de la Facultad

de Ciencias de la Universidad Mayor; el Área de Geomática de la Universidad de Santiago de Chile; el Laboratorio de Investigación en Trombosis de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad de Talca; el Laboratorio de Planificación Territorial de la Universidad Católica de Temuco; y muy especialmente, el Centro de Geomática de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Talca.

El libro Geomática Aplicada es una obra dirigida a profesionales de las áreas de catastro, planificación, evaluación y gestión de los fenómenos, recursos y relaciones que ocurren sobre un territorio, a todos aquellos que requieran incorporar la dimensión espacial en su gestión, así como también a las personas que buscan introducirse en el mundo de la geomática para conocer aplicaciones, metodologías y experiencias exitosas.

La lectura de este texto les permitirá conocer cuáles son las problemáticas que interesan a los investigadores, académicos y usuarios de la geoinformación en Chile y el mundo, así como también los avances tecnológicos y metodológicos que realizan empresas e instituciones, a fin de incentivar a aquellos cuyo accionar transcurre en diferentes áreas científicas y tecnológicas para que profundicen en las capacidades de la geomática y el futuro de la disciplina, adentrándose a partir de allí, a su empleo en la resolución a preguntas o asuntos que les inquieten.

Los productos y aplicaciones derivados de la geomática son amplios y diversos, como las ciencias y tecnologías que interactúan en la adquisición, análisis, administración y distribución de data geoespacial. Bajo esta perspectiva, las ciencias agrupadas en torno a la geomática tienen mucho que aportar en el devenir del hombre sobre el planeta. Es por ello que la Fuerza Aérea de Chile, a través de su Servicio Aerofotogramétrico, se siente gratificada y honrada por haber podido trabajar junto con académicos, profesionales e investigadores, en el desarrollo de este libro. Estamos convencidos que esta obra constituye un aporte sustancial a la comprensión y divulgación del conocimiento en materias geoespaciales.



JORGE ROBLES MELLA
General del Aire
Comandante en Jefe de la Fuerza Aérea de Chile

PRESENTACIÓN

La geomática, como ciencia, trata fundamentalmente de la gestión de información geográfica, basándose en conocimientos tradicionales y haciendo uso intensivo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). En este sentido, es interesante constatar cómo disciplinas fundamentales, incluyendo la geografía, la cartografía, la fotogrametría, la geodesia, por mencionar algunas, se han revitalizado incorporando rápidamente los avances tecnológicos disponibles, para complementar y potenciar distintas áreas de las ciencias de la tierra, conformando así una nueva rama, robusta, actual, influyente y, a veces, determinante en la vida actual de la sociedad.

El libro Geomática Aplicada se presenta como un intento de mostrar algunos de los aspectos más relevantes en el desarrollo de la ciencia geomática y, especialmente, aquellos referidos al uso de estas disciplinas modernas en la resolución o estudio de fenómenos, problemáticas o situaciones relacionadas con el territorio, los recursos naturales y la sociedad. Es aquí donde la aplicación de los últimos desarrollos geomáticos cobra una importancia singular, ya que permite alcanzar estados de conocimiento superiores, que conducen a la correcta comprensión de la situación abordada, posibilitando procesos de toma de decisiones oportunos, eficientes e inteligentes.

Las capacidades ofrecidas por la geomática en la actualidad son múltiples y variadas, por cuanto pueden ser aplicadas sobre condiciones muy diferentes y en una gran diversidad de procesos. En este sentido, la geomática ha venido diversificando y ampliando el espectro de usos la información geográfica. Tradicionalmente, la información geográfica apuntaba a la generación de un producto cartográfico en particular que, si bien resultaba muy útil, presentaba alguna rigidez en cuanto a sus posibilidades de uso y aprovechamiento. Hoy en día tenemos que cada etapa en el ciclo de generación de información geográfica puede ser el punto de partida de una amplia gama de posibles aplicaciones, multiplicando su utilidad y uso.

Etapas relacionadas con la adquisición de datos geográficos, el tratamiento de estos, su almacenamiento, consulta, análisis, representación, modelado y difusión de los mismos, representan instancias de potencial uso y aprovechamiento para diferentes disciplinas de las ciencias de la tierra. Modelar un bosque, registrar el desplazamiento de aves, medir altura de edificios, monitorear el desprendimiento de un glaciar, evaluar la calidad del aire, proyectar el efecto del aumento de la temperatura global, realizar prácticas agrícolas precisas, encontrar el mercado más próximo en la ciudad; son solo algunos escasos ejemplos de lo que hoy día es posible gracias al desarrollo de la geomática y su aplicación.

El libro Geomática Aplicada es producto del interés común del Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH) y el Centro de Geomática de la Universidad de Talca, de compartir y difundir los últimos avances registrados en los distintos ámbitos de la ciencia geomática. Es creencia compartida también, que la importancia de estos avances puede significar un aporte sustancial al desarrollo de nuestra comunidad, ya que muestra ejemplos concretos de las múltiples posibilidades de uso que ofrece la geomática hoy en día, dibujando, además, trazos de los futuros adelantos que podríamos llegar a conseguir.

El trabajo que reúne este libro proviene de las principales universidades y centros de investigación nacionales e internacionales en el área de las ciencias de la tierra. Esto tiene un valor particularmente alto, ya que representa una instancia única de convivencia y confluencia de los más relevantes actores de la comunidad científica y profesional de las diferentes disciplinas reunidas en la geomática. De esta forma, el libro constituye un escenario común y abierto, donde podemos conocer e interiorizarnos de los últimos avances y desarrollos conseguidos por un grupo diverso y amplio de investigadores altamente comprometidos con el desafío de ampliar nuestros márgenes de conocimiento y aplicarlos a situaciones concretas que requieran de herramientas de apoyo a la resolución de problemáticas actuales de la sociedad.

Para facilitar su lectura, hemos organizado el libro en seis secciones que agrupan los distintos trabajos incluidos como capítulos individuales. Intentamos darle un orden de lectura cercano al ciclo de generación de información geográfica, donde los capítulos agrupados en una sección resultan afines a una temática particular, y donde cada sección aborda una de las etapas principales del ciclo. De esta forma, la primera sección nos entrega una visión actualizada del nivel de desarrollo de las tecnologías de la geoinformación, yendo desde conceptos de base hasta una revisión detallada de aspectos técnicos y organizacionales más relevantes, dejando ver, además, aquellos desafíos que la geomática deberá enfrentar en su desarrollo futuro.

La segunda sección trata de la captura de datos desde sensores remotos pasivos y activos, poniendo atención en aquellos aspectos de fundamento que sustentan la implementación de las tecnologías destinadas a tales efectos. Se hace especial mención a la necesidad de mantener sistemas de captura de datos confiables y precisos, ya que de ello depende la validez de todos los procesamientos, análisis y productos de información que sean generados a partir de ellos. La sección tercera se centra en metodologías y procedimientos de clasificación de datos obtenidos de sensores remotos. Aquí resultan particularmente interesantes las distintas posibilidades metodológicas a utilizar, en distintos contextos de aplicación y de requerimiento de información. Es posible evidenciar que nuevas tecnologías o plataformas, como sensores de LiDAR, radar o los últimos sensores satelitales multiespectrales, si bien ofrecen grandes posibilidades de uso, requieren de grandes esfuerzos para definir procedimientos factibles de implementar y adecuados para el correcto aprovechamiento de los datos que proveen.

La sección cuarta aborda temáticas relacionadas con los recursos naturales de agua y suelo, los que, si bien pueden parecer elementos diferentes, mantienen un estrecho vínculo de interacción. En este contexto, encontramos capítulos dedicados a la temperatura del océano, la caracterización de cuencas, la estimación de evapotranspiración en cultivos o el monitoreo de la humedad del suelo a nivel continental. La quinta sección incluye capítulos dedicados al estudio de distintos fenómenos y desastres medioambientales, tales como la remoción en masa, el cambio de la cubierta vegetal, los incendios forestales y la determinación de la severidad de daño en vegetación quemada. Estas últimas temáticas concentran gran interés, por cuanto el escenario de cambio climático experimentado en los últimos años ha tornado el problema de los incendios forestales en un tema de primera prioridad, que puede provocar pérdidas y daños irreparables, por lo que requiere de un mayor estudio y cuidado.

Por último, hemos dedicado la sexta sección a las temáticas de población y territorio, ya que nos parece un tema siempre interesante por la interacción que se tiene entre estos elementos. Si bien la población es un componente inherente al territorio, actualmente ha venido cobrando mayor injerencia en la configuración del mismo, al punto de llegar a modificarlo totalmente, para bien o para mal, de acuerdo con sus intereses y prioridades. Temas como la distribución espacial de enfermedades, la planificación territorial, la evaluación de infraestructura instalada o la identificación y delimitación de sectores de la población más vulnerables dentro de una ciudad; son ejemplos que se incluyen y describen en los capítulos de esta sección. Terminamos con un capítulo que da cuenta de los medios y procedimientos para poner toda esta información a disposición de todos, a través de los tradicionales atlas, potenciados y replanteados desde las posibilidades que la geomática ofrece actualmente.

La sociedad en que vivimos y construimos hoy, depende en gran medida del conocimiento e información que pueda disponer. Nuestras posibilidades de desarrollo están fuertemente determinadas por el acceso a dicha información y los métodos y tecnologías que nos permitan aplicarla a nuestro hacer cotidiano. Este es el rol que tiene la geomática en la actualidad. Los editores de este libro, los miembros del comité editorial, las instituciones participantes y los investigadores reunidos, manifestamos nuestra alegría de ofrecerles el presente libro, como una modesta contribución a la difusión de dicho conocimiento y su aprovechamiento por parte de toda la comunidad.

EDITORES Y COMITÉ EDITORIAL

INSTITUCIONES PARTICIPANTES

El libro *Geomática Aplicada* reúne el trabajo de profesionales, técnicos y académicos que forman parte de importantes instituciones nacionales e internacionales. A continuación se incluye una breve descripción de estas instituciones:

Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH) Creado por la Ley Nº 15.284 el 11 de octubre de 1963, es un organismo técnico y oficial del Estado de Chile para la obtención y procesamientos de imágenes en el ámbito aeroespacial. Estando a la vanguardia en el uso y operación de sistemas remotos para la captura de datos y en el procesamiento y difusión de imágenes e información geoespacial, posibilitando el análisis y la toma de decisiones, con el propósito de contribuir efectivamente a la seguridad aeronáutica, a la defensa y el desarrollo nacional. Concentra sus esfuerzos en la generación de productos y servicios geoespaciales que apoyen la toma de decisiones.	
El Centro de Geomática de la Universidad de Talca, Chile Tiene como misión el cultivo de la geomática como área tecnológica de las ciencias de la tierra. Sus objetivos principales son mejorar las competencias profesionales de los estudiantes de pre y posgrado en la búsqueda de soluciones a problemas asociados al manejo multidimensional de variables ambientales; potenciar, facilitar y colaborar en las soluciones buscadas por los académicos, científicos y profesionales de la universidad en sus proyectos de investigación; y otorgar apoyo científico y técnico a instituciones públicas y privadas que requieran de la geomática para la ejecución de sus políticas.	
International Society for Photogrammetry and Remote Sensing La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) es una organización no gubernamental dedicada al desarrollo de la cooperación internacional para el avance de la fotogrametría, la teledetección y sus aplicaciones. La sociedad opera sin discriminación alguna por motivos de raza, religión, nacionalidad o filosofía política. Los intereses científicos de la sociedad incluyen la fotogrametría, la teleobservación, los sistemas de información espacial y las disciplinas afines, así como aplicaciones en cartografía, geodesia, topografía, ciencias naturales, ingeniería y vigilancia y protección del medioambiente.	
Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España Es la mayor institución pública dedicada a la investigación en España y la tercera de Europa. Adscrita al Ministerio de Economía y Competitividad, a través de la Secretaría de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, su objetivo fundamental es desarrollar y promover investigaciones en beneficio del progreso científico y tecnológico, para lo cual está abierta a la colaboración con entidades españolas y extranjeras.	
Centre for Landscape and Climate Research de la Universidad de Leicester, U.K. Está compuesto por un grupo de científicos multidisciplinarios. Se investigan preguntas interesantes sobre el medioambiente mediante el uso de una amplia gama de disciplinas. Se estudia el entorno terrestre desde una escala global a una escala molecular. La investigación considera las escalas de tiempo desde la dinámica de procesos contemporáneos hasta el cambio climático a largo plazo que abarca períodos de hasta millones de años. La investigación del centro se enfoca en dos temas: bosques y turberas, y procesos y cambios ambientales.	

Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), EE.UU. El Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), vinculado a la Universidad de California, Davis y dirigido por Susan L. Ustin, ha sido reconocido por su liderazgo en aplicaciones ambientales de teledetección y datos geoespaciales durante tres décadas. Hoy tiene uno de los grupos más fuertes de teledetección ambiental en Estados Unidos, con énfasis en la investigación multidisciplinaria.	
Centro de Desarrollo para el Secano Interior de la Universidad Católica del Maule, Chile Centro de Desarrollo del Secano Interior de la Universidad Católica del Maule tiene como objetivo de crear o adaptar procesos productivos innovadores, con cultivos adecuados para la condición de escasez hídrica y la incorporación de tecnologías de generación y aprovechamiento del agua. Su creación obedece a potenciar líneas de investigación en temáticas que den respuesta a necesidades regionales. Actualmente está abocado a la ejecución de proyectos en biomasa y el inicio de dos investigaciones sobre bosque nativo –raulí y roble maulino– y otro con cultivos mixtos de trufas y berries.	
Centro de Estudios del Cuaternario, Chile CEQUA es el primer centro regional de investigación científica y tecnológica, creado el año 2002, bajo la iniciativa del Programa Regional de Conicyt en colaboración con los gobiernos regionales para fortalecer el proceso de descentralización científica en Chile. Su misión es realizar investigación científica que impacte en forma positiva el desarrollo transversal y multisectorial de la región de Magallanes y Antártica Chilena a través de la generación, difusión y transferencia tecnológica del conocimiento creado por el CEQUA.	
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina CONICET es el principal organismo dedicado a la promoción de la ciencia y la tecnología en la Argentina, creado en 1958 con el propósito de fomentar y financiar la investigación científica y tecnológica y las actividades de apoyo que apunten al avance científico y tecnológico en el país, al desarrollo de la economía nacional y al mejoramiento de la calidad de vida, considerando los lineamientos establecidos por el gobierno nacional.	
Department of Global Ecology de la Universidad de Stanford, EE.UU. Fundado en 2002 en el campus de la Universidad de Stanford, para realizar investigaciones básicas sobre las interacciones entre los ecosistemas, la Tierra, la atmósfera y los océanos. El objetivo de esta investigación es comprender las formas en que estas interacciones configuran el comportamiento del sistema de la Tierra, incluidas sus respuestas a los cambios futuros.	
Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad de Kentucky, EE.UU. Es uno de catorce departamentos dentro de la Facultad de Agricultura, Alimentación, y Medio Ambiente. Se estableció en 1969 para cumplir con labores académicas, de investigación y extensión en las áreas de recursos forestales y vida silvestre. Sus profesores en el departamento concentran su investigación en seis áreas temáticas que incluyen: sanidad forestal y restauración ecológica, hidrología y manejo de cuencas, ecología espacial y de paisajes, silvicultura y operaciones forestales, economía y política de recursos naturales, y ecología de la vida silvestre.	

Departamento de Geografía y Geología de la Universidad de Alcalá, España La Universidad de Alcalá fue fundada en 1499 por el cardenal Cisneros y que desarrolló una fecunda labor en los siglos XVI y XVII, sirviendo de modelo a las nuevas universidades que se creaban por entonces en América. En el siglo XIX es trasladada a Madrid, abriendo de nuevo sus aulas en 1977. Actualmente, es el órgano encargado de coordinar y desarrollar las enseñanzas de las áreas de conocimiento relacionadas con el análisis geográfico regional, didáctica de las ciencias sociales, edafología y química agrícola, estratigrafía, geodinámica externa, geografía física, geografía humana y paleontología, en los centros docentes en que estas se impartan, de acuerdo con la programación docente de la universidad, así como de desarrollar la actividad investigadora encaminada a la creación y promoción del conocimiento científico, de los avances tecnológicos y de la formación.	Universidad de Alcalá DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE UNIDAD DOCENTE DE GEOGRAFÍA
Dirección de Programas Antárticos y Subantárticos de la Universidad de Magallanes, Chile Fue creada en 1994 con el propósito de contribuir al desarrollo, promoción, extensión e implementación de líneas de investigación científica y tecnológica propias de una universidad ubicada en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, la que está muy ligada a los diversos sistemas naturales de Antártica, incluyendo los sistemas asociados de latitudes templadas. Estas áreas y en particular el Continente Antártico, son reconocidos por la comunidad científica como un gran laboratorio para el estudio de amplios temas científicos, que actualmente son de gran preocupación mundial, de ahí la ciencia y la educación son los principales, sino los únicos, medios mediante el cual los países desarrollados hacen presencia en la Antártica. Este es un aspecto que la Universidad de Magallanes desea potenciar en beneficio de los intereses propios de la corporación, de Chile y de la ciencia en general.	UNIVERSIDAD DE MAGALLANES CHILE
Infraestructura de Datos Espaciales de Chile La Infraestructura de Datos Espaciales de Chile (IDE-Chile), iniciativa liderada por la Secretaria Técnica del Sistema Nacional de Coordinación de la Información Territorial (SNIT), perteneciente al Ministerio de Bienes Nacionales (MBN), busca llevar adelante iniciativas para promover que la información geográfica de carácter público este accesible a organismos de la administración del Estado, entidades privadas y ciudadanía en general para dar soporte a la toma de decisiones y la formulación de políticas mediante la coordinación interinstitucional, un marco legal robusto, el uso de plataformas tecnológicas modernas y el desarrollo y promoción de recomendaciones técnicas.	IDE CHILE Infraestructura de Datos Geoespaciales
Instituto de Geografía de la Universidad Católica de Chile La enseñanza de la geografía en la Universidad Católica de Chile se inicia el año 1942, fecha en que se crea la Escuela de Educación, donde, se impartían los cursos regulares de la disciplina destinados a la formación de profesores secundarios en historia, geografía y educación cívica. El actual Instituto de Geografía creado en 1970 con la misión de formar geógrafos profesionales se divide en los departamentos de Geografía Física y de Geografía Humana, incorporando en un estatus especial el área de geomática. Entrega una visión integral que permite a sus egresados elaborar y proponer alternativas de solución a los conflictos ambientales, sociales y territoriales, acordes con el desafío de conseguir un ordenamiento territorial sustentable.	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Instituto Geográfico Nacional, España

El Instituto Geográfico Nacional (IGN), creado en 1870, es una Dirección General del Ministerio de Fomento del gobierno de España. Entre otras funciones, se encarga de la captura, procesamiento y difusión de la información geográfica de ámbito nacional. El Área de Cartografía Temática y Atlas Nacional de la Subdirección General de Geodesia y Cartografía del IGN tiene encomendada la elaboración del Atlas Nacional de España (ANE), el que forma parte tanto del Plan Cartográfico Nacional como del Plan Estadístico Nacional.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), Brasil

El Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales del Brasil es un órgano civil especializado en la investigación espacial, creado en 1961. El instituto cuenta con instalaciones en diez ciudades del Brasil: Brasilia, Atibaia, Cachoeira Paulista, Cuiabá, Eusébio, Natal, Santa Maria, São Martinho da Serra y São Luís, encontrándose su sede principal en Sao Jose dos Campos, São Paulo. Conforme a las políticas definidas por el Ministerio de Ciencia y Tecnología brasileño, la misión del INPE es la promoción y ejecución de estudios e investigaciones científicas, el desarrollo tecnológico, la ejecución de actividades operacionales y la capacitación de recursos humanos en los campos de la ciencia espacial y de la atmósfera, de la observación de la Tierra, del pronóstico del tiempo y de los estudios climáticos, de la ingeniería y tecnología espacial y áreas relacionadas.

Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje de la Universidad de Chile

Creado el año 2005 con la finalidad de generar un espacio de investigación en el ámbito de la gestión de los recursos naturales y la conservación de la naturaleza, utilizando técnicas y tecnologías de última generación en el procesamiento digital de imágenes, el geoprocesamiento de datos vectoriales, el procesamiento de datos LiDAR y para la modelación estadística y geoestadística.

El Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB), perteneciente al Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile, nace el 1 de febrero de 2013, con el objetivo principal de desarrollar investigación científica avanzada para el estudio de la biósfera utilizando teledetección cuantitativa. En la actualidad, LAB dirige y colabora en varios proyectos de investigación tanto nacionales como internacionales.

Laboratorio de Planificación Territorial de la Universidad Católica de Temuco, Chile

El Laboratorio de Planificación Territorial de la Universidad Católica de Temuco fue creado en marzo del año 1999, a través de un proyecto internacional. El equipo de investigación que lidera el Dr. Fernando Peña Cortés, está conformado por académicos y profesionales tanto de la UC Temuco, como de otras casas de estudio. Importante es destacar el carácter multidisciplinario e integral que posee el equipo para abordar diversas problemáticas de índole geográfico territorial. Dentro de las líneas de especialización y desarrollo que posee, destaca la investigación geográfico-ambiental, manejo y conservación de recursos naturales, educación geográfica e interculturalidad; y, fuertemente, una línea vinculada a las aplicaciones en el área de la geomática. Todas estas actividades se han traducido en importantes publicaciones indexadas, libros y capítulos de libros a nivel nacional e internacional. En su historia ha desarrollado proyectos de investigación científico-tecnológica, como son FONDECYT (1030861, 1080317, 1110798 y 1151375), FONDEF (TE10I003, TE12I1015 e IT14I10099), INNOVA-CORFO (12BPCR-16617) y Núcleo Milenio (P07S-039 y NS100045), entre otros. En el ámbito de aplicación profesional y asistencia técnica, ha elaborado numerosos proyectos con el sector público y privado en las regiones de Los Ríos y La Araucanía y, en el último tiempo, a nivel nacional. Todo lo anteriormente señalado, lo ha posicionado como una unidad reconocida y referente a nivel nacional.

Universidad Autónoma de Entre Ríos, Argentina La creación de la Universidad Autónoma de Entre Ríos (UADER) en el año 2000, surgió como respuesta a los desafíos que interpelan la vida social, económica, política y cultural de la comunidad entrerriana. La Ley Nº 9250, dispuso la transferencia de más de veinte institutos superiores, institutos de enseñanza superior, escuelas de nivel medio y superior, escuelas superiores, colegios superiores y otras instituciones para conformar la estructura académica de UADER. Hoy cuenta con cuatro facultades Humanidades, Artes y Ciencias Sociales; Ciencias de la Gestión; Ciencia y Tecnología; Ciencias de la Vida y la Salud.	Universidad Autónoma de Entre Ríos
Universidad de Guadalajara, México La Universidad de Guadalajara es parte de la Red Universitaria de Jalisco. Institución benemérita, pública, laica y autónoma, con compromiso social y vocación internacional que satisface las necesidades educativas de nivel medio superior y superior con calidad y pertinencia. Promueve la investigación científica y tecnológica, así como la vinculación y extensión para incidir en el desarrollo sustentable e incluyente de la sociedad. El Departamento de Geografía y Ordenación Territorial pertenece al Centro Universitario de Ciencias Sociales y Humanidades, tiene como tareas desarrollar líneas generales de conocimiento integradas en programas docentes, de investigación y extensión relacionados con la geografía y generar entre sus estudiantes y académicos, una corriente de pensamiento geográfico con identidad propia, que tenga como insumo un desarrollo teórico-metodológico y un conocimiento geográfico con enfoque local y regional, para servir a la sociedad de manera profesional, pertinente y calificada.	UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA PIENSA Y TRABAJA
Universidad de Hannover, Alemania De nombre oficial en alemán Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, es una universidad pública fundada en 1831 y su nombre hace honor al gran matemático y filosofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz del siglo 18. Es una de las más antiguas universidades de ciencias y tecnología de Alemania. Sin embargo, es también reconocida en humanidades, ciencias sociales, derecho y economía. Posee nueve facultades que imparten 190 programas de estudio. Varios premios Nobel han pasado por esta universidad y hoy en día es parte del grupo TU9: grupo de las nueve universidades técnicas líderes en Alemania.	Leibniz Universität Hannover
Universidad de Jena, Alemania La Universidad Friedrich Schiller de Jena (FSU) fue fundada en 1558 y se encuentra en la lista de las 10 universidades más antiguas de Alemania. Lleva el nombre de Friedrich Schiller desde el año 1934, después de que el escritor alemán impartiese clases allí como profesor de historia y que cobijara a algunas de las mentes más influyentes de principios del siglo XIX.	
Universidad de Laval, Canadá Imbuida de una cultura de altos estándares, la Universidad Laval contribuye al desarrollo de la sociedad educando a personas para que se convierten en agentes del cambio y buscando el intercambiando de conocimiento en un estimulante ambiente de investigación y creación. Ofrece formación de posgrado y pregrado en silvicultura y geomática. La Facultad de Silvicultura y Geomática es la más grande de Canadá, con centros de investigación y redes que cubren muchos campos, desde el conocimiento de la tierra y los aspectos sociales del uso de la tierra hasta el uso de sus recursos (madera, no madera, vida silvestre, etc.)	UNIVERSITÉ LAVAL

Universidad Mayor, Chile El Centro de Observación de la Tierra Hémera, fue creado en el año 2017 para responder a la necesidad de entregar soluciones tecnológicas que permitan apoyar la innovación y transferencia en el área de la teledetección espacial, mediante alianzas estratégicas con el sector público y privado, con el fin de contribuir a la planificación, gestión y aprovechamientos de los recursos del país, área poco desarrollada a nivel nacional. La aspiración del Centro Hémera, es ser líderes y referente en Chile en la investigación básica y/o aplicada, y desarrollo tecnológico en el sector de la teledetección. Su misión, contribuir al desarrollo de la sociedad por medio del uso y aplicación de las tecnologías de observación terrestre, con el fin de generar y liderar proyectos de investigación, asesorías y capacitaciones, en asociación con instituciones públicas y privadas, tanto nacionales como internacionales.	UNIVERSIDAD MAYOR para espíritus emprendedores
Universidad Nacional de Luján, Argentina La Universidad Nacional de Luján tiene como finalidad producir conocimientos, transmitirlos y vincularse con la sociedad intentando brindar soluciones a los problemas que afligen a esta y, al mismo tiempo, buscar el desarrollo pleno del individuo son las metas que caracterizan su quehacer universitario. En el caso específico de la Universidad Nacional de Luján, quienes plasmaron la idea de lo que debía ser y que permitió su fundación por Ley N° 20031 del 20 de diciembre de 1972, concibieron una universidad moderna, con estructura departamental, centros regionales y vinculada en sus investigaciones y tareas de extensión a la región de la cual se nutre y a la que aspira servir.	UNIVERSIDAD NACIONAL DE LUJÁN
Universidad Politécnica de Valencia, España La Universitat Politècnica de València es una institución con capacidad para liderar los cambios y las demandas del entorno. Tiene como misión formar a personas para potenciar sus competencias; investigar y generar conocimiento, con calidad, rigor y ética, en los ámbitos de la ciencia, la tecnología, el arte y la empresa, con el objetivo de impulsar el desarrollo integral de la sociedad y contribuir a su progreso tecnológico, económico y cultural.	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Universidad de Santiago de Chile La Universidad de Santiago de Chile (USACH) se define como: *"Una universidad de excelencia, líder en la gestión e innovación tecnológica y del conocimiento, sustentada en las ciencias y las humanidades, con impacto nacional, reconocimiento internacional y responsabilidad social"*. El área de geomática perteneciente al Departamento de Ingeniería Geográfica, tiene como objetivo el uso y desarrollo integrado con equipos de georreferenciación, teledetección espacial y SIG. Imparte docencia de pregrado orientada a formar ingenieros de alto nivel de competencia profesional, ofrece programas de posgrado en áreas de la especialidad y realiza investigación con reconocimiento nacional e internacional.	usach
Universidad del Valle, Colombia La Escuela de Ingeniería Civil y Geomática pertenece a la facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, es una de las pioneras y más representativas instituciones en los campos de la mecánica de sólidos y la geomática; preparando profesionales con un alto nivel técnico, académico e investigativo, que les permita asumir retos y elaborar soluciones integrales acordes con la realidad tecnológica.	Universidad del Valle

“...En aquel Imperio, el Arte de la Cartografía logró tal perfección que el mapa de una sola provincia ocupaba toda una ciudad, y el mapa del Imperio, toda una provincia. Con el tiempo, esos mapas desmesurados no satisficieron y los colegios de cartógrafos levantaron un mapa del Imperio, que tenía el tamaño del Imperio y coincidía puntualmente con él. Menos adictas al estudio de la cartografía, las generaciones siguientes entendieron que ese dilatado mapa era Inútil y no sin impiedad lo entregaron a las inclemencias del Sol y de los inviernos. En los desiertos del Oeste perduran despedazadas ruinas del mapa, habitadas por animales y por mendigos; en todo el país no hay otra reliquia de las disciplinas geográficas”.

Suárez Miranda, Viajes de Varones Prudentes,
Libro Cuarto, Cap. XLV, Lérida, 1658.

Jorge Luis Borges (Del rigor en la ciencia)



“... In that Empire, the Art of Cartography attained such Perfection that the map of a single Province occupied the entirety of a City, and the map of the Empire, the entirety of a Province. In time, those Unconscionable Maps no longer satisfied, and the Cartographers Guilds struck a Map of the Empire whose size was that of the Empire, and which coincided point for point with it. The following Generations, who were not so fond of the Study of Cartography as their Forebears had been, saw that that vast map was Useless, and not without some Pitilessness was it, that they delivered it up to the Inclemencies of Sun and Winters. In the Deserts of the West, still today, there are Tattered Ruins of that Map, inhabited by Animals and Beggars; in all the Land there is no other Relic of the Disciplines of Geography”.

Suárez Miranda, Travels of Prudent Men,
Book Four, Ch. XLV, Lérida, 1658.

Jorge Luis Borges (On Exactitude in Science)





SECCIÓN 1

ESTADO DEL ARTE DE LA GEOINFORMACIÓN

“Primero, déjame preguntarte qué significa la palabra ‘geomática’. ¿Entonces? De acuerdo, no te preocupes, era poco probable que supieras qué decir. De hecho, había una gran posibilidad de que nunca antes hubieras escuchado la palabra. Dicho esto, es posible que te hayas encontrado con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y su uso en el monitoreo de volcanes, el mapeo de la deforestación global con imágenes satelitales, o la creación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para modelar datos demográficos, y así la lista sigue. Es posible que no solo estés familiarizado con estas tecnologías, sino que las hayas utilizado en tu propio trabajo, aunque nunca te diste cuenta de que están bajo el paraguas de la geomática”.

Jon Mills y Rosie Waddicor (Science)

SECCIÓN I

Estado del arte de la geoinformación

Esta sección trata de temas relacionados con el estado actual de las ciencias y tecnologías de la geoinformación en el mundo. El primer capítulo habla de que, con la mayor disponibilidad de imágenes de satélite de muy alta resolución, imágenes basadas en terreno y detección participativa, plataformas de bajo costo y tecnologías avanzadas de información y comunicación, la aplicación de imágenes ahora es omnipresente, jugando un papel importante en muchos aspectos de la vida y el trabajo de hoy. Como una organización líder en este campo, la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS) se ha dedicado a obtener y utilizar de manera eficaz y eficiente la información de imágenes desde su fundación en el año 1910. El capítulo preparado por ellos examina los importantes desafíos que actualmente enfrentan ISPRS y sus comunidades, como proporcionar información de alta calidad, habilitar la informática geoespacial avanzada y apoyar la resolución de problemas en colaboración. Se revisa el estado del arte en investigación y desarrollo relacionados con ISPRS y se identifican las tendencias y temas para el trabajo futuro. Al proporcionar una visión científica global y una agenda de investigación, se espera llamar y movilizar a todos los científicos ISPRS, profesionales y otras partes interesadas para continuar mejorando nuestra comprensión y capacidad en la información de imágenes y para entregar conocimiento geoespacial avanzado que permita a la humanidad lidiar mejor con el desafío por delante, planteados, por ejemplo, por el cambio global, la sensoramiento ubicuo y la demanda de generación de información en tiempo real.

El segundo capítulo ha sido preparado por el Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial (SNIT), que ha demostrado alcanzar un grado importante de madurez en todos los ámbitos que conciernen a una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), desarrollo reconocido tanto a nivel nacional como internacional. En el documento se detalla su institucionalidad y las actividades principales que se han emprendido en vista a consolidar una IDE nacional en Chile.

“First, let me quiz you on what the word ‘geomatics’ means. So? OK, no worries, it was unlikely you would know what to say. In fact, there was a good chance you had never heard the word before! That said, you may have come across the Global Positioning System (GPS) and its use in monitoring volcanoes, the mapping of global deforestation with satellite imagery, or the creation of a geographic information system (GIS) to model demographics, and so the list goes on. It’s possible you’re not only familiar with these technologies, but that you’ve used them in your own work, although you never realised they come under the umbrella of geomatics”.

Jon Mills and Rosie Waddicor (Science)

SECTION I

The State of Art of Geoinformation

This section deals with issues related to the current state of geoinformation science and technology in the world. The first chapter talks about the fact that with the increased availability of very high-resolution satellite imagery, terrain based imaging and participatory sensing, inexpensive platforms, and advanced information and communication technologies, the application of imagery is now ubiquitous, playing an important role in many aspects of life and work today. As a leading organization in this field, the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) has been devoted to effectively and efficiently obtaining and utilizing information from imagery since its foundation in the year 1910. The chapter prepared by them examines the significant challenges currently facing ISPRS and its communities, such as providing high-quality information, enabling advanced geospatial computing, and supporting collaborative problem solving. The state-of-the-art in ISPRS related research and development is reviewed and the trends and topics for future work are identified. By providing an overarching scientific vision and research agenda, it is expected to call on and mobilize all ISPRS scientists, practitioners and other stakeholders to continue improving our understanding and capacity on information from imagery and to deliver advanced geospatial knowledge that enables humankind to better deal with the challenges ahead, posed for example by global change, ubiquitous sensing, and a demand for real-time information generation.

The second chapter has been prepared by the National System for the Coordination of Territorial Information (SNIT) that has proven to reach an important degree of maturity in all areas related to a Spatial Data Infrastructure (SDI), this development is recognized nationally and internationally. The document details its institutional framework and the main activities that have been developed to consolidate a national SDI in Chile.



1.1 Información a partir de imágenes: Visión científica y agenda de investigación del ISPRS

Jun Chen,[a] Ian Dowman,[b] Songnian Li,[c] Zhilin Li,[d] Marguerite Madden,[e] Jon Mills,[f] Nicolas Paparoditis,[g] Franz Rottensteiner,[h] Monika Sester,[i] Charles Toth,[j] John Trinder,[k] Christian Heipke[h]

[a]National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China
[b]Department of Geomatic Engineering, University College London, Gower Street, WC1E 6BT, London, UK
[c]Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Ontario M5B 2K3, Canada
[d]Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong
[e] Center for Remote Sensing and Mapping Science, Department of Geography, The University of Georgia, Athens, GA, USA
[f]School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK
[g]IGN Research and Education, Institut National de l'Information Géographique et Forestière, Saint-Mandé Cedex, France
[h]Institute for Photogrammetry and GeoInformation, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover, Germany
[i]Institute for Cartography and Geoinformatics, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover, Germany
[j]Department of Civil, Environmental and Geodetic Engineering, The Ohio State University, USA
[k]School of Civil and Environmental Engineering, University, of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia

1.1.1. Introducción

1.1.1.1. Antecedentes

"Información desde imágenes" fue adoptado como lema de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS) en su XIX Congreso en Ámsterdam en el año 2000. La ISPRS promueve la extracción y utilización de información desde imágenes, mediante el fomento y la facilitación de la investigación y el desarrollo en sus áreas de actividad científica, avanzando en el conocimiento a través de redes científicas, estimulando la cooperación internacional, persiguiendo la integración interdisciplinaria, facilitando la educación y la capacitación, mejorando y explorando nuevas aplicaciones, y desarrollando el reconocimiento público de la fotogrametría, la teledetección y la ciencia de la información espacial. La información desde imágenes, en el lenguaje de ISPRS, se obtiene utilizando los principios de percepción remota, fotogrametría y ciencia de la información espacial.

a. Percepción remota: es la ciencia y la tecnología de capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la Tierra y los planetas, desde sensores en el espacio, en el aire y en tierra. Las observaciones remotas de la Tierra desde sensores aerotransportados y espaciales, en sinergia con mediciones *in situ* y manuales, proporcionan la base para mapear actividades humanas y naturales; para el monitoreo de procesos basado en datos físicos y empíricos; para evaluar y mitigar desastres; para identificar y evaluar recursos no renovables; para monitorear cambios temporales en el clima, el suelo y el mar; y para muchas otras aplicaciones. Las descripciones espaciales y semánticas de objetos, características y procesos se derivan de medidas de una, dos y tres dimensiones (3D), y la interpretación de sus atributos de señal electromagnética y acústica, mediante instrumentos ópticos, termales y de microondas, activos y pasivos, y dispositivos de sondeo.

b. Fotogrametría: es la ciencia y la tecnología de extraer información geométrica y temática tridimensional

confiable, a menudo a lo largo del tiempo, de objetos y escenas de datos desde imágenes y datos de rango. Los datos resultantes se pueden utilizar para el desarrollo de bases de datos espaciales y Sistemas de Información Espacial (SIS) en formas digitales, gráficas y de imágenes. La tecnología se emplea para mediciones tridimensionales basadas en imágenes, en mapeo, ingeniería, registro patrimonial, análisis forense, robótica, sistemas de asistencia al conductor, aplicaciones médicas, videojuegos y otros campos, donde proporciona información geométrica y semántica de objetos, para completar bases de datos espaciales y para crear escenas de realidad virtual con modelos texturizados de la vida real.

c. Ciencia de la información espacial: se ocupa del modelado, el almacenamiento, el procesamiento, la recuperación, la aplicación y la comunicación de información con una referencia espacial. El empleo de conceptos y métodos desde la ciencia de la información espacial es un paso esencial en el proceso de obtención de información útil desde imágenes, ya que típicamente la descripción y ubicación de objetos y procesos, así como las relaciones temporales entre estos objetos físicos, deben integrarse con datos socioeconómicos y de otro tipo, para fines de análisis, simulación, predicción y visualización. La ciencia de la información espacial se ocupa, por ejemplo, de la minería de datos espaciales, la interoperabilidad y la integración de datos, el análisis visual, las perspectivas espacio-temporales en el big data, la visualización y generalización, la internet de las cosas, redes sociales, y la interacción humano-computador. Se aplica en planificación y gestión de transporte, planificación urbana e infraestructura, gestión de recursos y tierras, ciudades inteligentes, gestión de desastres, monitoreo ambiental, salud pública, seguridad, y en la comprensión de muchos otros procesos y fenómenos naturales y antropogénicos.

Cabe señalar que los tres temas se superponen. En primer lugar, aunque la fotogrametría ya está establecida, hoy se la considera parte del campo más amplio de la percepción remota. Sin embargo, en aras de la continuidad, se discutirán ambos temas por separado en este capítulo, con énfasis en las imágenes terrestres y aéreas cuando se refiere a la fotogrametría, y en los datos satelitales cuando se refiere a la percepción remota. Además, la fotogrametría constituye uno de los pilares de la moderna "visión artificial" (Förstner, 2009). En segundo lugar, aunque en ocasiones se entiende que la ciencia de la información espacial incluye la captura de datos y, por lo tanto, a la fotogrametría y la percepción remota, se considerará que esta ciencia se ocupa principalmente de utilizar la información adquirida desde las imágenes y almacenada en una base de datos, con el fin de enfatizar el enfoque en la imaginería y la explotación de imágenes. Por lo tanto, se puede percibir que la base de datos espacial forma una interfaz entre la fotogrametría y la percepción remota, por un lado, y la ciencia de la información espacial, por el otro.

1.1.1.2. Información desde imágenes

La importancia de la información desde imágenes ha sido ampliamente reconocida en la última década (Li et al., 2008; Zell et al., 2012). La aplicación de imágenes es ahora omnipresente, con una mayor disponibilidad de imágenes de satélite de muy alta resolución, imágenes y escaneo en terreno, sensores económicos (por ejemplo, teléfonos inteligentes), y plataformas (por ejemplo, sistemas de aeronaves no tripuladas), complementados con una capacidad de procesamiento en rápido crecimiento y el avance en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs).

Las imágenes aéreas y satelitales se han utilizado exitosamente en una variedad de áreas tales como el mapeo topográfico, la planificación urbana, la evaluación ambiental, silvicultura, agricultura de precisión, recursos hídricos y monitoreo de desastres. También se ha manifestado una creciente demanda de información fiable y actual a partir de imágenes, en muchas áreas de beneficio social (SBA), como en los programas nacionales de mapeo (Kelmelis et al., 2003), la gestión de desastres y riesgos (Altan et al., 2012), los estudios globales de cambio ambiental (Reid et al., 2010; Pereira et al., 2013), y el desarrollo de la sostenibilidad (Hecht et al., 2012).

Las imágenes basadas en el terreno (también conocidas como imágenes de corto alcance o terrestres) han experimentado un aumento similar en prominencia, logrando avances importantes en cartografía móvil, metrología industrial, medicina forense, preservación del patrimonio cultural, imágenes médicas, mediciones subacuáticas

y las industrias del videojuego y el cine (Grün, 2008), en particular desde el advenimiento de los sistemas de aviones no tripulados (UAS) como plataformas nuevas y flexibles. Tales imágenes no se usan exclusivamente en la comunidad fotogramétrica, sino también en muchas disciplinas próximas, en particular, en informática e ingeniería eléctrica, y típicamente bajo diferentes nomenclaturas, como la visión artificial (Hartley y Zisserman, 2003) y la robótica (Thrun et al., 2005). Hoy en día, el campo también está vinculado a diversas aplicaciones, tales como la percepción visual automática en tiempo real, la navegación visual, la conducción autónoma y la vida cotidiana asistida, que utilizan pistas visuales para enfrentar los desafíos sociales como la movilidad, la salud y el envejecimiento; esta es un área extremadamente activa de investigación y desarrollo.

Crowdsourcing, también conocido como información geográfica voluntaria (VGI), ha agregado una nueva dimensión a la adquisición de datos. Internet, y en particular la Infraestructura de Datos Geoespaciales (o Espaciales) (GDI o SDI), se ha convertido en la clave para casi todos los aspectos de los datos geoespaciales, desde la adquisición hasta el procesamiento, gestión y análisis en bases de datos federadas y el intercambio de datos a través de servicios web estandarizados. Digital Globe, así como NASA World Wind, Google Earth y Microsoft Bing Maps 3D, son evidencias destacada de estos desarrollos.

Hay una serie de aspectos científicos, tecnológicos y organizacionales, relacionados con la información de las imágenes (figura 1). En primer lugar, los temas científicos incluyen una comprensión de las propiedades de la radiación electromagnética y su interacción con la atmósfera y con los objetos, los principios y modelos fundamentales para comprender y reconocer los patrones espacio-temporales en las imágenes, así como la abstracción, modelado y representación de objetos y fenómenos espacio-temporales y sus relaciones. Los conceptos, teorías y algoritmos se desarrollan y refinan continuamente para abordar estos problemas científicos. En segundo lugar, los aspectos tecnológicos se relacionan con una variedad de instrumentos, herramientas y sistemas, necesarios para realizar la adquisición de imágenes, la extracción de información y los servicios de información espacial. Sensores activos y pasivos, plataformas de imágenes, estaciones de trabajo fotogramétrico digitales (DPWS), procesamiento de imágenes y Sistemas de Información Geográfica (SIG), y servicios basados en la web que aprovechan una IDE completamente desarrollada, se encuentran entre las tecnologías modernas empleadas para este fin. Todavía

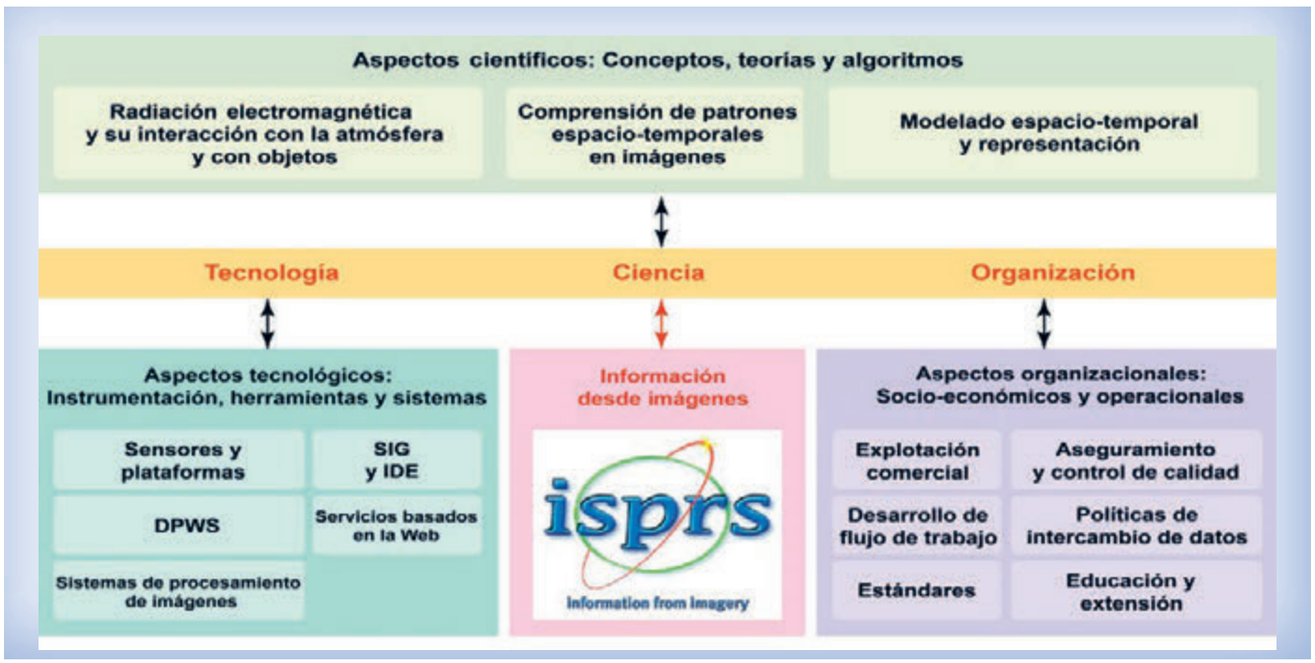


Figura 1: Aspectos científicos, tecnológicos y organizacionales, relacionados con la información de las imágenes. *Fuente: Elaboración propia.*

quedan por resolver muchos problemas técnicos para el diseño, la prueba, la fabricación, y la comercialización, de nuevas herramientas y sistemas; un número cada vez mayor de organizaciones y empresas se involucran en tales actividades. En tercer lugar, deben abordarse aspectos organizacionales para garantizar que la ciencia y la tecnología mencionadas se apliquen a las necesidades sociales o particulares, como el mapeo topográfico, la ingeniería civil, documentación y protección del patrimonio, inventario de recursos, monitoreo de desastres y del medioambiente, conducción autónoma, navegación visual, robótica, medición industrial e imágenes médicas. Esfuerzos significativos se han dedicado, y se deben dedicar continuamente, a los aspectos socioeconómicos y operacionales para garantizar que la información derivada de las imágenes se integre firmemente en los procesos de formulación de políticas, la aceptación pública y la explotación comercial. Tales aspectos incluyen la formulación de estándares técnicos, el desarrollo y la reingeniería de flujos de trabajo, la recopilación, procesamiento, control de calidad y garantía de calidad de conjuntos de datos masivos, y políticas para su uso, intercambio y difusión, así como educación y divulgación.

1.1.1.3. El rol de la ISPRS

Es beneficioso examinar de cerca los desarrollos recientes en estos aspectos científicos, tecnológicos, sociales y organizacionales de vez en cuando, a fin de proporcionar una visión científica relevante para la comunidad. De hecho, la ISPRS tiene una larga tradición en esto. Durante cada congreso cuatrienal, la Asamblea General de la ISPRS (GA) ha formulado y aprobado una serie de resoluciones en orden de establecer el curso de las actividades científicas para el siguiente cuatrienio (Konecny, 1985; Trinder y Fritz, 2008). Tales resoluciones normalmente abordan temas nuevos o de rápida evolución, y se enuncian brevemente como referencia en el sitio web de la ISPRS. Para las áreas de actividad científica dentro de la ISPRS, también se desarrolla un conjunto de Términos de Referencia (TdR) para guiar las comisiones y grupos de trabajo de ISPRS. En 2008, la ISPRS publicó un libro del congreso con aproximadamente 40 artículos de revisión y resúmenes, para reunir los últimos avances en actividades científicas y proyectar direcciones futuras (Li et al., 2008). En 2010, en paralelo con sus celebraciones del centenario, el ISPRS revisó su plan estratégico para garantizar que se entienda el papel de las imágenes y que la información derivada se utilice para la mayor ventaja en toda la sociedad. Como resultado de la revisión estratégica, se ha enfatizado la identificación continua de nuevos desafíos y el desarrollo de una visión científica más clara como uno de los principales objetivos y tareas para la ISPRS y sus funcionarios.

El presente capítulo continúa esta línea, presentando una visión científica global para la información desde imágenes y estableciendo una agenda de investigación avanzada para la ISPRS. Los contenidos se basan en la síntesis de las resoluciones del XXII Congreso de la ISPRS en 2012, los TdR de las comisiones técnicas para el período 2012-2016, las presentaciones principales del congreso de 2012, los simposios de término medio de 2014 y otras reuniones recientes de la ISPRS, así como otros materiales publicados en disciplinas relevantes. La visión y las estrategias articuladas aquí, también se derivan de numerosas discusiones dentro del Consejo ISPRS y consultas con los presidentes de la comisión, el Comité Asesor Científico Internacional, el Comité Asesor de Política Internacional, así como numerosos expertos en la comunidad internacional.

El resto del capítulo está organizado de la siguiente manera: la sección 1.1.2 examina las nuevas demandas y desafíos que enfrenta nuestro campo con énfasis en la observación de la Tierra desde el espacio, señalando que existen requisitos similares también para las otras áreas de la fotogrametría, la percepción remota y la ciencia de la información espacial. El estado del arte de la información de las imágenes y las tendencias actuales se revisan en la sección 1.1.3. Los temas de investigación científica para el futuro se analizan en la sección 1.1.4. La sección 1.1.5 resume las conclusiones alcanzadas en este documento.

1.1.2. Desafíos mayores

La humanidad se encuentra actualmente en una era en la que las ciencias espaciales desempeñan un papel destacado en la preparación de información para el público en general. Cada vez hay más exigencias en la aptitud para el uso de la información espacial, ya que la humanidad se enfrenta a una serie de grandes desafíos sin precedentes,

por ejemplo, en cambio climático (Schiermeier, 2013) y desarrollo sostenible (Hecht et al., 2012), pero también en movilidad, salud y seguridad. Los factores clave para hacer frente a estos grandes desafíos son: proporcionar información de alta calidad, habilitar la informática geoespacial avanzada, y apoyar la resolución colaborativa de problemas (figura 2). Estos factores se discuten más a fondo a continuación, centrándose en una perspectiva de observación de la Tierra. Como los dos primeros factores tienen una base científica y técnica, también son el foco de las secciones 1.1.3 y 1.1.4 de este documento de visión científica.

1.1.2.1. Información espacial de alta calidad

La información de alta calidad (es decir, oportuna, completa, temáticamente correcta, así como geométricamente precisa y confiable) de las imágenes siempre ha sido un requisito clave para cualquier aplicación. Por ejemplo, la comprensión y previsión de los procesos del sistema terrestre requieren una variedad de información confiable a partir de imágenes de la Tierra, su entorno y otros objetos y procesos físicos (Suresh, 2012). Dicha información puede referirse a la topografía, la cobertura y uso del suelo, el catastro, la distribución de la población y la contaminación, entre otros (UN-GGIM, 2013). Las diferentes comunidades de usuarios generalmente tienen sus propios conjuntos específicos de variables a ser derivadas de las imágenes, por ejemplo las Variables Esenciales de Biodiversidad (EBV) para la comunidad ecológica, cambios en la cobertura del suelo para la comunidad de cambio climático, e información topográfica y semántica detallada para las agencias cartográficas nacionales y gobierno. Se han lanzado una serie de programas e iniciativas nacionales, regionales e internacionales para optimizar la explotación de las imágenes. Dichas iniciativas tienen como objetivo proporcionar la información correcta, en el lugar correcto, en el momento preciso, a las personas adecuadas, para tomar decisiones apropiadas (Pereira et al., 2013; Whitcraft et al., 2015).

Se necesita información de alta calidad y alta resolución para diversas aplicaciones, tales como el monitoreo costero (Addo et al., 2008) y los estudios de glaciares (Kunz et al., 2012). Estos datos a menudo se usan no solo para monitorear, sino también para calibrar y validar modelos ambientales. La resolución espacial en la observación de la Tierra desde el espacio ha mejorado continuamente, por ejemplo, yendo de 80 m para Landsat-1 en 1970 a 30 m para Landsat-7 en los 90s, y a los actuales 0,31 m para WorldView-3 en 2015; por su parte, desde aeronaves y UAS se pueden obtener imágenes a nivel centimétrico. Como resultado, se han desarrollado productos de datos geoespaciales de mayor resolución a escala local, nacional y mundial. Un ejemplo reciente para un conjunto de datos globales es Globaland30 (conjunto de datos globales de cobertura terrestre a 30 m de resolución, Chen et al., 2014a), donado por China a las Naciones Unidas en 2014. Objetivos similares se persiguen con la iniciativa europea INSPIRE que se esfuerza por armonizar datos topográficos de alta resolución en todo el continente. Además, se requiere información de cobertura terrestre a una resolución de 1-2 m para estudios urbanos (Belgiu et al., 2014). Tal cambio a la resolución fina representa un desafío importante científica, técnica y organizativamente.

La Tierra es un planeta dinámico con cambios que tienen lugar a diferentes escalas de tiempo. Monitorear tales cambios y mapear sus impactos, requiere secuencias de imágenes para recopilar información de series de tiempo (Kuenzel et al., 2015). Por ejemplo, desde un punto de vista de riesgos meteorológicos y climáticos, un sistema de predicción uniforme debería ser capaz de utilizar imágenes de horas recientes, estaciones y de décadas, desde locales hasta globales, para todo tipo de riesgos (McBean, 2014). Algunos nuevos sistemas de observación han entrado en operación, y muchos más están planeados, para el monitoreo y modelado del planeta dinámico. La extracción de información sobre cambios en series de tiempo a partir de copiosas cantidades y tipos de datos, para evaluar los impactos en una variedad de problemas sociales, económicos, políticos y ambientales, en todas las escalas, conduce, utilizando todas las plataformas de imágenes disponibles, a preguntas que hoy no tienen una respuesta confiable y, por lo tanto, necesita más investigación para llevarse a cabo.

Lo mismo es válido para procesar y analizar datos terrestres. Con el advenimiento de los sistemas multisensor, que incluyen cámaras digitales de foto y video, escáneres láser y dispositivos de posicionamiento/navegación, las secuencias de imágenes de alta frecuencia son ahora

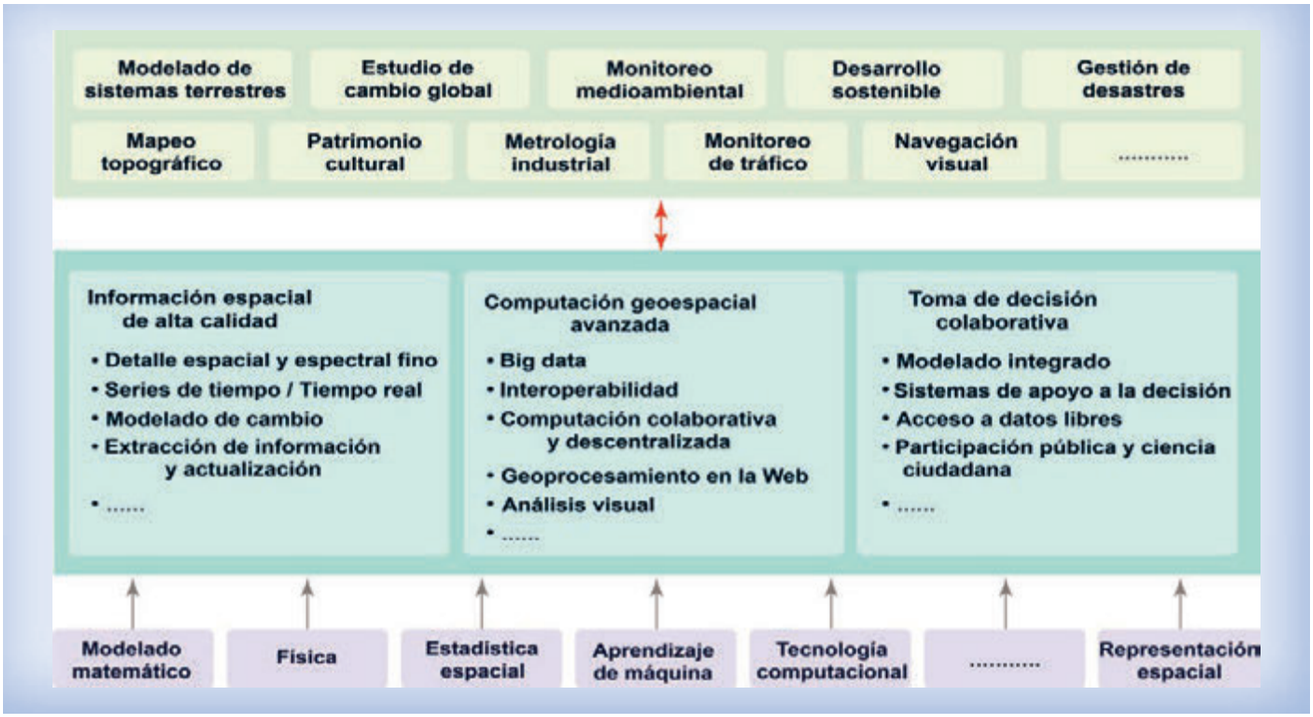


Figura 2: Principales desafíos que enfrenta la comunidad de ISPRS, con aplicaciones en la parte superior de la figura, desafíos en el medio y disciplinas de apoyo a continuación. *Fuente: Elaboración propia.*

capturadas desde UAS y camionetas móviles de mapeo a velocidad de tráfico normal. En particular los UAS, que constituyen una genuina tecnología habilitadora, prometen ofrecer soluciones innovadoras y flexibles a muchos de los problemas planteados en este párrafo, siempre que el área del proyecto no sea demasiado grande. Al mismo tiempo, tienen sus propios desafíos de investigación, por ejemplo, cuando se trata de vuelos en constelación y computación descentralizada, pero también en términos de seguridad y privacidad de datos. Aunque la interpretación automática de imágenes es una tarea formidable en sí misma (ver también la sección 1.1.3), la obtención de información significativa y de alta calidad a partir de estos grandes conjuntos de datos, presenta problemas de investigación específicos y adicionales que se abordan usando principios de, por ejemplo, reconocimiento de patrones y machine learning (aprendizaje de máquina).

1.1.2.2. Computación geoespacial avanzada

Con los rápidos avances en percepción remota y crowdsourcing, así como en redes de sensores terrestres y simulación computacional, se producen, acceden, analizan, integran, almacenan y recuperan diariamente datos altamente heterogéneos de muy diferentes orígenes (Conti et al., 2012). Esto implica que estamos entrando en un mundo intensivo en datos o en una era del llamado big data, y enfrentamos otro desafío: la informática geoespacial avanzada (Bryan, 2013). Dado que el análisis a menudo debe hacer uso de diferentes conjuntos de datos, se tiene que garantizar la interoperabilidad geométrica y semántica de estos datos (McInerney et al., 2012). Idealmente, una plataforma de información espacial basada en la web, capaz de acceder a las bases de datos federadas, facilitaría el uso de estos conjuntos de diversos y distribuidos datos. En este sentido, la investigación y el desarrollo son necesarios para resolver problemas claves como la traducción ontológica-cruzada automatizada y los servicios web interoperables.

Se requieren nuevas técnicas y herramientas computacionales para filtrar información extraña y revelar patrones ocultos. A menudo, este desafío debe ser resuelto en un entorno de colaboración, llamando a la computación

descentralizada. Un aspecto crítico es si los algoritmos y modelos ya desarrollados podrían cumplir con el entorno operacional o experimental (Hansen y Loveland, 2012). El otro es si podemos tener una implementación e integración flexible de los algoritmos y modelos de análisis de datos existentes. Con base en estándares abiertos como los del OGC (Open Geospatial Consortium), los algoritmos y modelos de procesamiento se pueden encapsular y exponer como servicios web en una arquitectura flexible y distribuida. Un ejemplo es la iniciativa de Modelo Web del GEO (Grupo de Observación de la Tierra) (Nativi et al., 2013). Este permite descubrir los algoritmos y modelos deseados a partir de registros y repositorios del servicio web, y reutilizarlos combinándolos en flujos de trabajo complejos a través de la composición de servicio y su ejecución sobre una arquitectura distribuida (McInerney et al., 2012; Zhao et al., 2012).

Muchos sistemas de visualización actuales son específicos de dominio o de aplicación y requieren un cierto compromiso para comprender y aprender a usarlos, lo que a veces dificulta su uso. Se necesitan nuevas herramientas de animación e interacción, como las desarrolladas en análisis visuales (Andrienko et al., 2014) para permitir un mejor análisis y una mejor comprensión de los conjuntos de datos masivos y dinámicos (Hey y Trefethen, 2005).

1.1.2.3. Soporte de decisión colaborativo

Como muchos problemas que involucran información espacial son bastante complejos, la cooperación interdisciplinaria y transfronteriza, así como los sistemas avanzados de apoyo a la toma de decisiones, están en demanda. Un ejemplo de colaboración interdisciplinaria es la preparación de la agenda de desarrollo post 2015, dirigida por la ONU (Organización de Naciones Unidas), para implementar un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Hecht et al., 2012). Dado que el desarrollo sostenible tiene dimensiones económicas, ambientales y sociales, una combinación de investigación disciplinaria e interdisciplinaria sobre "el futuro que queremos" ha sido testigo de una transición, desde ser dominado por las ciencias naturales a involucrar a toda la gama de ciencias naturales, de ingeniería y sociales (Pereira et al., 2013; Kauffman y Arico, 2014). Otro ejemplo es el programa Future Earth del Consejo Internacional de Ciencia (ICSU), cuyo objetivo es movilizar a la comunidad científica internacional en torno a una década centrada en la investigación para apoyar el desarrollo sostenible en el contexto del cambio ambiental global (Reid et al., 2010; O'Riordan, 2013). La ISPRS trabaja con sociedades hermanas, particularmente a través de ICSU y el Consejo Conjunto de Sociedades de Información Geoespacial (JBGIS), para contribuir a este objetivo.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas están en demanda para presentar evidencia observacional, generar narrativas de políticas y enmarcar conjuntos de suposiciones, durante la toma de decisiones políticas (Pielke et al., 2011; Schubert et al., 2015). A menudo, es necesario debatir cuestiones de política en el contexto de información espacialmente referenciada, potenciada por tecnologías de trabajo cooperativo, respaldado por computador (CSCW) o groupware, para permitir a los responsables políticos y al público (o ciudadanos), presentar sus perspectivas, resolver disputas espaciales y tomar e implementar decisiones. En muchos casos se necesita una integración de sensores, modelos de análisis específicos de dominio y capacidades de monitoreo.

1.1.3. Estado del arte de la información desde imágenes

En los últimos años, hemos sido testigos de importantes avances científicos y tecnológicos en la extracción de información desde imágenes. Los temas claves incluyen el desarrollo de cámaras aéreas digitales, sistemas de aviones no tripulados (UAS) como nuevas plataformas flexibles, orientación automática y concordancia densa de imágenes de múltiple vista, análisis de secuencia de imágenes, procesamiento automatizado de datos de escaneo láser terrestre y móvil (LiDAR), sensores ópticos y de radar de muy alta resolución, satélites pequeños y constelaciones de satélites, así como redes de geosensores. Otros desarrollos relevantes incluyen crowdsourcing, enlaces y big data, bases de datos espaciales federadas, análisis visuales, servicios de información distribuidos en la web, infraestructuras de datos espaciales, así como ciencia espacial libre. Estos temas centrales han sido aumentados por los avances en las tecnologías relacionadas, como los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y la topografía inercial.

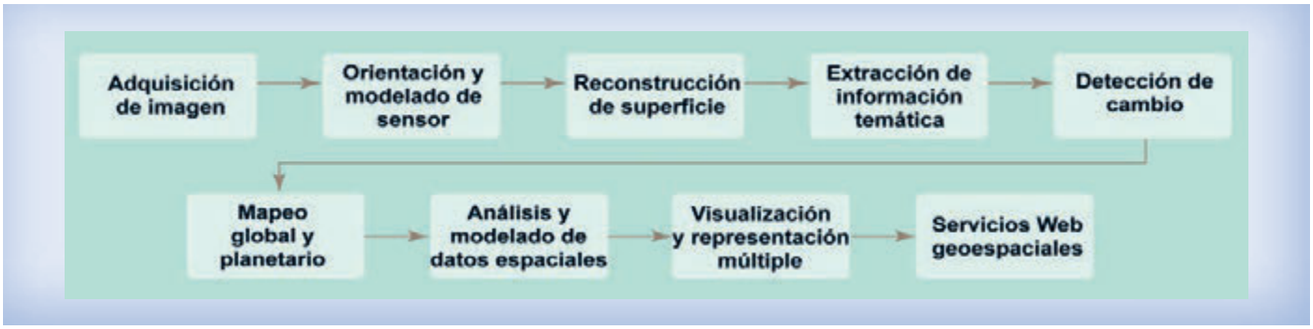


Figura 3: Áreas activas de investigación para obtener información de las imágenes. *Fuente: Elaboración propia.*

En esta sección se resume el estado del arte en la investigación sobre la extracción de información desde imágenes. Comenzando con la adquisición de imágenes, seguido de la orientación de estas, la reconstrucción de superficie y la extracción de información temática, la detección de cambios, el mapeo global y, luego, yendo con el modelado y análisis de datos espaciales, la visualización y servicios basados en la web (figura 3). Partes de esta secuencia constituyen la cadena de procesamiento tradicional de adquisición de datos topográficos a partir de imágenes, mientras que otras secuencias de procesamiento son obviamente también factibles.

1.1.3.1. Adquisición de imágenes

La adquisición de imágenes ha experimentado un desarrollo fenomenal en las últimas dos décadas, evidenciado por una proliferación sin precedentes de sensores de imágenes y plataformas. Hasta el milenio, las cámaras aéreas de gran formato basadas en película (film) representaban el caballo de batalla de la fotogrametría aérea; hoy en día, se utiliza una gran variedad de sensores de imagen activos y pasivos en la producción en plataformas, que van desde trípodes, pasando por UAS, hasta satélites. Además, ha habido un cambio de paradigma en la adquisición de imágenes, ya que el modelo de sensores integrados ha reemplazado a los enfoques basados en sensores de imagen individuales de larga data. Los sensores de georreferenciación, incluidos los sistemas integrados de GNSS y Unidad de Medida Inercial (IMU), son dispositivos ampliamente utilizados para soportar la orientación de uno, o típicamente más, sensores de imagen múltiples.

Con el avance de las tecnologías de sensores de imagen y los desarrollos generales de hardware, tasas de adquisición de imágenes más rápidas están fácilmente disponibles y el registro de grandes cantidades de datos es factible, produciendo datos geoespaciales de excelente calidad (Cramer, 2011). Combinado con un número cada vez mayor de plataformas, los datos de imagen se pueden adquirir con tasas de repetición más altas, proporcionando una mejor resolución temporal, como lo muestra la tendencia a pasar de estructuras de datos espaciales de tres a cuatro dimensiones (3D más tiempo). Por ejemplo, los UAS pueden proporcionar productos que cumplen con todos los requisitos del mapeo nacional (Cramer, 2013), y también de aplicaciones como el monitoreo costero y glacial, y el monitoreo del crecimiento de la vegetación en una base diaria. Del mismo modo, las nuevas constelaciones de satélites pueden proporcionar una cobertura de imagen diaria (o incluso varias veces al día), por ejemplo, para monitorear desastres naturales o el flujo de tráfico. Además, tasas de imágenes más altas permiten una mayor superposición de imágenes, lo que resulta en un mejor desempeño en la extracción de características, así como en la generación de nubes de puntos a partir de imágenes multiestéreo. Las cámaras mono y estéreo de alta velocidad se utilizan cada vez más en la industria automotriz para grabar escenas dinámicas, por ejemplo, en investigaciones de seguridad del automóvil; estando también en uso en deportes.

Siguiendo la introducción de sensores activos hace algunas décadas, ahora descubrimos que los sensores de imágenes activos y pasivos tienen más o menos la misma cuota del mercado de imágenes aerotransportadas, caracterizado por cámaras aéreas digitales de gran formato y sistemas LiDAR, mientras que radar SAR interferométrico aerotransportado (InSAR / IfSAR) representa solo un nicho de mercado. En plataformas satelitales, los sensores pasivos multiespectrales son dominantes, aunque los sistemas SAR han

mostrado desarrollos notables y proporcionan un volumen rápidamente creciente de datos geoespaciales globales (Krieger et al., 2007; Zink et al., 2014).

Una tendencia reciente en la adquisición de imágenes ha sido el uso cada vez mayor de sensores de imagen de calidad de consumo, como cámaras web y cámaras de teléfonos inteligentes. Si bien estos sensores han existido por más de una década, su nivel de rendimiento, en términos de calidad de imagen y velocidad de transferencia fue demasiado modesto para soportar el uso masivo hasta hace unos años. Dado que estos dispositivos son omnipresentes y, con frecuencia, tienen un georreferenciamiento bastante preciso, la información geográfica voluntaria (VGI, Sui et al., 2013) que recopilan podría decirse que conforma el mayor volumen de datos geoespaciales hoy en día. Si bien estos enfoques de crowdsourcing están lejos del mapeo convencional, tales flujos de datos ya se están convirtiendo en una fuente principal de imágenes para el monitoreo y la gestión de situaciones de emergencia, o en aplicaciones como la documentación del patrimonio cultural (Goodchild y Glennon, 2010). Del mismo modo, la cantidad de cámaras de vigilancia está creciendo constantemente, y también pueden ser compatibles con aplicaciones relacionadas con geografía humana. Esto plantea desafíos en el manejo de grandes cantidades de datos, para extraer información útil de dichas fuentes, teniendo en cuenta las diferencias en la calidad de los datos y también en la privacidad de los mismos.

La separación entre fotogrametría aérea/espacial y de corto alcance, que fue muy clara hace algunas décadas, se ha vuelto cada vez más borrosa principalmente debido a dos factores. En primer lugar, las campañas aéreas y espaciales se han vuelto mucho más diversas, con sensores menos o no estandarizados que incluyen imágenes oblicuas, de superposición múltiple (y cambiante), y orientación directa del sensor. En segundo lugar, las imágenes se combinan cada vez más con la información de "rango" de LiDAR, ya que la integración ocurre a lo largo de líneas similares para enfoques aéreos y de corto alcance.

Otra tendencia notable es que las diferencias en las características de las imágenes ópticas a bordo de aviones y satélites están disminuyendo, ya que satélites comerciales de alta resolución recientemente lanzados pueden adquirir datos a resoluciones espaciales tan altas como 30 cm de distancia de muestreo de terreno (GSD, Dowman et al., 2012), que alguna vez fue la resolución típica para la mayoría de imágenes aéreas. En una tendencia similar, cámaras aéreas de alto rendimiento pueden entregar imágenes a 5 cm de GSD (Sandau, 2009).

1.1.3.2. Modelación y orientación del sensor

El rápido desarrollo de sensores digitales en los últimos años ha mejorado significativamente la calidad de datos de imagen y de rango (mucho más alta relación señal-ruido y mucho mayor rango dinámico), y ha aumentado considerablemente la capacidad de adquirir imágenes estéreo altamente superpuestas, que conducen a un mayor nivel de redundancia en las observaciones. Estas ventajas han dado lugar al desarrollo de algoritmos y métodos mucho más robustos para la orientación de imagen y de sensores de rango (también llamada estimación de posición), y para la reconstrucción de superficies.

El modelado de sensores y la calibración geométrica son generalmente bien entendidos (Remondino y Fraser, 2006), mientras que la calibración radiométrica (Honkavaara et al., 2009) y una consideración detallada de los efectos ambientales, aún contienen una serie de preguntas sin resolver; esta última en particular para sensores de rango, ya que las condiciones atmosféricas influyen en la velocidad de la luz mucho más que la dirección de los rayos de luz. La explotación de secuencias de imágenes en 3D, también requiere de sincronización temporal; una solución es, por ejemplo, la entregada por Raguse y Heipke (2009). Las cámaras generalizadas, aquellas que no siguen las leyes de la perspectiva, han sido empleadas durante mucho tiempo para modelamientos geométricos rigurosos en fotogrametría y percepción remota, un ejemplo es el uso de cámaras de línea múltiple para trabajo topográfico (Hofmann et al., 1982) y planetario (Spiegel, 2007); modelos para lentes de ojo de pez fueron, por ejemplo, descritos en Abraham y Förstner (2005). Los modelos para cámaras generalizadas también se discuten en la literatura de visión artificial (Grossberg y Nayar, 2001).

La orientación automática de imagen ha sido un campo muy activo en la comunidad fotogramétrica durante mu-

cho tiempo. La orientación de imagen tiene como objetivo reconstruir las coordenadas de la perspectiva central y la dirección de visual durante la captura de imágenes (y algunas veces también los parámetros de orientación interior), de un conjunto potencialmente grande de imágenes desordenadas u ordenadas, con líneas base cortas o anchas. Se han propuesto y desarrollado diferentes enfoques, que incluyen soluciones automáticas precisas y personalizadas del tipo adoptado por los sistemas de metrología visual en medición industrial. Más recientemente, también se han vuelto muy prominentes las comunidades de visión artificial (estructura desde movimiento, o SFM) y robótica (localización y mapeo simultáneos, o SLAM), con varias estrategias ahora comunes. Tales enfoques han generado un renovado interés y una actividad estimulada sobre los métodos de imagen, dentro de una amplia variedad de áreas de aplicación, que van desde el patrimonio cultural hasta las ciencias de la tierra.

Se pueden distinguir diferentes avances notables en la orientación de imagen automatizada: uno es el desarrollo de detectores de características invariables, también llamados operadores de puntos de interés, tales como los operadores de Förstner (Förstner y Gülch, 1987) y Harris (Harris y Stephen, 1988); transformación de características de escala invariable (SIFT, Lowe, 2004); y características robustas aceleradas (SURF, Bay et al., 2008). Otro es el desarrollo de nuevas estrategias de calce para puntos de interés a través de imágenes y técnicas de forma cerrada, para estimar una posición relativa inicial entre pares de imágenes (Nistér, 2004; Frahm et al., 2010; Mayer, 2014). Los errores típicos que se producen en el calce automático se detectan usando algoritmos de tipo RANSC (muestreo aleatorio consensuado) (Fischler y Bolles, 1981). Para requisitos homogéneos y de alta precisión, un ajuste bundle (de lote) se realiza generalmente como paso final de la orientación de imagen.

La orientación del sensor de rango utiliza el mismo concepto matemático de las transformaciones de coordenadas 3D, pero el posicionamiento se calcula basándose en el calce de nubes de puntos 3D individuales, potencialmente aumentadas por características de control terrestre señalizado, típicamente esferas o superficies planas (Brenner et al., 2008). La calibración de los sensores de rango puede ser un desafío para la alta precisión, pero en general las soluciones están disponibles (Lichti et al., 2011). Un algoritmo popular para el calce de nubes de puntos es el algoritmo iterativo de punto más cercano (ICP, Besl y McKay, 1992) y sus derivados; existen diferentes soluciones para medir automáticamente las posiciones de las características de control terrestre, en el conjunto de datos de la nube de puntos. También se han sugerido soluciones para la estimación combinada de posición de datos de imagen y de rango, que están en uso actualmente.

1.1.3.3. Reconstrucción de superficie

Después del ajuste de lote, un conjunto disperso de coordenadas 3D de los puntos de interés coincidentes en las vistas está disponible. Este conjunto de puntos se usa, a menudo, como una solución inicial para una reconstrucción de superficie pixel-wise (también llamada reconstrucción "densa", es decir, que genera una profundidad o una elevación por pixel), haciendo coincidir las imágenes mediante restricciones derivadas de la geometría epipolar. Se han desarrollado varios enfoques de reconstrucción con métodos basados en energía (Pierrot-Deseilligny y Paparoditis, 2006; Hirschmüller, 2008; Furukawa y Ponce, 2010; Strecha et al., 2010; Bulatov et al., 2011), que proporcionan los mejores resultados a la fecha. Estos buscan encontrar la mejor solución global (es decir, la mejor superficie), minimizando la suma ponderada entre un término de datos que describe los costos de correspondencia locales y un término de regularización que evalúa la plausibilidad global de la forma de la superficie, por ejemplo, en términos de suavidad y continuidad de tramos. Las soluciones se derivan típicamente utilizando algoritmos de teoría de grafos o programación dinámica. En particular, la coincidencia semi-global (SGM, Hirschmüller, 2008) ha sido ampliamente adoptada, tanto en la comunidad fotogramétrica como en otras (Gehrig et al., 2009). La mayoría de estos métodos se desarrollaron para aplicaciones de corto alcance con grandes diferencias de profundidad y, por lo tanto, también son especialmente adecuados para imágenes aéreas y satelitales de escenas urbanas con importantes discontinuidades de altura (Haala, 2011).

Las superficies reconstruidas a menudo se utilizan junto con la información de brillo de la imagen, para facilitar

la comprensión 3D de la escena y la extracción de información temática. Los métodos de reconstrucción de superficie basados en optimización permiten la reconstrucción de detalles 3D tan pequeños como el tamaño de los elementos estructurantes sobre los que se calculan los puntajes de similitud. Por ejemplo, cuando se utilizan imágenes aéreas de muy alta resolución (5-10 cm), las superestructuras de las partes superiores de techos (como ventanas abuhardilladas, chimeneas o terrazas) se pueden reconstruir (Brédif, 2010). A partir de estos modelos digitales de superficie (DSM) de alta calidad, se pueden generar verdaderas ortofotos, fusionando las partes centrales de las imágenes rectificadas. Con bastante frecuencia, se emplean técnicas basadas en optimización para encontrar la mejor combinación y costura entre todas las partes centrales de las imágenes correspondientes. Los artefactos restantes de este proceso a menudo se borran mediante técnicas de combinación aplicadas a las áreas de costura. Sin embargo, la calidad de dichas ortofotos puede ser inferior en áreas cercanas a discontinuidades tridimensionales (por ejemplo, borde de construcciones), ya que las técnicas de calce basadas en píxeles no pueden procesar discontinuidades 3D de forma limpia sin tener en cuenta explícitamente estas discontinuidades en el proceso de coincidencia.

1.1.3.4. Extracción de información temática

La extracción de información temática tiene una larga historia en fotogrametría y percepción remota (Mayer, 2008; Vosselman, 2009). Por un lado, se han desarrollado esquemas de detección y reconstrucción para objetos individuales, en su mayoría topográficos, desde imágenes de alta resolución y nubes de puntos 3D, por ejemplo, para edificios (Rottensteiner et al., 2014) y caminos (Gerke y Heipke, 2008). Las nubes de puntos e imágenes a menudo se han procesado por separado (en parte porque solo había un conjunto de datos disponible), pero existen enfoques para las estrategias de procesamiento combinado. Por otro lado, las metodologías de clasificación que utilizan (por ejemplo la clasificación de máxima verosimilitud para imágenes satelitales, que se remontan a la década de 1970), se han empleado para esta tarea. Si bien la clasificación no entrega objetos per se, los resultados suelen servir como base para la detección y delineación de objetos individuales. Más recientemente, modernos métodos de discriminación para la clasificación –tales como AdaBoost (Chan y Paelinckx, 2008), Support Vector Machines (SVM, Mountrakis et al., 2011) y Random Forests (RF, Gislason et al., 2006)– se han aplicado en fotogrametría y percepción remota. Enfoques probabilísticos basados en modelos gráficos, como Markov Random Fields o Conditional Random Fields (CRF), se han adoptado para la clasificación basada en contexto con aplicaciones como la clasificación de fachadas (Yang y Förstner, 2011), el etiquetado de nubes de puntos (Niemeyer et al., 2014a), la segmentación para la reconstrucción de edificios en 3D (Lafarge y Mallet, 2012), y la clasificación multitemporal de imágenes de sensores remotos (Hoberg et al., 2015). El comportamiento de estos métodos de clasificación es bien entendido, y ofrecen una precisión razonable en una amplia gama de aplicaciones.

Las tareas de visualización de alto nivel para la comprensión de escenas también pueden sostenerse en modelos gráficos, pero requieren otros esquemas de representación de objetos o un diseño más complejo de gráfico subyacente. Por ejemplo, los modelos basados en piezas descomponen un objeto en sus componentes, cuya alineación relativa puede aprenderse desde las imágenes (Felzenszwalb et al., 2010) cuando se toman en cuenta los modelos 3D CAD (Zia et al., 2013). Las partes del objeto detectadas en una imagen pueden apoyarse mutuamente y así dar pistas para la detección y localización de todo el objeto, lo que da como resultado una identificación correcta de objetos, incluso si están parcialmente ocluidos. Los modelos jerárquicos (Yang y Förstner, 2011) integran el comportamiento escala-espacio de los objetos. Los procesos de punto marcado pueden considerar un modelo de objeto fuerte, en un marco estocástico basado en muestreo estadístico. Estos intentan encontrar la configuración de objeto más probable de acuerdo con los modelos de la forma y la alineación relativa de objetos individuales (Tournaire et al., 2010; Brédif et al., 2013). En los métodos de modelado basados en procedimientos, el conocimiento del modelo acerca de los objetos también puede representarse mediante gramáticas, usadas en combinación con muestreo estadístico, por ejemplo, para comprender la estructura de una fachada (Ripperda, 2008) y para modelar árboles caducos en secuencias de imágenes (Huang y Mayer, 2007). El modelado basado en procedimientos también se puede usar para acelerar la productividad del modelado semiau-

tomático basado en imágenes, donde el conocimiento del modelo permite la reconstrucción de más partes de un objeto en base a un conjunto mínimo de mediciones realizadas por el operador humano. Este enfoque es particularmente útil para la verificación y el refinamiento en línea, al superponer el resultado de la reconstrucción sobre las imágenes (Cura et al., 2015).

El análisis de secuencias de imágenes ha hecho posible la detección y el seguimiento de objetos en movimiento a partir de imágenes de cámaras estáticas o dinámicas, sistemas de cámaras individuales o estéreo. Campos de movimiento muy densos pueden derivarse desde secuencias de imágenes mono o estéreo, en tiempo real (Rabe et al., 2010), utilizando un filtro de Kalman extendido (EKF) para conectar diferentes escenas a lo largo del tiempo. La segmentación de tales campos de movimiento puede emplearse para detectar objetos dinámicos en secuencias de imágenes de plataformas móviles, por ejemplo, automóviles (Kitt et al., 2010). Esta metodología ha alcanzado tal grado de madurez que la industria automotriz la implementa en los sistemas de asistencia al conductor. Un enfoque alternativo es seguir el rastreo mediante el paradigma de detección, donde los detectores de objetos se aplican a cuadros individuales para rastrearlos a lo largo del tiempo. Ejemplos incluyen la detección de peatones desde un equipo estéreo en movimiento (Schindler et al., 2010) y la detección de objetos en movimiento en secuencias de imágenes monoculares (Wojek et al., 2010; Klinger et al., 2014). Los filtros de partículas se pueden utilizar como una alternativa a un EKF, para modelar el comportamiento temporal de los objetos (Breitenstein et al., 2011). Una vez más, los modelos gráficos proporcionan un marco probabilístico para muchas de estas aplicaciones.

1.1.3.5. Detección de cambios

El valor de la información geoespacial depende críticamente de su coherencia con respecto al mundo real, y esto ha estimulado la investigación intensiva sobre el mapeo y monitoreo de cambios, así como sus aplicaciones a escala nacional y mundial. Se siguen desarrollando nuevas técnicas de detección de cambios (Lu et al., 2014). Los ejemplos incluyen detección de cambios y métodos de clasificación integrados (Chen et al., 2012), enfoques basados en diferencia de gradiente espectral (SGD) (Chen et al., 2013a), detección de cambios basados en objetos (Hussain et al., 2013), detección de cambios 3D (Qin y Grün, 2014), análisis de tendencias estacionales basados en fenología (Li y Wu 2014, Parmentier y Eastman, 2014), y enfoques basados en modelos de campo aleatorios (Helmholz et al., 2012; Benedek et al., 2015). Todo esto apunta a emplear efectivamente diferentes características inherentes a las imágenes y datos auxiliares para reducir los denominados pseudocambios, es decir, cambios en la apariencia que no son relevantes para la tarea en cuestión.

La recopilación de datos de crowdsourcing es otro tema de investigación activo (Goodchild y Glennon, 2010; Heipke, 2010), a menudo empleado para la detección de cambios. Tanto los voluntarios como los profesionales pueden recopilar y analizar información de cambios, utilizando plataformas basadas en la web. Geo-Wiki es una plataforma en línea para recopilar información de cobertura terrestre a partir de imágenes crowdsourced (Fritz et al., 2012), y se ha aplicado en la generación de mapas de cobertura terrestre (See et al., 2015). Se ha recopilado información geográfica crowdsourcing para la respuesta temprana y la gestión de crisis (Stange y Bothe, 2013). Datos de trayectoria GNSS desde sistemas de navegación de automóviles y de teléfonos inteligentes se han utilizado para predecir las condiciones del tráfico urbano, extraer la geometría de la red vial (Zhang et al., 2010; Cao y Sun, 2014), y realizar análisis de movilidad humana (Huang et al., 2015). En este contexto, las imágenes (por ejemplo, de Flickr o Instagram) se usan a menudo en términos de sus metadatos (es decir, coordenadas y textos de anotación) y no necesariamente con respecto al contenido de la imagen, lo que requeriría de la interpretación de la misma.

A nivel nacional, la actualización rápida de las bases de datos geoespaciales se ha convertido en una prioridad principal de las agencias nacionales de cartografía (Heipke et al., 2008; Chen et al., 2014b). Una encuesta reciente realizada por la ISPRS con la ayuda del Grupo de Gestión de Información Geoespacial Global de Naciones Unidas (UN-GGIM), muestra que algunos Estados miembros de la ONU actualizan sus bases de datos geoespaciales una vez al año y muchos otros países han tenido éxito en completar o actualizar sus requerimientos de mapeo a las escalas críticas 1:5.000 a 1:50.000 (Konecny, 2013).

Sin embargo, hay muchos otros países que necesitan mejorar su ciclo de actualización de las bases de datos cartográficas nacionales.

1.1.3.6. Mapeo global y planetario

El mapeo y el monitoreo global (Ban et al., 2015) y planetario (Heipke et al., 2007; van Gasselt y Nass, 2011) son otros temas actuales. Se han invertido esfuerzos en la derivación y el suministro de geoinformación global, como los modelos de elevación digital global (DEMs, Robinson et al., 2014), el mapeo de áreas quemadas (Mouillot et al., 2014), la rugosidad de superficie (Chen et al. 2014c), el cambio de la cubierta forestal (Hansen et al., 2013), y la valoración del servicio ecosistémico (Li y Fang, 2014). Varias iniciativas de monitoreo global se han lanzado o discutido, por ejemplo, para especies terrestres (Schmeller et al., 2015), hábitat (Lucas et al., 2015), agricultura (Whitcraft et al., 2015) y alteraciones de la vegetación inducidas por el clima (McDowell et al., 2015); junto con las tecnologías de monitoreo relacionadas (Aschbacher y Milagro-Pérez, 2012; El-Sheimy et al., 2015). Un desarrollo notable es el producto Globeland30 (Chen et al., 2015) que constituye la primera cubierta de suelo global a 30 m del mundo para los años 2000 y 2010, y comprende diez tipos de cobertura terrestre. Se desarrolló un enfoque basado en pixel-object-knowledge para lograr un compromiso entre efectividad (precisión) y eficiencia (nivel de automatización), con una precisión de clasificación global superior al 80%.

1.1.3.7. Modelado y análisis de datos espaciales

Modelar la realidad geográfica y los fenómenos espaciales de interés en forma digital es la base para la construcción de bases de datos geoespaciales, el desarrollo de la Tierra digital, globos virtuales y ciudades inteligentes (Wise, 2000; Craglia et al., 2012). El análisis espacial es la interpretación adicional del modelo digital para derivar conocimiento significativo o para explicar los fenómenos geográficos relacionados con las ubicaciones en la superficie de la Tierra (Miller, 2004). Las características del espacio geográfico tienen un impacto significativo en el contenido y el desempeño del modelado y análisis de datos espaciales.

Durante los últimos años, el modelado en 3D se ha convertido en una práctica común para muchas de las ciudades más grandes del mundo. Se desarrollaron muchos algoritmos y estructuras de datos para mejorar la eficiencia y calidad del modelado urbano. Estos incluyen CityGML para consultas semánticas (Kolbe, 2009; Gröger y Plümer, 2012), octrees para nubes de puntos de gran tamaño (Elseberg et al., 2013), y prior flexible para el modelado de edificios 3D (Xiong et al., 2015).

El modelado de datos espacio-temporales tiene como objetivo representar objetos y eventos con movimientos continuos y cambios de estado (van de Weghe et al., 2014), y manipular procesos dinámicos como el tráfico del flujo de vehículos o el movimiento de personas individuales (Fang et al., 2012). Estos enfoques se han aplicado en muchos campos, como en la identificación de fuentes y patrones espaciales de enfermedades y lesiones (Cusimano et al., 2010), la respuesta ante desastres en tiempo real, la mitigación y prevención (Ren et al., 2007), el monitoreo de recursos naturales y contaminantes (Obradovic et al., 2010), la navegación peatonal basada en puntos de referencia (Fang et al., 2012) y otros servicios basados en la ubicación (Conti et al., 2012).

La escala es otro tema fundamental en el modelado de datos espaciales. Se han desarrollado técnicas para el modelado a múltiples escalas de diversos tipos de datos espacio-temporales, tal como trayectorias y datos de procesos puntuales (Bereuter y Weibel, 2013; Popa et al., 2015). Los efectos de escala también se han modelado para análisis de terreno basados en DEMs (Gao et al., 2012), análisis geográfico de datos de salud (Lee et al., 2014), análisis de distribución de especies (Moudrý y Šímová, 2012), la medición de la estructura de paisaje (Ricotta y Carranza, 2013), y simulaciones dinámicas de cambio de uso del suelo (Kim, 2013).

El big data geoespacial se ha convertido en un foco de análisis espacio-temporal en los últimos años, debido a la gran cantidad de datos que están adquiriendo los nuevos sensores y las nuevas fuentes de datos, como las redes sociales, trayectorias GNSS registradas por teléfonos móviles (Sester et al., 2014; Hahmann y Burghardt, 2013), y redes de sensores (Devaraju et al., 2015). Los datos recopilados con tales sistemas tienen las propiedades de ser abundantes, fluidos, de cambiar continuamente, en su mayoría georreferenciados, y estar (parcialmente) des-

estructurados. La explotación de la información implícita en los datos de estas fuentes, es un desafío que ofrece enormes oportunidades debido a sus características de tiempo real. Las técnicas de minerías han sido desarrolladas particularmente para VGI (Hagenauer y Helbich, 2012), trayectorias (Liu et al., 2012), datos de redes sociales (Majid et al., 2013), redes viales (Niu et al., 2011), y datos de movimiento (Bleisch et al., 2014). Un enfoque particular se encuentra sobre el big data espacio-temporal. Estos incluyen prismas espacio-tiempo probabilísticos de objetos en movimiento, incertidumbre temporal para la programación de viajes de actividades, detección y descripción de patrones de actividades dinámicas con datos de trayectoria de gran volumen, y el modelado y exploración del big data espacio-temporal.

Las relaciones espaciales han sido otro tema de interés. Se han observado discusiones sobre relaciones topológicas y de dirección, tales como la consulta descentralizada de las relaciones topológicas entre regiones (Jeong y Duckham, 2013) y la identificación de un marco unificador para relaciones direccionales y marcos de referencia (Clementini, 2013), una clasificación completa de relaciones espaciales utilizando el modelo de nueve intersecciones basado en Voronoi (Long y Li, 2013), un modelo de cómputo basado en números Euler para relaciones topológicas (Zhou et al., 2013), y relaciones de operación y lógica temporal para representar conocimiento de cambio (Chen et al., 2013b).

1.1.3.8. Visualización y representación múltiple

La visualización siempre ha sido un aspecto importante de la información espacial. Los atlas 3D en línea se han discutido, por ejemplo, por Sieber et al. (2012). Estos combinan las grandes tendencias del mapeo en 3D, aplicaciones móviles y en línea con diseño cartográfico y funcionalidad específica para atlas. Se han desarrollado panoramas 3D de múltiple perspectiva (Pasewaldt et al., 2014) y mapas de enfoque interactivos (van Dijk y Haunert, 2014). Se han aplicado técnicas de visualización para explorar diversos tipos de datos espaciales, como los datos de movilidad humana (Kwan et al., 2013), brotes de hepatitis A y E (Hughes et al., 2014), el cambio del uso del suelo (Vaz y Aversa, 2013), y los datos de islas de calor urbanas (Danahy et al., 2015).

El diseño de mapas efectivos ha recapturado la atención de la investigación en los últimos años (Li, 2012). La teoría de la información (Bjørke 2012; Ruiz et al., 2012) y la optimización multiobjetivo (Xiao y Armstrong, 2012) se han empleado para el diseño de mapas. La usabilidad es otro problema en la visualización (Joshi et al., 2014), que incluye la efectividad y la eficiencia de las técnicas de visualización. Con la efectividad en mente, surgen representaciones similares a mapas, como mapas esquemáticos y cartogramas (Buchin et al., 2014). En particular, se han desarrollado varios métodos para la generación automática de mapas esquemáticos (Ti y Li, 2014).

En la representación de mapas a escala múltiple, la investigación se centra en el paradigma basado en la escala (Li, 1996). Desarrollos notables son procesos de generalización totalmente automáticos para la producción de mapas (Stoter et al., 2014), generalización 3D, transmisión progresiva (Sester y Brenner, 2009; Kada, 2014), integración de datos de diferentes escalas y técnicas jerárquicas para la representación de redes viales (Li y Zhou, 2012; Zhou y Li, 2014; Benz y Weibel, 2014).

1.1.3.9. Servicios web geoespaciales

Los servicios web geoespaciales permiten el acceso en línea, y el procesamiento de mapas y datos geoespaciales almacenados en uno o más servidores de datos geoespaciales. Su utilización ya ha tenido un impacto profundo en la gestión del conocimiento geoespacial, estructurando y automatizando flujos de trabajo dentro y entre organizaciones que tratan con información e inteligencia basada en la ubicación, y aportando datos geoespaciales a la vida cotidiana de las personas a través del geobrowsing o la web geoespacial. Los últimos esfuerzos de investigación se han dirigido hacia el geoprocesamiento smart o inteligente en la web, que incluye servicios web habilitados en semántica, detección inteligente de servicios, encadenamiento de servicios dinámicos y automáticos y flujos de trabajo compuestos, y balanceo de carga de servicios, idealmente basado en preferencias personalizadas de usuario o aplicación (Li et al., 2011; Veenendaal et al., 2014).

Numerosos desarrollos han ejemplificado los avances en el campo. Los servicios de mapeo se han convertido en la nueva plataforma que permite a una multitud de usua-

rios publicar, consumir, comparar y analizar datos colaborativamente, facilitando el proceso de crowdsourcing de datos geoespaciales o VGI (Han et al., 2015; Liu et al., 2015). Esto ha proporcionado servicios de nube y de web automáticos, analíticos, compartidos y de código abierto para la información geoespacial. En el manejo de servicios de geoprocesamiento se han estudiado enfoques sintácticos y semánticos, y lenguaje de servicio web y de modelado de procesos. El surgimiento de internet 3D, con una amplia disponibilidad de soluciones accesibles basadas en la web (que explotan desarrollos ya mencionados en orientación de sensores, reconstrucción de superficies, entre otros), como Microsoft Photosynth, Autodesk 123d Catch y globos virtuales (por ejemplo, Google Earth, Microsoft Bing Maps 3D), ha permitido la generación y visualización sencilla de datos 3D desde varias fuentes. La computación en la nube ha desempeñado un papel activo en el mapeo web y los SIG porque vincula computadoras dispares para formar una gran infraestructura, aprovechando los recursos no utilizados y formando una plataforma integral (Yang et al., 2014). El concepto de datos vinculados, que a menudo se considera como parte de la web semántica, se ha explorado para conectar datos geoespaciales y otros datos relacionados, que no se vincularon previamente, utilizando Uniform Resource Identifier (URI) y Resource Description Framework (RDF), sobre la web (Bizer et al., 2009; Abbas y Ojo, 2013).

A pesar del rápido desarrollo de los servicios web geoespaciales, sigue habiendo una variedad de aspectos relacionados con los datos, la tecnología y los asuntos organizacionales, que desafían a los investigadores, desarrolladores, profesionales y usuarios públicos en este campo (Li et al., 2011). A medida que se accede a más y más datos geoespaciales en línea, en forma de servicios web, se ha generado una mayor demanda de servicios y datos de calidad, tanto para los proveedores como para los consumidores. Se necesitan medidas claras de calidad que ayuden a identificar, visualizar, evaluar y seleccionar información y servicios geoespaciales apropiados para aplicaciones dedicadas, a través de internet. En cuanto a la tecnología, los principales desafíos están relacionados con arquitecturas de datos y componentes distribuidos, apropiados y eficientes, falta de suficiente poder de geoprocesamiento, falta de aspectos semánticos de los servicios web, orquestación de servicios (selección de servicios, relación, interacción y composición), y gestión del rendimiento y equilibrio de carga de servicio dinámico. Además, se debe prestar más atención a algunos aspectos olvidados pero importantes, relacionados con la propiedad de los datos, derechos de autor y privacidad, políticas de uso de datos y servicios, y las implicaciones de la calidad de servicio y datos (Li y Yan, 2010; Blatt, 2014).

1.1.4. Agenda de investigación científica

En esta sección, se proporciona una visión sobre el desarrollo futuro de la información desde imágenes. Al hacerlo, se sigue la nueva estructura de comisiones de ISPRS, adoptada en 2015 para la implementación 2016 (figura 4), que comprende cinco comisiones:

- **Comisión I:** Sistemas de sensores.
- **Comisión II:** Fotogrametría.
- **Comisión III:** Percepción remota.
- **Comisión IV:** Ciencia de la información espacial.
- **Comisión V:** Educación y extensión.

Los desafíos de investigación de la Comisión V, que es una comisión no técnica, se analizarán más a fondo en la sección 1.1.5.

1.1.4.1. Sistemas de sensores

La Comisión I se preocupa del diseño, construcción, caracterización, calibración y uso de sensores de imágenes, sistemas y redes de sensores para fotogrametría, percepción remota y ciencia de la información espacial, tales como cámaras digitales aéreas y espaciales (escena y video) y escáneres láser, y sensores térmicos, hiperespectrales y de radar. Investiga las diferentes plataformas para la adquisición de datos incluidos, entre otros, UAS, sistemas móviles de mapeo, aeronaves, satélites, contenidos pequeños y constelaciones. La comisión también coopera con el sector industrial relacionado.

a. Sensores de imagen ópticos: se espera que los sensores de imagen sigan evolucionando a un ritmo

acelerado en el futuro previsible. Los avances en las tecnologías CCD/CMOS se deben principalmente al gran mercado de consumo, donde los desarrollos del sistema de cámaras serán fuertes en los próximos años. El número de píxeles por adquisición de imágenes seguirá aumentando y se espera que los sistemas de cámaras con configuraciones de múltiple vista, que proporcionan simultáneamente imágenes adquiridas desde diferentes direcciones, aumenten rápidamente su cuota de mercado (Gruber y Walcher, 2014). Este desarrollo y el aumento esperado de los datos disponibles, enfatizan la necesidad de un procesamiento mejorado de big data y conceptos para la integración de datos. Si bien es probable que el rendimiento radiométrico de las cámaras mejore, la resolución espectral RGB y RGB-NIR típicas es poco probable que lo hagan a corto plazo (Honkavaara et al., 2009), aunque el interés en imágenes hiperespectrales desde el aire y el espacio está creciendo y estos datos pueden ser usados para generar escenas en 3D. Sin embargo, se necesita trabajar en la calibración y en el manejo de grandes volúmenes de datos. Además, existe un interés creciente en las imágenes térmicas. Para el trabajo terrestre se usarán cada vez más sensores multicámara debido a sus ventajas en la captura de datos 3D, por ejemplo, para aplicaciones médicas. Se espera que la velocidad de adquisición de cuadros para capturar secuencias de imágenes experimente mejoras, lo que permite una mayor superposición de imágenes y una mejor observación del espacio de objetos desde el suelo, el aire y el espacio. Si se diseñan como cámaras PTZ (pan, tilt, zoom), estos sensores también se pueden usar para tareas de vigilancia y monitoreo, involucrando procesos altamente dinámicos. Para tales procesos, la captura de datos 3D, a partir de secuencias de imágenes necesita una sincronización de tiempo de alta precisión, lo que puede ser un problema. El límite entre los sensores de imágenes profesionales y de consumidores se verá aún más borroso. Un desafío radica en establecer y monitorear estándares para distinguir

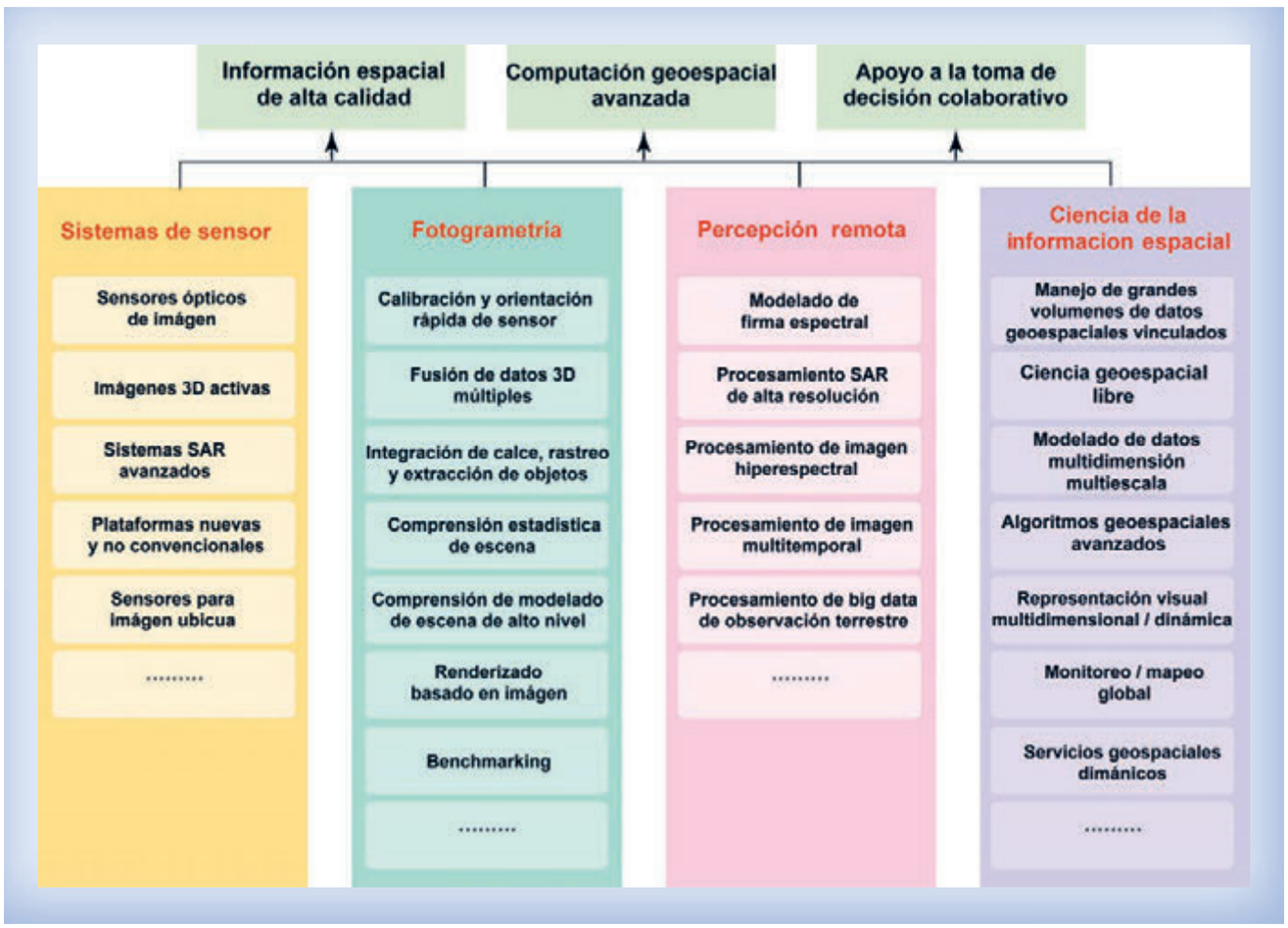


Figura 4: Temas de investigación de desafío para la ISPRS. *Fuente: Elaboración propia.*

productos fotogramétricos de alta precisión de imágenes de tipo consumidor.

b. Imágenes 3D activas: las tecnologías de imagen activa en 3D, basadas en láser, son relativamente caras, pero han avanzado rápidamente a una tasa de desarrollo anual de 15% durante los últimos años (Hyyppä et al., 2013). De este modo, proporcionan la base para desarrollos futuros significativos del sistema (Mallet y Bretar, 2009). Los sistemas LiDAR aerotransportados se están acercando a una frecuencia de pulso de 1 MHz, mientras los pulsos múltiples en el aire y los sistemas multisensor (sensores basados en láser múltiples), se desarrollan aún más en todas las plataformas (Nagai et al., 2009). El LiDAR móvil es actualmente el segmento de mayor crecimiento del mercado de adquisición directa de datos 3D, y es probable que la tendencia continúe por un tiempo. En particular, se esperan desarrollos rápidos en la categoría de gama baja. Las cámaras de tiempo de vuelo, que ofrecen una medición de profundidad para cada píxel simultáneamente, han aparecido en el mercado y se utilizan en interfaces hombre-máquina y juegos de video, para sistemas de asistencia al conductor y también para tareas de medición. Sin embargo, su potencial aún está en gran parte sin explotar. La tecnología Flash LiDAR ha alcanzado la madurez y está por ingresar a la producción convencional (Stettner, 2010). El mapeo de interiores probablemente sea la primera aplicación que se beneficiará de esta poderosa tecnología. Además, aunque los sistemas LiDAR de alta energía pulsada continuarán dominando el mercado, también se espera que los sistemas LiDAR de fotón único o Geiger-mode, alcancen el rendimiento necesario para aplicaciones comerciales (Abdullah, 2012). Por último, se están investigando activamente los sistemas LiDAR de longitud de onda múltiple, y es probable que se introduzcan ampliamente a medida que se desarrolle la demanda del mercado. Actualmente, los sistemas LiDAR de longitud de onda dual, verde y rojo, se utilizan cada vez más para el mapeo costero y batimétrico (Allouis et al., 2010; Niemeyer et al., 2014b), y los sistemas de longitudes de onda cuádruples han sido probados en aplicaciones forestales (Bo et al. 2011).

c. Sistemas SAR avanzados: SAR ha hecho incursiones importantes en nuestro campo, en particular desde la disponibilidad de datos de alta resolución desde el espacio, por ejemplo Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X y TanDEM-X (Eineder et al., 2009; Zink et al., 2014). Un desafío particular es volar estos satélites en una formación muy cercana. Otras innovaciones de sensores comprenden SAR bidireccional y multiestático, y SAR de formación de haz digital y superresolución; las imágenes de terahercios (THz) prometen mediciones de rango, extremadamente precisas. Las imágenes de una resolución geométrica en el rango dm desde los sistemas aéreos muestran un gran potencial, en particular cuando se usan en modo de multi-aspecto (Palm et al., 2015). También el radar terrestre está ganando importancia, por ejemplo, para tareas de geomonitoreo.

d. Plataformas nuevas y no convencionales: en los últimos años se observó una tendencia clara a utilizar satélites pequeños (Sandau et al., 2011) y constelaciones de satélites, como RapidEye o Skybox, para diferentes tipos de aplicaciones. Una comparación de estos sistemas flexibles con sistemas más completos y parcialmente monolíticos, arrojará una visión interesante del potencial y las limitaciones de esta nueva tecnología para el mapeo y la percepción remota. Otro tipo de plataforma que se ha vuelto muy popular en los últimos años es UAS (Colomina y Molina, 2014; Pajeres, 2015). Para la comunidad geoespacial, el desafío es cómo lidiar con la mayor variación de movimiento de plataforma y el uso de sensores no métricos. Especialistas de disciplinas vecinas, en particular, han mostrado un gran interés en utilizar estos sistemas para aplicaciones que van desde la televisión hasta la seguridad nacional y la supervisión del tráfico. El boom inicial parece haber terminado, y ahora necesitamos evaluar sistemáticamente los méritos de estas plataformas y mejorarlas de acuerdo con las necesidades de la industria. También hay un movimiento para usar plataformas geoestacionarias con fines de mapeo (Joseph, 2015). Esto ofrece la posibilidad de una rápida revisita y adquisición de imágenes en tiempo real, a la vez que desafía a los desarrolladores de instrumentos a proporcionar un sensor que efectivamente genere imágenes de alta resolución desde la órbita terrestre alta.

e. Sensores para imágenes ubicuas: en términos generales, la imagen es ubicua y, de hecho, está volviéndose omnipresente, en particular cuando se utiliza en redes de sensores, ya que un crecimiento exponencial del

número de sensores de imagen proporciona datos altamente redundantes a una resolución temporal creciente. Claramente, la redundancia está creciendo, ya que múltiples sensores simultáneamente capturan el espacio de objeto y plataformas de sensores cooperativamente observan la misma zona (Hyde et al., 2006). La creciente variedad de plataformas, incluidos dispositivos inteligentes equipados con cámaras y GNSS, así como UAS, es otro aspecto clave que se debe tener en cuenta. Debido a la competitividad del mercado de consumo, la investigación y el desarrollo son muy fuertes en esta categoría y los avances se transfieren rápidamente al mercado profesional. Existen preocupaciones en esta área sobre cuestiones legales y de privacidad, y también en el establecimiento de normas que rigen la calidad de los productos.

En conclusión, se puede observar que los desarrollos en tecnología están produciendo nuevos sistemas de adquisición de datos y el desafío para la ISPRS es hacer coincidir esto con métodos científicos adecuados y herramientas para la evaluación, el procesamiento y el análisis.

1.1.4.2. Fotogrametría

La Comisión II trata la teoría y la metodología para extraer y analizar información espacio-temporal de objetos desde imágenes terrestres, aéreas y satelitales, secuencias de imágenes y nubes de puntos, utilizando enfoques de fotogrametría, análisis de imágenes y visión artificial, con énfasis en la precisión y fiabilidad de la información geométrica. Las aplicaciones incluyen medición 3D basada en imágenes, en la adquisición de datos geoespaciales, el mapeo extraterrestre, ingeniería y metrología industrial, registro patrimonial, análisis forense, robótica, sistemas de asistencia al conductor, vigilancia, aplicaciones médicas, industria del cine y videojuegos, y otros campos.

a. Calibración y orientación rápida del sensor: como parte del procesamiento fotogramétrico, la modelación y calibración de sensores necesita más atención en las tareas de medición geométrica precisa, en metrología de imágenes, y para dispositivos de imágenes no convencionales como lentes de ojo de pez, panóptico y otras cámaras generalizadas. La orientación automática de la imagen (estimación de posición) se ha desarrollado con un cierto grado de madurez en la última década. Otras direcciones de investigación son, por un lado, la orientación simultánea de imágenes con perspectivas muy diferentes o de diferentes sensores, y la orientación desde una nueva fuente de datos relativa a imágenes ya orientadas o modelos 3D, como hitos visuales 3D generados a partir de imágenes. Por otro lado, soluciones incrementales para hacer frente a cantidades masivas de imágenes, soluciones basadas en la optimización convexa (Boyd y Vandenberghe, 2004) y la integración de diferentes sensores de imagen con información adicional sobre la posición y dirección de visualización (como la de GNSS e IMU), son temas cada vez más importantes.

En particular, en navegación, robótica y vigilancia se necesitan soluciones en tiempo real para procesar secuencias de imágenes; por ejemplo, para evitar obstáculos en sistemas autónomos de conducción y asistencia al conductor, para el seguimiento de peatones, y para SLAM. El enfoque debe estar en el desarrollo de algoritmos que sean escalables a través de muchas órdenes de magnitud, y que se puedan paralelizar fácilmente (Klingner et al., 2013).

b. Fusión de datos 3D múltiple: otro campo que ganará importancia es la fusión de múltiples datos complementarios para aplicaciones 3D. Los sistemas de adquisición recientemente desarrollados están integrando más y más sensores de imagen múltiples, además de los sensores LiDAR. Por ejemplo, un uso combinado de imágenes ópticas y LiDAR en el contexto de imágenes de visuales de calle (Paparoditis et al., 2012), tiene muchas ventajas para el procesamiento en 3D. Para dar otro ejemplo, nubes de puntos LiDAR con una densidad mucho menor (con respecto a las nubes de puntos 3D que se pueden generar a partir del procesamiento óptico) se pueden usar para identificar áreas focalizadas y reducir el esfuerzo combinatorio para el análisis de escenas, además de proporcionar una reconstrucción de superficie inicial para predecir las oclusiones y para normalizar la reconstrucción de nubes de puntos y mallas 3D, a partir de imágenes ópticas.

En una línea similar, el uso simultáneo de imágenes múltiples para la clasificación de imágenes, puede ayudar a superar los problemas de oclusión y obtener una clasi-

ficación de una escena completa (Roig et al., 2011). La disponibilidad de imágenes aéreas con altas superposiciones sin ningún costo adicional, junto con la tendencia a obtener vistas aéreas oblicuas, pueden proporcionar antecedentes para hacer que tales aplicaciones también sean posibles para el caso aéreo.

c. Integración de calce, seguimiento y extracción de objetos: la reconstrucción de objetos y superficies 3D a partir de imágenes y nubes de puntos ha alcanzado un estado alentador en la investigación, pero los problemas aún persisten, por ejemplo, en presencia de oclusiones múltiples, textura pobre y discontinuidades de profundidad significativas. Como consecuencia, aunque la detección de objetos en movimiento para sistemas de asistencia al conductor ha encontrado su camino en aplicaciones prácticas, podría decirse que aún no es robusta frente a condiciones desafiantes de imagen, tales como cambios bruscos de brillo, lluvia o nieve.

La integración del calce de imágenes, el seguimiento de patrones y la extracción de objetos en el mismo proceso, es una posible solución a estos problemas que debe explorarse más a fondo. En la actualidad, estas tareas generalmente se resuelven de manera independiente, de modo que los errores en la solución de una tarea se propagan a la siguiente; una solución simultánea puede ayudar a superar algunas de las limitaciones de los métodos actuales. Una primera solución para integrar el calce de imágenes y la clasificación ha sido desarrollada por Ladický et al. (2012), pero el problema aún requiere más esfuerzos de investigación. Otra extensión importante del calce denso es el flujo de escena dinámico, es decir, la estimación de campos de vector de profundidad y velocidad densos, coherentes espacialmente y temporalmente (Vogel et al., 2013; Menze y Geiger, 2015), que también se pueden usar para identificar objetos individuales (movimiento) (Menze et al., 2015).

d. Comprensión estadística de la escena: gran parte del trabajo actual sobre comprensión robusta de escenas mediante clasificación y seguimiento de imágenes, se basa en una formulación de problemas estadístico, en muchos casos, en un entorno supervisado para hacer que las respectivas aplicaciones se adapten más fácilmente a diferentes escenas. Los modelos gráficos han demostrado proporcionar un marco flexible muy adecuado para resolver estos problemas. Los clasificadores basados en modelos gráficos, tal como los campos aleatorios condicionales (CRF), se entienden bastante bien hoy en día y deberían convertirse en el método de elección para las tareas de clasificación (Schindler, 2012). Sin embargo, la provisión de datos de entrenamiento es un factor limitante para aplicaciones prácticas, en particular si modelos de contexto sofisticados se van a aprender en la capacitación. Este problema se puede superar adaptando las técnicas para aprendizaje de transferencia (Pan y Yang, 2010) a problemas de clasificación de imágenes. El aprendizaje de transferencia puede ayudar a adaptar un clasificador entrenado en un conjunto de imágenes, a otro conjunto de datos con diferentes distribuciones subyacentes; o puede ayudar a resolver tareas nuevas basadas en la solución existente de una tarea similar. Ambos tipos de aprendizaje de transferencia deberían encontrar su camino en fotogrametría y percepción remota. Otra posibilidad de hacer frente a muy pocos datos de capacitación, en particular para aplicaciones de mapeo, es el uso de información de bases de datos potencialmente desactualizadas. El desafío es lidiar con información parcialmente incorrecta. Este aspecto se refiere al problema del ruido de etiqueta (Frénay y Verleysen, 2014).

Para muchas aplicaciones, también es importante que los algoritmos lleguen a saber dónde fallan para, por un lado, pilotar un operador y controlar –y potencialmente editar y corregir– el error o, por otro lado, para cambiar a un algoritmo alternativo (Paparoditis et al., 2007). Las posibilidades de autodiagnóstico basadas en medidas de calidad fiables (Boudet et al., 2006) son necesarias para lograr medidas de integridad como las que se utilizan en la industria aeronáutica.

e. Modelado del conocimiento de escenas de alto nivel: la incorporación del conocimiento de escenas de alto nivel para la detección de objetos y la comprensión de escenas, es una de las direcciones más importantes de investigación. CRF y los modelos relacionados funcionan bien a nivel local, combinando la clasificación de píxeles vecinos de una imagen. Como se señaló en la sección sobre el estado del arte, hay una variedad de estrategias para abordar este problema. No todos se pueden transferir fácilmente a imágenes aéreas y de satélite, y aún no está

del todo claro cuál es la mejor estrategia a seguir cuando se trata de abordar este problema. Ejemplos a considerar del conocimiento de alto nivel incluyen el uso de múltiples capas de etiquetas de objeto, así como de modelos basados en partes, la definición de camarillas de alto orden que combinan las etiquetas de múltiples píxeles, el uso de modelos jerárquicos teniendo en cuenta etiquetas de clase a diferentes escalas, y otras formas de considerar las interacciones de largo alcance, como los antecedentes relativos de ubicación (Gould et al., 2008). Algunas de estas técnicas implican un procedimiento de etapas múltiples en el que interactúan la clasificación a nivel local y los procedimientos de alto nivel. Los procesos de puntos marcados (MPP, Lafarge et al., 2008) y particularmente los MPP multi-objeto, son otra posibilidad prometedora para integrar el conocimiento de escena de alto nivel; estos podrían tener éxito donde los sistemas expertos fallaron en la década de los 80. Una perspectiva interesante y desafiante podría ser también unificar los MPP y los modelos gráficos en el mismo marco para obtener ventajas complementarias. La forma óptima de considerar el conocimiento de alto nivel, así como la mejor forma de integrar múltiples etapas de procesamiento en este contexto, aún debe ser investigada. Esto proporciona un campo de investigación bastante amplio que debe ser abordado por la comunidad científica.

f. Representación basada en imágenes: esto consiste en navegar continuamente en 3D para un mayor nivel de inmersión, entre las imágenes orientadas más cercanas, pandeando y combinando estas imágenes en un modelo 3D (ya existente o generado fuera de línea o sobre la marcha desde las imágenes), para generar una representación sintética pero realista de cualquier vista, evitando así la necesidad de texturizar los modelos 3D antes de la navegación, lo que no es un problema bien planteado. Esto evitaría, por ejemplo, la necesidad de generar ortofotos fuera de línea, y conduciría a la generación de ortofotos sobre la marcha. Algunos problemas de investigación abierta son la consideración y gestión de la incertidumbre de las orientaciones de la imagen y el modelo 3D en el proceso de renderizado y la ecualización radiométrica de las imágenes (física, empírica, o intermedias), antes de la mezcla de texturas.

g. Comparadores (Benchmarking): por último, pero no menos importante, la comunidad ISPRS debe aumentar sus esfuerzos para proporcionar puntos de referencia para tareas específicas (Rottensteiner et al., 2014; Nex et al., 2015; Vallet et al., 2015). Mientras que las bases de referencia de la comunidad de visión artificial y robótica pueden ser suficientes en muchos casos, hay algunas aplicaciones que no cubren, en particular aquellas que requieren vistas casi verticales. Puede ser difícil superar los derechos de autor y los aspectos de seguridad, pero proporcionar un banco de pruebas común para los nuevos algoritmos es, sin embargo, importante para comparar enfoques diferentes y poder identificar estrategias prometedoras frente a aquellas que son menos prometedoras. Como consecuencia, la evaluación comparativa puede acelerar considerablemente el progreso de la investigación.

1.1.4.3. Percepción remota

La Comisión III se ocupa de la investigación, el desarrollo, el uso operacional e investigativo de métodos y sistemas para el análisis de observaciones de la Tierra obtenidas remotamente desde sensores aéreos y espaciales, en sinergia con mediciones in situ y portátiles. Los ejemplos incluyen el modelado físico de radiación electromagnética, el análisis de firmas espectrales, la clasificación de imágenes, la fusión de datos y el reconocimiento de patrones. Las aplicaciones tratadas en la Comisión III incluyen el monitoreo ambiental para el desarrollo sostenible y el cambio global; el mapeo de actividades humanas y naturales, incluyendo uso y cobertura del suelo, y la biodiversidad; procesos de monitoreo basados en evidencia física y empírica; evaluación y mitigación de desastres; identificación y evaluación de recursos renovables y no renovables; y el monitoreo de cambios temporales en el clima y en la cubierta terrestre y marina.

a. Modelado de firma espectral: un elemento clave en percepción remota sigue siendo el modelado físico de las ondas electromagnéticas y su interacción con la atmósfera, así como con superficies y objetos retratados. Con el creciente número de bandas espectrales disponibles en muchos sensores satelitales (por ejemplo, WorldView-3 con un total de 28 bandas, y en particular las misiones hiperespectrales como la alemana ENMAP con más de 240 bandas), el modelado de las firmas espectrales de diferentes materiales alcanza

un mayor nivel de complejidad y comprende muchos desafíos nuevos.

b. Procesamiento de SAR de alta resolución: la detección remota de SAR (radar de apertura sintética) jugará un papel importante en futuras aplicaciones de percepción remota. El hecho de que el radar sea un sistema activo y pueda penetrar las nubes lo convierte en una herramienta muy útil para las tareas de monitoreo continuo en la observación de la Tierra. Los desafíos específicos de la investigación radican en imágenes de alta resolución en tres dimensiones, posiblemente a través de tomografías SAR, combinadas con detección compresiva (Zhu y Bamler, 2012). También el SAR polarimétrico y simplificaciones de SAR tomográfico, tales como InSAR/IFSAR y la interferometría de dispersión permanente (PSI), todavía proporcionan muchos desafíos sin resolver, en particular cuando se emplean con las ahora disponibles pilas de imágenes SAR de alta resolución y los datos SAR multiaspecto. La interferometría en modo de seguimiento proporciona posibilidades para monitorear objetos dinámicos, por ejemplo, en el monitoreo del tráfico de buques, la medición de las corrientes oceánicas y el monitoreo de icebergs. Otra área de mayor interés es la fusión de datos ópticos y de SAR, ya que en muchos casos estas dos fuentes de datos son complementarias.

c. Procesamiento de imágenes hiperespectrales: la interpretación de imágenes satelitales de forma automática, utiliza la clasificación de imagen y los enfoques de análisis de imágenes (ver las discusiones en la sección 1.1.4.2). Las imágenes hiperespectrales ofrecen un desafío adicional, ya que a menudo es necesaria una selección adecuada de bandas y una definición de características, para poder manejar grandes cantidades de datos y escapar de la maldición de la dimensionalidad (Hughes, 1968), que puede surgir fácilmente debido a una falta de suficientes datos de entrenamiento. Otro tema de investigación importante es la elaboración de métodos de clasificación que solo requieren un mínimo de mediciones in situ, difíciles y costosas de recoger.

d. Procesamiento de imágenes multitemporales: constelaciones de satélites como RapidEye, con cinco satélites, y más aún, el sistema Skybox, que es capaz de capturar videos de alta resolución desde el espacio y que está planeado para tener 24 satélites en su constelación final, entregan una mayor cantidad de observaciones repetidas que pueden ser utilizadas en el procesamiento multitemporal para modelar procesos dinámicos, por ejemplo, patrones de crecimiento de plantas en la agricultura. Obviamente, para áreas más pequeñas, tales series de tiempo también se pueden adquirir usando UAS de ala fija y a la rotativa. Al explotar tales series de tiempo, las imágenes desempeñarán el papel de una instantánea, documentando un estado específico de los procesos subyacentes observados que inducen el cambio. Aunque estos procesos pueden ser naturales (por ejemplo, geocientíficos y biológicos) o antropogénicos (es decir, hechos por el hombre), el énfasis estará en estimar los parámetros que rigen los procesos para una mejor comprensión y poder predictivo. Obviamente, tales estudios requieren un enfoque interdisciplinario.

e. Procesamiento de big data de observación de la Tierra: los volúmenes de datos adquiridos actualmente por los sistemas de percepción remota desde el espacio, y también desde el aire, y mediante sistemas de mapeo móvil basados en terreno, presentan un desafío no solo en términos de almacenamiento y preprocesamiento de las imágenes, sino también en términos de extracción de información (especialmente en 3D) y minería de información (Quartulli y Olaizola, 2013). Por lo tanto, este tema también se relaciona con las otras comisiones ISPRS. El nuevo paradigma es extraer por completo, de noche, la información de datos que tradicionalmente se han adquirido solo durante el día. Las nuevas tecnologías para el procesamiento de big data como Hadoop y MapReduce en la nube o en soluciones computacionales de alto rendimiento (HPC), deberían investigarse y aplicarse ventajosamente a tales imágenes (Nativi et al., 2015). Además, el preprocesamiento factorizado de los datos para extraer características 2D o 3D de bajo o mediano nivel, es necesario para evitar el procesamiento redundante y simplificar la explotación de datos.

1.1.4.4. Ciencia de la información espacial

La Comisión IV trata aspectos teóricos y prácticos de la modelización, la gestión, el análisis, la difusión y la visualización de datos geoespaciales, incluida la interoperabilidad, los servicios web y la infraestructura de datos

geoespaciales. También se ocupa de las aplicaciones y el uso operativo de información espacio-temporal, en áreas como transporte, monitoreo ambiental, gestión de desastres, movilidad, modelos 3D de ciudades, Building Information Systems (BIM), redes sociales, servicios basados en la ubicación y salud.

a. Manejo de grandes datos geoespaciales vinculados: grandes datos geoespaciales vinculados, obtenidos a través de la combinación de tecnología de datos enlazados con big data geoespacial, se refieren a la construcción y publicación de datos geoespaciales de alto volumen, estructurados y no estructurados, para permitir consultas semánticas más útiles y permitir una mejor reutilización de conocimientos integrados en diferentes fuentes de datos (Kuhn et al., 2014; Lee y Kang, 2015). Es necesario explorar una serie de aspectos, como la agregación semántica y la publicación de grandes cantidades de datos espaciales con datos de dominio y de redes sociales, la recuperación y exploración de datos espaciotemporales vinculados, el desarrollo de herramientas innovadoras y capaces de procesar datos geoespaciales (grandes o vinculados), la conexión y publicación de big data geoespacial y la minería y visualización de big data geoespacial vinculado, así como su aplicación en navegación, salud pública, gestión urbana, monitoreo ambiental, y en otras áreas de beneficio social.

b. Ciencia geoespacial abierta: con los significativos incrementos en los datos geoespaciales abiertos, el rápido avance del software libre y de código abierto para geoinformación (FOSS4G) y el acceso abierto a artículos de investigación, se verá un desarrollo dramático en la ciencia geoespacial abierta o libre (Steiniger y Hunter, 2013; Jeffery et al., 2014; Simón et al., 2014; Harris y Baumann, 2015; Swain et al., 2015). Promoverá la colaboración a gran escala de científicos y ciudadanos en diversas etapas de la información, desde el proceso de captura de imágenes, incluyendo el intercambio de datos, la reutilización de códigos de software, la reproducibilidad de la ciencia y el procesamiento y validación colaborativo. Los temas de investigación críticos incluyen estándares de datos abiertos, evaluación de calidad y control de datos abiertos, interoperabilidad semántica, VGI, arquitecturas y marcos de trabajo para software de fuente abierta, conceptualización y creación de software de fuente abierta, interfaces de computadora humana y usabilidad en y alrededor de sistemas de IG abiertos, la combinación e integración de software y datos geoespaciales de código abierto, un análisis de costo y beneficio de aplicaciones de código abierto, y modelos de negocio de código abierto.

c. Modelado de datos n-dimensionales múltiple escala: incluso después de veinte años de investigación, todavía hay una falta de enfoques bien establecidos para el modelado sofisticado de grandes cantidades de datos multidimensionales, fenómenos multiescala y estructuras hechas por el hombre, incluidos sus cambios temporales (Craglia et al., 2012; Long y Li, 2013; Xiong et al., 2015). Todavía quedan por resolver varios problemas para desarrollar nuevas metodologías, algoritmos y aplicaciones relacionadas con la representación de datos espaciales n-dimensionales en escalas múltiples. Ejemplos típicos son (a) la representación y el cálculo de relaciones 3D y temporales, y ontologías espacio-temporales, así como su uso para representar fenómenos geográficos y ambientales en 3D y a mayor dimensión, (b) estructuras de datos espaciales e indexación espacial para modelos multidimensionales, (c) generalización automatizada de datos multidimensionales de diferentes niveles de detalle para varios propósitos, y (d) juegos completos de algoritmos atómicos para modelado multidimensional.

d. Algoritmos geoespaciales avanzados: cada vez hay más conjuntos de datos espaciales disponibles que deben analizarse y combinarse de forma inteligente. Para hacerlo se necesitan métodos de interpretación que puedan encontrar información de mayor nivel en los geodatos estructurados proporcionados. Con este fin, se pueden aplicar técnicas similares como las usadas en el análisis de imágenes, la minería de datos (espaciales) y los métodos de aprendizaje automático, que son técnicas muy potentes (Miller y Han, 2009). Como los datos son adquiridos por varios sensores, es obvio que también se pueden procesar por separado, es decir, de forma descentralizada. Esto tiene varios beneficios, por ejemplo, procesamiento en paralelo, computación local con ventajas con respecto a la privacidad de datos, así como una reducción en la comunicación de datos (Duckham, 2012). Finalmente, se necesitan métodos y modelos que puedan actualizar y refinar incrementalmente conjuntos

de datos geoespaciales y permitir explícitamente que las descripciones tengan diferentes estados: por ejemplo, partes del objeto pueden ser completamente capturadas, otras partes solo groseramente o no ser en absoluto. Entonces, aún debe ser posible almacenar la información (preliminar), marcarla como tal, y refinarla y completarla incrementalmente en una etapa posterior.

e. Representación visual dinámica y multidimensional: la geovisualización mantendrá un fuerte vínculo con el big data geoespacial y los datos 3D. La visualización de la movilidad y la dinámica en entornos urbanos continuará llamando la atención. El análisis visual permite la inspección visual interactiva de datos potencialmente grandes y de gran dimensión (Andrienko y Andrienko, 2013). La visualización para la navegación interior 3D y la infraestructura subterránea están ganando terreno. El zoom continuo se convertirá en una función crítica para los sistemas de análisis digital desde tierra y espaciales. Los problemas teóricos incluyen la percepción por el cerebro humano de las estructuras de representaciones visual, los principios de diseño de mapas y otras representaciones visuales, y la usabilidad de la representación visual. Basándose en información métrica, temática y topológica (Li y Huang, 2002), la teoría de la información se utilizará ampliamente como base teórica para el diseño eficaz de sistemas de transmisión de información y para la evaluación de representaciones visuales. Como la usabilidad de los mapas será más enfatizada por los usuarios en el futuro, particularmente por el público en general, las representaciones similares a mapas, como los mapas esquemáticos, mapas de escala variable y otros mapas personalizados, serán cada vez más populares.

f. Mapeo y monitoreo global: con el acceso abierto a conjuntos de datos globales, se dedicarán más esfuerzos a su validación, actualización y aplicación (Li et al., 2011; Giri et al., 2013; Chen et al., 2015; Ban et al., 2015). Es necesario desarrollar especificaciones técnicas acordadas internacionalmente, que definan la estrategia general, el muestreo y los enfoques para la evaluación de la calidad, y establecer una plataforma de validación basada en la web correspondiente. Todavía se deben desarrollar enfoques de actualización operativos para la generación de productos más actuales y conjuntos de datos de series de tiempo a través de una combinación de detección de cambio robusta, crowdsourcing de ciudadanos y recopilación de datos auxiliares. Habrá que establecer varias redes dinámicas de monitoreo a escala local, regional, nacional y continental, para la entrega oportuna de los cambios en la cobertura terrestre y otros hechos, variables esenciales y tendencias relevantes para los responsables de la toma de decisiones y los usuarios relevantes. Para integrar el monitoreo y análisis a escala fina con cobertura global, es esencial integrar o conectar todas las fuentes de información existentes en una variedad de escalas espaciales, distribuidas localmente a nivel mundial, para formar portales de conocimiento ampliamente accesibles y para proporcionar un servicio de información one-stop para cobertura de suelo, nieve y hielo, y otra información relacionada con la Tierra. Como resultado, la actualización incremental y el refinamiento seguirán siendo un tema que merece atención de investigación. También es fundamental incorporar conocimiento y principios específicos de dominio en el proceso de monitoreo, para comprender las razones y las consecuencias de los cambios observados y predecir las tendencias futuras.

g. Servicios geoespaciales dinámicos: los avances recientes en redes de ciberinfraestructura y tecnologías de comunicaciones, especialmente las tecnologías más recientes de computación en la nube, han creado un gran potencial para servicios basados en la web y la demanda de nuevos tipos de servicios, para diseminar información espacial y acceder a infraestructuras de computación escaladas masivamente, y para nuevos servicios web y en la nube para el procesamiento en línea de problemas de uso intensivo de datos de información geoespacial espacio-temporal, estática y dinámica. La rápida transición de la web 2.0 a la web 3.0 cambia la web desde creación de contenido y participación a significado y conocimiento conectado, lo que requiere una web semántica en lugar de una que solo sea interactiva. La web 3.0 requiere una web inteligente con conjuntos de datos geoespaciales vinculados para un descubrimiento, análisis, automatización, integración, reutilización y visualización, de información geoespacial, más efectivos en varias aplicaciones. Se necesitan nuevos estándares y especificaciones de interoperabilidad para servicios, arquitecturas de sistemas e información geoespacial, procesos y flujos de trabajo. Las investigaciones futuras se centrarán más en la recuperación in-

teligente y el procesamiento de recursos informáticos distribuidos, en la procedencia y los metadatos de métodos analíticos espaciales, y en la computación grid y en la nube, para una red geoespacial funcionalmente rica y colaborativa, basada en servicios geoespaciales (Li, 2008; Li et al., 2011; Evangelidis et al., 2014). Esto nos moverá hacia la web como una plataforma que proporciona capacidades GIS tradicionales de una manera no tradicional.

1.1.5. Conclusiones

Como sociedad preocupada por la información desde imágenes, la ISPRS se enfrenta a desafíos científicos importantes, con algunas de sus subdisciplinas evolucionando gradualmente y algunas avanzando un ritmo muy rápido. Las principales tendencias se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Adquisición de imágenes:** el modelo de sensores integrados ha reemplazado el modelo tradicional de un solo sensor de imagen. Las nuevas fuentes de datos como Urthcast y las cámaras en UAS, son ampliamente utilizadas y plantean problemas de calibración y calidad de datos. La percepción ubicua y la participación pública están ganando peso, lo que lleva a la percepción ciudadana o la percepción participativa. Si bien este desarrollo abre muchas aplicaciones nuevas, por ejemplo, en la actualización y el monitoreo de desastres, los científicos tienen el desafío de garantizar aspectos de calidad de datos, confiabilidad y privacidad de los mismos.

- **Constelación de satélites:** en un futuro cercano, las constelaciones que comprenden satélites múltiples, proporcionarán imágenes de alta resolución hasta varias veces al día, en cada rincón del planeta, casi en tiempo real. Así será posible monitorear procesos dinámicos en la superficie de la Tierra. Los desafíos comprenden el procesamiento de datos multitemporales y el modelado de los procesos dinámicos, así como la minería de información y de procesamiento de datos multitemporales.

- **Extracción de información:** la integración del calce de imágenes, el seguimiento y la extracción de objetos, está reemplazando al modelo tradicional de procesamiento independiente de objetos individuales. Las soluciones escalables en tiempo real se volverán cada vez más importantes, mientras que la alta precisión geométrica, junto con el mayor grado de automatización, sigue siendo un requisito y un desafío central, en particular en la metrología industrial. El uso de imágenes múltiples promete ofrecer una solución para la clasificación de imágenes y la reconstrucción de objetos, de manera de superar el problema de la oclusión. El monitoreo de grandes áreas se está moviendo desde la configuración experimental basada en la investigación, a los procedimientos operativos.

- **Modelado de datos:** el modelado y la comprensión del mundo real y de las comunidades en línea, y su interacción, se están volviendo cruciales para el emergente mundo ciberfísico convergente (CPW). Las estructuras de datos espaciales tienden a moverse desde tres a cuatro dimensiones (3D más tiempo). La infraestructura de datos espaciales será un marco dinámico para compartir información globalmente, para incluir tanto entornos interiores como exteriores, y para navegar por espacio y tiempo.

- **Servicios geoespaciales:** las preocupaciones clave se han desplazado desde la provisión de información a la entrega de conocimiento geoespacial, desde el mapeo aleatorio hasta el monitoreo dinámico y la predicción de las tendencias futuras, y desde las soluciones de escritorio tradicionales a las plataformas en la nube mediante servicios web. El big data geoespacial llegó para quedarse y exige un nuevo examen de lo que la teoría geoespacial, métodos y sistemas de aplicación existentes son capaces de manejar. Existe un inmenso desafío para proporcionar infraestructuras de datos espaciales y servicios relacionados que sean sólidos y puedan satisfacer la necesidad de proporcionar información a los responsables de la toma de decisiones, de una manera que sea útil, comprensible y fácil de usar.

- **Interacción disciplinaria:** la separación entre fotogrametría de corto alcance y aérea, se ha vuelto cada vez más borrosa. La percepción remota y la ciencia

de la información espacial están más estrechamente integradas en muchos sistemas operativos, y más conocimientos y principios específicos de dominio se incorporarán en el procesamiento y análisis de datos geoespaciales tradicionales de geometría dominante.

Este documento ha identificado y discutido temas de investigación para que la comunidad ISPRS aborde en el futuro. Nuestro objetivo principal ha sido llamar y movilizar a todos los científicos, profesionales y partes interesadas de la ISPRS a continuar mejorando nuestra comprensión y capacidad relacionadas con la generación de información desde imágenes, y a proporcionar conocimiento geoespacial que permita a la humanidad enfrentar los desafíos que se avecinan, por ejemplo, por cambio global, la detección ubicua y la demanda de información en tiempo real. La implementación de esta visión científica y agenda de investigación de la ISPRS, requiere de más educación y de un esfuerzo mayor, así como también colaboración internacional e interdisciplinaria. Necesitamos promover el uso de imágenes en otras profesiones, atraer a científicos y profesionales jóvenes, involucrar a una nueva generación de investigadores y usuarios, educar a nuestros socios sobre nuestras fortalezas, y desarrollar alianzas internacionales innovadoras entre investigadores y agencias operativas. Aquí es donde la Comisión V de la ISPRS sobre educación y extensión desempeñará un papel central. La Comisión V se ocupa de la educación, capacitación, creación de capacidades y la divulgación en todas las áreas relacionadas con la ISPRS. También es la comisión de origen del Consorcio Estudiantil ISPRS.

Algunos de los desarrollos científicos y desafíos discutidos también plantean problemas legales y políticos. Por ejemplo, el uso de UAS plantea problemas relacionados con la seguridad y la privacidad. Los datos satelitales de alta resolución también generan preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad nacional, al igual que las cámaras de vigilancia combinadas con algoritmos de rastreo. Otro tema importante de política es el acceso a datos y software, y si los datos y herramientas recopilados y desarrollados con el dinero de los contribuyentes deberían ser gratuitos. Estos problemas deben continuar siendo abordados en el futuro y la ISPRS puede desempeñar un rol importante en tales discusiones. Con esta visión científica general y la nueva estructura de la comisión, la ISPRS está bien posicionada como una organización científica relevante, dinámica y con visión de futuro, dedicada a obtener y utilizar información desde imágenes en el siglo XXI.

1.1.6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer al primer vicepresidente de la ISPRS, Orhan Altan, a la directora del congreso, Lena Halounová, al presidente del IPAC, Gunter Schreier y al profesor Wenzhong Shi (Universidad Politécnica de Hong Kong), al profesor Stephan Winter (Universidad de Melbourne), por sus contribuciones al presente capítulo. También agradecemos a los miembros honorarios de la ISPRS, a los miembros regulares, a los presidentes de las comisiones técnicas, y a otros oficiales de la ISPRS, por sus valiosos comentarios y sugerencias. Finalmente, los autores agradecen a Christine Jeans, de la Universidad de Newcastle, por su ayuda en la preparación de las figuras.

1.2 Avances del Sistema Nacional de Coordinación de Información Territorial (SNIT), la Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE) de Chile

Pablo Morales Hermosilla

Secretaría Ejecutiva SNIT del Ministerio de Bienes Nacionales, Santiago, Chile

1.2.1. Introducción

La información geográfica se encuentra cada vez más presente en una amplia gama de actividades, tales como la gestión de desastres, el manejo de recursos naturales y la prestación de servicios públicos, entre otras importantes temáticas. El contar con una instancia de coordinación multisectorial que articule a los organismos del Estado y sirva como punto de entrada a la información geográfica con carácter de pública de forma expedita, interoperable y desde las fuentes oficiales, es un aporte al país que realiza el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), la Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE) de Chile.

El SNIT tiene por misión "llevar adelante iniciativas para promover que la información geográfica pública se encuentre accesible a los organismos de la administración del Estado y ciudadanía en general, para dar soporte a la toma de decisiones y la formulación de políticas mediante la coordinación interinstitucional, el uso de plataformas tecnológicas modernas y la promoción de normas y recomendaciones técnicas" (SNIT, 2016). En este sentido, y para cumplir con la misión enunciada, el SNIT posee como marco institucional el Decreto Supremo número 28 del año 2006 (D.S. N°28/2006), según el cual esta secretaría es un sistema de coordinación permanente entre los órganos del Estado que generan y usan información territorial, orientado a la gestión moderna de este tipo de información, facilitando el acceso igualitario, oportuno y eficiente de los ciudadanos y las autoridades del país a la información territorial, y fomentando el uso de las herramientas de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones (TICs), especialmente, internet.

El D.S. N°28/2006 (Ministerio de Bienes Nacionales, 2006) señala que el SNIT está integrado por un Consejo de Ministros de Información Territorial, responsable de su coordinación superior, y por un secretario ejecutivo, responsable de la coordinación operativa de las distintas instancias públicas que participan de este sistema. El Consejo de Ministros de la Información Territorial se encuentra integrado actualmente por el ministro de Bienes Nacionales, quien lo preside, y por los ministros de Interior, de Relaciones Exteriores, de Defensa Nacional, de Hacienda, de Economía, de Desarrollo Social, de Educación, de Obras Públicas, de Salud, de Vivienda y Urbanismo y de Agricultura. Además, se creó un Comité Técnico de Coordinación Interministerial, cuya función es asesorar y apoyar al secretario ejecutivo en lo relativo a las políticas de gestión de la información territorial. A nivel de cada región del país, se establece que es el intendente correspondiente el responsable de la coordinación propia del sistema, quien delega su función en un coordinador regional. En las coordinaciones regionales SNIT, participan representantes de los gobiernos regionales, las secretarías regionales ministeriales (SEREMI), municipalidades y, en algunos casos, la academia.

Si bien el marco institucional dado por el D.S. N°28/2006 entrega el sustento para el funcionamiento de SNIT, actualmente, la gestión de información geográfica se ha masificado en múltiples ámbitos. Las instituciones públicas son parte importante de esto, por lo que, dado que los requerimientos de este tipo de información han aumentado de forma significativa, se hace necesario contar con una legislación moderna que permita el acceso de forma más expedita a la información geográfica con carácter de pública.

Aunque el marco institucional (D.S. N°28/2006) acota las instituciones que conforman el SNIT, este Sistema Nacional de Coordinación promueve y apoya el desarrollo de IDEs en los distintos ministerios e instituciones del país,

con el ánimo de establecer una estructura distribuida de nodos proveedores y consumidores de información geográfica de forma remota e interoperable, valiéndose para ello de normas y estándares nacionales e internacionales para la gestión y transferencia de datos geográficos.

A la fecha existen en el país seis ministerios con IDEs establecidas, todos ellos se encuentran conectados de forma interoperable a la IDE de Chile, estos son: Ministerio de Agricultura, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Energía, Ministerio de Medio Ambiente, Ministerio de Minería y Ministerio de Vivienda; y se encuentran en desarrollo: el Ministerio de Defensa, Ministerio de Relaciones Exteriores, Ministerio de Transporte, Ministerio de Justicia, Ministerio de Salud, Ministerio del Interior, Ministerio de Desarrollo Social, Ministerio de Bienes Nacionales y el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo. A nivel de gobiernos regionales, se puede señalar que todas las regiones del país cuentan con coordinaciones activas o en proceso de consolidar sus IDEs.

1.2.2. Grupos de trabajo y Comité Nacional de Estándares de Información Geográfica

A nivel sectorial, SNIT coordina a los organismos del Estado en materias de información geográfica mediante grupos de trabajo; y en el ámbito normativo, trabaja mediante un Comité Nacional de Estándares de Información Geográfica. Los grupos de trabajo son: grupo multisectorial para gestión de emergencias y desastres, grupo de cartografía de ejes viales, grupo de división político-administrativa.

El grupo multisectorial para gestión de emergencias y desastres tiene por objetivo coordinar, ordenar y sistematizar las acciones del Estado de Chile en torno al manejo de información geográfica o geoespacial, ante una situación de desastre. Su funcionamiento surge de la necesidad de satisfacer los requerimientos de información geográfica digital que se manifestaron a partir de los desastres naturales ocurridos el año 2015.

Entre los hitos de este grupo de trabajo, destaca la formulación de una propuesta de protocolo para la generación, traspaso, análisis y publicación de información geoespacial durante emergencias producidas por desastres naturales. Una vez terminado y sancionado, este protocolo será aplicado en las instituciones que conforman este grupo de trabajo y en aquellas que sean convocadas de acuerdo al tipo de desastre que ocurra: terremoto, tsunami, erupción volcánica, incendio forestal, desborde de cauces naturales/ movimientos en masa, inundaciones urbanas.

Otro punto a destacar del grupo de emergencias es el desarrollo coordinado de un visor de mapas que se publica, en forma breve, una vez ocurrido un episodio de desastre. En el visor se despliega el área de afectación del fenómeno, el estado de la infraestructura pública dañada y otra información relevante para hacer frente a la contingencia. El visor de mapas de desastres ha tenido una relevancia ya demostrada en múltiples episodios catastróficos, como: el tsunami y terremoto de Coquimbo (año 2015), las lluvias y aluviones de norte del país (año 2015), la erupción del volcán Calbuco (año 2015) y en el incendio del año 2016 en Valparaíso, entre otros. En la figura 5 se muestra un ejemplo de despliegue de información a través del visor de mapas.

Otro grupo de trabajo del SNIT es el de cartografía de ejes viales, el que se encuentra integrado por el Ministerio de Economía, el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), el Servicio de Impuestos Internos (SII), Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y el Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO). Su objetivo es obtener una capa única y pública de ejes viales del país con capacidades de geocodificación. La geocodificación es el proceso de transformar una descripción de una ubicación (por ejemplo, un par de coordenadas, una dirección o nombre de un lugar), en una ubicación de la superficie de la Tierra (ESRI, 2016). En este caso, se trata de poder llevar listas de direcciones a localizaciones.

El desarrollo de una cartografía única y pública de ejes viales, es un producto que vendrá a satisfacer la creciente demanda de los organismos del Estado de localizar en terreno información que actualmente se maneja a nivel de tablas, permitiendo aumentar sus capacidades de análisis espacial y con ello, entregar a las autoridades información de fácil interpretación que les permita tomar mejores decisiones en beneficio de la ciudadanía.

Entre los hitos de este grupo de trabajo se encuentra el desarrollo de una metodología en base a softwa-

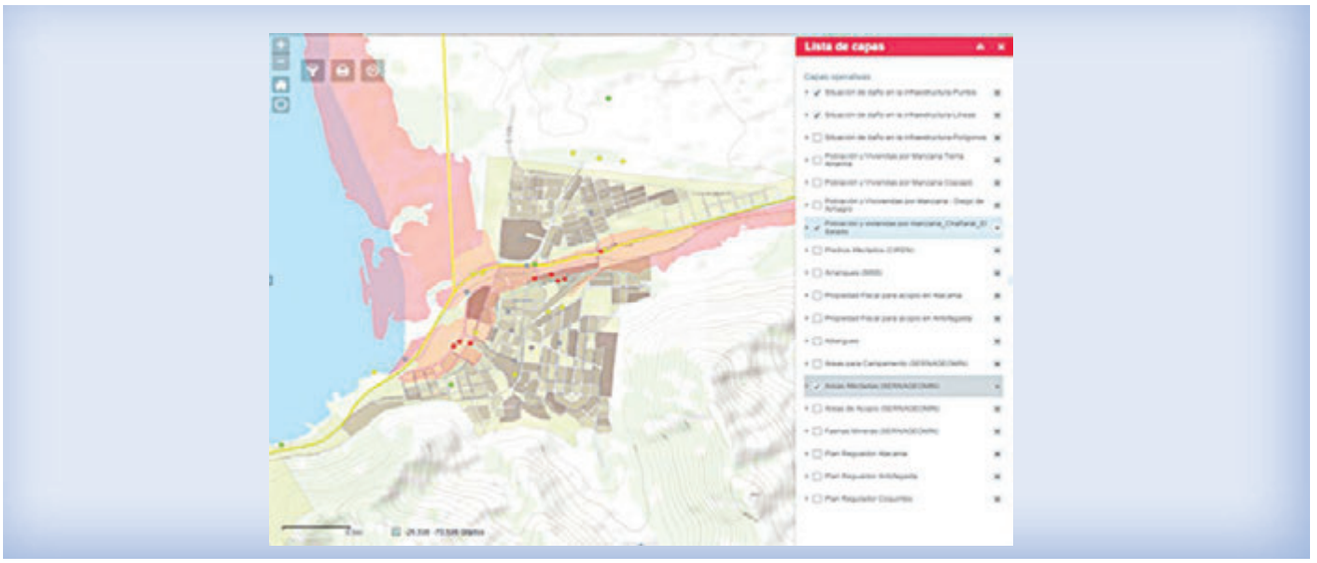


Figura 5: Despliegue de área de afectación de aluvión de Chañaral e infraestructura pública afectada. *Fuente: Elaboración propia.*

re de Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la integración de las capas de ejes viales de los distintos ministerios e instituciones participantes; y el desarrollo de una especificación de producto para los ejes viales, en base a la recomendación técnica Uso de la Norma Chilena ISO 19131 (Morales y Tapia, 2015). Se puede mencionar que se han tenido avances parciales con los ejes viales y diccionarios de calles de las ciudades de Arica, Antofagasta, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas. Se esperaba, durante el año 2017, terminar una primera versión de este producto en lo que se refiere a totalidad de las capitales regionales del país.

Finalmente, cabe mencionar el grupo de trabajo de división político-administrativa, el que tiene por objetivo entregar la representación cartográfica de los límites internacionales y administrativos internos del país. En esta iniciativa participan la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), la Dirección Nacional de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), el Instituto Nacional de Estadística (INE) y el Instituto Geográfico Militar (IGM). Se ha consensuado en este grupo de trabajo que la institución responsable del límite internacional es DIFROL, y que los límites internos corresponden a SUBDERE.

1.2.3. Comité Nacional de Normas de Información Geográfica

Adicional a los grupos de trabajo, y con motivo de cumplir una de las funciones principales de SNIT, vinculada a recomendar normas para la gestión de la información territorial, el sistema ha instaurado el Comité Nacional de Normas de Información Geográfica, el que trabaja de forma coordinada con el Instituto Nacional de Normalización (INN). Esta instancia está compuesta por múltiples organismos públicos, privados y académicos del país, los que desarrollan las siguientes actividades:

- Publicación de Normas Chilenas ISO (International Organization for Standardization) de Información Geográfica.
- Publicación de recomendaciones técnicas para facilitar el uso de las Normas Chilenas de Información Geográfica.
- Capacitación permanente en materias de gestión de información geográfica mediante la aplicación de normas ISO.
- Participación en la discusión internacional de las Normas de Información Geográfica actualmente en desarrollo por ISO.
- Participación internacional en reuniones presenciales de ISO.
- Publicación del libro Aplicación de Normas Chilenas de Información Geográfica.
- Acceso para los organismos públicos a las normas geográficas ISO consideradas como fundamentales.
- Participación en el desarrollo del Glosario multilingüe ISO/TC 211.

A continuación, se detallan cada una de estas actividades.

1.2.3.1. Publicación de Normas Chilenas ISO de Información Geográfica (NCh-ISO)

La International Organization for Standardization (ISO), desde el año 1994 ha instaurado el Comité Técnico 211, conocido como ISO/TC 211, que a la fecha ha producido 73 normas para los distintos ámbitos de la gestión de la información geográfica digital. A estas normas se les denomina de la familia 19100.

Actualmente, el Comité Nacional cuenta con 28 normas traducidas, las cuales han sido consensuadas por múltiples instituciones públicas, privadas y académicas del país. Las normas chilenas (NCh-ISO) de la familia 19100 vigentes y no vigentes están detalladas en tabla 1.

1.2.3.2. Publicación de recomendaciones técnicas para facilitar el uso de las Normas Chilenas de Información Geográfica

La Secretaría Ejecutiva SNIT, pensando en facilitar el uso de las NCh-ISO de Información Geográfica, ha identificado un conjunto de normas que resultan relevantes para la gestión de información geoespacial. En tal sentido, se ha propuesto desarrollar recomendaciones prácticas para facilitar su aplicación. Hasta el momento se ha desarrollado la recomendación técnica de la norma NCh-ISO 19131 (Morales y Tapia, 2015), en la que participaron 21 profesionales de instituciones públicas, privadas y académicas. Este documento se considera esencial en la fase de planificación de la información geográfica, por lo que es clave en el ciclo de vida de la información y la posterior evaluación de calidad a los productos geográficos. Mediante este documento, se entregan lineamientos para describir detalladamente los requerimientos que debe cumplir un conjunto de datos de información geográfica. Su aplicación puede servir para guiar el desarrollo de términos de referencia, o bien, ser de utilidad para especificar a un tercero el desarrollo de productos de información geográfica.

Utilizar especificaciones de un producto proporciona una descripción detallada del producto geográfico que se requiere, permitiendo a la parte solicitante guiar los procesos para la elaboración de información, de acuerdo a necesidades específicas, y crear las condiciones para evaluar la calidad de los productos o los procesos.

1.2.3.3. Capacitación permanente en materias de Gestión de Información Geográfica mediante la aplicación de normas ISO

Esta tarea se desarrolla mediante talleres mensuales y abiertos sobre temas teóricos y prácticos de normas de información geográfica. Su enfoque principal ha estado en compartir experiencias en torno a temas de especificaciones de producto y calidad de datos. Se puede acceder al programa de capacitación anual y a más información de estas actividades, en el siguiente vínculo web: http://www.ide.cl/acerca-de/que-es-una-ide/normas-y-estandares/95-comite-nacional-de-estandares-de-informacion-geografica.html.

1.2.3.4. Participación en la discusión internacional de las Normas de Información Geográfica actualmente en desarrollo por ISO

Participar activamente en la discusión de las normas que se encuentran en desarrollo por ISO/TC 211 conlleva emitir el voto nacional de aprobación, abstención o en contra de la publicación. Para ello, el comité estudia las normas internacionales y formula, cuando corresponde, observaciones que son enviadas a ISO/TC 211 para su consideración. Durante el año 2016, se enviaron observaciones nacionales a las siguientes normas internacionales:

- ISO/DIS 19127 Geographic information - Geodetic register.
- ISO/CD 19165 Geographic information - Preservation of digital data and metadata.

1.2.3.5. Participación internacional en reuniones presenciales de ISO

Nuestro país ha sido el primero en Latinoamérica que ha participado de una reunión internacional de ISO/TC 211. A la fecha se ha participado de tres instancias internacionales, y la representación está abierta a cualquier miembro del comité que cumpla los requerimientos establecidos por el Instituto Nacional de Normalización (INN).

1.2.3.6. Publicación del libro Aplicación de Normas Chilenas de Información Geográfica

En el marco del trabajo desarrollado por el comité, se publicó un libro que tiene por objetivo facilitar la aplicación

Tabla 1: Normas Chilenas de Información Geográfica (NCh-ISO). *Fuente: Elaboración propia.*

N°	Norma	Detalle
1	NCh-ISO19101:2010	No vigente - Modelo de referencia reemplazada por NCh19101-1:2014
2	NCh-ISO19101/2:2010	Modelo de referencia - Parte 2: Imágenes
3	NCh-ISO19103:2010	Lenguaje de esquema conceptual
4	NCh-ISO19104:2010	Terminología
5	NCh-ISO19105:2011	Conformidad y pruebas
6	NCh-ISO19106:2011	Perfiles
7	NCh-ISO19109:2011	Reglas para esquema de aplicación
8	NCh-ISO19110:2012	Metodología para catalogación de features
9	NCh-ISO19111:2011	Establecimiento de referencias espaciales mediante coordenadas
10	NCh-ISO19113:2012	No vigente - Principios de calidad reemplazada por NCh19157
11	NCh-ISO19114:2012	No vigente - Procedimientos de evaluación de la calidad reemplazada por NCh19157
12	NCh-ISO19115:2011	No vigente - Metadatos reemplazada por NCh-ISO19115-1
13	NCh-ISO19115/2:2011	Metadatos - Parte 2: Extensiones para imágenes y datos de grilla
14	NCh-ISO19117	Representación
15	NCh-ISO19119:2012	Servicios
16	NCh-ISO19128:2012	Interfaz de Web Map Server (WMS)
17	NCh-ISO19131:2012	Especificaciones de productos de datos
18	NCh-ISO19136:2012	Lenguaje de Marcado Geográfico (GML)
19	NCh-ISO19139:2011	Metadatos - Implementación de esquema XML
20	NCh-ISO19142:2012	Web Feature Service (WFS)
21	NCh-ISO19152:2013	Modelo del Dominio de la Administración de Tierras (LADM)
22	NCh-ISO19157:2014	Calidad de datos
23	NCh-ISO19115-1:2014	Metadatos - Parte 1: Fundamentos
24	NCh-ISO19153:2014	Modelo de referencia para la administración de derechos digitales geoespaciales
25	NCh-ISO19101/1:2014	Modelo de referencia - Parte 1: Principios básicos
26	NCh-ISO19158:2014	Aseguramiento de la calidad del suministro de datos
27	NCh-ISO19145:2015	Registro de representaciones de localizaciones geográficas puntuales
28	NCh-ISO19122:2016	Cualificación y certificación de personal

práctica de las normas chilenas de información geográfica. Sin embargo, desde que se publicó la primera versión se han desarrollado y actualizado nuevas normas, por lo que, durante el segundo semestre del año 2017, se publicó una nueva versión que incluye todas las normas actualmente vigentes. Se puede leer la primera versión del libro en la siguiente dirección web: http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/20121206_IDE_Chile_documento_tecnico_normas.pdf.

1.2.3.7. Acceso para los organismos públicos a las normas geográficas ISO consideradas fundamentales

En el marco de las reuniones y la experiencia adquirida durante los cinco años de funcionamiento del Comité, se ha identificado un conjunto de normas que son consideradas esenciales para la gestión de información geográfica. En tal sentido, la Secretaría Ejecutiva del SNIT ha gestionado con el INN el acceso gratuito a este conjunto de normas a los organismos públicos, y de este modo cumplir con el lineamiento dispuesto en el D.S. N°28/2006, Artículo 4, en lo referido a proponer normas para que la información territorial sea interoperable.

1.2.3.8. Participación en el desarrollo del Glosario multilingüe ISO/TC 211

Una actividad relevante, desarrollada en colaboración y consulta con los organismos miembros del comité, ha sido la participación en el desarrollo de la versión, en idioma español, del *Glosario de términos multilingüe* de ISO/TC 211. El objetivo del glosario es fomentar la coherencia en el uso y la interpretación de los términos geoespaciales. Este documento, ya traducido a 14 idiomas, se encuentra en formato Excel y está disponible desde el mes de agosto del año 2015, en el siguiente vínculo: http://www.isotc211.org/TC211_Multi-Lingual_Glossary-2016-06-28_Published.xls

El *Glosario de términos multilingüe* incluye los términos principales que se utilizan en las normas de información geográfica, su definición, abreviaciones, referencia y notas explicativas, según corresponda (IDE Chile, 2015). Actualmente, en nuestro idioma se encuentran disponibles 941 términos, incluyendo equivalencias nacionales, por ejemplo, el vocablo feature que ha sido consensuado y adoptado en nuestro país por el comité nacional.

1.2.4. Modelo de gestión de información territorial para el desarrollo de una IDE

Con el objetivo de orientar a las instituciones en el proceso de conformación de sus IDEs y direccionar su desarrollo, la secretaría ejecutiva SNIT ha trabajado en un modelo de gestión. Un modelo se puede definir como un punto de referencia para imitar o reproducir. El objetivo de recomendar un modelo de gestión de información territorial para el desarrollo de una IDE, es definir un conjunto de pautas adecuadas que sirvan como punto de referencia, para que las IDE en formación o en desarrollo sean exitosas.

El modelo propuesto por SNIT se asienta en el elaborado por los profesores Robert Kaplan y David Norton, en el libro *The Execution Premium* que, según los expertos, resulta uno de los mejores modelos que existe en la actualidad y es ampliamente utilizado a nivel internacional en empresas y organizaciones gubernamentales. En la figura 6 se presenta el resumen el modelo de Kaplan y Norton (2008).

Como se puede inferir de la figura 6, el modelo desarrollado por Kaplan y Norton consta de dos componentes principales: el estratégico y el operativo. Estos dos componentes se dividen en etapas y elementos que se deben abordar y desarrollar con la colaboración de las autoridades, directivos y profesionales de la institución.

Para abordar el componente estratégico que involucra las fases 1 y 2 (ver figura 7), se recomienda afrontar temas tales como: definición, análisis e implementación.

Para el desarrollo de componente operativo que involucra la fase 3 (ver figura 7), además de lo definido en el modelo, se agrega el ciclo de vida de la información geográfica, seis elementos de gestión y las normas del comité ISO/TC 211 de información geográfica/geomática (ver figura 8).

La fase 4, monitoree y aprenda, propone evaluar continuamente el funcionamiento del modelo para cada componente y la fase 5, compruebe y adapte su estrategia, pretende mejorar la estrategia en cada revisión.

1.2.5. Aplicaciones del SNIT para el acceso a la información geográfica pública

Las aplicaciones del SNIT tienen por objetivo documentar, visualizar, descargar, educar e informar respecto a la información territorial pública del país. Las principales aplicaciones de SNIT, son las siguientes:

- Geoportal de Chile (Catálogo nacional de metadatos y Visor de mapas SNIT).
- Sitio web SNIT.
- Geonodo.

A continuación, se describe cada una de ellas:

a. Geoportal de Chile: permite documentar, buscar y visualizar en la web información geoespacial pública por medio del catálogo nacional de metadatos y el Visor de mapas SNIT. Ambas herramientas gozan de una arquitectura de alta disponibilidad de tres capas (de presentación, aplicaciones y datos). Tanto el Catálogo nacional de metadatos como el Visor de mapas SNIT son desarrollados en base a software de ESRI (Geoportal Server y ArcGIS Server, respectivamente).

- **Catálogo nacional de metadatos:** permite documentar y buscar la información geográfica que disponibilizan mediante fichas de metadatos alrededor de 35 organismos públicos. Actualmente existen 11.401 fichas, en cada una de ellas se incluye información respecto al nombre de la institución responsable, datos de contacto y características técnicas, así como las coordenadas de referencia o la escala del recurso.

  Los metadatos presentes en el catálogo nacional siguen las especificaciones de las normas ISO de documentación de información geográfica y la estructura

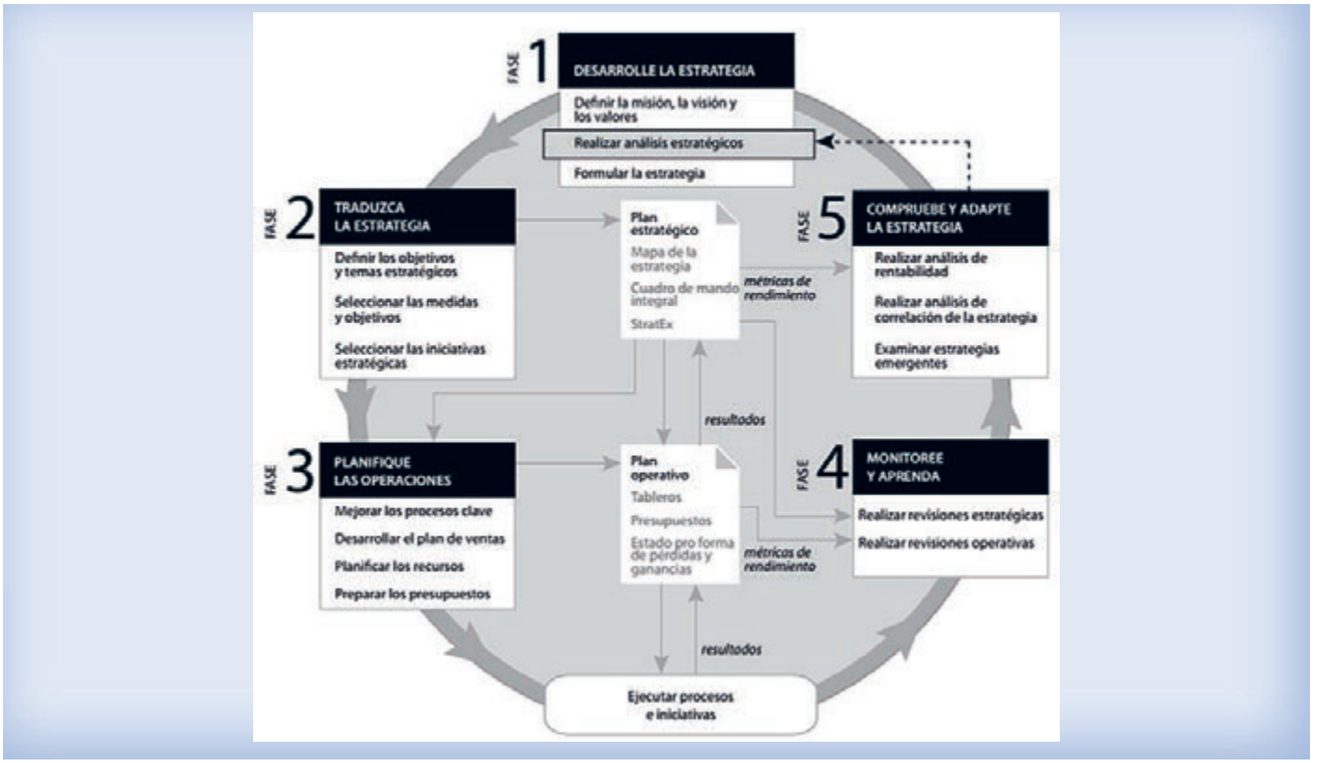


Figura 6: Modelo Execution Premium. *Fuente: Kaplan y Norton (2008).*



Figura 7: Componente estratégico. *Fuente: Elaboración propia.*



Figura 8: Descripción del componente operativo. *Fuente: Elaboración propia.*

del perfil nacional de metadatos, conforme a la norma ISO 19115.

El catálogo nacional posee la capacidad de desarrollar harvesting mediante el estándar Catalog Service for the Web (CSW) (OGC, 2014), lo que permite conectarse de forma remota a otros catálogos que sean conformes a este protocolo y publicar de forma automatizada su información en el catálogo nacional. Esto sucede actualmente con los catálogos de la IDE del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, y el catálogo del Servicio Nacional de Geología y Minería. Se puede acceder al catálogo nacional de metadatos en la siguiente dirección web: http://www.geoportal.cl/geoportal/

- **Visor de mapas del geoportal de Chile:** es una herramienta que permite visualizar, actualmente, 153 mapas digitales provistos por múltiples servicios públicos. Estos mapas digitales se pueden desplegar, superponer, consultar sus atributos alfanuméricos y transparentar.

  Como se comentó en párrafos anteriores, el SNIT promueve un modelo distribuido de información, por lo que tiende a que la información que se publique en el visor de mapas SNIT proceda directamente de las instituciones proveedoras, y sea conectada mediante estándares que aportan interoperabilidad y actualización inmediata, como el estándar Web Map Service (WMS) o el Web Feature Service (WFS). En este sentido, alrededor de 60% de los mapas digitales publicados en el visor SNIT corresponden a servicios de mapas que son conectados mediante la interoperabilidad que aportan los estándares de información geográfica. Se puede acceder al Visor de mapas SNIT en la siguiente dirección web: http://www.geoportal.cl/Visor/

b. Sitio web de SNIT: este sitio web se ha transformado no solo en una herramienta para informarse de las actividades de la coordinación SNIT, sino que en el principal punto de acceso para descargar la información geográfica pública del país. Esto gracias a la inclusión, desde el año 2016, de un centro de descarga de datos que a la fecha consta de más de 650 capas vectoriales e imágenes raster. Entre la información dispuesta destacan: capas vectoriales de deslindes prediales, ejes viales, zonas de inundación por tsunami e imágenes aéreas ortorectificadas de resolución submétrica, entre otros valiosos recursos. Cada uno de ellos cuenta con su respectiva documentación ficha de metadatos.

Se puede acceder al sitio web SNIT en la siguiente dirección web: http://www.ide.cl/. También, puede acceder de forma directa al centro de descargas de información geográfica en el siguiente vínculo: http://www.ide.cl/descarga/capas.html

c. Geonodo: corresponde a una solución de software diseñada por la secretaría ejecutiva del SNIT. Su finalidad es ofrecer a los organismos del Estado la capacidad de administrar visores de mapas de una manera fácil e intuitiva, en pro de favorecer la gestión pública. Geonodo está construido con el framework YII y se encuentra integrado a las soluciones Geonetwork (servidor de catálogo) y GeoServer (servidor de mapas). Utiliza como lenguaje de programación PHP y opera con la base de datos Postgres 9.2. Una de las ventajas principales de Geonodo es que evita al usuario la complejidad de utilizar software como Geonetwork o GeoServer a través de interfaces simples. Geonodo se encuentra instalado en las instituciones que se listan en la tabla 2.

Actualmente, se trabaja en incorporar nuevas funcionalidades a Geonodo añadiendo herramientas de inteligencia de negocios (BI) y captura de datos en terreno, entre otras. Se esperaba contar con una nueva versión del software dentro del segundo semestre del año 2017.

1.2.6. Actividad internacional SNIT

Entre las funciones descritas en el artículo 4 del D.S. Nº28/2006, que da origen a SNIT, se menciona: "Colaborar en la presencia y representación del país en la comunidad internacional de datos geoespaciales, sistemas de información territorial y todo tipo de instancias relacionadas con la gestión moderna de la información territorial".

En este marco, SNIT participa activamente en el ámbito internacional siendo una de las instancias más destacadas el Comité de Expertos de Naciones Unidas en Gestión Global de Información Geoespacial, UN-GGIM, donde cabe mencionar la participación en el Comité Regional de esta instancia internacional conocido como UN-GGIM: Américas. En este Comité Regional Chile, mediante el se-

Tabla 2: Listado de instituciones donde se ha instalado Geonodo. *Fuente: Elaboración propia.*

INIA La Cruz	DIBAM	GORE región de Valparaíso	SERVIU O'Higgins
GORE Araucanía	Fundación Integra	Universidad Católica del Norte	SSAN (Salud Araucanía Norte)
GORE Los Lagos	SERNATUR	Municipalidad de Conchalí	GORE región de Atacama
GORE región de Antofagasta	Bomberos (uso interno)	SENADIS	MOP (uso interno)
SISS	GORE región del Maule	SENCE	

cretario ejecutivo SNIT, ocupa la vicepresidencia y dirige el grupo de trabajo de evaluación y promoción de IDE, además de participar mediante su encargado de área de información geográfica y normas, en el grupo de trabajo de normas, estándares y especificaciones técnicas de UN-GGIM: Américas.

Otra de las actividades internacionales destacadas de SNIT, es la participación en el proyecto fortalecimiento de las infraestructuras de datos espaciales de los países de la Asociación de los Estados del Caribe. En el marco de este proyecto internacional, la secretaría ha participado dictando capacitaciones en metadatos y geoportales a más de 20 países. Durante el año 2017 se apoyó a los países del Caribe mediante una capacitación en evaluación y control de calidad de información geográfica.

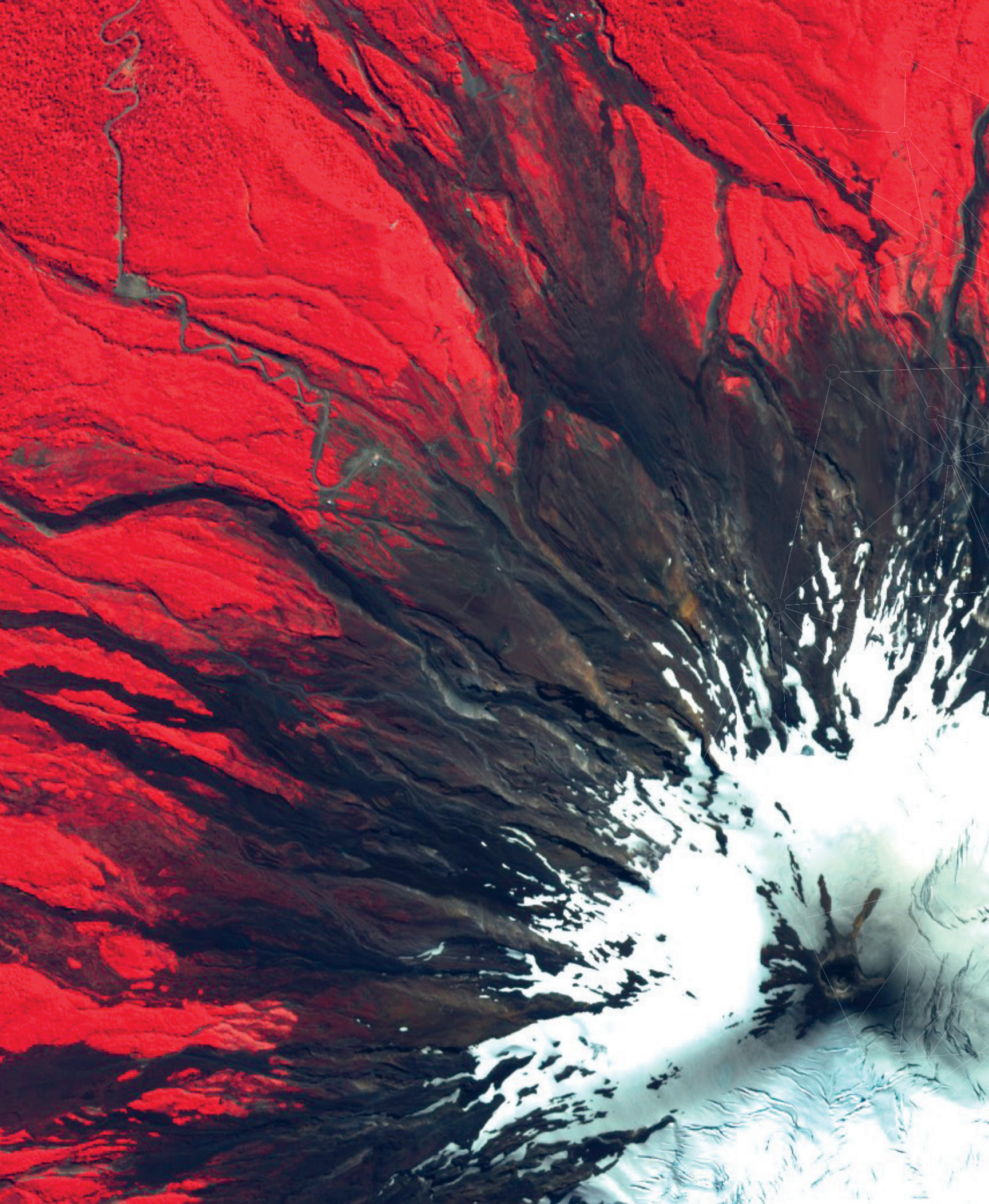
Otra instancia internacional donde SNIT ha participado activamente ha sido en los proyectos panamericanos de asistencia técnica del Instituto Panamericano de Historia y Geografía (IPGH). El IPGH es un organismo especializado de la Organización de Estados Americanos (OEA) que posee una trayectoria de más de 88 años, llevando adelante iniciativas y proyectos internacionales vinculados a la gestión de información geográfica. SNIT ha participado de los proyectos internacionales Diagnóstico sobre la situación actual de las metodologías y procedimientos empleados para la evaluación de calidad de la Información Geográfica (IG), y del proyecto Usabilidad de geoportales IDE. Estas instancias le han permitido a la secretaría adquirir experiencia internacional y conocimiento en las temáticas de evaluación de usabilidad de geoportales y evaluación de calidad.

Finalmente, cabe destacar la firma del convenio cooperación con la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) del gobierno de Ecuador, en materia de información territorial y geoespacial, con especial énfasis en los desastres. Este acuerdo ha permitido la implementación del proyecto de cooperación Información territorial para contribuir al desarrollo sustentable del Ecuador, que cuenta con respaldo del fondo Chile de la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) y del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). En el marco de este proyecto y como fase inicial, se ha realizado una primera visita que tuvo por objetivo dar a conocer a instituciones públicas de Ecuador, una propuesta de modelo de gestión de información territorial que permitirá la realización de un diagnóstico de la situación actual de ese país, respecto a la provisión de información geoespacial en situación de desastre.

1.2.7. Conclusión

Se puede concluir que, si bien aún faltan elementos para llegar a establecer una IDE nacional avanzada, el trabajo desarrollado hasta el momento por SNIT y su Secretaría Ejecutiva ha demostrado alcanzar un grado de madurez importante, consolidando la IDE Nacional mediante la conformación de grupos de trabajo, actuando en situaciones de desastre, entregando normas y recomendaciones técnicas, generando modelos de gestión que sirven de guía para el establecimiento de IDE en otros organismos públicos, fortaleciendo capacidades geoespaciales y dando acceso a herramientas tecnológicas a la comunidad, que no solo permiten buscar y visualizar información geográfica web, sino que también descargar información de forma directa. Todas estas acciones han permitido democratizar el acceso, uso y gestión de la información geográfica pública para que sea empleada en iniciativas y proyectos por organismos del Estado, el sector privado, instituciones académicas y la ciudadanía en general, trayendo consigo beneficios como: contar con una sociedad más informada, fomentar el desarrollo sustentable, ahorrar recursos al Estado, incentivar el emprendimiento, evitar la duplicación del gasto, tomar decisiones políticas acertadas y, en definitiva, promover el bien común de nuestra sociedad.







SECCIÓN 2

TECNOLOGÍA PARA LA CAPTURA DE DATOS

"La adquisición de datos es una necesidad, razón por lo cual los sistemas de adquisición de datos y aplicaciones de software son herramientas esenciales en una variedad de campos. Por ejemplo, científicos de investigación confían en las herramientas de obtención de datos para el análisis y la medición de sus proyectos de laboratorio. Por lo tanto, como un diseñador de un sistema de adquisición de datos, usted debe tener un conocimiento en profundidad de cada parte de los sistemas y programas que usted genere".

Maurizio Di Paolo Emilio (Circuit Cellar)

SECCIÓN II

Tecnología para la captura de datos

Esta sección trata de temas relacionados con la tecnología geoespacial desarrollada para la captura de datos terrestres. El primer capítulo presenta un resumen de los diferentes métodos actualmente empleados por los diversos grupos de investigación, agencias espaciales y operadores satelitales para estimar, monitorear y actualizar los parámetros de calibración de sensores ópticos en el rango VNIR. Dentro de todas las actividades ejecutadas con posterioridad al lanzamiento de una misión de observación de la Tierra, la calibración radiométrica absoluta es de suma importancia debido a que permite compensar la degradación que comienza a afectar al sensor una vez que el satélite es puesto en órbita. Este proceso de degradación se traduce en variaciones de la respuesta radiométrica que deben ser corregidas si se requiere conocer con precisión la intensidad del flujo radiante captado por el sensor, lo cual a su vez es un requerimiento tanto para el desarrollo de aplicaciones cuantitativas en percepción remota como para la integración de datos adquiridos por otras plataformas en dichos estudios. Además, el capítulo describe la investigación conjunta realizada para la calibración radiométrica absoluta del sensor a bordo del satélite chileno FASat-Charlie, enfatizando las actividades de terreno realizadas en forma periódica en el Desierto de Atacama y la calibración cruzada sobre el sitio CEOS de Frenchman Flat, EE.UU.

El segundo capítulo muestra una visión general de los sensores activos y su principio de funcionamiento enfocándose en los sistemas de radar y su capacidad para detectar información de un objetivo de interés, mostrando los parámetros principales que gobiernan esta capacidad y las relaciones que permiten establecer el criterio de detección, junto con poner de manifiesto la ventaja comparativa de estos sistemas para ser utilizados en zonas donde las condiciones climáticas son normalmente adversas. Se hace una especial atención a los sistemas de radar generadores de imágenes, los que pueden estar instalados en diferentes tipos de plataforma ya sea terrestres, aéreos o aeroespaciales. Para el caso aéreo, se muestran las bases de operación de estos sistemas, que son replicables al caso aeroespacial, para luego explicar con un poco más de detalle el funcionamiento del sistema de apertura sintética. Finalmente, se muestra un ejemplo de aplicación de un sistema de radar, el que es utilizado para caracterizar hielo marino en un sector de la Antártica mediante el uso de imágenes satelitales de radar, aplicando técnicas polarimétricas para establecer la caracterización.

"Data acquisition is a necessity, which is why data acquisition systems and software applications are essential tools in a variety of fields. For instance, research scientists rely on data acquisition tools for testing and measuring their laboratory-based projects. Therefore, as a data acquisition system designer, you must have an in-depth understanding of each part of the systems and programs you create".

Maurizio Di Paolo Emilio (Circuit Cellar)

SECTION II

Technology for Data Acquire

This section deals with issues related to geospatial technology developed for the capture of terrestrial data. The first chapter presents a summary of the different methods currently used by space agencies, research groups and satellite operators in order to obtain, monitor and update the calibration parameters of optical sensors operating in the VNIR spectral range. Whithin all the post-launch activities of an earth observing mission, the absolute radiometric calibration is of paramount importance since it allows the compensation of the degradation affecting the sensor once the satellite is launched. The degradation process translates into variations in the radiometric response that must be corrected if accurate estimates of the radiant flux intensity reaching the sensor are required, which in turn is requirement either for the development of quantitative applications on remote sensing or for the integration of the data acquired by different missions into such studies. Besides, the chapter describes the joint research carried out for the absolute radiometric calibration of the sensor on board of the Chilean satellite FASat-Charlie, emphasizing the field activities periodically conducted in Atacama Desert and the cross calibration over the Frenchman Flat CEOS endorsed site, EE.UU.

The second chapter shows an overview of the active sensors and their principle of operation focusing on the radar systems and their ability to detect information of a target, showing the main parameters that govern this capacity and the relationships that allow to establish the detection criterion along with highlighting the comparative advantage of these systems to be used in areas where climatic conditions are normally adverse. Special attention is given to radar imaging systems, which can be installed on different types of platforms, whether terrestrial, aerial or aerospace. For the aerial case, the operating bases of these systems are shown, which are replicable to the aerospace case, and then explain in short more detail about the operation of the synthetic aperture system. Finally, an example of an application of a radar system, which is used to characterize sea ice in a sector of Antarctica, is shown through the use of satellite images of radar, applying polarimetric techniques to establish the characterization.



2.1 Calibración absoluta de sensores satelitales en el rango VNIR: Revisión de métodos empleados y actividades Cal/Val desarrolladas en el marco del monitoreo de FASat-Charlie

Carolina Barrientos,[a] Cristian Mattar,[b] Flavio Jorge Ponzoni[c]

[a]Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), Santiago, Chile
[b]Universidad de Aysén, Coyhaique, Chile
[c]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, Brasil

2.1.1. Introducción

Los sensores a bordo de satélites son una herramienta esencial para la adquisición de información acerca de los diversos procesos que acontecen en nuestro planeta, a distintas escalas espaciales y temporales. Esta información permite la observación y el desarrollo de modelos para detectar tendencias y monitorear variaciones en el comportamiento de diversas variables claves para el estudio de la biósfera. Aplicaciones como el monitoreo de variaciones espaciales y temporales en concentraciones de clorofila en el océano, propiedades y distribución de aerosoles y vapor de agua, temperatura de superficie terrestre y del mar, entre otras, dependen de la obtención de datos consistentes; vale decir, capturados por sensores calibrados (Chander et al., 2013; Tanstock et al., 2015). Esto hace referencia a que la respuesta del sensor ha sido determinada en laboratorio y luego, monitoreada y actualizada periódicamente tras el lanzamiento, durante toda su vida útil.

Si bien existen distintos tipos de parámetros de un sensor (geométricos, espectrales, entre otros) a ser caracterizados o calibrados, un rol preponderante tienen los de tipo radiométrico, específicamente, los parámetros de calibración absoluta. A través de la calibración absoluta se estiman los coeficientes que permiten asociar la señal detectada por el sensor a una determinada intensidad del flujo radiante para, posteriormente, obtener los valores de reflectancia en el tope de la atmósfera (Top-of-Atmosphere o TOA) y a nivel de superficie (Bottom-of-Atmosphere o BOA). Cabe destacar que esta información, que será empleada para caracterizar espectralmente una superficie o estimar parámetros de entrada para diversos algoritmos, se verá influenciada por los cambios en la respuesta radiométrica del sensor. Estas variaciones son el resultado de la sostenida exposición del sensor a las condiciones extremas del espacio exterior, sin embargo, pueden ser compensadas a través de las actividades de calibración radiométrica absoluta realizadas en vuelo.

Por otra parte, la calibración absoluta es el eslabón que hace posible la integración de información proveniente de distintas plataformas satelitales de manera consistente (Chander, 2009 y 2013; CEOS, 2017), lo que permite, entre otras cosas, incrementar la frecuencia de revisita sobre una determinada área de interés y realizar estudios multitemporales durante períodos bastante extendidos.

En el presente capítulo se entregan diversos antecedentes con el objeto de conocer la importancia del desarrollo de las denominadas actividades de calibración y validación (Cal/Val). Asimismo, se presenta una breve revisión de los principales métodos de calibración absoluta utilizados por las diversas agencias espaciales, centros de investigación y operadores satelitales. Finalmente, se dan a conocer las actividades realizadas dentro del marco de las campañas de caracterización de un sitio en el desierto de Atacama (Pinto et al., 2015), y de las investigaciones orientadas a la calibración de FASat-Charlie (Mattar et al., 2014; Barrientos et al., 2016), siendo mencionadas además, algunas alternativas contempladas con el objetivo de dar continuidad a la investigación conjunta entre el Servicio Aerofotogramétrico (SAF), el Grupo de Operaciones Espaciales (GOE) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), y diversos centros académicos, tanto nacionales como internacionales.

2.1.2. Calibración absoluta de un sensor satelital: ¿qué es y por qué es necesaria?

Según Tanstock et al. (2015), el desempeño de un sensor depende de la relación entre los dominios radiométrico, espectral, espacial, temporal y de polarización, por ende, el objetivo de un proceso de calibración es la caracterización independiente de cada uno de estos componentes. En la práctica ellos interactúan, razón por la cual deben ser conocidos antes de obtener las radiancias y reflectancias que serán utilizadas para derivar los parámetros meteorológicos, biofísicos o geofísicos requeridos para el desarrollo de estudios cuantitativos con datos capturados desde el espacio.

Con respecto al dominio radiométrico, y de acuerdo al Grupo de Calibración y Validación (WGCV) del Comité de Satélites de Observación de la Tierra (CEOS), la calibración radiométrica absoluta: "corresponde al proceso mediante el cual se cuantifica la respuesta de un sensor ante la intensidad del flujo de energía electromagnética radiante conocida y controlada, para correlacionar el valor registrado y la magnitud física medida", es decir, las ganancias absolutas por banda. En primera instancia, en la fase prevuelo, esto se realiza en laboratorio con instrumental calibrado y empleando referencias trazables bajo estándares del National Institute of Standards and Techonolgy (NIST). Luego, una vez en órbita, se ejecutan aplicando metodologías directas o vicarias.

Las actividades de Cal/Val son determinantes a la hora de afirmar si una misión satelital ha sido o no exitosa, pues el cumplimiento de los objetivos definidos durante su análisis y diseño, que deben ser alcanzados al menor costo posible, está necesariamente ligado a la capacidad de extraer o inferir la información requerida de la variable bajo estudio, dentro de ciertos márgenes aceptables de incertidumbre (Wyatt, 1991; Thome, 2001).

En relación a este punto es posible citar a Ohring et al. (2005) y Datla et al. (2011), que detallan las precisiones requeridas para que distintos parámetros, tales como albedo de superficie, irradiancia solar, temperatura, vapor de agua, ozono, CO2, color del océano, cobertura de nieve, hielo marino, entre otros, puedan ser incorporadas en estudios de tendencias a largo plazo. También se especifica la precisión de la calibración radiométrica que debe ser mantenida para garantizar que las estimaciones realizadas estén dentro de los márgenes de incertidumbre aceptables para la aplicación.

Tras el lanzamiento de un satélite, producto del fuerte stress mecánico y térmico, sus componentes comienzan a degradarse en forma progresiva, lo que conlleva efectos que deben ser periódicamente estudiados y compensados (Wang et al., 2012; Guenther, 2012). Entre las principales causas de degradación se encuentran: la exposición a radiación ultravioleta, oxidantes químicos, rayos cósmicos, energía proveniente de erupciones solares y partículas atrapadas en los cinturones radiación, abruptos cambios de temperatura y procesos de desgasificación. Estos factores afectan a todos los dispositivos electrónicos, paneles solares y a los componentes de los sensores a bordo (Tribble et al., 2005), alterando la respuesta radiométrica del instrumento que capta la información que posteriormente será utilizada para derivar parámetros biogeofísicos de las distintas coberturas y ecosistemas de nuestro planeta (Barker, 1985; Slater et al., 1987; Meckler y Kauffman, 1995; Barnes et al., 2001; Tansock et al., 2015).

A modo de ejemplo, podemos citar algunas de las cifras recopiladas y expuestas por Kieffer y Stone (2005), con respecto a las variaciones registradas en la calibración radiométrica absoluta de los sensores Landsat-5 TM, entre 3 y 23% durante toda su vida útil, dependiendo de la banda; TERRA-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), entre 1-8% durante el primer año; AQUA-MODIS, de aproximadamente 0,4% en 60 días; MISR, que presentó una variación inicial de 6%, y que luego bajó a 1-2% al año; EO-1 Hyperion, con una variación de alrededor de -8% en el rango VIS y de -18% en el SWIR; y ASTER, entre 8-20% en dos años.

Como se puede apreciar, la degradación del instrumental ocurre a una escala de tiempo que es bastante reducida en comparación a los procesos que ocurren en nuestro planeta. Por este motivo, la vida operativa de uno o un par de sensores no serían suficientes para observar la dinámica de muchos fenómenos, sino que estos solo podrían ser estudiados a través de una serie de datos proveniente de muchas misiones consecutivas. Entonces, la

calibración absoluta, junto con la intercalibración entre misiones, evita la introducción de sesgos que podrían llevar a conclusiones erróneas acerca del comportamiento de la variable bajo estudio, lo cual es posible si los parámetros no son conocidos con la precisión suficiente o no son actualizados en el tiempo (Dinguirard y Slater, 1999). En síntesis, la calibración radiométrica y su estabilidad en el tiempo permiten subsanar la degradación del sensor y entregar a los usuarios información actualizada de la relación entre la radiancia captada por el instrumento y los números digitales de la imagen (DN), posibilitando el desarrollo de una aplicación o su limitación, en caso de existir desvíos con respecto al rango de precisión previamente definido como aceptable.

Por último, se debe realizar el siguiente alcance, si bien un sensor aerotransportado, diseñado para aeronaves o vehículos aéreos no tripulados (UAV's) no está expuesto a las mismas condiciones que uno de tipo satelital, la calibración radiométrica absoluta también es fundamental si se pretende emplear los datos en aplicaciones cuantitativas, especialmente en vegetación y agricultura de precisión, entre otros fines (Zarco-Tejada et al., 2012; Berni et al., 2014; Del Pozo et al., 2014; Calderón et al., 2014).

2.1.3. Métodos de calibración absoluta empleados

Con el objetivo de estimar los parámetros de calibración radiométrica absoluta, se realizan procesos en distintas etapas de la vida operativa de un sensor. Antes de la puesta en órbita del satélite se ejecutan los procedimientos en laboratorio, conocidos como calibraciones prevuelo o pre-flight; luego, durante la fase de comisionado y durante toda la vida útil, se realizan las calibraciones en vuelo, denominadas in-flight. Estas últimas deben ser ejecutadas de forma permanente, cuando el desarrollo de estudios cuantitativos ha sido definido como un resultado esperable de una misión satelital.

Es necesario hacer un alcance con respecto a las calibraciones radiométricas que pueden ser llevadas a cabo, ya que, además de la absoluta, existe la calibración relativa. Esta última busca compensar las diferencias existentes entre los detectores de los arreglos del sensor, y que generará una imagen más homogénea y sin ruido aparente entre detectores (Thome et al., 1997). Existe además la denominada calibración entre bandas, donde se estima cuáles son las diferencias existentes entre las respuestas radiométricas de distintas bandas espectrales o con respecto a una banda tomada como referencia, en función de la precisión de su calibración absoluta (Hagolle et al., 2004).

También se considera el monitoreo de la calibración absoluta de un sensor en el tiempo, con el propósito de estimar variaciones y detectar la existencia de tendencias en largos períodos. Este punto es especialmente crucial en el caso de las misiones de continuidad enmarcadas dentro de grandes programas de observación de la Tierra, ya que estas buscan monitorear fenómenos a escalas temporales de décadas, lo requiere que las incertidumbres introducidas por la integración de distintos sensores no afecten significativamente el estudio de los parámetros de interés.

En relación a este punto, debe ser mencionado el caso del programa de Landsat que desde 1972 ha completado una colección de datos de más de cuatro décadas y cuya continuidad se proyecta hacia el 2020 con el lanzamiento de Landsat-9 (Stone et al., 2017). Significativos esfuerzos han sido realizados para reconstruir una escala radiométrica común y para resolver las diferencias entre los distintos instrumentos. Esto ha permitido –y permitirá – la integración de las imágenes capturadas por las diferentes misiones (Markham y Helder, 2012; Knight y Kvaran, 2014).

Si bien este capítulo trata de calibración, las metodologías aplicadas tanto para caracterizar o determinar parámetros relacionados con los otros dominios mencionados en la sección anterior, no serán abarcadas pues están fuera del alcance del presente capítulo.

2.1.3.1. Calibración prevuelo en laboratorio

En este proceso se determinan las ganancias para cada banda del sensor, para lo que se capturan imágenes de una referencia calibrada bajo estándares trazables NIST, en salas especiales y bajo condiciones controladas. A través del uso de una esfera integradora, de lámparas calibradas o monocromadores (ópticos o laser) cuya longitud de onda puede ser controlada, se determina el modelo

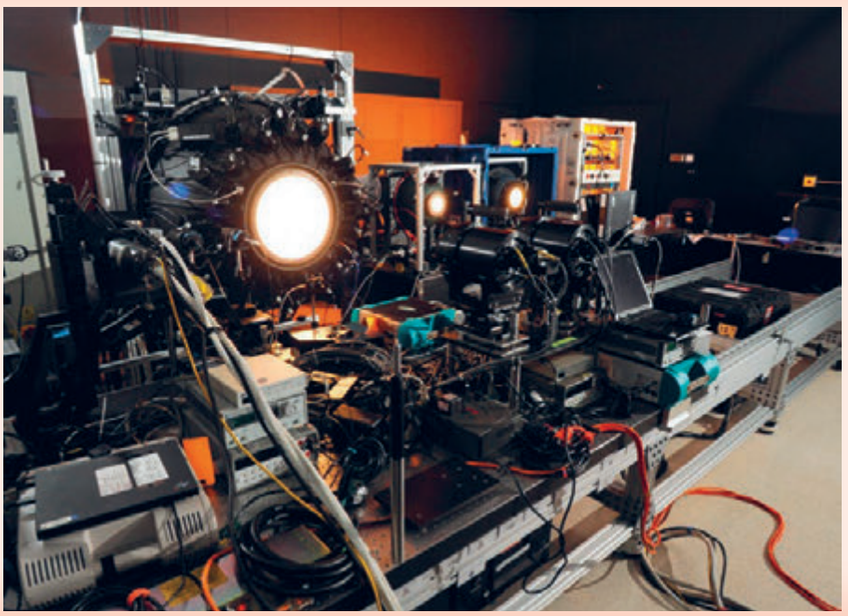


Figura 9: Instrumental de laboratorio y esferas integradoras del NIST, Universidad de Arizona, Ball Aerospace y GSFC, empleadas para calibración del sensor L8-OLI. *Fuente: Knight y Kvaran (2014).*

radiométrico del sensor, la linealidad de su respuesta, junto con las respectivas incertidumbres de los parámetros estimados. En esta fase también se determinan una serie de factores, tales como: razón señal ruido (SNR), corriente oscura, transmitancia espectral de los filtros y respuesta espectral del instrumento, entre otras. Este procedimiento también tiene como fin verificar el cumplimiento de las especificaciones para las que se diseñó el instrumento, que es lo que permitirá monitorear un determinado fenómeno con la precisión requerida.

Se debe recalcar que toda la infraestructura de calibración de laboratorio debe, a su vez, ser verificada y calibrada contra referencias metrológicas en laboratorio de manera periódica (Woolliams et al., 2002; Tansock et al., 2015; NIST, 2017; NPL, 2017). En la figura 9 se muestra parte del instrumental de laboratorio del NIST, Universidad de Arizona, Ball Aerospace y Goddard Space Flight Center (GSFC), empleado para calibrar el sensor Landsat-8 OLI (Operational Land Imager), aplicando chequeo cruzado entre laboratorios (Knight y Kvaran, 2014).

2.1.3.2. Calibración en vuelo o in-flight calibration

Con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos de la misión, es necesario compensar las variaciones de la respuesta radiométrica del sensor permanentemente. Para esto se aplican métodos directos mediante los denominados calibradores a bordo (OBC) o se realizan calibraciones reiteradas, aplicando diversos métodos indirectos o vicarios. A continuación, se proporcionan antecedentes acerca de las distintas metodologías que actualmente son utilizadas y combinadas dentro de los planes Cal/Val de todas las misiones satelitales que portan instrumentos pasivos en el rango solar reflectivo.

a. Método directo basado en calibradores a bordo: los OBC corresponden a difusores solares, lámparas y sistemas de fibra óptica que proveen una señal conocida al sensor y que permiten obtener de manera directa las ganancias de las bandas del rango VNIR (Visible and Near-InfraRed) y SWIR (Short-Wavelength InfraRed). Tienen la ventaja de posibilitar la ejecución de calibraciones con una alta frecuencia temporal, que va desde el escaneo por medio, por ejemplo, MSS (para listado de acrónimos, ver tabla 4), a una vez al mes, por ejemplo, OLI. Sin embargo, al estar expuestos a las mismas condiciones extremas que el sensor, los patrones de referencia utilizados para estimar los parámetros de calibración también están sujetos a contaminación y degradación (Slater y Biggar, 1996; Hagolle et al., 2004; Xiong et al, 2014).

Diversos sensores han contado con más de un OBC, con el fin de facilitar la ejecución de calibraciones con distinta periodicidad. Se puede mencionar el caso de MERIS que contó con dos difusores, uno para monitorear el instrumento cada dos semanas y otro para hacerlo cada tres meses (Goryl y Huot, 2003). Otro ejemplo es el sensor del programa Copernicus de la European Space Agency (ESA), el Sentinel-3A OLCI que también posee dos difusores orientados a la calibración radiométrica absoluta, uno para ejecutarla cada dos semanas y otro para calibrar cada tres meses (Fougnie et al., 2015). En ninguno de los dos casos la existencia de infraestructura de calibración a bordo implicó descartar el uso de los métodos vicarios de las actividades de Cal/Val, sino que diversos enfoques fueron empleados de forma complementaria.

b. Metodologías indirectas o vicarias: disminuir los costos de una misión requiere de instrumentos menos complejos, lo que ha llevado al desarrollo de plataformas de tamaño mucho más compacto y es la razón principal por la cual muchos satélites de observación de la Tierra no poseen OBC. En este sentido, las calibraciones vicarias constituyen la única alternativa para actualizar las ganancias y monitorear la estabilidad de la respuesta radiométrica de instrumentos. Los métodos vicarios tienen la ventaja de: a) ser realizados en las condiciones normales de operación del satélite, y b) no están afectados por la degradación del OBC.

De acuerdo a lo señalado por Slater y Biggar (1996), el término vicarias habría sido propuesto por Koepke (1982) y hace referencia a las metodologías indirectas, es decir, basadas en datos totalmente independientes de la calibración realizada en laboratorio y del OBC. Entre las calibraciones vicarias se diferencian dos categorías: a) las que requieren mediciones in situ de algún tipo, y b) las que pueden prescindir de ellas. Para poder efectuar las calibraciones se capturan imágenes sobre diversos sitios naturales del planeta o de cuerpos celestes, los cuales deben cumplir con una serie de requisitos determinados en función del enfoque que será empleado para el proceso y que serán descritos a continuación.

Muchas misiones han optado exclusivamente por la utilización de uno o más métodos indirectos, entre las cuales se puede mencionar: la serie NOAA-AVHRR (VNIR); POLDER-ADEOS; Pléiades 1A y 1B; SLIM6 y HiRAIS de Deimos 1 y 2; PROBA-CHRIS 1 y 2; Dubaisat 1 y 2; las constelaciones RapidEye-MSI y Planet-MSI; Kompsat 1, 2, 3 y 3A; Formosat 1 y 2; FASat-Charlie NAOMI-1; Huang Jing 1A y 1B; GaoFen 1, 2 y 4; y Venμs, por nombrar algunos. Si bien prácticamente todas las misiones de los programas de observación de la Tierra de las principales agencias espaciales poseen OBC, estas también se han beneficiado de las ventajas que ofrecen los métodos indirectos. De hecho, desde hace más de dos décadas, muchos grupos de Cal/Val integran de forma operativa diversos enfoques de calibración indirecta como estrategia de monitoreo y validación de los resultados proporcionados por los OBC. Diversos ejemplos serán detallados a continuación.

c. Métodos vicarios con mediciones in situ: se distinguen tres tipos:

- **Basado en mediciones de reflectancia:** este método se basa en mediciones de reflectancia de superficie y en la caracterización del estado de la atmósfera, realizadas simultáneamente con el paso del satélite. En este método el factor de reflectancia de superficie se determina ponderando los valores medidos con el instrumento, por los coeficientes de calibración de un panel de referencia (figura 10). Los paneles están construidos de materiales que poseen una reflectancia plana cercana al 99% en todo el rango VNIR - SWIR, y un comportamiento prácticamente lambertiano, tales como sulfato de Bario ($BaSO_4$) o Politetrafluoretileno (PTFE) (Camacho et al., 1999; Schaepman-Strub et al., 2006). En la figura 11 es posible ver los paneles empleados en terreno junto con los factores de calibración estimados en laboratorios del fabricante.

  Idealmente, el trabajo en campo debe contemplar una caracterización de la reflectancia en función de los ángulos de observación e iluminación, lo que permite determinar qué modelo de función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF) describe el grado de anisotropía que presenta la reflectancia del sitio de calibración (Yeom et al., 2017). La estimación de los parámetros de BRDF es vital para predecir el valor que toma la reflectancia de superficie a cualquier ángulo solar y de observación (figura 12).

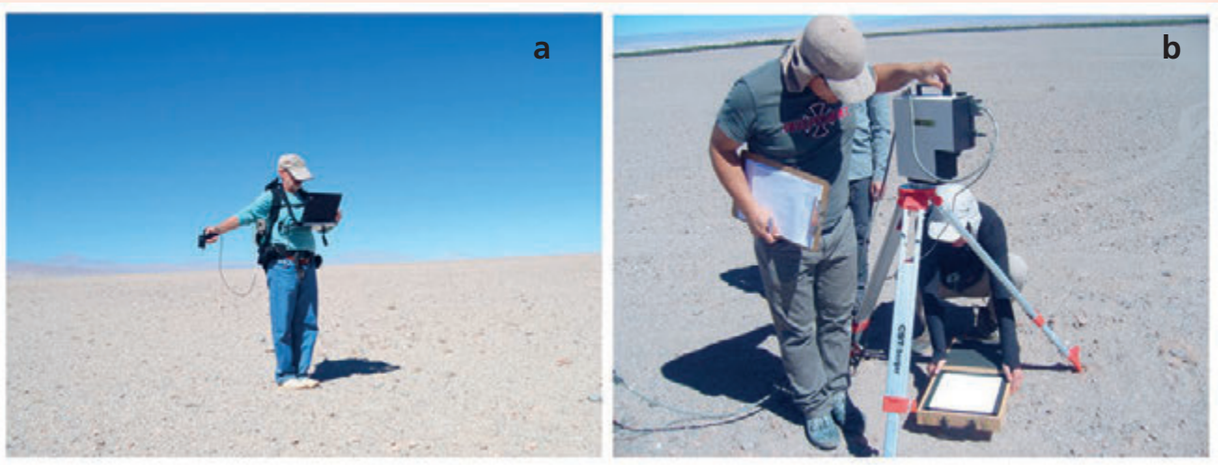


Figura 10: Captura de datos de reflectancia in situ mediante espectroradiómetros de campo en el desierto de Atacama con un instrumento ASD FieldSpec-4 con fibra óptica del INPE a) y un GER-2600 Spectravista del SAF b). *Fuente: Elaboración propia.*

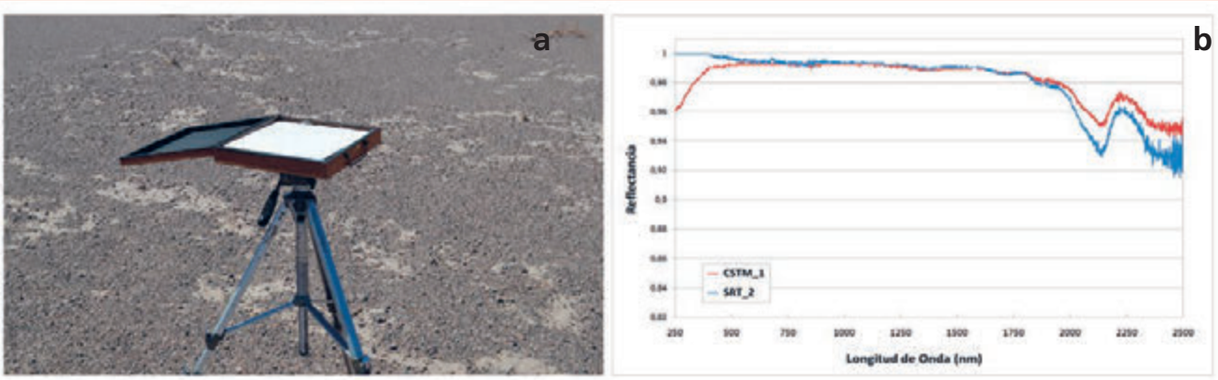


Figura 11: a) Panel de reflectancia de Spectralon© del INPE, y b) factores de reflectancia estimados en laboratorio para paneles del SAF, elaborados del mismo material. *Fuente: Elaboración propia.*

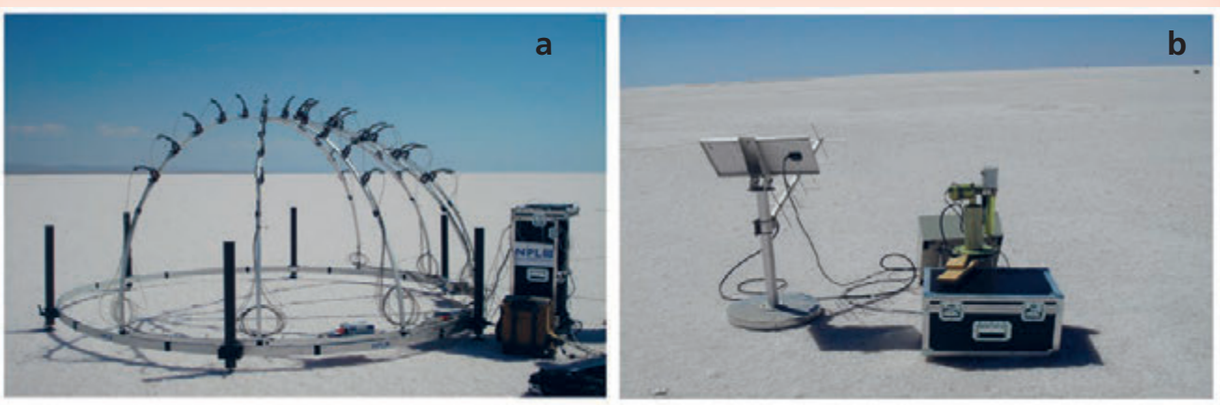


Figura 12: La imagen corresponde al Gonio Radiometer Spectrometer System (GRASS) del National Physical Institute (NPL) que es empleado para realizar mediciones de reflectancia angular a), y el fotómetro solar CIMEL para la caracterización atmosférica b). Ambos instrumentos fueron utilizados en una campaña conjunta ejecutada en Tuz Gölü, Turquía, organizada el 2009 por el NPL y que contó con la participación de diversas organizaciones. *Fuente: Elaboración propia.*

En lo que respecta a las mediciones de la intensidad del flujo de energía incidente, estas constituyen la entrada para diversos modelos que permiten obtener los datos requeridos por el Código de Transferencia Radiativa (CTR) que será empleado en el proceso de calibración. Los valores de los principales parámetros atmosféricos a estimar e indicadores asociados a estos (contenido de vapor de agua, aerosoles, ozono y otros componentes), provienen de las mediciones de irradiancia solar directa o difusa, sin embargo, algunos pueden ser obtenidos a partir de datos captados por sondas o estaciones meteorológicas.

Todos los parámetros determinados a partir de la información recolectada, junto con los detalles de geometría de iluminación y adquisición, son ingresados al CTR que, como su nombre lo indica, modela la transferencia de energía a través de la atmósfera y predice la radiancia at-sensor o reflectancia TOA, correspondiente a los valores medidos in situ (BOA). Entre los más utilizados se encuentra el Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) (Vermote et al., 1997), el MODerate resolution atmospheric TRANsmission (MODTRAN) (Berk et al., 2006) y el Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine (SMARTS) (Gueymard, 1995), entre otros. Luego, a partir de los resultados obtenidos a través del modelamiento y mediante ajustes estadísticos con los DN extraídos de la imagen capturada sobre el sitio de calibración, se determina la cantidad de energía que está captando el sensor por cada banda.

El enfoque basado en la reflectancia ha sido uno de los más utilizados por la comunidad científica durante los últimos 25 años (Czapla-Myers et al., 2015), y puede llegar a entregar precisiones del orden de 2 a 3% en el rango visible e infrarrojo cercano (VNIR) (Thome, 2005). Este método ha sido históricamente empleado para calibrar diversas misiones como SPOT (Santer et al., 1992), CBERS (Ponzoni et al., 2004; Pinto et al., 2016), Landsat 5-8 (Thome et al, 1997; Thome, 2001), entre otras.

- **Basado en mediciones de radiancia:** este método también se basa en la ejecución de mediciones de una superficie de referencia y de la atmósfera, ambas coincidentes con el paso del satélite, no obstante, el parámetro medido es la radiancia, la que es obtenida ya sea in situ, a través de radiómetros con calibración absoluta, o bien empleando sensores aerotransportados bien caracterizados (Slater et al., 1987).

  Las primeras calibraciones experimentales bajo este enfoque fueron llevadas a cabo en 1984 por Hovis et al. (1985), quienes montaron un radiómetro en un avión para estudiar la degradación del Nimbus-7 CZCS; y por Slater et al. (1987), quienes realizaron un vuelo en helicóptero a 3000 m.s.n.m.m., sobre el sitio de calibración White Sands para monitorear el estado del CZCS y de L5-TM.

  El proceso de corrección atmosférica puede ser aplicado en el caso de datos capturados con la ayuda de plataformas, empleando CTR y las mediciones para la caracterización atmosférica. De acuerdo a Thome (1999), una de las principales ventajas de este método es que puede cubrir grandes áreas en tiempos muy reducidos en comparación al enfoque basado en la reflectancia, y que las mediciones se realizan por sobre la zona en la que se encuentran los componentes que más incertidumbre generan sobre los resultados.

- **Basado en mediciones de irradiancia:** este método fue propuesto por Biggar et al. (1990) y en diversas fuentes bibliográficas es llamado enfoque basado en la reflectancia mejorado (Chen et al., 2014), debido a que la incertidumbre en la caracterización atmosférica es reducida mediante la estimación de diversos parámetros de los aerosoles a partir de mediciones de irradiancia solar difusa, directa y global. En este caso, no es necesario asumir ciertas propiedades ópticas asociadas a la capacidad de reflejar y dispersar energía, tal como la distribución por tamaño e información relativa al índice de refracción. Recientes estudios llevados a cabo por Chen et al. (2014) y Wei et al. (2016), han arrojado positivos resultados en la calibración absoluta de sensores como Beijing-1 MS.

2.1.3.3. Sitios de calibración y sus características

Para los métodos basados en la radiancia, reflectancia e irradiancia, se capturan datos en áreas que históricamen-

te han sido utilizadas por diversos grupos de Cal/Val y que son recomendadas por el CEOS, debido a que cumplen con la mayoría de los requisitos expuestos por Scott et al. (1996) y Thome (2001), que son:

- Reflectancia mayor a 30% en prácticamente todo el rango VNIR-SWIR para maximizar la SNR.
- Alta homogeneidad espacial en una superficie suficiente para calibrar el sensor de interés, en función de su resolución espacial.
- Uniformidad espectral y comportamiento lambertiano, para minimizar los errores introducidos por variaciones en el ángulo cenital y el ángulo acimutal solar, durante el transcurso de las mediciones (Slater et al., 1987).
- Ubicación en altura, lejos del océano y áreas urbanas, y con atmósfera estable. Esto reduce la cantidad de aerosoles y disminuye la incertidumbre que generan en la calibración.
- Sin vegetación, con el fin de reducir la influencia de los cambios estacionales.
- Conocimiento del comportamiento temporal, idealmente con reflectancia estable en el tiempo.
- Zona de fácil acceso, para posibilitar la ejecución de campañas con la periodicidad requerida.

Estos sitios, instrumentados de forma permanente o en los que frecuentemente se realizan campañas, han sido denominados como Red LandNET, la que está conformada por: Ivanpah Playa, Frenchman Flat y Railroad Valley Playa en Estados Unidos; La Crau en Francia; Tuz Gölü en Turquía; Negev en Israel; Dunhuang en China y Dome-C en Antártica. Recientemente, ha surgido otra iniciativa del CEOS llamada RadCalNet, que busca entregar reflectancias espectrales de alta precisión a nivel TOA. Estos datos serán recolectados por una red de instrumentos instalados en sitios bien caracterizados en: Gobabeb (Namibia), Baotou (China), La Crau (Francia) y Railroad Valley (EE.UU.). En la figura 13 se visualizan imágenes capturadas por el satélite chileno FASat-Charlie de los principales sitios de calibración, ya sean instrumentados o normalmente empleados por la comunidad científica.

Además, existen otras áreas que han sido utilizadas por diversos grupos de investigación y son recomendadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), estas son: White Sands, Lunar Lake, Alkali Flats y dunas Algodones, en Estados Unidos; salar de Uyuni en Bolivia; Dunrobin y Winton, en Australia; Taklamakan, China; y Barreal Blanco en Argentina, entre otras. Se debe considerar que, si bien no existe el sitio perfecto que cumpla

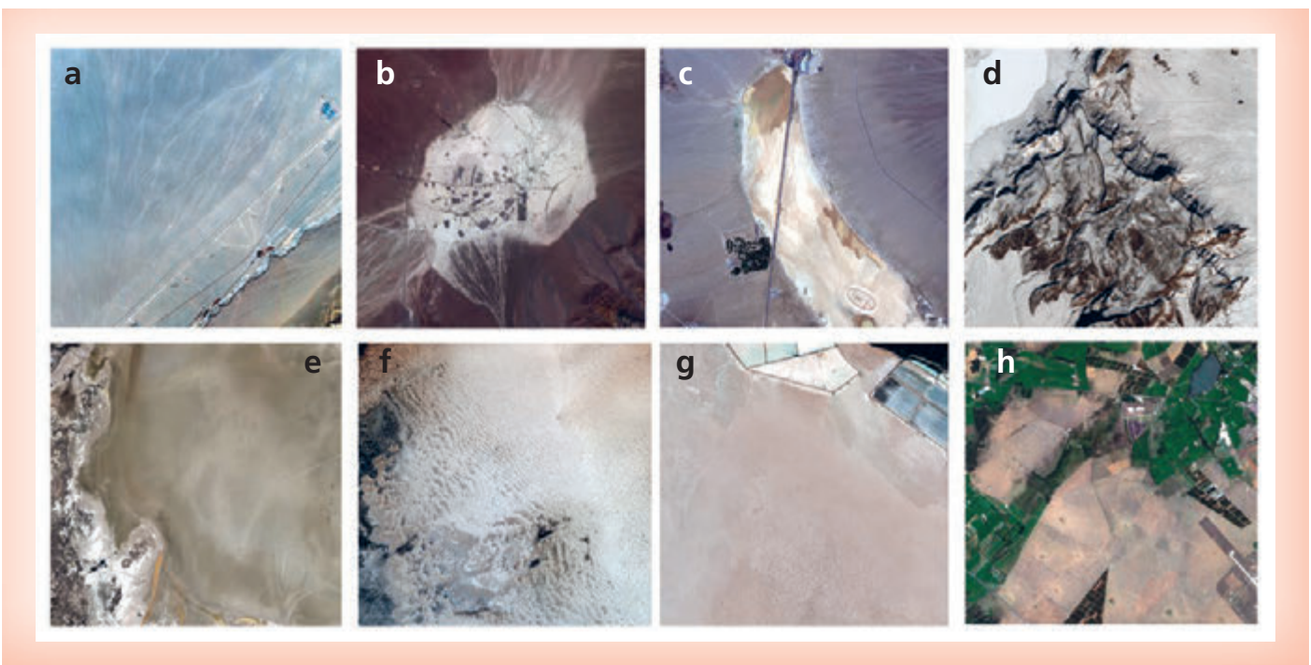


Figura 13: En China: a) Dunhuang; en EE.UU.: b) Frenchman Flat, c) Ivanpah, d) Lunar Lake, e) Railroad Valley, f) White Sands; en Turquía: g) Tuz Gölü; en Francia: h) ROSAS, La Crau. *Fuente: Elaboración propia.*

con todos los requisitos citados, los diversos grupos de investigación en el área de Cal/Val han desarrollado sus actividades en zonas que cumplen con varias de las características definidas como deseables.

En el caso de Chile, diversas campañas han sido realizadas desde el año 2014 en las cercanías de la reserva CONAF de Tambillo, San Pedro de Atacama (Pinto et al., 2015). Más antecedentes con respecto a estos trabajos serán proporcionados en el siguiente apartado, que trata de las actividades desarrolladas en el marco del estudio de un sitio en Sudamérica y del monitoreo del Sistema Satelital de Observación de la Tierra (SSOT) o FASat-Charlie (figura 14).

Por último, se debe mencionar el caso de los sensores orientados a color del océano, los que requieren de mediciones in situ de la señal de radiancia del agua para sus calibraciones vicarias y procesos de validación; razón por la cual en 1996 se implementó el sistema de boyas conocido como Marine Optical BuoY (MOBY) (Brown et al., 2007). Diversos sensores como el OCTS, POLDER, SeaWiFS, MODIS, MISR, MERIS, GLI y OLCI, así como también los algoritmos para generar productos, han sido calibrados con los datos de MOBY. También se han empleado los datos adquiridos por sistemas como el BOUée pour l'acquiSition d'une Série à Long termE (BOUSSOLE), que además de boyas han contemplado la ejecución periódica de cruceros para recolección de información de otros parámetros biogeofísicos, por ejemplo, clorofila, fluorescencia, CDOM, absorción de fitoplancton, aerosoles, entre otros (Antoine et al., 2008).

En relación a la selección de sitios óptimos para calibraciones vicarias de sensores de color del océano, también se han desarrollado investigaciones orientadas a la identificación de áreas marinas como, por ejemplo, las llevadas a cabo por Zibordi et al. (2015) y Zibordi y Mélin (2017).

2.1.3.4. Metodologías vicarias basadas en datos remotos

a. Calibración en base a la dispersión de Rayleigh: este método, propuesto por Fraser y Kaufman (1987), se basa en el hecho de que la mayor parte de la señal ob-

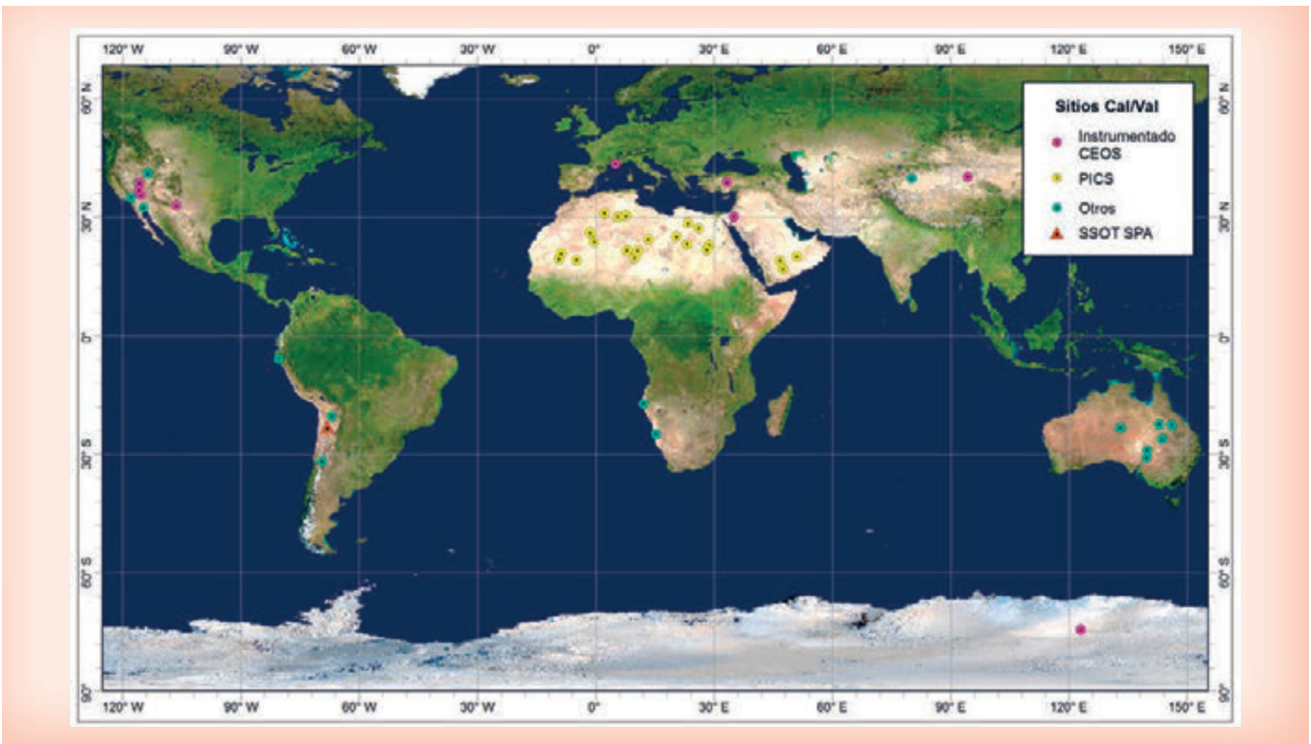


Figura 14: Ubicación de sitios de calibración y validación de sensores satelitales. Se señalan los sitios instrumentados y recurrentemente visitados para la ejecución de actividades de calibración vicaria, los sitios desérticos pseudo-invariantes (PICS), incluyendo, además, la ubicación del área de Tambillo (SSOT SPA). *Fuente: Elaboración propia en base a CEOS y NASA/GSFC Scientific Visualization Studio The Blue Marble Next Generation.*

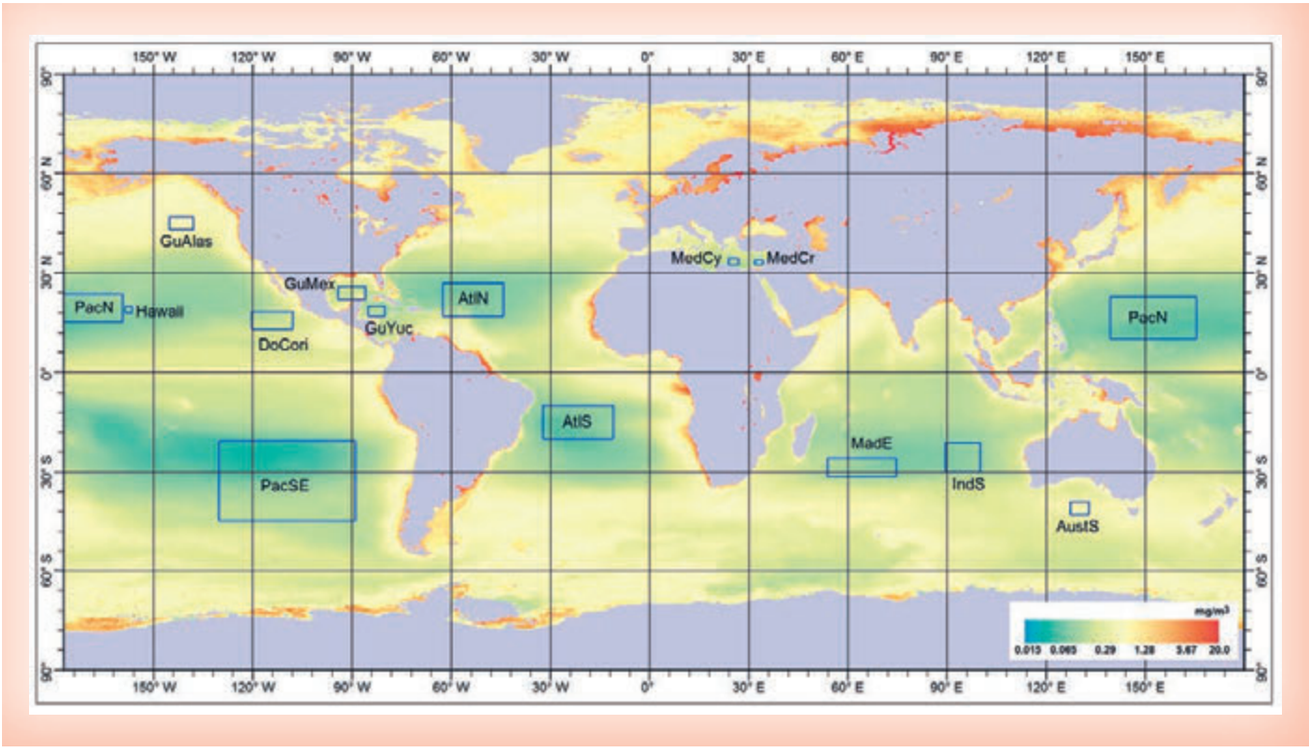


Figura 15: Áreas oceánicas estudiadas por Fougnie et al. (2002) para la determinación de áreas de calibración mediante dispersión molecular. La imagen corresponde a un promedio temporal de concentración de clorofila-a (mg/m^3) en base a datos SeaWIFS (1997-2010), generada a partir de la herramienta Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure (GIOVANNI), de la NASA. *Fuente: Acker y Leptoukh (2007).*

servada a nivel TOA sobre áreas oceánicas, es resultado de la dispersión molecular o de Rayleigh. Esta puede ser estimada con gran precisión a través de modelamiento de transferencia radiativa atmosférica, si la presión, velocidad del viento a nivel de superficie, la cantidad total de ozono y la respuesta espectral del sensor son conocidas (Kaufman y Holben, 1993; Vermote y Kaufman, 1995; Fougnie et al., 2010).

Un estudio de Fougnie et al. (2002) determinó cuales son los sectores oceánicos más apropiados para la estimación de los parámetros de calibración de las bandas del visible. Estos sectores corresponden a aguas con productividad primaria baja que presentan una variabilidad estacional reducida, en las cuales alrededor de 85-90% de la señal TOA corresponde a dispersión Rayleigh y la influencia de otras fuentes es reducida (por ejemplo, dispersión de aerosoles, absorción de gases, entre otros).

Si bien influyen otros factores, tales como la dispersión generada por los aerosoles, la reflexión difusa de la espuma (white caps) y la reflexión especular de la superficie del agua, el modelamiento atmosférico permite separar la señal que efectivamente corresponde a la reflectancia marina (Koepke, 1984; Vermote y Kauffman, 1995). Los sitios más apropiados y que periódicamente son monitoreados por las agencias espaciales son: Pacífico Norte y Noroeste (PacN y PacNW), Hawai, Pacífico Sureste (PacSE), Atlántico Norte y Sur (AtlN y AtlS), Océano Índico Sur (IndS) y Domo Costa Rica (DoCoRi) (figura 15).

Sensores de la serie AVHRR, GOES Imagers, PROBA-V, MERIS, POLDER, entre otros, han sido calibrados con este método, el cual fue implementado por el CNES y funciona de manera totalmente operacional.

b. Calibración cruzada: otra metodología cuya aplicación se ha acrecentado de manera considerable durante los últimos años es la calibración cruzada. Esta es una alternativa que permite monitorear y actualizar la respuesta radiométrica de un instrumento, en función de un sensor de referencia que es constantemente calibrado a través de alguno de los métodos ya mencionados (directos o indirectos) (Heidinger et al., 2002; Cao et al.,

2005; Teillet et al., 2001). Si bien, a mediados de los años 90 eran ejecutadas más de 20 calibraciones cruzadas al año con fines de diagnóstico (Slater y Biggar, 1996), a la fecha esta técnica es aplicada de manera extensiva por diversas agencias espaciales y grupos de investigación, no solo para calibrar, también como estrategia de validación en enfoques totalmente integrados (por ejemplo, Pinto et al., 2016; Lacherade et al., 2012).

Ejemplos son las calibraciones cruzadas realizadas durante el período de operación en modo tándem de Landsat-7 ETM+ con Landsat-5 TM y de Landsat-8 OLI con Landsat-7 ETM+ (Teillet et al., 2006; Czapla-Myers et al., 2015), junto con la de NOAA-16 AVHRR, utilizando como sensor de referencia a TERRA-MODIS (Vermote y Saleous, 2006). Otros satélites de alta resolución recientemente lanzados, tales como Pléiades 1A y 1B, integran la calibración cruzada en base a otros sensores (PARASOL o MERIS) con algunas de las metodologías vicarias mencionadas (Lachérade et al., 2013).

La importancia de la calibración cruzada como proceso que permite homogeneizar e integrar los datos de largas series de tiempo, se refleja en el estudio publicado por Markham y Helder (2012), que describe el proceso que llevó a la intercalibración de 40 años de imágenes capturadas por la serie Landsat. En este se menciona que inicialmente los esfuerzos eran orientados al amarre de un sensor con el siguiente, para luego considerar todos los instrumentos puestos en órbita entre 1972 y 1999, con anterioridad al L8-OLI.

También se destaca el trabajo realizado para calibrar la serie de datos históricos capturada por los sensores AVHRR durante 35 años que, gracias a observaciones simultáneas sobre el Polo Norte, permitió inicialmente transferir la calibración radiométrica de AQUA-MODIS a los canales visibles de NOAA-16 AVHRR, y luego llevar la serie completa de datos a una escala consistente (Bhatt et al., 2016; Doelling et al., 2016). Cabe destacar que las condiciones ideales contemplan pasos simultáneos al nadir (SNO) (Heidinger, 2002), junto con similares respuestas espectrales relativas (RSR) y distancia de muestreo terrestre (GSD). No obstante, esta situación generalmente no ocurre, por lo que una serie de compensaciones deben ser llevadas a cabo (Teillet et al., 2006; Chander et al., 2013). Estudios recientemente desarrollados por Thome et al. (2013) y Lacherade et al. (2013), que consideran todas las correcciones necesarias, reportan precisiones del orden del 1-2% para este método.

Finalmente, se pueden mencionar otras dos grandes iniciativas que buscan la integración de plataformas de distintos programas de observación de la Tierra. El Global Space-Based Inter-Calibration System (GSICS) partió el 2005, impulsado por EUTMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites) y el CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites), y en torno a él se han reunido diversas agencias espaciales y organismos tales como: CNES, ISRO, JAXA, NASA, NOAA, WMO, ESA, NIST, WGCV/CEOS, entre otros. El GSICS busca asimilar los datos provenientes de distintos sensores (LEO y GEO) orientados a meteorología, estudios climáticos y medioambiente. Para esto, promueve el uso de instrumentos y sitios trazables, la implementación de mejoras en la caracterización de los sensores y la intercalibración de estos (Goldberg et al., 2011; Hewison et al., 2013). La otra iniciativa corresponde al reciente proyecto de la NASA, denominado Harmonized Landsat Sentinel-2 surface reflectance (HLS) y que, gracias a la sinergia entre estos dos sensores de resolución media, incrementará la capacidad de revisita a dos-tres días, permitiendo el desarrollo de algoritmos para generar productos combinados (Masek et al., 2016).

A la fecha, la calibración cruzada es llevada a cabo observando prácticamente todos los sectores utilizados en otros métodos indirectos, siendo la principal variación, particular en cada caso, el principio en el cual se basa el método, que define cómo se predicen las radiancias del sensor de referencia, y los factores a considerar para las correcciones o compensaciones de los datos provenientes del sensor a ser calibrado.

c. Método basado en desiertos pseudo-invariantes: existe otro método, principalmente aplicado para calibración cruzada, basado en datos capturados sobre un grupo formado por 20 desiertos localizados en África y Medio Oriente (figura 16). Debido a que el comportamiento de estos sitios, en cuanto a reflectancia, presenta una alta estabilidad temporal, son conocidos como sitios de calibración pseudo-invariantes (PICS). Por esta razón,

han sido ampliamente utilizados por diversas agencias espaciales y operadores satelitales, por ejemplo, NASA, CNES, ESA, ISRO (Vermote y Saleous, 2006; Kaufman y Holben, 1993; Lacherade et al., 2013). Sensores que han sido calibrados empleando enfoques que integran observaciones sobre los PICS, son: SPOT HRV, Vegetation 1 y 2, POLDER 1 y 2, Pléiades 1A y 1B, PROBA-V, MERIS, serie Landsat, MODIS, VIIRS, NOAA-AVHRR, entre otros.

Los primeros estudios sobre estas áreas datan de principios de los 90. Los PICS fueron propuestos tras un monitoreo basado en datos Meteosat-4 publicado por Cosnefroy et al. (1993 y 1996), quienes, el mismo año, realizan la primera campaña de caracterización de terreno en Argelia (Cosnefroy et al., 1997). Posteriormente, con el objetivo de calibrar sensores de mayor resolución espacial y de menor ancho de barrido, se determinaron subáreas en los PICS más homogéneos y estables, información disponible en el estudio llevado a cabo por Lacherade et al. (2013). Seis PICS fueron seleccionados por el WGCV/IVOS y son recomendados por el CEOS: Argelia 3 y 5, Libia 1 y 4, y Mauritania 1 y 2 (Choi et al., 2014).

De acuerdo a lo expuesto por los diversos autores mencionados, las observaciones realizadas sobre los PICS (del sensor de referencia y el que se calibrará en base a este) son seleccionadas en función de la geometría de iluminación y observación, correspondan estas a adquisiciones coincidentes o no. Por este motivo, se consideran correcciones por efectos de comportamiento direccional de la reflectancia del sitio y por influencia de la atmósfera, asumiendo la estabilidad de esta. Se utiliza como referencia la firma espectral del sitio obtenida por el sensor calibrado, corregida a nivel BOA. A partir de esta información, considerando las RSR del sensor a calibrar y procesos de interpolación, se simulan los valores de reflectancia BOA que este captaría, para obtener estos valores en el TOA empleando un modelo de transferencia radiativa (MTR). Con esta información finalmente se calculan los coeficientes de calibración.

Dome-C y algunas zonas de hielo polar en Groenlandia, también han sido monitoreadas por diversos grupos de investigación, debido a que también presentan un alto grado de estabilidad en el tiempo (Doelling et al., 2016).

d. Método basado en la Luna: el método basado en observaciones de la Luna aprovecha la agilidad de algunas plataformas (por ejemplo, Ikonos y Pléiades), o la gran cantidad de ocasiones en que este cuerpo celeste aparece en las imágenes (por ejemplo, en satélites geoes-

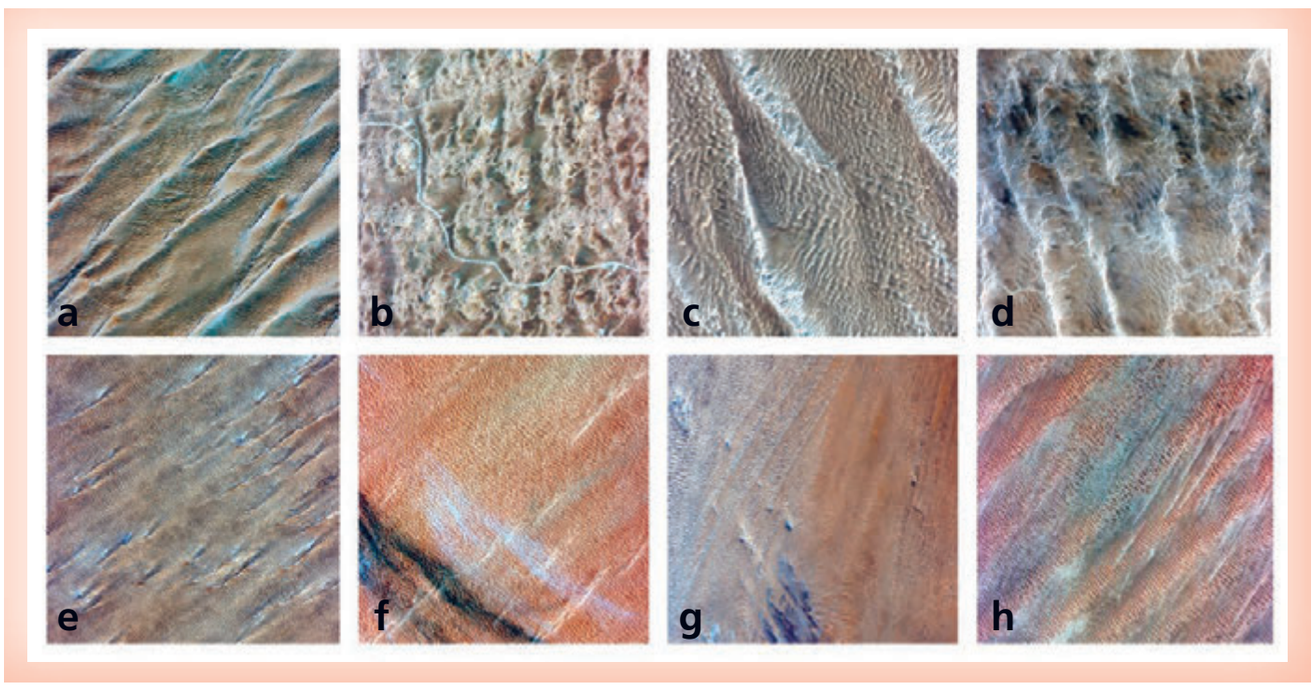


Figura 16: Imágenes satelitales capturadas por FASat-Charlie sobre los PICS, a) Arabia-1; b) Argelia-3; c) Egipto-1; d) Libia-4; e) Libia-1; f) Mauritania-2; g) Sudán-1; h) Mauritania-1. *Fuente: Elaboración propia.*

tacionarios), para permitir la actualización y monitoreo de la calibración radiométrica absoluta de las bandas reflectivas del espectro electromagnético (EEM). La Luna ha sido considerada como una superficie ideal debido a que no posee atmósfera, es un reflector difuso estable en el tiempo y posee una respuesta adecuada para trabajos de calibración (Kieffer y Wildey, 1996; Grant et al., 2001).

A mediados de los '80, Kieffer y Wildey comienzan a exponer sus estudios con respecto a la calibración basada en imágenes de la Luna. Ellos tratan acerca de las posibilidades de emplear el método con Landsat 4 y 5 (MSS y TM), mencionan las condiciones que deberían cumplir las observaciones, así como también otros parámetros que podrían ser caracterizados mediante estas capturas, por ejemplo, MTF (Función de Transferencia de Modulación) y straylight (Kieffer y Wildey, 1985).

Posteriormente surge el Robotic Lunar Observatory (ROLO), un programa financiado por la NASA que ha generado un modelo de la reflectancia lunar a partir de más de seis años de observaciones (Kieffer y Stone, 2005). El modelo ROLO predice la reflectancia de la Luna, considerando sus distintas fases y libraciones, y obtiene su irradiancia en base a un determinado modelo solar. Debido a las variaciones normales en la irradiancia de la Luna, el modelo radiométrico considera un valor integrado de la irradiancia de la superficie lunar, cuya área útil es determinada tras aplicar una serie de criterios y filtros. ROLO está ubicado en las instalaciones del USGS, consta de dos telescopios y observa el rango 350-2.350 nm a diferentes resoluciones espectrales. Si bien ya no funciona regularmente, aún se capturan datos para diversos trabajos de calibración en vuelo (ver figura 17).

Otras iniciativas en la temática han sido llevadas a cabo por otras agencias espaciales y organizaciones. Por una parte, EUTMETSAT ha implementado una serie de mejoras a ROLO, lo que ha derivado en un desarrollo denominado GIRO (GSICS Implementation of ROLO); por otra parte, la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) envió al espacio en el 2007 la misión SELenological and ENgineering Explorer (SELENE) (Yokota et al., 2011), que durante dos años levantó datos para elaborar un modelo de la reflectividad lunar.

Diversos sensores satelitales han sido o están siendo calibrados empleando este enfoque. Entre ellos se destacan:



Figura 17: a) Imagen lunar; b) Telescopios del observatorio ROLO (Robotic Lunar Observatory); c) Imagen satelital corregida capturada por el satélite Pléiades a 380 m de resolución espacial; d) Imagen satelital corregida adquirida el 24 de junio de 2013 por Landsat-8 OLI. *Fuente: Lacherade et al. (2013b) y GSFC NASA.*

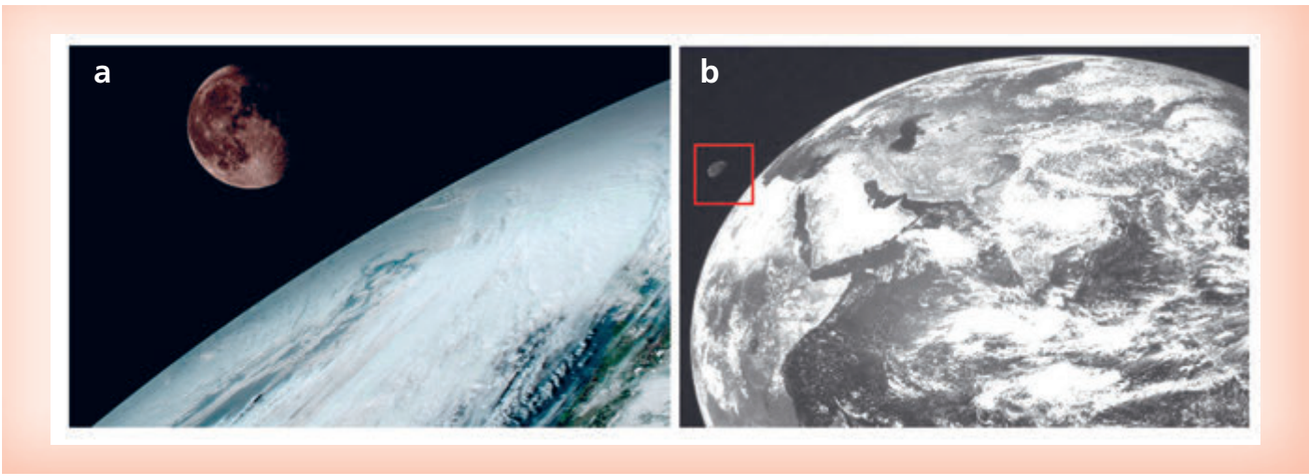


Figura 18: Imágenes de la Luna capturada por los sensores a bordo de GOES-16 en enero de 2017 (a) e INSAT-3D (b), en esta última imagen, la Luna aparece destacada en el recuadro rojo. *Fuente: NOAA e ISRO.*

la serie Landsat (MSS a OLI), SeaWIFS, Ikonos, MODIS, ASTER, VIIRS, EO-1 ALI e Hyperion, OceanSat OCM-2, PROVA VGT-P, GOES, GMS-5 VISSR y MTSAT-2 Imager, Himawari-8 AHI, INSAT-3D, y Pléiades 1A y 1B. En el caso de los dos últimos satélites, se han realizado calibraciones incluso mediante el método cruzado (ver figura 18).

e. **Método basado en estrellas:** este método utiliza el flujo de irradiancia proveniente de estrellas radiométricamente bien caracterizadas, que es registrado por el sensor como base para la estimación de las ganancias. Considera correcciones por distorsiones del sistema óptico, por concepto de respuestas espectrales, por umbrales de respuesta de los detectores, entre otras (Bowen y Cunningham, 2006).

Las primeras calibraciones basadas en observaciones de estrellas datan de fines de los 90 y fueron llevadas a cabo con el objetivo de estudiar la degradación de las bandas visibles de los sensores a bordo de GOES-8 y 9 (Bremer et al., 1998). Inicialmente, las estrellas habían sido observadas con el fin de calibrar sistemas de navegación y actitud, luego se logra implementar un método operacional orientado al monitoreo del comportamiento radiométrico de diversos sensores Imagers de la serie GOES (Chang et al., 2008 y 2012). En relación a los sensores de alta resolución espacial, Bowen publica los resultados obtenidos con el método para el sensor de Ikonos (2002), para luego aplicarlo en la calibración de los sensores a bordo de Geoeye-1 (Arnold et al., 2013).

Las estrellas empleadas como base para la estimación de las ganancias de cada una de las bandas del sensor, han sido seleccionadas de determinados catálogos, entre los que se destaca el de Gunn y Striker (1983). Como referencia para validación se considera a la estrella Vega, el principal estándar para el rango óptico (Bowen, 2002), la cual también es empleada para la calibración de ROLO (Stone et al., 2003). Al ser fuentes de energía de tipo puntual, las estrellas han sido de utilidad para evaluar, además de las ganancias absolutas por banda, parámetros como la MTF (por ejemplo, Pléiades) (Fourest et al., 2012).

f. **Método basado en nubes convectivas profundas:** este método, empleado principalmente para la calibración absoluta de una banda de referencia y la transferencia de la calibración de esta hacia otras bandas, considera capturas en zonas intertropicales caracterizadas por la alta presencia de nubes de gran desarrollo vertical y espesor óptico. Estas se denominan nubes de convección profunda (DCC, por su sigla en inglés), y corresponden a cumulonimbos cuyo techo puede alcanzar hasta los 12-13 km, lo que reduce en gran medida los efectos del vapor de agua y los aerosoles, en su mayoría concentrados bajo el tope de las nubes. (Mu et al., 2017; Sterckx et al., 2013).

De acuerdo a las investigaciones de Doelling et al. (2004 y 2013), las DCC son las superficies naturales más reflectantes, invariantes y frías en los trópicos, lo que las

hace fácilmente identificables y permite, además de calibrar bandas en el VIS-NIR, monitorear la estabilidad en el tiempo de las calibraciones de bandas del SWIR.

Las investigaciones que abrieron el camino al posterior desarrollo de esta técnica, fueron las aplicadas NOAA-AVHRR, llevadas a cabo por Justus (1988), Abel (1991), y Vermote y Kaufman (1995). Actualmente, este método ha sido integrado a los programas de Cal/Val de diversas misiones de observación de la Tierra, tales como: PROBA-V, la serie NOAA-AVHRR, POLDER, MODIS, AIRS, PARASOL, GOES Imagers y VIIRS.

Varios de los autores mencionados concuerdan en que las zonas más adecuadas se encuentran entre los 20 N y 20 S, en las zonas de aguas cálidas (figura 19). Sectores en el oeste del océano Pacífico, zonas ecuatoriales en África y Sudamérica, y en torno las Islas Maldivas, son recurrentemente monitoreadas para aplicar este enfoque de calibración. Una vez que se han capturado las imágenes sobre las áreas de interés, se realiza un filtrado, eliminándose los píxeles o clusters que no pasan ciertos umbrales de reflectividad, T de brillo (en el caso de los sensores con bandas en el TIR), homogeneidad espacial y presión aparente, entre otros factores. Se analizan las formas de los histogramas de las zonas muestreadas, se realiza una selección basada en las condiciones de iluminación y observación, correcciones por dispersión de Rayleigh, ozono y BRDF. Finalmente, en base a simulación basada en códigos de transferencia radiativa (CTR) y ajustes estadísticos, son determinados los nuevos coeficientes de calibración que podrán ser 1) los adoptados para la banda en cuestión, 2) la referencia para calibrar otras bandas, o 3) intercomparar y validar los resultados arrojados por otras técnicas.

g. Método basado en la reflexión solar especular sobre el océano: la información registrada por un sensor en las áreas de reflexión solar especular sobre el océano (sunglint), también ha sido utilizada para evaluar el comportamiento de la calibración radiométrica. Específicamente, para estudiar una banda de referencia y luego transferir la calibración a las bandas restantes (Hagolle et al., 2004). Estas zonas son de utilidad debido a que la

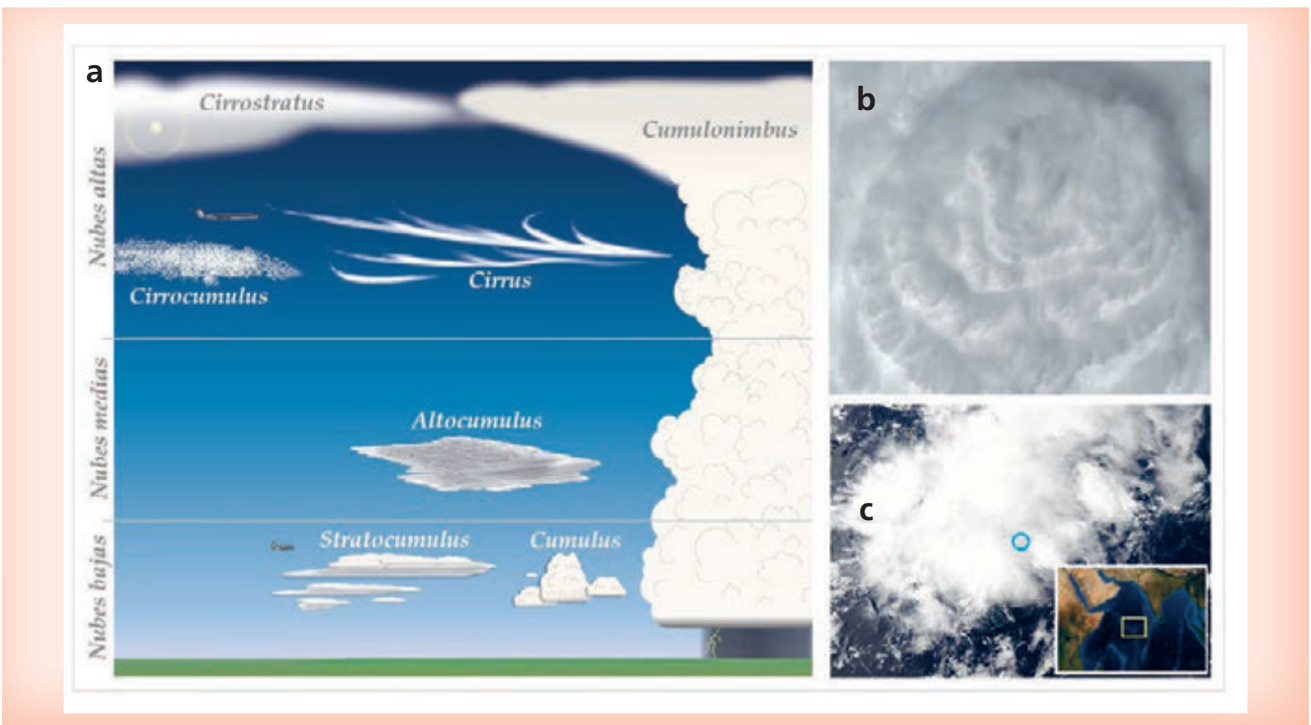


Figura 19: a) Esquema comparativo de las DCC, como referencia se incluyen otros tipos de nubes; b) Captura de la Estación Espacial Internacional sobre un área cubierta por DCC; c) Sector en torno a las Islas Maldivas monitoreado para fines de calibración mediante DCC. *Fuente: National Weather Service - Jet Stream, NOAA; Johnson Space Center (JSC); Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS).*

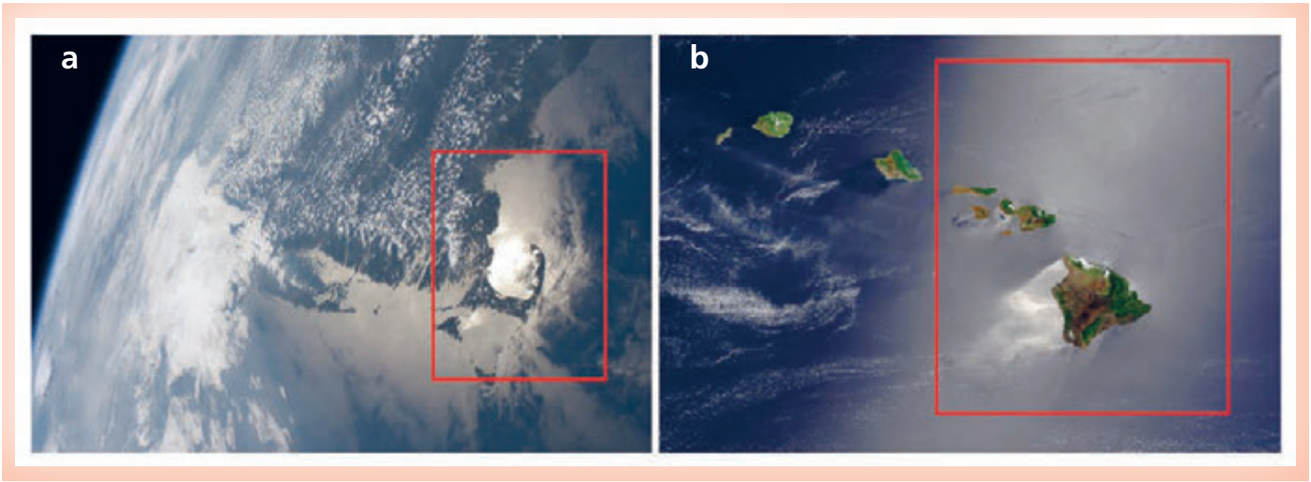


Figura 20: Reflexión solar especular sobre el océano capturada desde la Estación Espacial Internacional sobre la bahía de Cabo Cod a) y sobre Hawaii b) por el sensor TERRA-MODIS. *Fuente: Johnson Space Center (JSC) y Earth Observatory, GSFC, NASA.*

intensidad del flujo de energía captado por el sensor es elevada, la reflectancia de estas áreas es plana y puede ser estimada a través de MTR.

La selección de las áreas de interés se realiza considerando umbrales para definir las condiciones adecuadas de iluminación y observación, junto con las de velocidad del viento, a fin de evitar los píxeles saturados y las áreas con mucha rugosidad superficial. De acuerdo a Sterckx et al. (2014), esta técnica también podría ser extendida a las bandas del SWIR. En la figura 20 es posible apreciar este tipo de reflexión sobre el océano.

2.1.4. Actividades en Chile: Caracterización de sitio en Sudamérica y calibración del satélite chileno FASat Charlie

2.1.4.1. Ejecución de las primeras calibraciones en vuelo y cruzada

En enero del 2013, Mattar et al. realizaron la primera calibración en vuelo del FASat-Charlie en el sector de Antumapu, Santiago, Chile. En esta campaña se midió la reflectancia de distintas superficies durante el paso del satélite y se emplearon productos derivados del sensor MODIS (MOD04, 05 y 07) para la caracterización atmosférica. Mediante el MTR Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) (Vermote et al., 1997), los valores de reflectancia TOA de FASat-Charlie fueron corregidos atmosféricamente y comparados con las mediciones de reflectancia de superficie obtenidas con un espectroradiómetro de campo Handheld Fieldspec ASD (figura 21). Este estudio determinó un error promedio de +5% entre las reflectancias con corrección atmosférica y las mediciones in situ, para las distintas bandas espectrales.

Tal como se ha mencionado en párrafos anteriores, al igual que diversos sensores que operan en la actualidad, FASat-Charlie carece del instrumental para ejecutar la calibración radiométrica absoluta a bordo. Por este motivo, y con el fin de obtener un nuevo set de ganancias absolutas, posteriormente se aplicó la metodología de calibración cruzada mediante observaciones simultáneas al nadir (Heidinger et al., 2002), bajo el enfoque propuesto por Teillet et al. (2001). Este trabajo se basó en capturas simultáneas de RapidEye-MSI (el sensor de referencia) y de FASat-Charlie (el sensor a ser calibrado), sobre Frenchman Flat, Nevada, Estados Unidos, el 25 de julio del 2014. En base a los resultados del análisis espacial –que contempló la obtención de los indicadores de Getis y Ord (Getis y Ord, 1992), Moran (Anselin, 1995) y el Coeficiente de Variación (CV)–, se determinaron los sectores más homogéneos y con la mayor reflectividad dentro del área. De estos sectores fueron extraídas las muestras para efectuar el ajuste que permitió actualizar los coeficientes de calibración de las bandas multiespectrales de NAOMI-1, el sensor a bordo de FASat-Charlie.

De acuerdo con lo planteado por Teillet et al. (2007) y Chander et al. (2013), se compensaron las diferencias de geometría de iluminación y por concepto de RSR (respuestas espectrales relativas), las cuales, en la práctica, generan discrepancias en las radiancias/reflectancias obtenidas a partir de sensores distintos sobre una misma superficie, que son producto de los factores antes mencionados. Para el cálculo de los factores de ajuste por diferencias en las bandas espectrales (SBAF), se emplearon barridos históricos del sensor hiperespectral de la NASA EO-1 Hyperion (figura 22).

Además, se llevó a cabo una validación en zonas con diferente comportamiento en cuanto a reflectancia. Para la obtención de los valores de radiancia at-sensor y reflectancia TOA, se emplearon ambos sets de parámetros de calibración (estos son de prevuelo y estimados mediante calibración cruzada), y los resultados fueron comparados con los correspondientes valores obtenidos a partir de RapidEye. Se obtuvo un acuerdo promedio de 2,63% (RMSE) para las bandas multiespectrales de los dos sensores, lo que reflejó una disminución en los errores absolutos y sesgos de las radiancias/reflectancias de FASat-Charlie. Mayores detalles acerca de la metodología y los resultados, pueden ser consultados en Barrientos et al. (2016a y b).

2.1.4.2. Campañas de caracterización y calibración en el desierto de Atacama

Entre el 19 y 22 de agosto del 2014, se realizó la primera campaña de terreno que tenía como fin evaluar y caracterizar una zona del desierto de Atacama (el desierto más árido del mundo), con fines de calibración absoluta de sensores satelitales. Este fue un trabajo conjunto, dirigido por el Instituto de Pesquisas Espaciais de Brasil (INPE), en el participó el Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB) de la Universidad de Chile y el Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de la Fuerza Aérea de Chile (FACH) (Pinto et al., 2015).

El trabajo de campo se desarrolló en las cercanías de la reserva Tambillo, a 28 km al sur de San Pedro de Atacama (SPA), a una altitud aproximada de 2400 m.s.n.m. (figura 23). Durante toda la campaña se realizaron mediciones de reflectancia de superficie, irradiancia solar directa, temperatura de brillo y contenido humedad de suelo (a 10 cm de profundidad). El instrumental utilizado y los parámetros estimados a partir de los datos se encuentran detallados en la tabla 3.

De acuerdo con lo publicado por Pinto et al. (2015), el contenido de vapor de agua en la atmósfera y el espesor

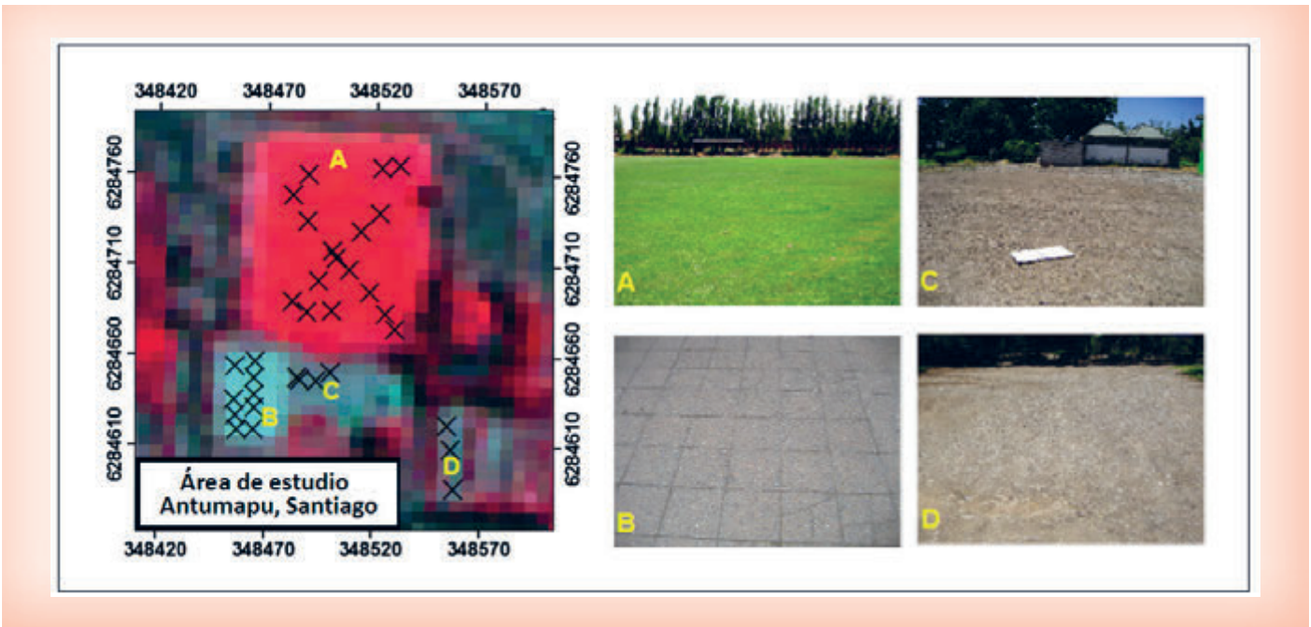


Figura 21: Esquema del protocolo de captura de firmas espectrales en terreno para la primera calibración en vuelo de FASat-Charlie en Antumapu, Santiago. *Fuente: Modificado en base a Mattar et al. (2014).*

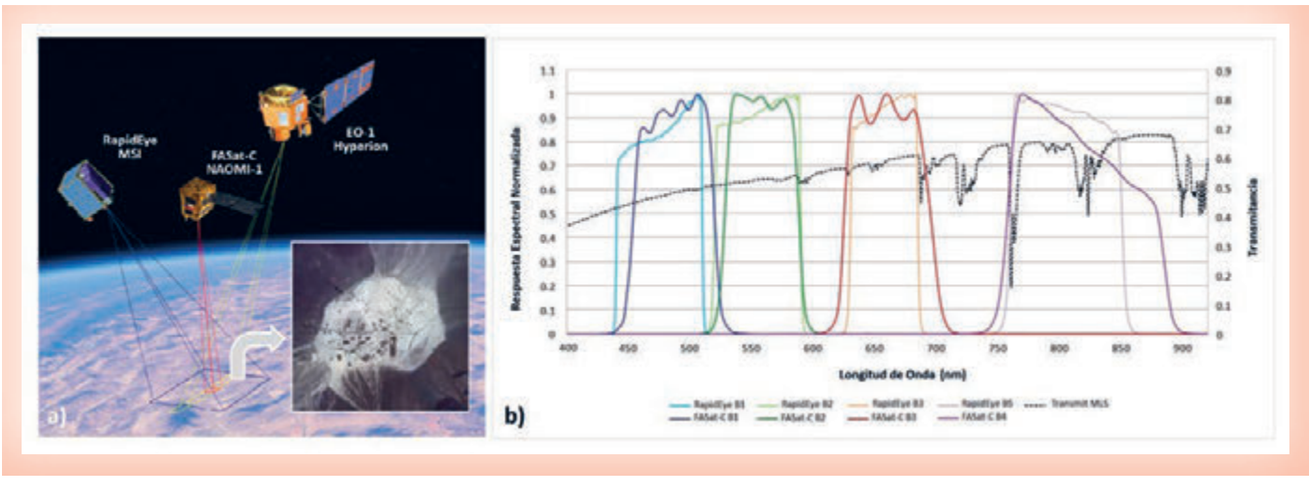


Figura 22: a) Esquema general de la calibración cruzada mediante observaciones simultáneas al nadir para FASat-Charlie sobre Frenchman Flat; b) Comparación de las respuestas espectrales relativas de NAOMI-1 y MSI, los sensores a bordo de FASat-Charlie y RapidEye, respectivamente. *Se aprecia la similitud entre las bandas multiespectrales de ambos sensores y se incluye como referencia la transmitancia total atmosférica del modelo de verano para latitudes medias (MLS). Fuente: Elaboración propia.*



Figura 23: a) Vista general en torno al sitio de calibración estudiado en las distintas campañas, localizado en Tambillo (SPA); b y c) Investigadores del INPE, LAB y SAF realizando mediciones de reflectancia de superficie, de irradiancia solar directa, temperatura y humedad de suelo durante las campañas de caracterización (2014), y de calibración (2016) d). *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 3: Instrumental utilizado y parámetros estudiados durante la campaña de caracterización en Tambillo, Atacama 2014. *Fuente: Elaboración propia.*

Parámetro	Instrumento	Parámetro	Instrumento
Irradiancia solar directa (AOD y contenido de vapor de agua)	CIMEL CE-317 (440, 670, 870 y 1020 nm)	Contenido volumétrico de humedad de suelo a 10 cm de profundidad	CS Hydrosense II
Reflectancia de superficie	ASD FieldSpec-4 (350 - 2500 nm)		
	ASD FieldSpec HandHeld (400 - 1000 nm)	Temperatura de brillo	Apogee SI111 (8,0 - 14,0 µm)

óptico de aerosoles (correspondiente a un valor promedio levemente por debajo de los 0,4 g/cm^2), fueron estimados a partir de las mediciones de irradiancia solar directa, empleando el método de Langley Modificado. En relación al AOD a 550 nm (estimado a partir de la fórmula de turbidez atmosférica de Ångström), se obtuvo un valor promedio de 0,092 que corresponde a una reducida carga de aerosoles y refleja la limpieza de la atmósfera. En cuanto a la reflectancia de superficie, las mediciones in situ revelan un alto grado de homogeneidad espacial, con un CV mejor al 4% en todo el rango solar reflectivo. Este estudio demostró que, de acuerdo con los resultados obtenidos de la campaña, el sitio de Tambillo cumple con muchos de los requisitos mencionados por Scott et al. (1996) y Thome (2001), y puede ser empleado para calibrar sensores satelitales y aerotransportados.

En la figura 24 se proporcionan, a modo de referencia, mapas globales de fracción de cobertura nubosa (a), cantidad de vapor de agua precipitable en la atmósfera (b), irradiancia solar (c) y AOD a 550 nm (d). En ellos es posible apreciar las favorables condiciones del área escogida, en función de la alta probabilidad de tener días despejados y cantidad de radiación solar (la mayor a nivel mundial), junto con una atmósfera seca con muy baja carga de aerosoles (Kiemle et al., 2015).

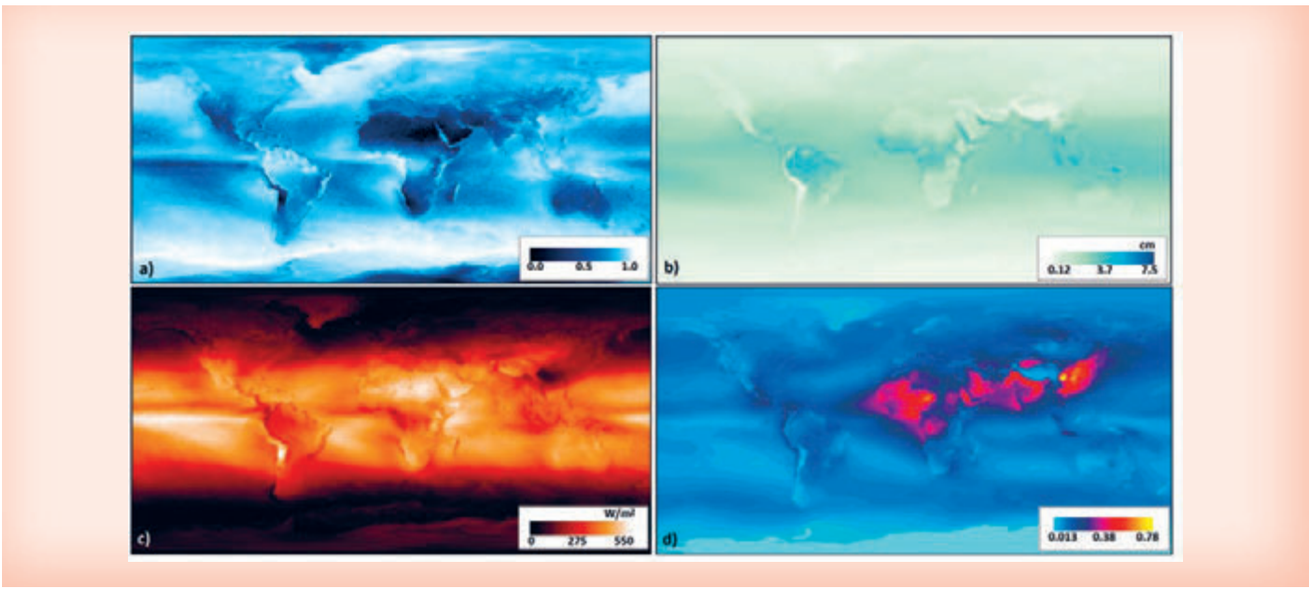


Figura 24: a) Fracción de cobertura nubosa en base a datos TERRA-MODIS; b) Contenido de vapor de agua precipitable en base al producto MOD05 TERRA-MODIS; c) Mapa de irradiancia generado a partir de observaciones del instrumento Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES); d) Espesor óptico de aerosoles a 550 nm basado en productos de TERRA-MODIS, todos los mapas corresponden a promedios generados a partir de productos mensuales desde enero de 2016 hasta abril de 2017. *Fuente: NASA Earth Observations (NEO).*

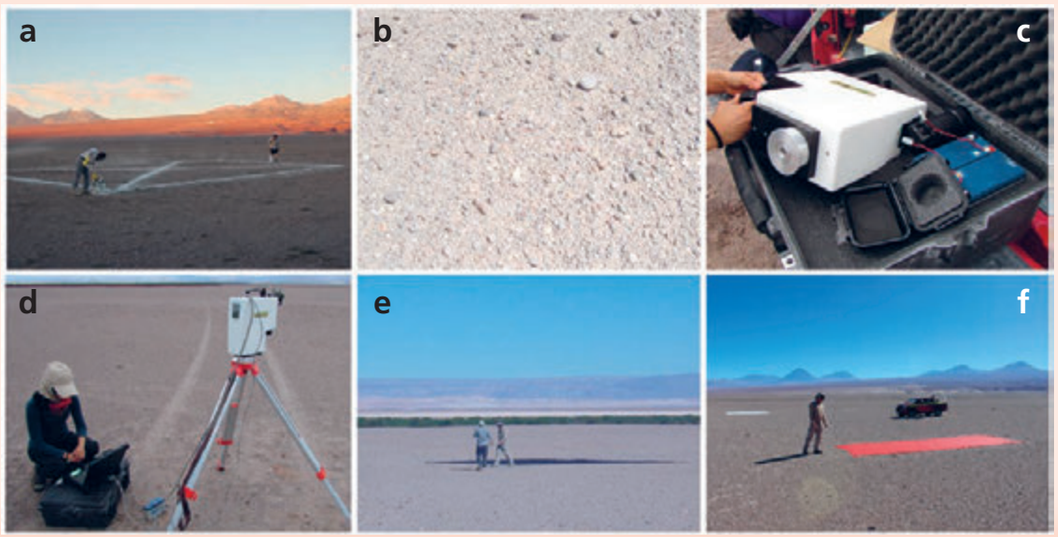


Figura 25: a) Trabajo de terreno realizado en las campañas ejecutadas el año 2016 y 2017, para la georreferenciación precisa de las imágenes y la correcta asociación de las mediciones de reflectancia a ellas se realizó un levantamiento GPS, se hicieron marcas fotoidentificables de los puntos de control y señalizaron los puntos de medición de reflectancia; b) Imagen a nivel de superficie del área de estudio en la que se aprecian, a modo general, la textura y composición del suelo; c y d) Espectrorradiómetro de campo GER-2600 empleado por el SAF para mediciones de reflectancia de superficie en el rango 400-2500 nm; e y f) A modo de experimento se emplearon telas con distintos niveles de reflectividad con el objetivo de evaluar su utilidad en el proceso de calibración. *Fuente: Elaboración propia.*

Tras la ejecución de la primera campaña de caracterización in situ del año 2014, diversas campañas de terreno en Tambillo han sido organizadas por SAF, en conjunto con otros centros de investigación. En abril del 2016 se llevó a cabo una campaña que contó con la participación de GOE, de LAB y el Centro de Ecología Aplicada (CEA). Luego, en octubre del 2016 y mayo del 2017 nuevamente se ejecutaron mediciones de reflectancia in situ, coincidentes con el paso de FASat-Charlie, llevando a cabo incluso algunos experimentos con blancos de distintos niveles de reflectividad (figura 25). Todo este trabajo de terreno, junto con el monitoreo del sitio a través de imágenes FASat-Charlie y otros sensores, ha permitido caracterizar la zona y conocer su grado de homogeneidad espacial y temporal, tanto a nivel BOA, como TOA (figura 26).

El análisis preliminar de los resultados obtenidos en estas campañas (en las que se ha empleado información proveniente de MODIS para caracterizar la atmósfera durante el período de ejecución de las mediciones), indican una variación inferior al 7% en los coeficientes de calibración, con respecto a los determinados en la fase prevuelo. Estos resultados están siendo validados por el grupo de trabajo conformado por SAF y LAB. Otras fuentes de datos atmosféricos están siendo evaluadas y próximamente se darán a conocer mayores detalles de esta investigación conjunta.

2.1.5. Comentarios finales

Para desarrollar estudios con datos capturados por sensores remotos es necesario saber cuánta energía se está recibiendo desde la superficie que queremos analizar en cuanto a estado o comportamiento. En este capítulo se han expuesto, de la manera más sencilla posible, las distintas técnicas de calibración radiométrica absoluta que permiten dar respuesta a esta interrogante.

Se ha explicado que el objetivo principal de la calibración radiométrica es compensar la degradación que afecta a todo sensor satelital como resultado de la exposición a condiciones extremas tras la puesta en órbita. Además, se ha puesto énfasis en el hecho de que la calibración radiométrica es uno de los factores que permite que la variable del ecosistema terrestre de interés sea detectada y monitoreada con la precisión requerida, garantizando que toda variación observada será el fruto de un cambio

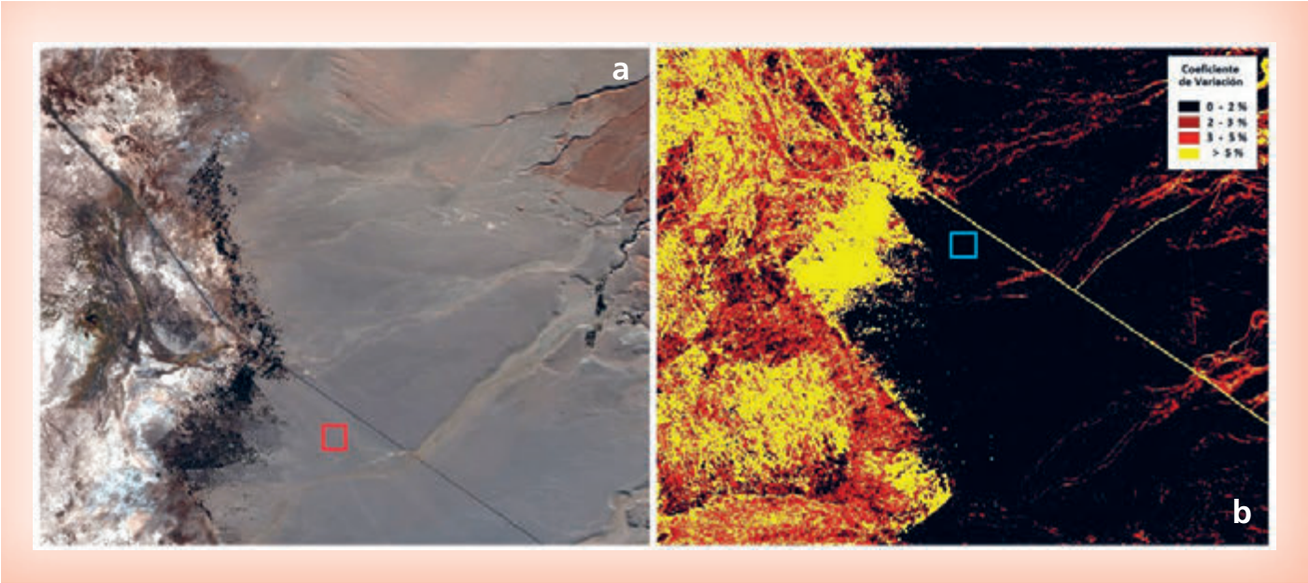


Figura 26: a) Combinación RGB convencional FASat-Charlie del área de Tambillo, el recuadro en rojo señala el área en la que se han ejecutado múltiples campañas; b) Coeficiente de variación (CV) espacial (matriz de 5x5 píxeles) para Tambillo, se observa demarcada en azul el área de estudio, que en general presenta una alta homogeneidad espacial. *Fuente: Elaboración propia.*

real y no una variación aparente, introducida por desviaciones en la respuesta del instrumento.

En base a los antecedentes entregados se visualiza que los diversos grupos a cargo de las actividades de Cal/Val de distintos sensores satelitales han orientado sus esfuerzos hacia la integración de los distintos métodos, combinando diversas técnicas vicarias como estrategia de validación y monitoreo, incluso en los casos en que los calibradores a bordo han sido contemplados como parte de la infraestructura de una determinada misión satelital.

En lo que a las actividades de Cal/Val del satélite chileno FASat-Charlie se refiere (el que está pronto a cumplir su vida operativa y que ya ha excedido su vida útil nominal), se han desarrollado trabajos que han contemplado la ejecución de mediciones in situ, empleando la metodología de calibración cruzada. Estas actividades seguirán siendo realizadas mientras el satélite se encuentre operativo y también se ha considerado el amarre con otras misiones, ya sea de continuidad o de plataformas operadas por otras agencias. El desarrollo continuo de estas actividades ha permitido el establecimiento de un grupo de trabajo y colaboración, lo que sin duda ha conducido a la mejora de los protocolos de captura de datos y procesamiento, y también favorecerá el establecimiento de un nuevo sitio de calibración de sensores en Chile. Todos estos esfuerzos y actividades conjuntas serán fundamentales para avanzar como comunidad chilena en el área de percepción remota.

2.1.6. Listado de acrónimos

En tabla 4 se presenta un listado de acrónimos utilizados en este capítulo.

Tabla 4: Lista de acrónimos mencionados. *Fuente: Elaboración propia.*

Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
ADEOS	Advanced Earth Observing Satellite	m.s.n.m.m	Metros sobre el nivel medio del mar
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
ALI	Advanced Land Imager	MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
AOD	Aerosol Optical Depth	MOBY	Marine Optical BuoY
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
AtlN/AtlS	Atlántico Norte y Sur	MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
AVHRR	Advanced Very-High-Resolution Radiometer	MSI	Multispectral Imager
BOA	Bottom-Of-Atmosphere	MSS	Multispectral Scanner
BOUSSOLE	BOUée pour l'acquiSition d'une Série à Long termE	MTF	Modulation Transfer Function
BRDF	Bi-directional Reflectance Distribution Function	MTSAT	Multifunctional Transport Satellite
Cal/Val	Calibración y Validación	NAOMI-1	New AstroSat Optical Modular Instrument 1
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite	NASA	National Aeronautics Space Agency
CDOM	Colored Dissolved Organic Matter	NIST	National Institute of Standards and Technology
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System	NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
CEOS	Committee on Earth Observation Satellites	OBC	On-Board Calibrator
CGMS	Coordination Group for Meteorological Satellites	OCM-2	Ocean Colour Monitor-2
CHRIS	Compact High Resolution Imaging Spectrometer	OCTS	Ocean Color and Temperature Sensor
CNES	Centre National d'Études Spatiales	OLCI	Ocean and Land Color Instrument
CONAF	Corporación Nacional Forestal	PacN/PacNW	Pacífico Norte / Noroeste
CTR/MTR	Código/ Modelo de Transferencia Radiativa	PacSE	Pacífico Sureste
CV	Coeficiente de Variación	PARASOL	Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Science coupled with Observations from a Lidar
CZCS	Coastal Zone Color Scanner Experiment	PICS	Pseudo-Invariant Calibration Sites
DCC	Deep Convective Clouds	POLDER	POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances
DN	Digital Numbers	PROBA-V	PRoject for On-Board Autonomy - Vegetation
DoCoRi	Domo Costa Rica	PTFE	Politetrafluoretileno
EEM	Espectro Electro-magnético	RMSE	Root Mean Square Error
EO-1	Earth Observing-1 Mission	ROLO	RObotic Lunar Observatory
ESA	European Space Agency	ROSAS	RObotic Station for Atmosphere and Surface
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus	RSR	Relative Spectral Response
EUTMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites	SAF	Servicio Aerofotogramétrico
GaoFen-1	Chinese High Resolution Imaging Satellite-1	SBAF	Spectral Band Adjustment Factor
GEO	Geosynchronous Earth Orbit	SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor
GIRO	GICS Implementation of ROLO	6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
GIOVANNI	Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure	SELENE	SELenological and ENgineering Explorer
GLI	Global Imager	SLIM 6	Surrey Linear Imager 6
GMS	Geostationary Meteorological Satellite	SMARTS2	Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine -2
GOE	Grupo de Operaciones Espaciales	SNO	Simultaneous Nadir Overpass

Acrónimo	Significado	Acrónimo	Significado
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	SNR	Signal-to-Noise Ratio
GSD	Ground Sampling Distance	SSOT	Sistema Satelital de Observación de la Tierra
GSICS	Global Space-based Inter-Calibration System	SWIR	Infrarrojo de Onda Corta
HiRAIS	High Resolution Advanced Imaging System	TIR	Infrarrojo Termal
HLS	Harmonized Landsat Sentinel-2 surface reflectance	TM	Thematic Mapper
HSI	Hyperspectral Imager	TOA	Top-of-Atmosphere
IndS	Océano Índico Sur	UAV	Unmanned Aerial Vehicle
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales	USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
ISRO	Indian Space Research Organisation	VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
IVOS	Infrared and Visible Optical Systems	VISSR	Visible and Infrared Spin Scan Radiometer
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	VNIR	Visible e Infrarrojo Cercano
L8-OLI	Landsat-8 Operational Land Imager	WGCV	Working Group on Calibration and Validation
LAB	Laboratorio para el Análisis de la Biósfera	WMO	World Meteorological Organization
LEO	Low Earth Orbit		

2.2 Fundamentos del sistema radar

Carlos Cárdenas Mansilla

Dirección de Programas Antárticos y Subantárticos, Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile

2.2.1. Introducción

En términos generales, un sensor es un dispositivo diseñado para adquirir información de un tipo de magnitud y transformarla en otra. Por ejemplo, de acuerdo con su aplicación, un sensor puede estar construido de diferentes materiales, cuyas características definen qué tipo de conversión realiza y, además, determinan las propiedades de salida. Los sensores pueden clasificarse de muchas formas, sin embargo, un tipo de clasificación básica es diferenciar los sensores como pasivos o activos, por medio del tipo de fuente que utilizan para obtener información específica del objetivo de interés. Los sensores pasivos requieren de una fuente de alimentación externa para generar su señal de salida, en cambio un sensor activo lo obtiene por medio de una fuente propia. Teniendo en cuenta la definición de sensor antes descrita, es posible establecer que un sensor remoto es un dispositivo que permite adquirir información, sin tener contacto físico con el objetivo de interés (Pellikka y Rees, 2010).

En muchos procesos que involucran el uso de sensores remotos, existe la interacción entre la radiación incidente y el objetivo de interés, como ocurre en el caso del uso de sistemas de captura de imágenes, donde también es posible diferenciar tanto el uso de sensores pasivos como de activos (CCRS, 2017). En el caso del sensor pasivo, la energía electromagnética que interactuará con el objetivo de interés es la generada por el Sol, que actúa como fuente de energía externa; en cambio, en el caso de los sensores activos, la energía que viaja entre la fuente y el objetivo de interés, es generada por una fuente artificial de ondas electromagnéticas que normalmente se encuentran en el espectro de las microondas o de radar (ver figura 27).

Un sensor remoto, que captura imágenes, requiere de una fuente de energía en forma de radiación electromagnética, natural o artificial, que interactúe sin tener contacto físico con el objetivo de interés. Cuando el Sol provee la energía, el sensor pasivo captura aquella energía que es reflejada desde una superficie remota, tanto para las longitudes de onda del espectro visible, como para las absorbidas y que posteriormente son remitidas en el espectro del infrarrojo térmico (figura 28a).

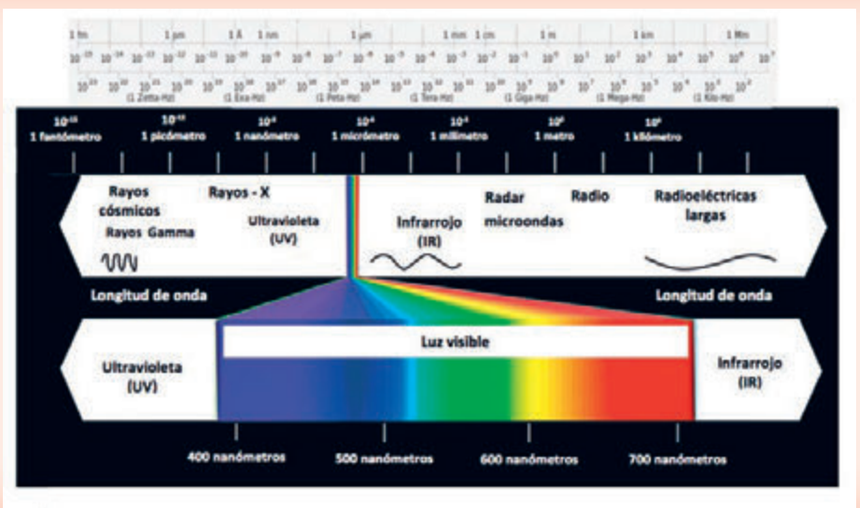


Figura 27: Espectro electromagnético. *Fuente: Imagen adaptada.*

Un sensor pasivo solo puede ser utilizado para detectar energía que está disponible en forma natural. Por lo tanto, esto solo puede suceder mientras el Sol esta iluminando la Tierra, es decir, solo de día y junto a condiciones meteorológicas que mantenga la atmósfera libre de nubosidad, permitiendo la interacción con el objetivo de interés.

La energía térmica puede ser detectada tanto de día como de noche. En el caso de los sensores activos, estos emiten su propia energía de radiación directamente sobre el objetivo de interés, luego la radiación reflejada desde el objetivo es detectada y medida por el sensor. Como estos sensores generan su propia energía, tienen la habilidad de obtener mediciones en cualquier momento, independiente de las condiciones de nubosidad o si es de día o de noche (figura 28b).

2.2.2. Los sensores activos

Los sensores remotos activos operan en la porción del espectro electromagnético de las microondas (figura 27), el que incluye las longitudes de onda que van en el rango de 1 mm a 1 m. Esta energía se puede caracterizar por dos capacidades: 1) las microondas son capaces de penetrar la atmósfera bajo prácticamente todas las condiciones (dependiendo de la longitud de la onda, la energía puede viajar a través de neblina o bruma, lluvia o nieve ligera, nubes y también smog); y 2) la energía reflejada o remitida desde diferentes materiales, no representan gráficamente las mismas características de su contraparte en el espectro visible o térmico (Lillesand et al., 2008).

En la práctica, las capacidades de los sensores activos son mucho menores comparadas con los sensores pasivos. Sin embargo, con el incremento de las habilidades de los sensores activos instalados en plataformas aeroespaciales, estos sensores han ganado terreno sustancialmente. A continuación, se presenta con mayor detalle las características principales los sistemas de radar que, en su conjunto, corresponde a un sensor activo.

2.2.2.1. Fundamentos de un sistema de radar

RADAR es un acrónimo de RAdio Detections And Ranging y como su nombre lo indica fue desarrollado para, mediante el uso de las ondas de radiofrecuencia, detectar la presencia de objetos, determinar su distancia y en algunos casos, obtener el ángulo y la posición de los mismos. Los sistemas de radar tienen la capacidad de producir imágenes, sin embargo, existen aplicaciones específicas donde no es necesaria la generación de imágenes. Un ejemplo de esto es el caso del sistema de radar que utiliza el efecto Doppler, el que permite determinar el cambio de frecuencia entre la señal que se transmite y la que se recepciona, con el objetivo de determinar la velocidad de desplazamiento de un objeto específico. Otra forma común de radar sin generación de imágenes es el sistema denominado Plano Indicador de Posición (Plan Position Indicator, PPI), el que

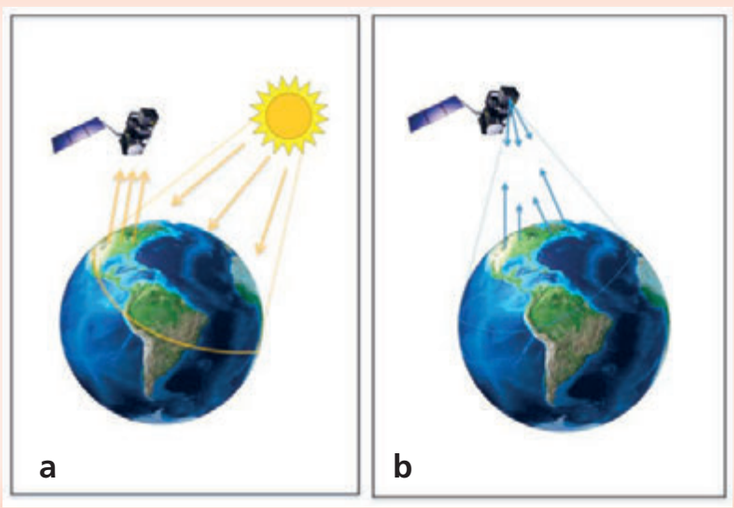


Figura 28: a) Energía capturada por un sensor pasivo; b) Energía transmitida y capturada por un sensor activo. *Fuente: Imagen adaptada.*

muestra sobre una pantalla circular un barrido radial, que indica la posición de objetivos de interés. Este sistema normalmente es utilizado para identificar desplazamientos de naves marítimas (Scheer y Kurtz, 1993).

Por otro lado, los sistemas de radar cuyos sensores están instalados sobre plataformas de transporte terrestre, aerotransportada o aeroespacial, están orientados normalmente a obtener imágenes del tipo radar. Como ejemplos de sistemas de radar instalados sobre plataformas de transporte terrestres se pueden nombrar los sistemas de radar de penetración terrestre (Ground Penetrating Radar, GPR) y el sistema de radioecosondaje para aplicaciones glaciológicas (Radio Echo Sounding, RES). Ambos sistemas generan imágenes de estructuras internas o radiografías, que son utilizadas ampliamente en estudios geofísicos, geológicos o glaciológicos, que tienen directa relación con problemáticas globales, por ejemplo, en estudios de cambio climático, donde estas imágenes permiten identificar aspectos relevantes en este tipo de investigaciones (Bogodorosky et al., 1985). En cuanto a los sistemas de observación que generan imágenes de radar y que están instalados sobre plataformas aéreas o espaciales, normalmente tienen una antena fija bajo la aeronave la que es direccionada hacia un costado, denominando a estos sistemas como radar de barrido lateral (Side-looking Radar, SLR) o radar de barrido aéreo lateral (Side-Looking Airborne Radar, SLAR), en el caso de sistemas aerotransportados. Los sistemas con mayor proyección, por su avanzado método de procesamiento de la información y sus capacidades para capturar información, son los radares de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR) (Skolnick, 1980).

El principio básico de operación de un sistema SLR se muestra en la figura 29 (a), donde un transmisor que está instalado sobre una aeronave, transmite un corto tren de pulsos de energía electromagnética hacia la superficie terrestre, representada por ondas frontales localizadas en sucesivos incrementos de tiempo (de 1 a 10) que, al alcanzar la casa en el tiempo 6, son reflejadas hacia la aeronave alcanzándola en el tiempo 12. De igual forma, las ondas frontales alcanzan el árbol en el tiempo 9, para luego alcanzar la antena de la aeronave en el tiempo 17. Luego, en la figura 29 (b), se puede apreciar que el árbol absorbe más energía que la casa, cuya respuesta es representada por el gráfico respectivo. En general, los diferentes tipos de sistemas de radar antes enunciados, a pesar de lo complejo que pueda ser, tanto su instalación, como su configuración, son básicamente sistemas constituidos de dispositivos electrónicos que permiten en su conjunto, determinar distancias a partir de la medición del tiempo de retorno de una onda de radiofrecuencias generada, transmitida y recepcionada por el mismo sistema.

El tiempo de viaje de la onda de radiofrecuencia (τ), desde su transmisión a través de la antena transmisora, hasta su regreso a la antena receptora, puede describirse por medio de la fórmula 1. De esta forma, es posible obtener el valor de la distancia recorrida o Rango (R), a través de la velocidad de propagación de la onda desplazándose en el medio, cuyo valor es conocido (v). El valor 2 incluido en la expresión, corresponde al doble recorrido que realiza la onda electromagnética o señal de radiofrecuencia en ir y volver al punto de transmisión.

$$\tau = \frac{2R}{v} \quad (1)$$

Es importante mencionar que una señal de radiofrecuencia transmitida a través de un medio específico deberá saltar una serie de obstáculos durante su viaje hasta que alcance el receptor, por lo que, en la práctica, perderá energía hasta niveles en donde no pueda ser detectada. Estos niveles de energía críticos pueden ser establecidos a través de la relación señal ruido (S/N), que involucra los parámetros que definen la capacidad de un sistema de radar para detectar un nivel de energía específico y que se obtiene a través de la relación entre la ecuación de radar y los niveles de ruido a la cual la onda electromagnética está expuesta durante su viaje (Rohling, 2014).

2.2.2.2. La ecuación de radar

La capacidad de un sistema de radar para detectar un objetivo de interés, puede ser descrito mediante la Ecuación de Radar (Rohling, 2014).

Se debe tener en cuenta que un sistema de radar está radiando con potencia de transmisión (P_t) a través de la antena transmisora de Ganancia (G_t), y asumiendo que la antena del sistema está radiando en forma esférica con una ganancia de 0 dBi, como se indica en la figura 30.

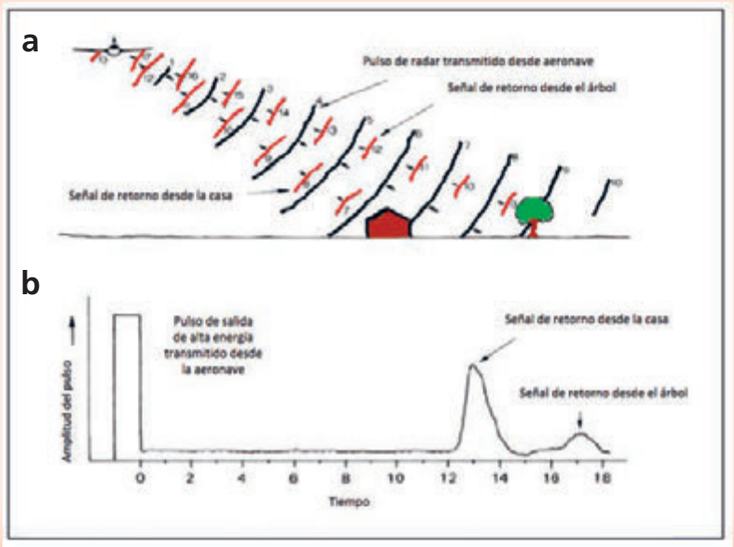


Figura 29: a) Propagación de un pulso de radar (intervalos de tiempo 1-17); b) Resultado en la antena receptora.*Fuente: Lillesand et al. (2008).*

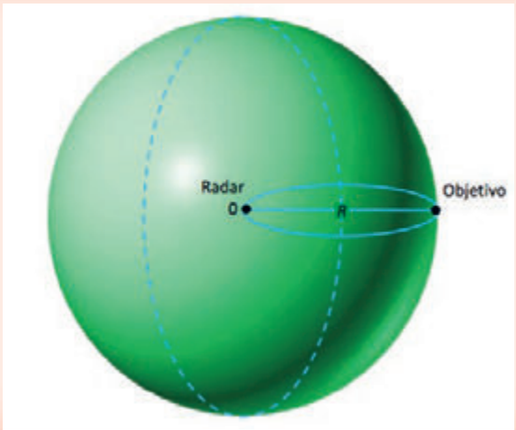


Figura 30: Radiador esférico isotrópico con una ganancia de 0 dBi. *Fuente: Adaptado desde Rohling (2014).*

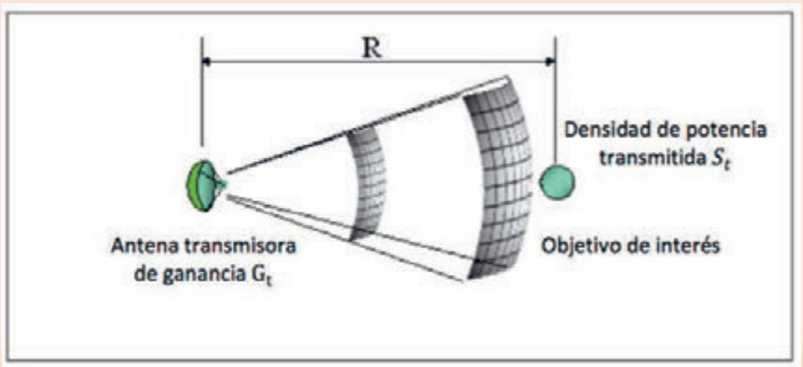


Figura 31: Densidad de potencia de transmisión a una distancia R del objetivo de interés. *Fuente: Adaptado desde Rohling (2014).*

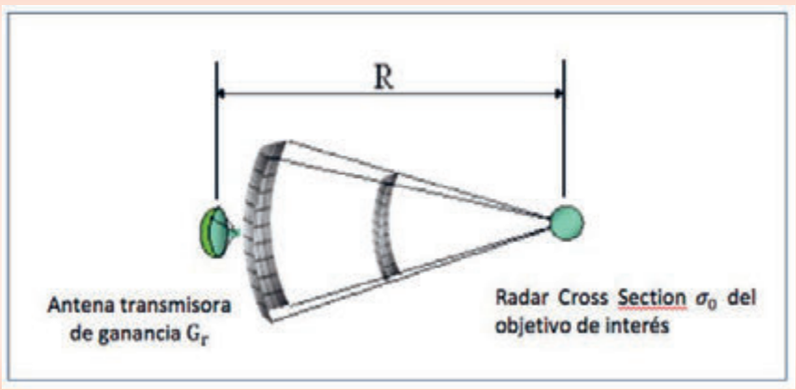


Figura 32: Densidad de potencia de recepción a una distancia R, cuya fuente, en este caso, es la potencia reflejada desde el objetivo de interés. *Fuente: Adaptado desde Rohling (2014).*

De acuerdo con la figura 31, se puede establecer una densidad de potencia transmitida S_t a un Rango (R), como describe la fórmula 2.

$$S_t = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \qquad (2)$$

De igual forma, se puede obtener la densidad de la potencia de recepción S_r en la antena receptora. En ese sentido y según la figura 32, es posible establecer una densidad de potencia de recepción S_r a un rango de distancia R, como describe la fórmula 3.

$$S_r = \frac{P_t G_r \sigma_0}{(4\pi R^2)^2} \qquad (3)$$

donde el parámetro σ_0 es el Radar Cross Section (RCS o sección cruzada de radar), correspondiente a una constante que involucra el tamaño, tipo de material, forma, dirección respecto del objetivo de interés, además del tipo de antena y longitud de onda de la señal; en tanto G_r corresponde a la ganancia de la antena receptora.

Por otra parte, al tomar en cuenta el tamaño y forma de la antena, es posible relacionar la ganancia y el área efectiva A_e de la antena receptora a través de la relación 4.

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \qquad (4)$$

A partir de esto, se puede escribir la potencia de recepción (P_r) en la antena receptora por la fórmula 5.

$$P_r = \frac{P_t G_t \sigma_0}{(4\pi R^2)^2} A_e \qquad (5)$$

Tomando en cuenta la fórmula 5, además de incluir el término L que representa las pérdidas de la señal durante su propagación por el medio y en el sistema de radar, y despejando A_e desde la fórmula 4, la expresión 5 se puede reescribir en la fórmula 6

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi)^3} \frac{\sigma_0 \lambda^2}{R^4} \frac{1}{L} \qquad (6)$$

Finalmente, considerando que la antena transmisora tiene iguales características a la antena receptora, se cumple que $G(_r) = G_t = G$, entonces la Potencia de recepción (P_r) puede ser escrita de acuerdo a la fórmula 7, la cual se le denomina ecuación simplificada de radar.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} \qquad (7)$$

Por otro lado, la señal de recepción siempre estará acompañada de ruido, el cual está compuesto del ruido de ancho de banda (B_N), el ruido térmico (T_R). el Factor de ruido (F), y la constante de Boltzmann ($k_B = 1{,}38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$). Con esto, se define la potencia del ruido en el receptor (N) como se expresa en la fórmula 8

$$N = k_B T_R B_N F \qquad (8)$$

A partir de lo anterior, es posible definir la relación señal ruido (Signal-to-Noise Ratio, S/N) mediante la fórmula 9.

$$S/N = \frac{P_r}{N} = \frac{P_s G^2 \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 N L} \qquad (9)$$

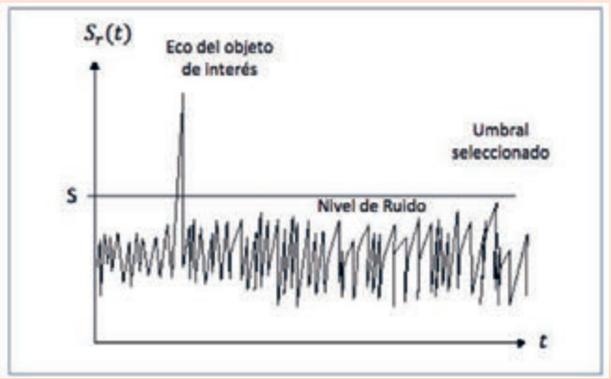


Figura 33: Señal de recepción típica de un sistema de radar de pulso en función del tiempo. *Fuente: Rohling (2014).*

De la ecuación [9], se puede obtener el máximo valor del Rango (), según se indica en la fórmula 10.

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G^2 \sigma_0 \lambda^2}{(4\pi)^3 N (S/N) L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

2.2.2.3. Detección de objetivos de interés mediante un radar

La detección del objetivo de interés del radar asegura la decisión entre un verdadero objetivo o un falso objetivo de interés. Para ello, es comparada la amplitud capturada por la antena *[S_(r) (t)]* y la amplitud del umbral seleccionado S, como lo muestra la figura 33.

2.2.2.4. La resolución de un sistema de radar

Se puede definir resolución de un sistema de radar como la habilidad de detectar separadamente múltiples objetivos de interés (o múltiples características de un mismo objetivo de interés) en lugar de reportar múltiples objetivos con una sola detección (Byron, 1995) (ver figura 34).

Un objetivo de interés puede ser determinado en cuatros dimensiones (no necesariamente por todos los radares), que son: Rango (distancia), horizontal cross-range (azimuth), vertical cross-range (elevación) y diferencia Doppler. La resolución en rango *(ΔR)* es la habilidad del sistema de radar para detectar separadamente múltiples objetivos de interés sobre una misma posición angular, pero de diferentes rangos. En el caso de un sistema de radar de pulsos, la resolución en rango se puede determinar de acuerdo con la expresión 11, obtenida desde la ecuación 1.

$$\Delta R = \frac{c\tau_c}{2} \quad (11)$$

donde c corresponde a la velocidad de la luz (3×10^{-8}) *m/s)* y τ_c es el tiempo equivalente al ancho del pulso procesado. Cuando el valor del ancho del pulso procesado

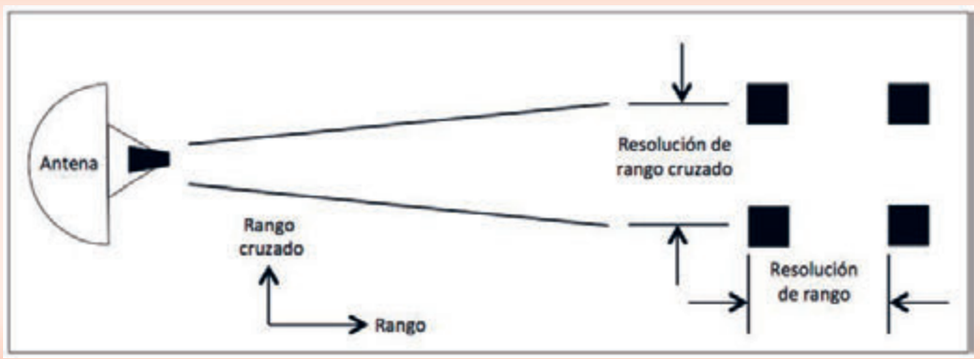


Figura 34: Resolución en rango y rango cruzado. *Fuente: Adaptada desde Byron (1995).*

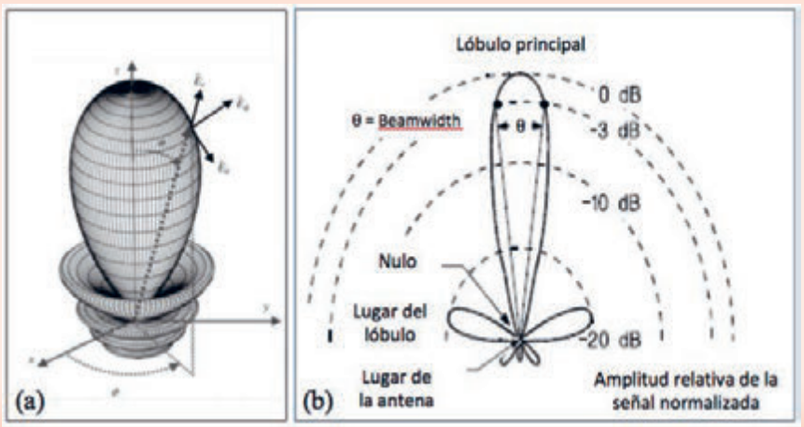


Figura 35: a) Patrón de radiación de un tipo de antena; b) Amplitud relativa de la señal normalizada de un patrón de radiación. *Fuente: Adaptada desde Balanis (2005).*

es aproximadamente igual al pulso transmitido, se puede describir el rango de resolución en términos de ancho de banda, obteniendo la fórmula 12, donde B corresponde a la adaptación del ancho de banda transmitido (Hertz).

$$B \approx \frac{1}{\tau_c} \quad (12)$$

2.2.2.5. Control del rango de resolución

Con el objetivo de entender cómo se obtiene una mayor resolución, se puede remplazar la expresión 12 en 11 para obtener la fórmula 13.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (13)$$

Esta expresión determina el rango de resolución ΔR en metros, desde donde es posible deducir que este parámetro puede ser controlado por medio del ancho de banda B que está directamente relacionado con el ancho del pulso. Por lo tanto, para determinar un rango de resolución específico será necesario variar el valor de τ_c.

Así como es factible controlar el rango de resolución de un sistema de radar, también existen técnicas para adecuar los valores de resolución de rango cruzado (cross-range), más allá de disponer únicamente tamaños físicos razonables de antenas con su respectivo ancho de iluminación o beamwidth (Balanis, 2005) (donde el beamwidth es definido junto a la separación angular de dos puntos idénticos de lados opuestos del lóbulo principal del patrón de radiación de una antena (figura 35b)).

Luego, el proceso de mejorar el rango cruzado o cross-range, depende de observar el objetivo de interés visto en forma secuencial desde diferentes posiciones, con una pequeña antena real (figura 36a). De acuerdo con la figura 36b, la antena está primero en la posición 1 donde se transmite el pulso y la señal es almacenada, luego la antena se mueve a la posición 2 y así hasta la posición 4, repitiendo el proceso realizado en la posición 1. De esa forma, se obtiene como resultado una antena virtual de mayor longitud, que mejora la resolución cross-range en comparación con la antena que permanece en una sola posición. En resumen, estos sistemas sintetizan el efecto de una antena virtualmente muy larga por medio del procesamiento de la información capturada, denominándose sistemas de radar de apertura sintética (Syntetic Aperture Radar, SAR).

2.2.2.6. Sistemas de radar de apertura sintética

Los sistemas que utilizan antenas reales empleando su propio ancho de iluminación (beamwidth) son conocidos como sistemas de Radar de Apertura Real (RAR) (ver figura 36a). Los sistemas que pueden mejorar la resolución cross-range a través del movimiento de la antena son conocidos como Sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) (figura 36b). Esta técnica SAR es implementada en situaciones donde el sistema de radar se mueve rápidamente con respecto al objetivo de interés, permaneciendo estos, estacionarios. De igual forma como un radar instalado sobre un avión, registra los objetivos de interés sobre la superficie terrestre (figura 37).

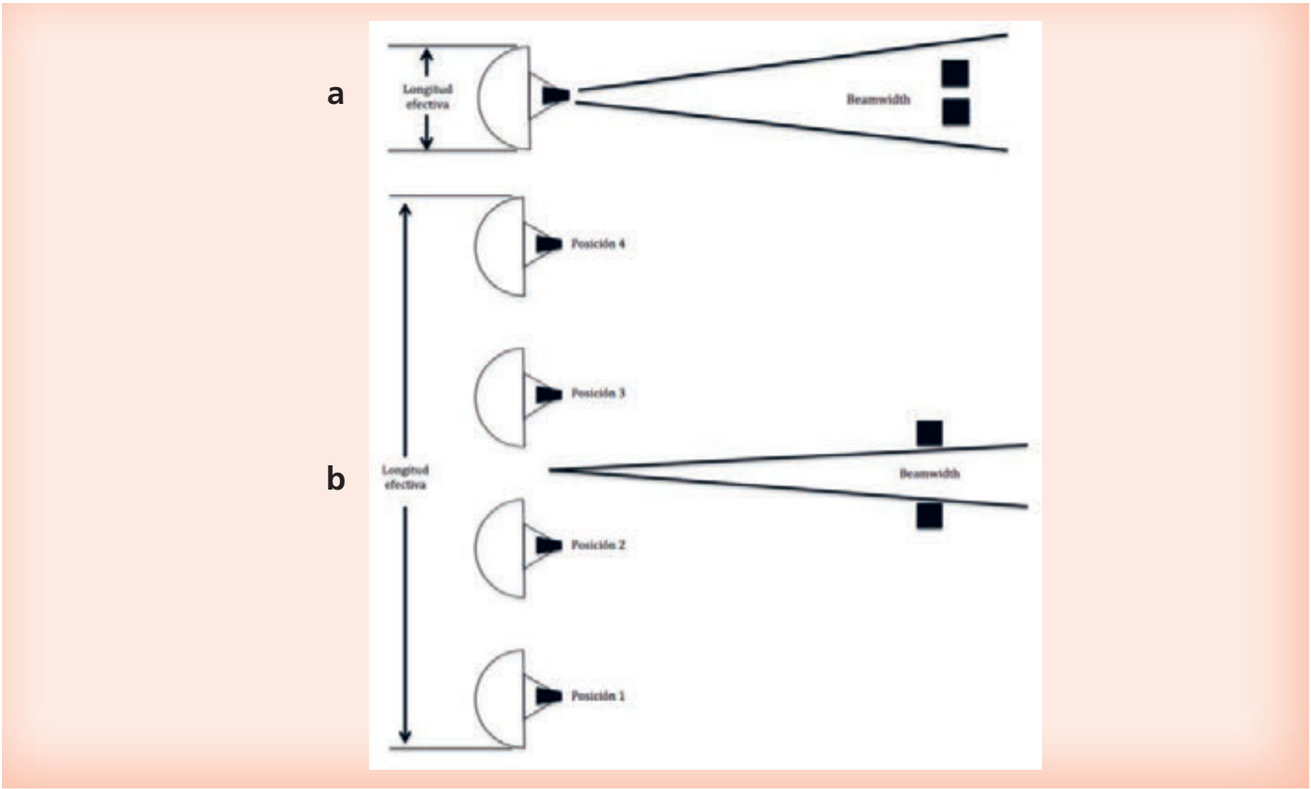


Figura 36: a) Antena real pequeña, objetos de interés no resueltos; b) Antena sintetizada grande, objetos de interés resueltos. *Fuente: Adaptada desde Byron (1985).*

Los sistemas SAR utilizan antenas físicamente cortas y por medio de técnicas del procesamiento de la información adquirida ellas sintetizan el efecto de una antena muy larga. El resultado de este modo de operación es una antena con un angosto beamwidth, incluso en rangos lejanos, sin requerir antenas físicamente largas. Esto es logrado a través de la captura de información obtenida tras varias posiciones sucesivas de la antena física a lo largo de la línea de vuelo, simulando un arreglo en que unidas actúan como una única antena y con un patrón de radiación propio (sintético). De ahí este proceso, al ser realizado desde una plataforma espacial, puede sintetizar antenas largas de varios kilómetros de longitud.

El sistema SAR barre en forma lateral a su dirección de vuelo y el procesamiento de la información adquirida produce una imagen de alta resolución espacial gracias al arreglo sintético antes mencionado, el que a su vez utiliza el efecto Doppler producido por los ecos de retorno del sistema de radar, para integrar la información de movimiento de la plataforma aérea al procesamiento de la antena sintetizada.

La figura 38 muestra la variación con la distancia del tamaño de la celda de resolución terrestre del Radar de Apertura Real (RAR), versus el Radar de Apertura Sintética (SAR). De la comparación se puede entender que al incrementar la distancia desde la aeronave, la resolución en azimut incrementa en el caso del RAR y permanece constante en el caso del SAR; además que la resolución en rango terrestre permanece constante en ambos sistemas.

2.2.3. Polarimetría: Aplicación utilizando imágenes de radar

Dos factores influencian la transmisión de una señal de radar: 1) la longitud de la onda y 2) la polarización del pulso transmitido. La longitud de onda de la señal transmitida es atenuada o dispersada por la atmósfera y puede ser transmitida en diferentes modos de polarización, los que son definidos por el plano geométrico que forma la oscilación de su campo eléctrico. Teniendo en cuenta lo anterior, las mediciones de las propiedades polarimétricas de patrones de objetos reflectantes se denomina

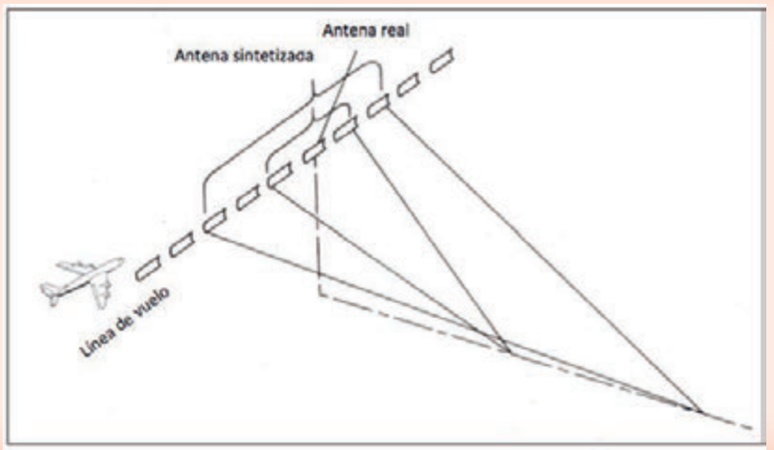


Figura 37: Modelo de arreglo a través de la posición de una antena real formando una apertura sintética. *Fuente: Adaptada desde Lillesand et al. (2008).*

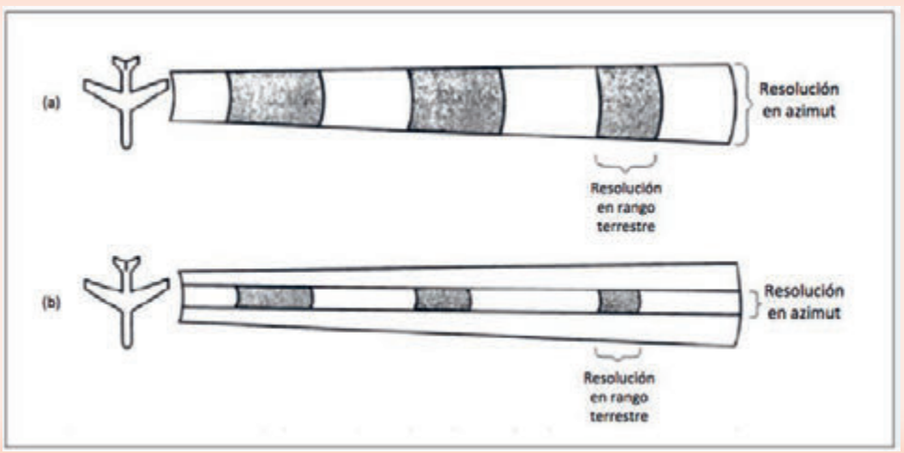


Figura 38: Variación con la distancia, del tamaño de la celda de resolución terrestre del Radar de Apertura Real a) versus Radar de Apertura Sintética b). *Fuente: Lillesand et al. (2008).*

polarimetría. Por lo tanto, la polarimetría se puede definir como la ciencia de adquirir, procesar y analizar el estado de polarización del campo electromagnético resultante de un objeto de interés. En el caso de las imágenes de radar, es el estudio del estado de polarización de estas imágenes, las cuales están formadas por ecos de retornos de varias combinaciones de polarización mientras se transmite y recibe, hacia y desde los medios reflectores (Lee et al., 2009).

La polarización contiene información de las ondas reflejadas desde el medio específico, que está altamente relacionado con su geometría, orientación y propiedades geofísicas. Esto es posible como consecuencia de la interacción de la onda electromagnética y su paso a través de medios específicos de diferentes índices de refracción o cuando esta golpea un objeto o superficie reflectora (superficie scattered), generando ondas reflejadas en diferentes direcciones. Entonces, en base a la información reflejada, la forma y orientación del cuerpo reflector, puede ser obtenido por medio de la matriz de coherencia o matriz Sinclair (Lillesand et al., 2008).

Como ejemplo del uso de la polarimetría, se presenta en forma resumida, un trabajo realizado como parte de un tema de tesis del programa de Magíster en Ciencias Antárticas de la Universidad de Magallanes, donde se analizan las características del hielo marino a través de la descomposición polarimétrica y la entropía de Shannon. Estas dos técnicas permiten establecer el comporta-

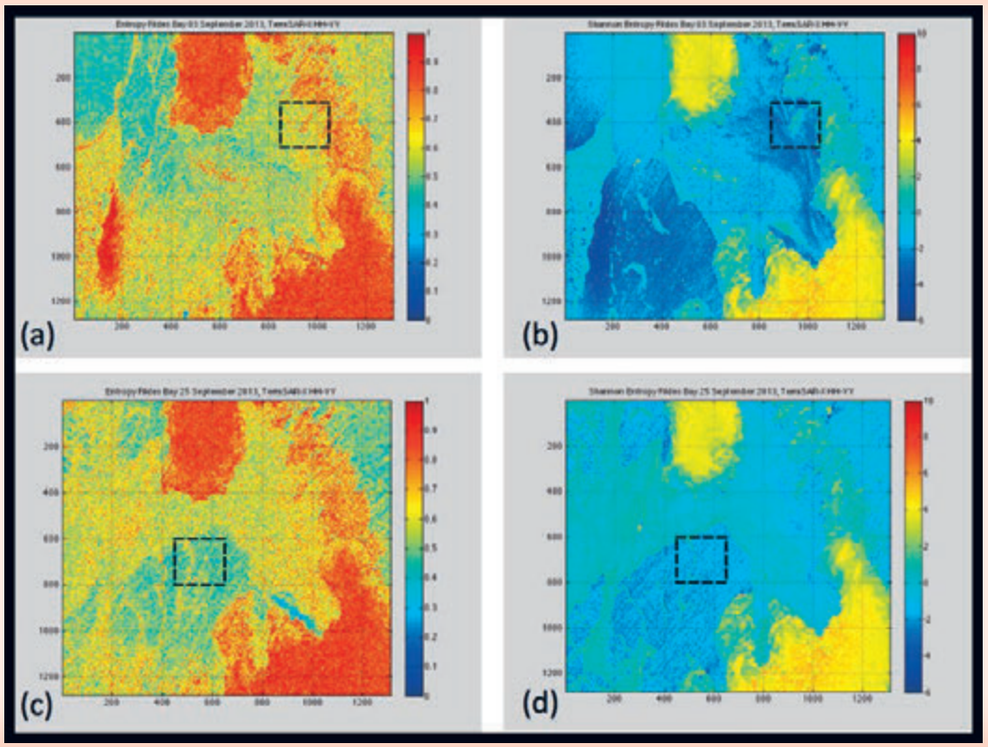


Figura 39: Entropía (H) a) y Entropía de Shannon b) para el 3 septiembre de 2014; y Entropía (H) c) y Entropía de Shannon d) para el 25 septiembre de 2014. *Fuente: Escobar (2014).*

miento de los reflejos, o backscatterer, generados desde un sistema de radar que emite ondas electromagnéticas polarizadas en forma dual (HH - VV) y que son reflejadas desde la superficie de hielo marino ubicado en las inmediaciones de la Bahía Fildes, Isla Rey Jorge, en la Antártica.

En este trabajo se utilizaron imágenes de radar obtenidas desde el satélite TerraSAR-X, de dos días específicos, sobre la zona de estudio (3 y 25 de septiembre de 2013), en frecuencias de 9,65 Ghz (λ=3,1), capturada en modo StripMap (SSC) y con Polarización dual (HH-VV).

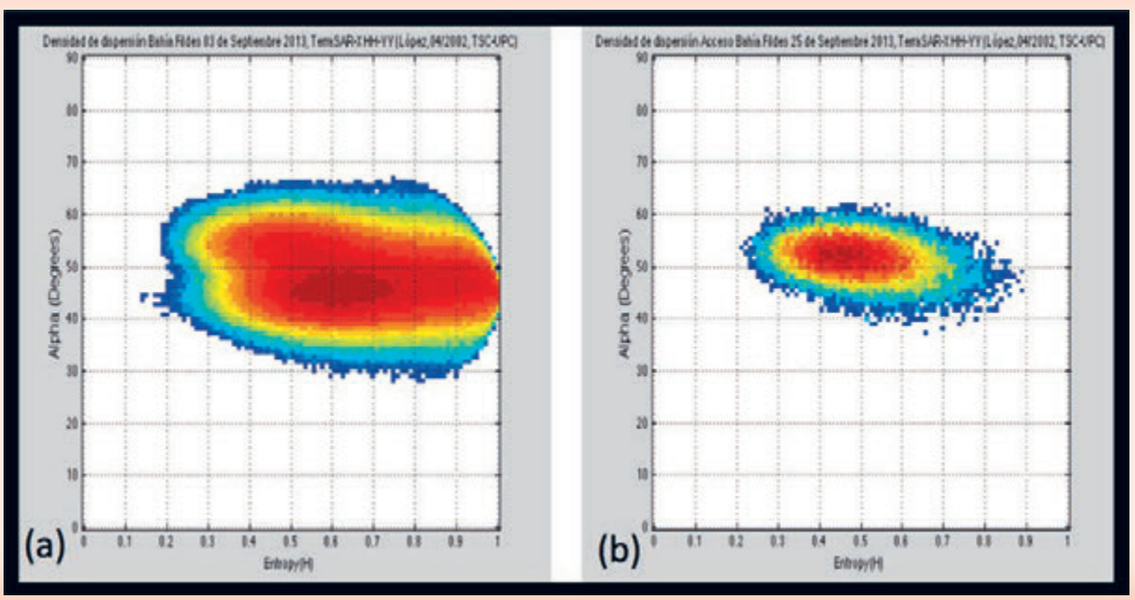


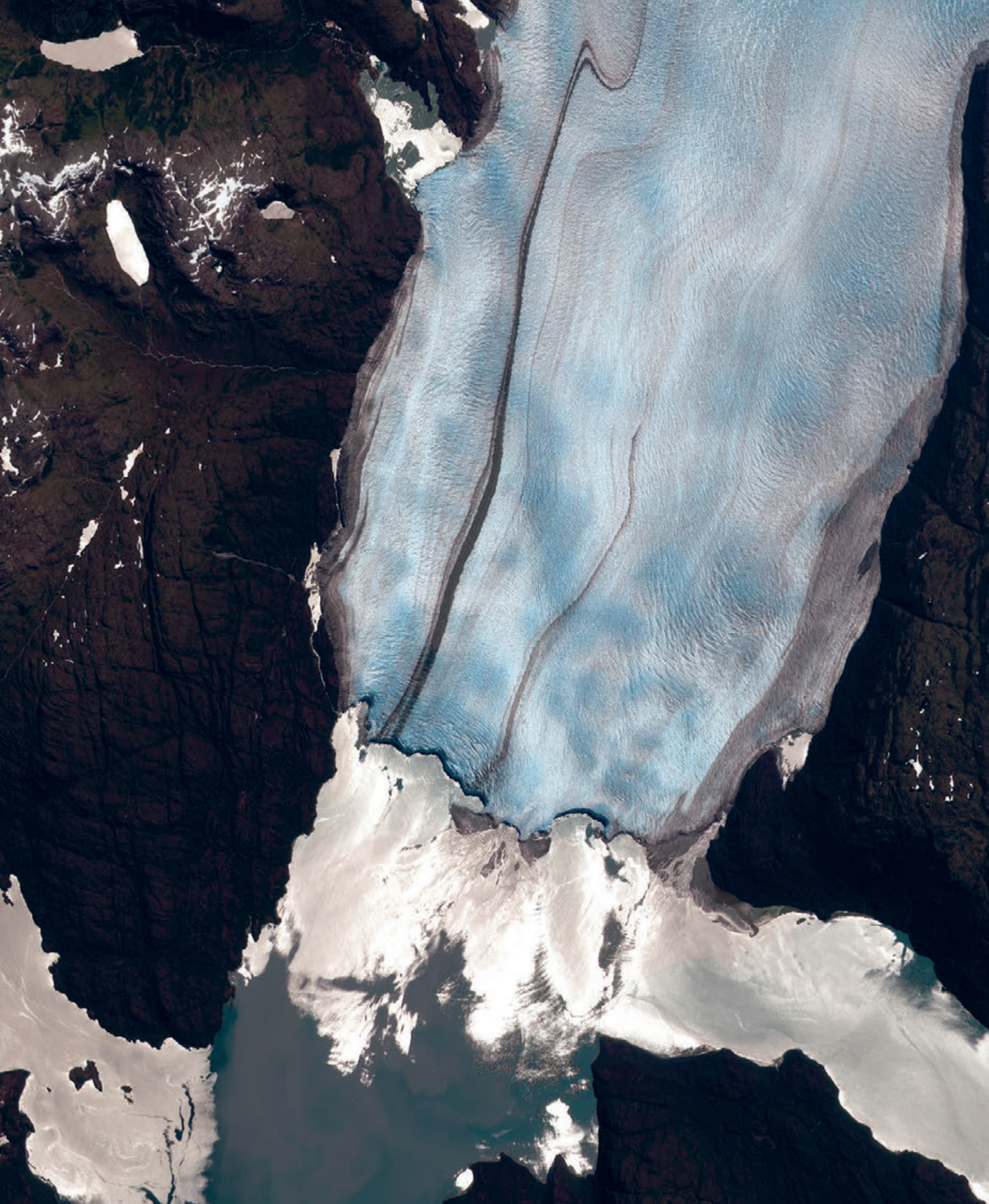
Figura 40: a) H/α (3 septiembre de 2013); b) H/α (25 septiembre de 2014). *Fuente: Escobar (2014).*

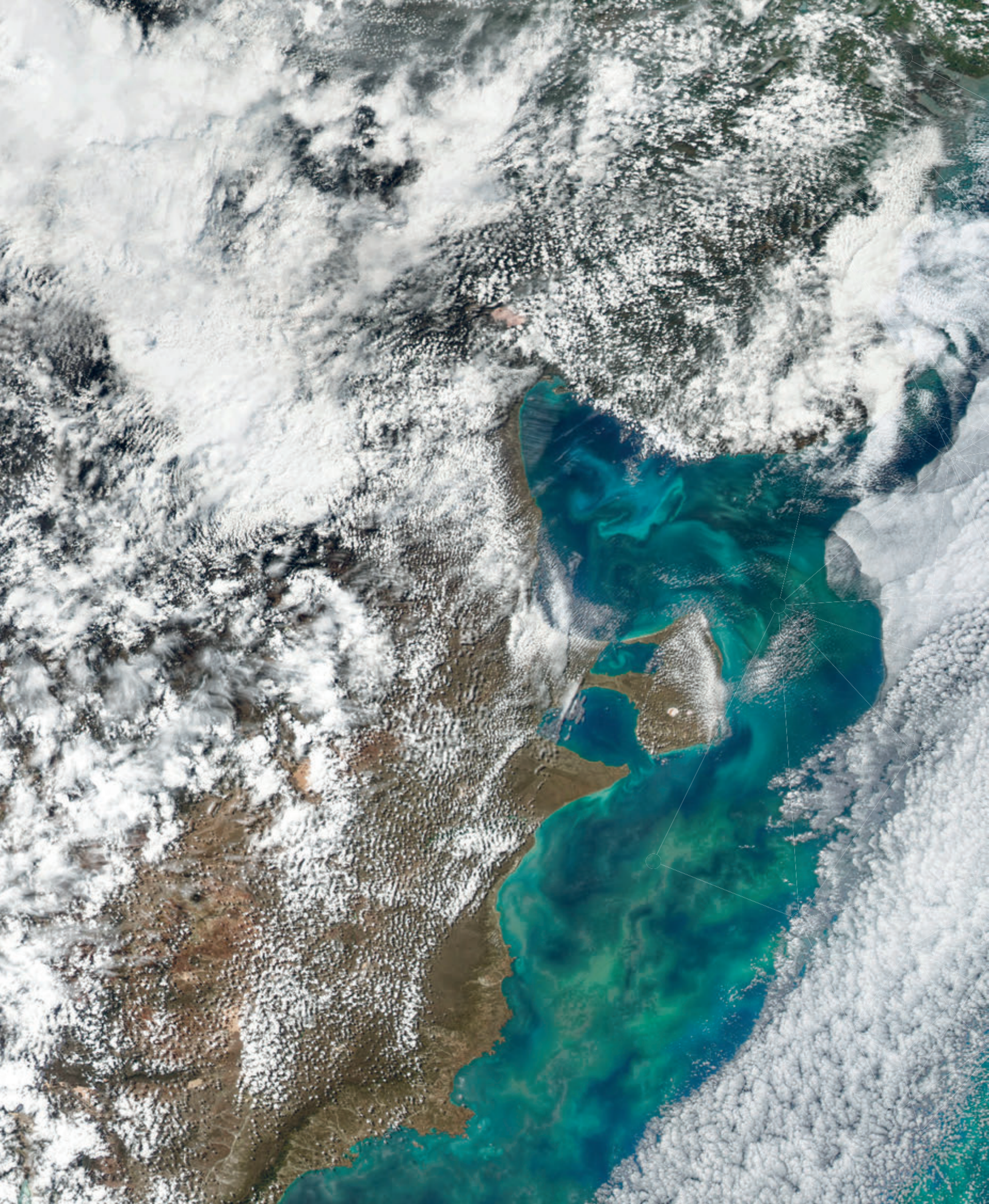
El procesamiento de la información se realizó mediante el software open source PolSar-Pro, obteniendo los parámetros de descomposición polarimétrica y entropía de Shannon basados en la matriz de covarianza (C_2) y un multilook de 9x9. Como resultado, se obtuvieron valores de Entropía (H) derivada de la descomposición polarimétrica (figura 39 a y c), como también entropía de Shannon para los días 3 y 25 de septiembre de 2013 (figura 39 b y d).

Para ambas técnicas polarimétricas, es posible de obtener la dispersión generada por el hielo marino. Sin embargo, en el caso de la entropía de Shannon se distinguen de mejor forma las extensas zonas de hielo marino, con valores entre 0 y 1. En el caso de la entropía clásica (sobre valores de 0,5), se denota un mecanismo de dispersión aleatorio moderado, causado por la presencia de hielo marino. En el caso del periodo estudiado se obtuvo un mecanismo de doble rebote y volumen de dispersión, dependiendo del tipo de hielo, con lo cual fue posible determinar las características superficiales del hielo marino en la zona de estudio (figura 40 a y b).

2.2.4. Conclusiones

Las características fundamentales de los sistemas de radar muestran las ventajas comparativas del uso de esta tecnología para la observación de la Tierra. Una clara ventaja de esta tecnología es su aplicación a la observación terrestre, permitiendo ser utilizadas en condiciones de nubosidad, como así también su independencia de la luz solar para obtener información, cuyo principio radica en la transmisión y posterior recepción de la energía de radiofrecuencias que es generada por el mismo sistema. En este sentido, el uso de los sistemas de radar de apertura sintética (SAR) resulta relevante, por cuanto están orientados a obtener una gran resolución espacial a través de técnicas de procesamiento, que sintetizan y transforman una antena físicamente corta en una de grandes dimensiones por medio de un arreglo matemático. Finalmente, la aplicación presentada del sistema de radar que utiliza la polarización del campo electromagnético de la onda de radiofrecuencias reflejada desde un medio, muestra la capacidad de estos sistemas para capturar la información reflejada, permitiendo caracterizar los parámetros involucrados, que en resumen es la información real del medio.







SECCIÓN 3

CLASIFICACIÓN DE DATOS OBTENIDOS DE SENSORES REMOTOS

“Hoy en día, la abstracción ya no es la del mapa, del doble, del espejo o del concepto. La simulación ya no es la de un territorio, un ser referencial, a una sustancia. Es la generación mediante modelos de algo real sin origen ni realidad: lo hiperreal. El territorio ya no precede al mapa, ni le sobrevive. Es, sin embargo, el mapa el que precede al territorio –precesión del simulacro– el que engendra al territorio…”.

Jean Baudrillard

SECCIÓN III

Clasificación de datos obtenidos de sensores remotos

Esta sección trata de temas relacionados con la clasificación de datos obtenidos a partir de sensores remotos. En el capítulo 1, varios métodos para estimar la fracción de huecos en el dosel (GF) han sido revisados y aplicados utilizando datos derivados de sensores LiDAR. Para lograr esto, mediciones aéreas de LiDAR (ALS) se llevaron a cabo en Jasper Ridge (California, EE.UU.) en 2007. El dosel del bosque es la zona de intercambio de flujos y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera. La estructura del dosel es la detallada organización espacial de todos los elementos vegetales sobre el suelo. Esta estructura condiciona diversas variables microclimáticas, influye en los recursos disponibles y en el comportamiento animal en el hábitat. Existen diversas variables que permiten la descripción de la estructura del dosel. Una de las más relevantes es el índice de área foliar (LAI), cuyo cálculo y corrección depende de otros parámetros como la GF y el índice de agrupamiento foliar (CI). En este caso, la estimación de GF se derivó de métricas basadas en la ley de Beer-Lambert calculada para modelos de frecuencia de retornos aplicados en parcelas de bosque y matorrales de diferentes tamaños. Las estimaciones se compararon con los valores entregados por el análisis de fotografías hemisféricas. Los resultados presentaron una subestimación de 3% para las parcelas de bosque y 43% de sobreestimación para las parcelas de matorrales. La estimación de GF mostró una clara dependencia espacial del tamaño de la parcela y del tipo de vegetación.

El capítulo 2 muestra una investigación que tuvo por objetivo desarrollar un sistema automático para la separación de áreas boscosas del uso agrícola y ganadero sin bosque. El trabajo se orientó a la generación automática de una máscara forestal para datos de entrada destinada a la detección de cambios y el monitoreo del bosque nativo, mediante el enmascaramiento anual sucesivo de cortes claros. Se utilizó un enfoque metodológico basado en el proceso por separado de pequeños subconjuntos espaciales, lo que permite que las técnicas simples aumenten la precisión con cada iteración metodológica. Los resultados muestran dos clases con baja fragmentación y una clase no forestal con formas geométricas bien definidas. La clase de bosque muestra poca fragmentación, a pesar de que el mapa de frecuencias fue el resultado de una serie de transformaciones temáticas independientes.

El capítulo 3 describe el desarrollo de un método generalizado para la detección de árboles usando datos LiDAR de huella pequeña aplicable a bosques deciduos con alta variabilidad de estructura de rodal. El método es no-paramétrico, detecta la ubicación de ápices de árboles, delinea sus copas basado en información local proveniente de los puntos LiDAR y no requiere supuestos a priori de forma, tamaño de copa, ni estructura de rodal. En el trabajo se desarrolló también una estrategia de procesamiento paralelo de datos LiDAR para la aplicación del método a nivel de bosque. La estrategia usa un modelo maestro-esclavo para procesar múltiples cuadriculas con datos LiDAR y fue implementada usando la interfaz de paso de mensajes. La evaluación de los resultados del método en 23 parcelas circulares de 0,04 ha generó una tasa general de detección de árboles de 72%, 86% de los cuales fueron detectados correctamente, resultando en una calidad de detección combinada de 77%. Al considerar resultados por tipo de copa, el método detectó 100% de los árboles dominantes, 92% de los árboles co-dominantes, el 74% de los árboles intermedios, y 39% de los árboles suprimidos. La estrategia de procesamiento paralelo y el método de detección de árboles se aplicaron a un bosque experimental de 7.742 ha de propiedad de la Universidad de Kentucky. Se usaron 192 nodos de supercomputador para procesar los datos de las 801 cuadriculas (301m x 301m) que cubren el bosque experimental con un tiempo de proceso de 2 hr y 29 min. Se detectó un total de

1.952.137 árboles, y después de ajustar los resultados de acuerdo a las 23 parcelas, la estimación del número de árboles es de casi 2,55 millones (±13,5% con intervalo de confianza de 95%) o 343 árboles por ha. El 6% de los árboles detectados son dominantes, 24% son co-dominantes, 42% son intermedios, y 28% son suprimidos. La obtención dinámica de información local de puntos LiDAR para extraer la forma y altura de copa, crea un gran potencial del método para ser aplicado en distintos tipos forestales. El método junto con la estrategia de procesamiento de datos paralelos, ofrecen la posibilidad de satisfacer el creciente interés en la cuantificación remota de información forestal a nivel de bosque para el mejor monitoreo, manejo y conservación de recursos.

En el capítulo 4 se realiza una clasificación de la cubierta del suelo para dos cuencas costeras a partir de una imagen Landsat 8, y el algoritmo de clasificación de máquinas de soporte vectorial (MSV). La clasificación de cubierta de suelo a partir de imágenes Landsat, ha permitido el estudio de fenómenos socioambientales de carácter dinámico, de gran relevancia para la toma de decisiones y la planificación territorial. El satélite Landsat 8 ha dado continuidad al programa Landsat abarcando cerca de 40 años de observaciones de la Tierra, lo que junto al desarrollo de nuevos algoritmos de clasificación han permitido mejorar el estudio de la cubierta de la Tierra. Los resultados obtenidos en el estudio, a través de la matriz de confusión, muestran una exactitud general de 82,9% para la cuenca del río Lingue, y de 87,2% para la cuenca del río Budi. En general, fue posible clasificar con exactitud los principales tipos de cubiertas del suelo, sin embargo, no fue posible distinguir con una alta certeza entre cubiertas con un comportamiento espectral similar, por ejemplo, entre bosque nativo y matorral, entre suelos con escasa vegetación, o entre terrenos húmedos con distintos niveles de cobertura vegetal y humedad. Futuros estudios deberán explorar nuevos métodos como la incorporación de texturas, series temporales, o información de radar para alcanzar una mayor separabilidad entre las clases presentes en estas dos cuencas costeras.



“Today abstraction is no longer that of the map, the double, the mirror, or the concept. Simulation is no longer that of a territory, a referential being or substance. It is the generation by models of a real without origin or reality: a hyperreal. The territory no longer precedes the map, nor does it survive it. It is nevertheless the map that precedes the territory -precession of simulacra- that engenders the territory…”

Jean Baudrillard

SECTION III

Classification of Remotely Sensed Data

This section deals with issues related to the classification of data obtained from remote sensors. In the first chapter, methods for the gap fraction (GF) have been reviewed and applied using data derived from LiDAR sensors. To achieve this, aerial (ALS) LiDAR measurements were carried out in Jasper Ridge (California, EE.UU.) on 2007. The forest canopy is a zone for fluxes and energy exchange between the land surface and the atmosphere. The forest structure is the detailed spatial organization of all aboveground vegetal elements. This structure conditions several microclimatic variables within this space, and it influences the available resources and the animal behavior on the habitat. There are several variables that allow the description of the canopy structure. One of the most relevant is the leaf area index (LAI), whose calculation and correction depends on other parameters like the GF and clumping index (CI). In this case, the GF estimation was derived from metrics based on the Beer-Lambert law computed for frequency and intensity returns at different plot sizes. The estimations were compared with the values given by the analysis of real hemispherical photographs. The GF results presented an underestimation of 3% for the forest plots and a 43% of overestimation for the shrub plots. The GF estimation showed a clear spatial dependence on the plot size and vegetation type.

Chapter 2 shows an investigation that aimed to develop an automatic system for separation of forested areas from agricultural and cattle use without forest. The work was aimed at automatic generation of forest mask for input data destined to change detection and monitoring of native forest, through successive annual masking of clear cuts. A methodological approach based on the separately process of small spatial subsets was used, allowing simple techniques to increase the accuracy with each methodological iteraction. The results show two classes with low fragmentation, and the no forest class with well defined geometric shapes. The forest class show little fragmentation, despite the frequency map was the result of one serie of independent thematic transformations.

Chapter 3 describes the development of a generalized method that uses small footprint LiDAR data was developed to detect trees in deciduous forests with complex vegetation conditions. The method is non-parametric, detects the location of tree apices and delineates tree crowns based on local information from the LiDAR point cloud, and does not require a priori assumptions of crown size and shape nor of vegetation structure. A distributed LiDAR data processing strategy was also developed to apply the tree detection method at the forest level. The distributed strategy uses a master-slave scheme to process multiple titles with LiDAR data and was implemented using the message passing interface. Results, evaluated using 23 circular plots of 0,04 ha in size, provided a general tree detection rate of 72%, 86% of which were detected correctly, yielding a combined tree detection accuracy of 77%. The tree detection method was able to detect 100% of dominant trees, 92% of co-dominant trees, 74% of intermediate trees, and 39% of suppressed trees. Using the distributed processing strategy, the tree detection method was applied to the 7,742 ha University of Kentucky experimental forest. A total of 192 computer cores were used to process the 801 tiles (301 m x 301 m) covering the entire forest with a processing time of 2 hr. and 29 min. A grand total of 1,952,137 trees were detected, which after adjustments using the results from the 23 circular plots, almost 2,55 trees (±13,5% using a 95% confidence interval) or 343 trees per ha were estimated. Of these, 6% are dominant trees, 24% are co-dominant, 42% are intermediate, and 27% are suppressed. Avoiding the need of a priori information of tree crown size and shape makes the tree detection method a robust approach for its application to forests with different vegetation conditions.

Along with the distributed processing strategy, the tree detection method offers a great potential to address the increasing need for the remote quantification of forest resources to improve monitoring, conservation and management activities.

In chapter 4 a land cover classification for two watersheds was obtained from a Landsat 8 image using the support vector machine (SVM) algorithm, as the first step to study their land cover dynamics.4 Land cover classification using Landsat images have enabled to study a range of dynamics socio-environmental phenomena of great importance to support decision making processes and spatial planning. The Landsat 8 satellite have given continuity to the Landsat program, encompassing nearly 40 years of earth observation data, which together with the development of new classification algorithms have enabled to improve the study of the earth surface. The results obtained in the study, through the error matrix, show an overall accuracy of 82.9% for the Lingue river watershed, and 87.2% for the Budi river watershed. In general, it was possible to accurately distinguish among the main classes. However, it was not possible to discern with certainty, among land covers with similar spectral behaviour, for example, between native forest and scrubland, among several types of scarce vegetation land, or among wetlands with different levels of vegetation cover and moisture. Future studies should explore new methods that incorporate texture information, temporal series, or the integration of radar data to reach a higher separability among land cover classes present in these two watersheds.

3.1 Caracterización de la estructura de dosel de la vegetación mediante datos de escaner láser aerotransportado

John Gajardo,[a] David Riaño,[bd] Mariano García,[c] Susan Ustin,[b] Gregory Asner,[e] Yony Ormazábal,[a] Carlos Mena[a]

[a]Centro de Geomática, Universidad de Talca, Talca, Chile
[b]Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS), University of California, Davis, USA
[c]Center for Landscape and Climate Research, University of Leicester, UK
[d]Institute of Economics, Geography and Demography, Spanish National Research Council (CSIC), Madrid, Spain
[e]Department of Global Ecology, Carnegie Institute for Science, Standford, California, USA

3.1.1. Introducción

3.1.1.1. Caracterización de la estructura del dosel de la vegetación

Las ramas, ramillas, hojas, flores, frutos y forma de copa, se organizan para conformar el dosel de la vegetación (Parker, 1995). La detallada organización y disposición de todos los elementos de la vegetación que se encuentran sobre el suelo, conforman la estructura del dosel. Esta descripción incluye información y atributos sobre la cantidad, ubicación, conectividad y tipo de elementos (Lefsky et al., 1999). La estructura del dosel es uno de los elementos más influyentes en el microclima y el hábitat que este soporta. Por ejemplo, modula la velocidad del viento (Parker, 1995; Lefsky et al., 2002), la cantidad de irradiancia o luz visible (Parker, 1995; Panferov et al., 2001; Danson et al., 2007) y la precipitación que puede alcanzar el suelo dentro del dosel (Parker, 1995).

La disposición de las capas del dosel, la distribución y complejidad de ramas y el follaje, producen cambios en el espacio, la luz, humedad y la disponibilidad de alimentos, que necesitan las especies para sobrevivir y desarrollarse (Nelson et al., 2003; Pringle et al., 2003; Skirvin, 2007). Por otra parte, en el contexto del manejo del fuego, los parámetros estructurales del dosel, como la carga de combustible, la densidad aparente del dosel y la altura de la base de la copa, contribuyen al modelamiento del comportamiento del fuego (Riaño et al., 2003; Hall et al., 2005; Popescu y Zhao, 2008; García et al., 2012). Asimismo, las dimensiones de la copa y su relación con la altura y el diámetro a la altura del pecho (DAP), es un indicador de la competencia y la salud del bosque, que usualmente es empleado para diseñar tratamientos silvícolas y gestionar los rodales para aumentar la producción de madera (Popescu y Zhao, 2008; Dean et al., 2009).

La estructura del dosel se puede caracterizar a diferentes escalas, desde la identificación de árboles individuales, pasando por las plantaciones hasta el nivel de ecosistema (Van der Zande et al., 2006). La tarea de producir una descripción completa del tamaño, forma y orientación de todos los elementos vegetales (troncos, ramas, hojas, flores, frutos), es casi imposible, ya que el dosel es muy dinámico (Welles y Cohen, 1996). Para simplificar esta complejidad, variables o descriptores, como la altura máxima del árbol, la densidad de árboles, la biomasa forestal, la fracción de huecos o el índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés), pueden resumir la estructura en la mayoría de las circunstancias (Parker, 1995).

Entre estas variables, la fracción de huecos en el dosel (GF, por sus siglas en inglés), entendida como la fracción del cielo que es visible bajo el dosel en cualquier dirección en particular, es especialmente relevante para describir la estructura. El rango de variación del GF es de cero a uno, para un cielo completamente obstruido y completamente abierto, respectivamente (Welles y Cohen, 1996). El GF es una medida valiosa para el análisis de la vegetación, permite monitorear las fluctuaciones fenológicas, la evo-

lución y la recuperación después de una perturbación, como el estrés hídrico, la inundación, la contaminación del aire y del suelo, o una plaga (Walter, 2009). Por otra parte, los animales responden a la disponibilidad de luz dentro del dosel y el GF puede condicionar su comportamiento (Endler, 1993; Pringle et al., 2003). El GF es también un parámetro estructural importante, porque a partir de su inversión, que teóricamente sigue una distribución de frecuencia de Poisson, permite obtener el LAI (Miller, 1967; Nilson, 1971; Campbell y Norman, 1989). El LAI se define como la mitad del total de área foliar por unidad de área horizontal terrestre (Chen y Black, 1992), y es una de las principales variables de entrada para modelar la fotosíntesis, la evapotranspiración y el intercambio de flujos de carbono y agua entre el dosel y la atmósfera (Weiss et al., 2004).

3.1.1.2. Medición de las variables estructurales del dosel de la vegetación

La complejidad del dosel, la accesibilidad y el tiempo para tomar las medidas, limitan la adquisición de datos directos que son representativos de la estructura del dosel (Welles y Cohen, 1996; Fournier et al., 1997; Van der Zande et al., 2006). Estas son algunas de las principales razones para limitar las mediciones a una variable, intentando encontrar un valor promedio que represente características espaciales similares (Parker, 1995). En este contexto, elegir la variable apropiada que describa adecuadamente el fenómeno a estudiar es un desafío (Campbell y Norman, 1989). Una de las primeras caracterizaciones en el campo de la estructura del dosel, fueron solo algunos bocetos de los árboles representativos en el bosque (Parker, 1995). Además, uno de los enfoques más simples para describir la estructura es medir la altura y la cobertura del dosel (Lefsky et al., 1999). Los métodos más avanzados han permitido describir la distribución vertical del dosel, como los puntos y cuadrantes 2D de Wilson (1959) primero, y más tarde los cuadrantes ópticos de MacArthur y Horn (1969), que utilizaban un teleobjetivo apuntando en la dirección del dosel.

Algunas variables utilizadas para caracterizar la estructura del bosque se pueden medir directamente, mientras que otras se estiman utilizando métodos indirectos. Por ejemplo, Fournier et al. (1997) llevaron a cabo una caracterización estructural de escala múltiple (árboles individuales y plantaciones), para producir una reconstrucción tridimensional digital completa de los elementos del dosel. Asimismo, una variable crítica para resumir la estructura del dosel es el LAI, este se puede medir directamente en dos fases: 1) recolección de hojas mediante técnicas destructivas o no destructivas (Weiss et al., 2004), 2) el cálculo del LAI escaneando las hojas (Jonckheere et al., 2004), o 3) basándose en la correlación del peso seco con el área foliar (Le Roux et al., 1999).

Para tratar algunas de las dificultades de estas estimaciones directas, se desarrollaron diferentes métodos que dependen de la relación entre la estructura del dosel y la intercepción de la luz (Weiss et al., 2004). La luz que pasa a través del dosel se puede estimar mediante un modelo tridimensional que describe la estructura del dosel (Jonckheere et al., 2004). La transmisión de luz a través del dosel se puede recoger a partir de las mediciones de GF con sensores lineales y hemisféricos (Welles y Cohen, 1996).

Los sensores lineales miden la luz solar directa en una sola dirección a la vez y requieren que el usuario se mueva a lo largo de un transecto para caracterizar la estructura (Leblanc et al., 2002). Se sabe que las hojas absorben casi 90% de la luz en la región de radiación fotosintética activa (PAR) (400 a 700 nanómetros). Entonces, la capacidad de los sensores lineales para medir PAR hace que estos instrumentos sean un buen indicador del GF del dosel (Chen, 1996). En estos casos, el GF se obtiene al dividir el PAR medido bajo del dosel por el PAR medido arriba del dosel o en un lugar sin vegetación. Hay varias opciones para sensores lineales, por ejemplo, AccuPar L-80 (Box 2365, Pullman, WA 99163 - EE.UU.), LI-191 (Box 4425, Lincoln, NE 68504 - EE.UU.), Sun Scan SS1 (130 Low Road, Burwell, Cambridge, Reino Unido), TRAC (14 Aleutian Rd, Nepean, Ontario - CA) y DEMON (Locked Bag 10, Clayton South VIC 3169 - AU), solo por mencionar algunos.

A diferencia de los sensores lineales, los sensores hemisféricos son capaces de recoger mediciones desde múltiples ángulos a la vez y para algunos de ellos no es necesario utilizar transectos (Welles y Cohen, 1996). Existen

varios sensores hemisféricos, entre los cuales se pueden mencionar CI-110 (1554 NE 3rd Ave, Camas, WA 98607 - EE.UU.), LAI 2200C (Box 4425, Lincoln, NE 68504 - EE.UU.) y las fotografías hemisféricas (HP). Las HP son imágenes capturadas de cámaras con lente hemisférico (ojo de pez), colocadas debajo del dosel y orientadas hacia el cenit (Jonckheere et al., 2005). Para lograr mejores mediciones, la HP debe capturarse cuando existe un alto contraste entre el cielo y el dosel, lo cual pasa cuando las condiciones de iluminación son homogéneas. Esta condición generalmente se da cuando el cielo está nublado o durante las primeras o últimas horas del día (Welles y Cohen, 1996). La HP es una valiosa fuente de información para estudiar la estructura del dosel, ya que proporciona un registro 2D permanente de la posición, el tamaño y la distribución de sus elementos (Gonsamo y Pellikka, 2009). La HP proporciona un campo de visión extremo, generalmente de 180°, que produce una proyección del hemisferio en un plano (Herbert, 1986). Las proyecciones geométricas más comunes utilizadas por los fabricantes de lentes de ojo de pez son: polar, ortográfica, Lambert y estereográfica (Gonsamo et al., 2010). Una proyección polar perfecta de 180° da como resultado una imagen circular. Tal imagen encaja completamente en el marco dejando los márgenes externos del círculo de color negro. La HP representa la vista del cielo en todas las direcciones acimutales (θ) y cenitales (ϕ), con ϕ en el centro de la imagen y el horizonte en los bordes (Jonckheere et al., 2004). La imagen se divide en segmentos de cielo que forman lo que se llama el mapa del cielo. Los segmentos del mapa del cielo están delimitados por la intersección de ϕ anillos y θ sectores, y se utilizan para calcular el GF en esos segmentos (Gonsamo et al., 2010).

El GF en las HP se calcula como la relación entre el número de píxeles que representan el cielo en un segmento particular, versus el total de píxeles en este segmento (Walter, 2009). Para calcularla es necesario clasificar la HP en dos clases: dosel y cielo, produciendo una imagen binaria. Este es uno de los principales problemas en el procesamiento de HP, ya que los cálculos de GF dependen principalmente de establecer un umbral en la imagen para discriminar entre las dos clases (Jonckheere et al., 2005). La forma más sencilla de segmentar la HP es que el usuario defina un umbral visual, así los valores debajo de ese umbral representarían una clase, y por encima la otra clase (Frazer et al., 2001). Este proceso es subjetivo e introduce una fuente de variabilidad ya que los valores de umbral del usuario no se pueden reproducir consistentemente en otras HP (Hale y Edwards, 2002). Por otra parte, los algoritmos de umbralización automáticos pueden ayudar a superar parcialmente este problema (Jonckheere et al., 2005), pero los cambios en las condiciones de iluminación en el HP pueden hacer que este proceso falle. Varios estudios han calculado el GF de las HP aplicando umbrales interactivos (Frazer et al., 2001; Hale y Edwards, 2002; Gonsamo y Pellikka, 2009; Gonsamo et al., 2010) o automáticos (Walter et al., 2003; Inoue et al., 2004; Jonckheere et al., 2005; Leblanc et al., 2005; Gonsamo y Pellikka, 2008).

3.1.1.3. Estimación de la estructura del dosel de la vegetación usando escáneres láser aerotransportados

El Light Detection and Ranging (LiDAR) es un láser que mide la distancia utilizando el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso y su retorno al sensor después de reflejarse en un objeto interceptado (Lim et al., 2003).

El tipo de información que recopilan los sistemas LiDAR se puede agrupar en dos amplias clases: el retorno discreto y la onda completa. Los dispositivos de retornos discretos pueden medir, ya sea un retorno del pulso láser (retornos únicos) o varios retornos de cada pulso (retornos múltiples). Estos sensores representan la superficie escaneada como una nube de puntos, donde cada punto corresponde a un objeto interceptado por el láser. El sistema extrae automáticamente cada punto identificando los picos principales en la señal digitalizada, mediante diferentes algoritmos (Disney et al., 2010). Estos sistemas usualmente almacenan la intensidad de retorno de cada pico junto con su distancia (Lefsky et al., 2002). La otra clase de LiDAR son los dispositivos de onda completa, que registran para cada pulso la variabilidad de tiempo e intensidad en pequeños intervalos, casi de manera continua, dando esto una distribución detallada de todos los objetos interceptados por el pulso láser (García et al., 2009).

Un escáner combinado con el láser LiDAR permite adquirir datos a lo largo y a lo ancho del movimiento del dispositivo. Cuando el instrumento está montado en una plataforma aérea se le denomina escáner láser aéreo (ALS). El ALS también necesita incluir otros instrumentos como un sistema de posicionamiento global (GPS) para recopilar la posición de la plataforma, un sistema de navegación inercial (INS) para registrar la orientación del escáner en relación con el movimiento del avión (deriva, cabeceo y alabeo), además de una unidad de almacenamiento y de control (Lim et al., 2003). La combinación de toda esta información proporciona las coordenadas tridimensionales (3D) de los objetos interceptados por el pulso del sensor (Lefsky et al., 2002; García et al., 2009).

Los datos de ALS permiten medir la estructura del bosque, ya que pueden proporcionar descripciones detalladas de la organización espacial horizontal y vertical de los elementos dentro del dosel (Lefsky et al., 1999; Lefsky et al., 2002; Lim et al., 2003; Parker et al., 2004). Estos instrumentos superan algunos de los problemas que muestran los métodos directos o semidirectos (Lovell et al., 2003; Henning y Radtke, 2006). El sensor registra los retornos láseres reflejados desde una o varias superficies dentro del dosel, el resto de los pulsos continúan viajando para interceptar con la vegetación más baja o la superficie del suelo. La capacidad de estos instrumentos para registrar los retornos del láser a diferentes profundidades en el dosel o incluso en el suelo, sienta las bases para medir los huecos dentro del dosel (Hopkinson y Chasmer, 2007). El GF [14] sigue la ley de Beer Lambert, que puede suponerse equivalente a la transmitancia del dosel (T) obtenida desde LiDAR o HP.

$$GF = e^{-kLAI};\ T = \frac{I_I}{I_o};\ \text{donde}\ GF \equiv T \quad (14)$$

donde, I_I es la intensidad de la luz después de recorrer una trayectoria de longitud (I) atravesando el dosel, I_o es la intensidad de la luz sobre el dosel, y k es el coeficiente de extinción, que es un indicador de la eficiencia de intercepción de la penetración de la luz a través del dosel.

El GF ha sido estimado por ALS. Uno de los métodos más empleados es medir las tasas de penetración basadas en la fracción de retornos por debajo del dosel, respecto del total de retornos (Lovell et al., 2003; Riaño et al., 2004; Hopkinson y Chasmer, 2009). Otro enfoque es derivar el GF empíricamente a partir de las métricas ALS. En ese contexto, Riaño et al. (2004) evaluaron los percentiles de alturas P50th, P75th y P95th, y Hall et al. (2005) obtuvieron indicadores como la densidad de los primeros retornos.

Cuando los sensores pueden registrar más de un retorno por pulso (primero, último, intermedio o único), es posible probar modelos más complejos que definen la tasa de penetración. Para esto es necesario tener en cuenta la naturaleza del tipo de retorno y la posibilidad de que un pulso produzca más de un retorno. Para corregir los pulsos que pueden producir primeros y los últimos retornos, Solberg et al. (2009, 2010) y Korhonen et al. (2011), eligieron factores de peso de 0,0 0,5 y 1,0 para retornos únicos de dosel, para retornos primeros del dosel, y retornos últimos del suelo o retornos únicos del suelo, respectivamente. En este contexto, Hopkinson y Chasmer (2009) asignaron el factor de ponderación de raíz cuadrada para los retornos intermedios y últimos. Para evitar el uso de retornos residuales, se pueden usar modelos basados solo en los primeros y últimos retornos, no obstante, existen algunos problemas de subestimación y sobreestimación de GF (Lovell et al., 2003; Morsdorf et al., 2006). Para esos casos, es posible buscar la mejor opción que reduce el sesgo causado por las interacciones entre los tipos de retornos, la dimensión de la huella, el tamaño de los huecos y los umbrales de retorno. El uso combinado del primer y último retorno, junto con la intensidad, parece ser una buena alternativa para reducir al menos el problema del tamaño de la huella (Lovell et al., 2003). Para dar cuenta de esto, Morsdorf et al. (2006) probaron modelos con primer, último y único retorno, para encontrar el mejor acuerdo. Por otra parte, Sasaki et al. (2008) utilizaron los retornos únicos en el piso porque estos garantizan que el pulso golpee completamente el dosel o el suelo, evitando retornos mixtos.

El objetivo de este capítulo es probar varios enfoques para aplicar métricas empíricas de altura y modelos de penetración de dosel basados en la ley de Beer Lambert, que permitan estimar el GF del dosel a partir de los datos de ALS.

3.1.2. Métodos

3.1.2.1. Zona de estudio Jasper Ridge

La zona de Jasper Ridge se encuentra en las bases de las montañas de Santa Cruz, en Portola Valley (37°24' de latitud norte y 122°13' de longitud oeste), en el condado de San Mateo, California, EE.UU. (García y Ustin, 2001). El sitio es una reserva biológica de aproximadamente 500 hectáreas, propiedad de la Universidad de Stanford (http://jrbp.stanford.edu/). La reserva tiene un clima mediterráneo con veranos calurosos y secos, y una precipitación promedio anual de aproximadamente 650 mm (Dahlin et al., 2011). La elevación varía de 52 a 161 m.s.n.m. y la pendiente varía de un mínimo de 2% a un máximo de 34%, con un promedio de 14%. Según García y Ustin (2001), el sitio está integrado principalmente por cinco tipos de vegetación: matorrales, bosques perennes y caducifolios, humedales herbáceos perennes y pastizales anuales. El tipo de vegetación de arbustos comprende una amplia gama de especies de chaparrales californianos, como: Lepechinia calycina (Benth.) Epling ex Munz, Ceanothus cuneatus (Hook.) Nutt., Baccharis pilularis DC, Adenostoma fasciculatum Hook. & Arn, Eriodictyon californicum (Hook. & Arn.) Torr., Heteromeles arbutifolia (Lindl.) M. Roem., Artemisia californica Less. El tipo de vegetación forestal incluye Quercus douglasii Hook. & Arn., también presente en las parcelas de arbustos, Quercus agrifolia Née, y Quercus lobata Née.

3.1.2.2. Descripción del equipo, recopilación de datos y preprocesamiento de las HP

Los datos de HP fueron suministrados por el Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS) de la Universidad de California, Davis (http://cstars.metro.ucdavis.edu). Se recolectó un total de 347 HP en trece parcelas de arbustos y trece parcelas de bosque, entre el 12 al 17 de mayo de 2006, el 20 al 21 de septiembre de 2006 y el 13 al 14 de agosto de 2007 (figura 41). Para adquirir las HP, se usó una cámara digital Nikon Coolpix 4300 con un convertidor de lente de ojo de pez Nikon FC-E8. La Coolpix 4300 tiene una distancia focal de 8-24 mm y una resolución efectiva de 4 megapíxeles en un sensor CCD. El FC-E8 tiene un FOV máximo de 180° con una proyección polar (Frazer et al., 2001). Para mejorar el contraste entre el cielo y el dosel, las imágenes se sobreexpusieron (más dos puntos) los valores de exposición obtenidos por la medición con la cámara en una zona descubierta de dosel, como lo sugirieron Zhang et al. (2005). Las imágenes se almacenaron a la máxima resolución (2272x1704 píxeles formato jpg). Para evitar

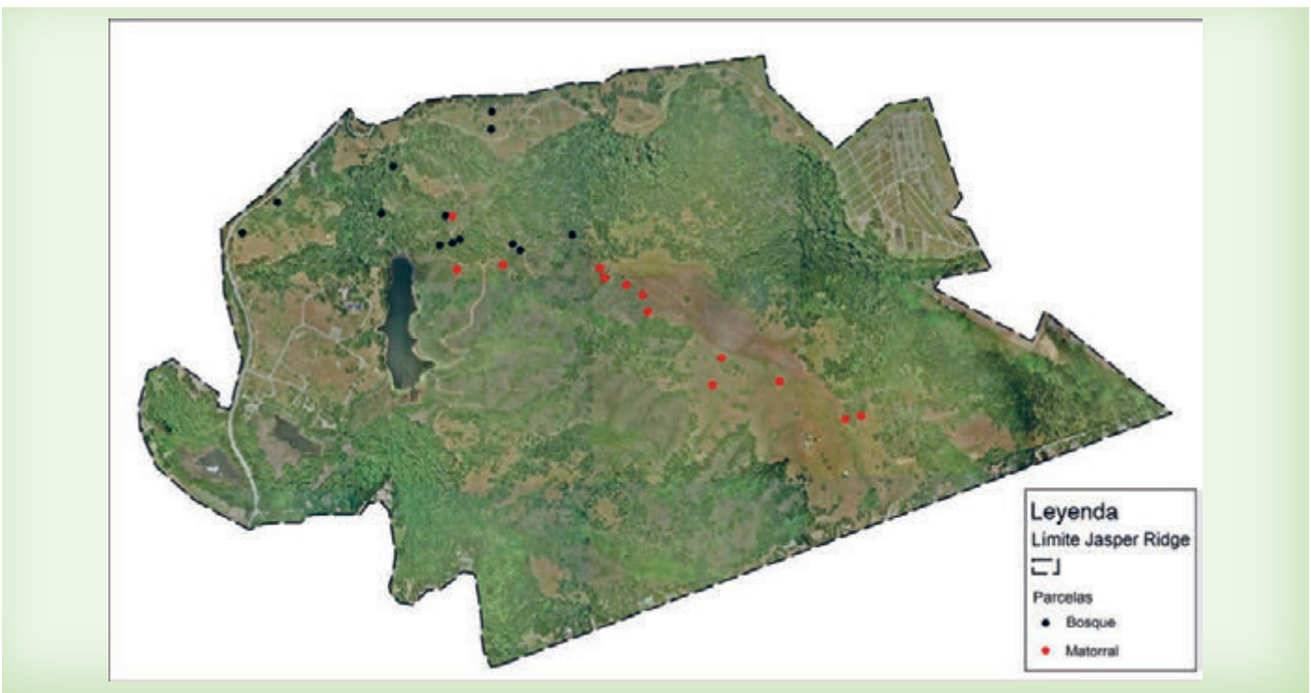


Figura 41: Distribución de las parcelas en el sitio de Jasper Ridge. *Fuente: Elaboración propia.*

la vegetación del sotobosque, con un trípode se elevó la cámara aproximadamente a 0,7 m y 0,2 m por encima del suelo para las parcelas de bosque y arbustos, respectivamente. La lente se niveló para apuntar al cenit y se orientó de modo que el norte magnético se ubicara en la parte superior de la fotografía (Walter et al., 2003). Cada centro de las parcelas fue geolocalizado usando métodos de posicionamiento GPS diferenciales. Con una brújula y una cinta métrica, se tomaron las HP en el centro de la parcela y a 2,5 m del centro, a lo largo de las cuatro direcciones cardinales (N, S, E, W). Todas las HP se tomaron bajo condiciones de luz solar indirecta, es decir, antes del amanecer, después del atardecer o cuando el cielo se encontraba nublado (García et al., 2015) (figura 42).

Se utilizó el software libre Fiji (http://fiji.sc/Fiji) para llevar a cabo una serie de pasos de preprocesamiento en las HP. De las HP se seleccionó la banda azul, ya que el dosel en esta banda aparece más oscuro que en las bandas del rojo o verde y, por lo tanto, tiene un mejor contraste con el cielo (Frazer et al., 2001; Gonsamo et al., 2010). Los huecos de mayor tamaño en el dosel causan un aumento desmedido de los valores digitales para aquellos píxeles que se encuentran próximos a ellos, lo que se da especialmente en las bandas del rojo y verde. No obstante, este efecto desaparece en su mayoría en la banda del azul (Leblanc et al., 2005).

Según Frazer et al. (2001) una limitación de las cámaras digitales, es la poca nitidez en comparación con las cámaras tradicionales basadas en películas. Por esta razón, las HP obtenidas pueden parecer borrosas y algunos de los detalles estructurales del dosel pueden ser deficientes. Esto fue especialmente evidente en zonas con alto contraste: bordes exteriores de tallos, ramas, brotes y los bordes interiores de los claros del dosel. Para minimizar este efecto y mejorar la discriminación de los huecos pequeños al interior del follaje, se aplicó un filtro de mejora de bordes de 3x3 [-1 -1 -1; -1 1 -1; -1 -1 -1], propuesto por Kucharik et al. (1997).

El último paso del preprocesamiento fue definir un valor de umbral óptimo en el HP para producir una imagen binaria que separe el dosel del cielo, lo cual es crítico para calcular el GF (Jonckheere et al., 2004). Jonckheere et al. (2005) probaron varios algoritmos de umbrales automáticos y concluyeron que los de cluster eran la mejor alternativa en comparación con los métodos basados en histogramas, entropía, atributo-objeto, espaciales y locales. Teniendo esto en cuenta, se eligió como óptimo el valor de umbral promedio de los cuatro algoritmos de cluster disponibles dentro del software Fiji, que son: Isodata (Ridler y Calvard, 1978), Otsu (Otsu, 1979), Intermode (Prewitt y Mendelsohn, 1966) e IsodataMod (http://fiji.sc/Auto_Threshold#Default) (figura 43). Los métodos de cluster inicialmente segmentan el histograma de la imagen en dos clases, utilizando un valor umbral inicial para el dosel de la vegetación y el cielo (T0 = 2p-1, es decir, la mitad del rango dinámico máximo). Se calculó las distancias al centro de cada clase y se asignó cada píxel a su clase más cercana, en función de

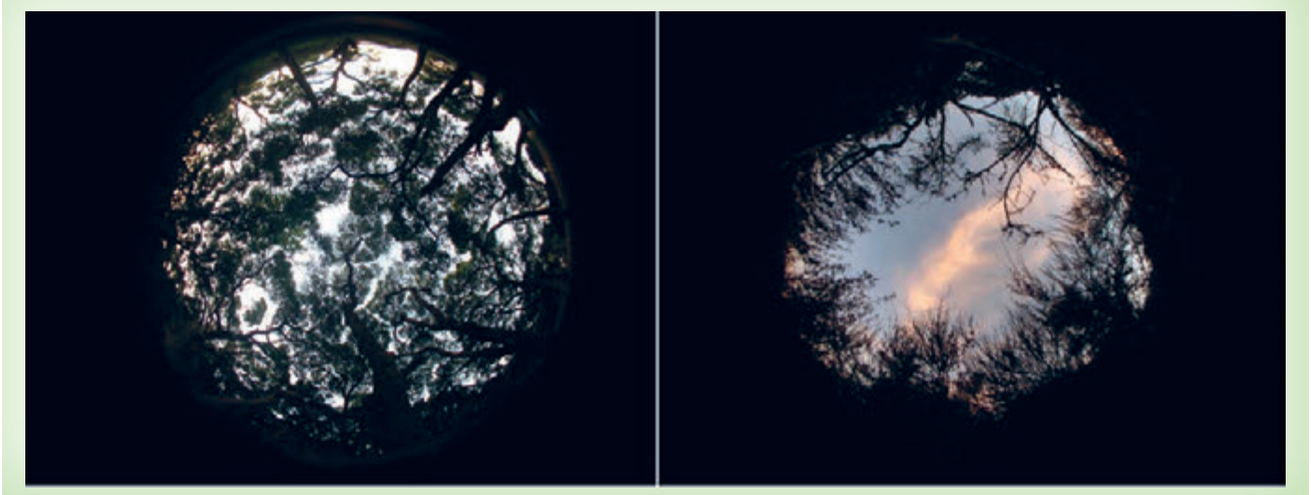


Figura 42: Composición HP (RGB) desde una parcela de bosque (izquierda) y desde una parcela de matorral (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

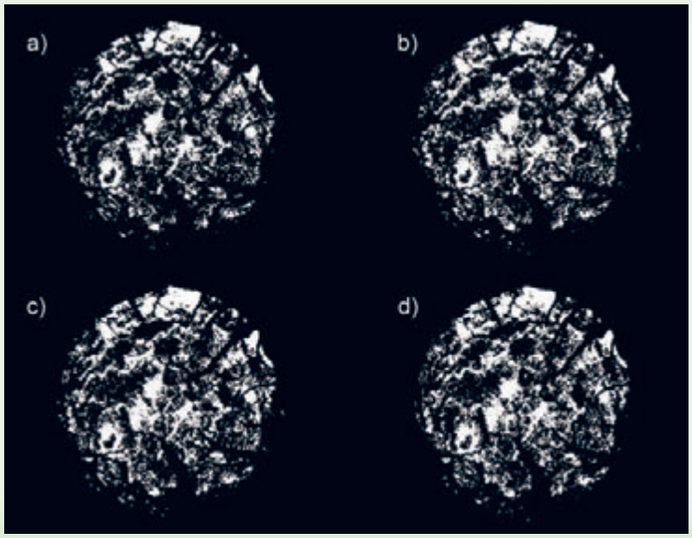


Figure 43: HP binaria después de aplicar algoritmos de cluster Isodata a), Otsu b), Intermodes c) e IsodataMod d).
Fuente: Elaboración propia.

cualquiera de los cuatro algoritmos anteriores (Jonckheere et al., 2005). A continuación, se calculó un nuevo umbral (T1). El proceso se repite de forma iterativa, hasta que el valor umbral permanece constante. Después del proceso de agrupación, los píxeles del dosel y cielo se convirtieron en blanco o negro (0 o 1), si el valor digital estaba por debajo o por encima del umbral óptimo. Posteriormente, los HP binarios se exportaron a archivos .bmp. Todo este proceso se llevó a cabo automáticamente, usando una macro de Java y Fiji. Los HP resultantes se inspeccionaron visualmente y se compararon con su HP original para buscar casos de clasificaciones anómalas.

3.1.2.3. Descripción del sensor ALS, recopilación de datos y preprocesamiento

Los datos ALS fueron suministrados por el Carnegie Airborne Observatory (CAO) y su versión de sensores denominada Beta (Asner et al., 2007). El Beta combinó tres instrumentos en un solo paquete: 1) el Airborne Visible/Infrared Spectrometer (AVIRIS), no utilizado en este estudio; 2) un sensor de onda completa ALS de huella pequeña, y 3) una unidad de medición inercial junto con un sistema de posicionamiento global (GPS-IMU) (Dahlin et al., 2011). El subsistema GPS-IMU proporciona el posicionamiento 3D y los datos de altitud para el paquete de sensores a bordo de la aeronave, lo que permite la proyección precisa de las observaciones ALS (y AVIRIS) en el terreno. El ALS es una versión personalizada del Optech ALTM-3100EA, con un nuevo sistema de digitalización de onda (tabla 5). Este ALS puede proporcionar los datos en dos modos: retorno discreto y de onda completa (Asner et al., 2007).

La configuración CAO Beta fue sobrevolada en Jasper Ridge y sus alrededores en el mes de agosto de 2007, a una altura promedio de 2.700 m sobre el nivel del suelo, capturando dieciocho líneas de vuelo y cubriendo 5,93 km^2. Los datos ALS se proporcionaron como retornos discretos; cada pulso se etiquetó como primer, último, único

Tabla 5: Instrumento ALS ALTM-3100EA del CAO Beta. *Fuente: Elaboración propia.*

Longitud de onda	1064 nm
Frecuencia repetición del pulso	programable hasta 100 kHz
Angulo escaneo	programable hasta 44°
Frecuencia escaneo	programable hasta 70 Hz
Divergencia del pulso	0,56 mrad (1/e)
Rango de intensidad	12 bit
Digitalización de la onda	Hasta 44 secciones por elevación/pulso

o intermedio. El ALS operó a una frecuencia de repetición de pulsos de 33 kHz y a un ángulo de escaneo de máximo 36°. Esta configuración proporcionó un espaciado de retornos láser de 0,5 m, una huella de 1,5 m y una densidad promedio de 5 puntos/m^2. La integración del GPS-IMU y el ALS determinó la ubicación 3D de los retornos del láser, que se proyectó en las coordenadas UTM WGS84 (Dahlin et al., 2011).

Un análisis exploratorio de los datos ALS demostró la existencia de retornos replicados (misma terna de coordenadas - X, Y, Z - y valores de intensidad) en la nube de puntos. Este problema ocurrió sistemáticamente en el borde de los bloques en los que se distribuyeron los datos. Dado que este problema afectaría a las métricas ALS relacionadas con GF, con un script de Matlab (MathWorks, Natick, Massachusetts) se identificó estos retornos láseres replicados y se eliminaron de la nube de puntos. El conjunto de datos ALS filtrado contenía una densidad promedio de retorno de 4 puntos/m^2.

Las precisiones absolutas y relativas (entre líneas de vuelo) de los modelos ALS 3D dependen de varias fuentes de error: 1) la alineación entre el láser, la aeronave y el sistema de navegación; 2) la precisión en la determinación de las distancias; 3) vibración y oscilación en el espejo del escáner; y 4) otros problemas en el sistema GPS-IMU (Huising y Gomes Pereira, 1998). Estos errores causan desplazamientos significativos de planimetría (X e Y) y altimetría (Z), que afectan la información y, por lo tanto, la calidad del producto final (Lee et al., 2007). Se han propuesto varios métodos para cuantificar estos desplazamientos, a fin de unir adecuadamente las áreas superpuestas entre líneas de vuelo, tales como: 1) mínimos cuadrados entre nubes de puntos (Maas, 2002); 2) segmentación de objetos en las de nubes de puntos tales como líneas o superficies (Pfeifer et al., 2005), y 3) imágenes de intensidad de las nubes de puntos (solo X e Y) (Vosselman, 2002).

Una adaptación de los métodos propuestos por Pfeifer et al. (2005) se utilizó para cuantificar el desplazamiento

Tabla 6: Identificador de la superficie (ID), línea de vuelo (FL), promedio Z ($\bar{Z}$), desviación estándar de Z (σ), diferencia absoluta $\bar{Z}$ entre FL..
Fuente*: Elaboración propia.*

ID	FL_1	$\bar{Z}_1$(m)	$\sigma(Z)_1$(m)	FL_2	$\bar{Z}_2$(m)	$\sigma(Z)_2$(m)	$\lvert(\bar{Z})_1 - (\bar{Z})_2\rvert$ (m)
01	26	69,02	0,10	28	69,09	0,11	0,07
02	26	69,17	0,11	28	69,24	0,12	0,07
03	28	73,55	0,09	29	73,52	0,11	0,03
04	28	73,41	0,10	29	73,38	0,09	0,02
05	28	73,33	0,09	29	73,33	0,09	0,00
06	28	73,18	0,10	29	73,17	0,10	0,01
07	28	73,09	0,09	29	73,10	0,09	0,01
08	28	72,98	0,09	29	73,00	0,10	0,02
09	28	72,89	0,10	29	72,90	0,10	0,01
10	28	72,77	0,10	29	72,77	0,07	0,00
11	29	71,94	0,09	30	71,94	0,11	0,00
12	29	71,85	0,10	30	71,85	0,10	0,01
13	29	71,70	0,08	30	71,74	0,10	0,04
14	29	71,62	0,11	30	71,63	0,10	0,02
15	29	71,52	0,10	30	71,54	0,10	0,02
16	30	70,79	0,08	31	70,78	0,11	0,01
17	30	70,68	0,09	31	70,65	0,08	0,02
18	30	70,59	0,09	31	70,59	0,08	0,00
19	30	70,52	0,09	31	70,50	0,09	0,02
20	30	70,39	0,09	31	70,38	0,09	0,02
21	30	70,29	0,09	31	70,31	0,12	0,02
22	30	70,17	0,11	31	70,20	0,11	0,04
23	30	70,04	0,08	31	70,08	0,11	0,04
24	30	69,94	0,08	31	69,98	0,11	0,04
25	30	69,85	0,09	31	69,88	0,10	0,03
26	30	69,73	0,11	31	69,78	0,10	0,05
27	30	69,62	0,10	31	69,65	0,08	0,03
28	31	69,13	0,10	33	69,07	0,10	0,06
29	31	68,93	0,08	33	68,89	0,09	0,04
30	31	68,80	0,10	33	68,80	0,08	0,00
31	31	68,70	0,10	33	68,69	0,10	0,01
32	31	68,62	0,08	33	68,59	0,09	0,03

de Z entre las líneas de vuelo. Treinta y dos superficies planas, tales como cruces de caminos y techos, con una superficie de al menos 25 m^2 y con un mínimo de 50 retornos cayendo en áreas de superposición entre líneas de vuelo, se extrajeron de la nube de puntos. Para estos retornos se calculó el valor promedio de Z dentro de cada superficie para cada línea de vuelo, y su diferencia determinó su desplazamiento en Z (tabla 6). Las líneas de vuelo demostraron estar intercalibradas, ya que la diferencia promedio absoluta de Z entre líneas de vuelo de todas las superficies fue de 0,02 m. Además, la desviación estándar de todas las superficies (tabla 6) proporcionó un promedio de 0,09 m, inferior a la precisión nominal de 15 cm del sistema ALS, verificando entonces un buen ajuste altimétrico de los datos.

Un método basado en Lee et al. (2007) fue usado para evaluar el desplazamiento X e Y entre los objetos muestreados en líneas de vuelo superpuestas. Los techos triangulares se identificaron manualmente y se aislaron de la nube de puntos (figura 44). Solo se encontraron tres techos para este ejercicio de validación, debido a la reducida presencia de estos elementos en el sitio de estudio. Para cada flanco del techo, se ajustó una superficie plana utilizando un enfoque de mínimos cuadrados, obteniendo así su ecuación y el vector director (Figura 45). Este proceso se realizó para los dos datos de líneas de vuelo en cada techo seleccionado. La intersección de estos dos planos proporcionó la ecuación que describe la posición del techo. Por lo tanto, la distancia entre la parte superior del techo en cada línea de vuelo midió el desplazamiento

Tabla 7: Identificador del techo (ID), línea de vuelo (FL), ángulo entre vectores (a) y distancia entre las líneas de intersección (XY). *Fuente: Elaboración propia.*

ID	FL	α (°)	XY (m)
1	20 y 22	4,24	0,23
2	26 y 28	4,47	0,07
3	20 y 22	0,51	0,13
$\overline{XY}$			0,15

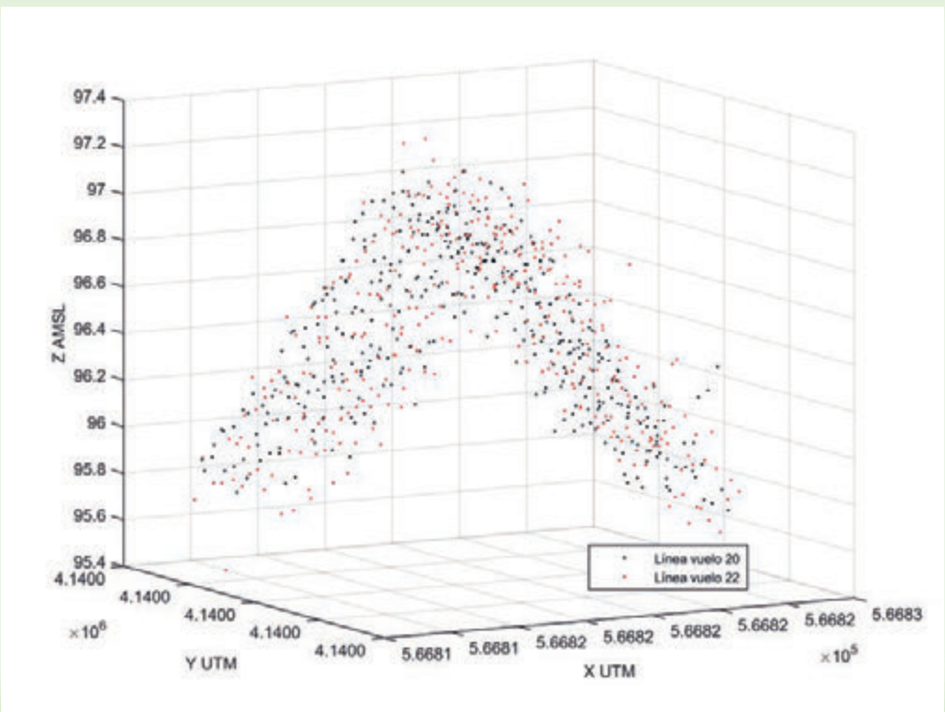


Figura 44: Techo aislado desde la nube de puntos con retornos de dos líneas de vuelo. *Fuente: Elaboración propia.*

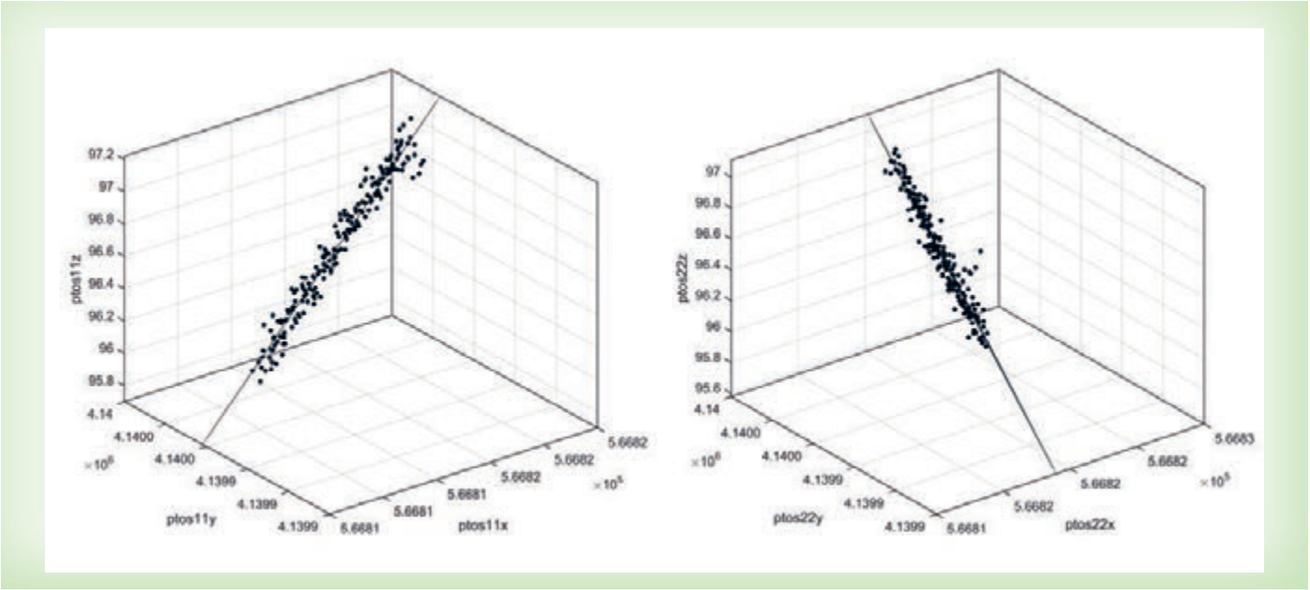


Figura 45: Plano ajustado a los retornos del flanco este y oeste del techo indicado en figura 44. *Fuente: Elaboración propia.*

X e Y (tabla 7). Esta distancia promedió 0,15 m y coincidió con el error esperado presentado por el fabricante del sistema ALS (Optech, 2013). Además, se generó una imagen de intensidad con los datos ALS de resolución 0,5 m de píxel, usando el algoritmo del vecino más próximo, para luego aplicar un filtro propuesto por Lee (1980) que corrige el efecto speckle o de sal y pimienta en la imagen. Las coordenadas XY de puntos obtenidos en los cruces y esquinas de caminos fueron recogidas desde una ortofotografía y desde la imagen de intensidad generada, para garantizar el registro conjunto entre los datos ALS y las ubicaciones de las parcelas. Se calculó la distancia euclidiana entre las coordenadas obtenidas y se obtuvo el promedio de las distancias. Esta diferencia se consideró como el desplazamiento entre la ALS y la ortofotografía. El RMSE fue de 2,07 m para 17 puntos de control identificados en ambas imágenes (tabla 8).

Una vez que se eliminaron los retornos replicados y se verificó la exactitud de los datos, se utilizó el algoritmo propuesto por Streutker et al. (2006), implementado en el software BCAL LiDAR Tools (BCAL, 2013), para clasifi-

Tabla 8: Coordenadas desde ortofotografía e imagen de intensidad ALS. *Fuente: Elaboración propia.*

ID	Ortofoto X	Ortofoto Y	Intensidad X	Intensidad Y	Distancia (px)
1	4077,3283	592,5395	4072,1743	590,9075	5,4062
2	1338,3894	1092,9101	1332,4983	1092,4959	5,9056
3	1376,9107	2484,1009	1373,5022	2483,0013	3,5815
4	1512,9478	2554,2244	1508,9037	2553,2985	4,1487
5	1470,7508	2597,8711	1467,5238	2596,0837	3,6889
6	1360,3390	2466,9829	1355,6331	2465,5315	4,9246
7	5272,3446	2739,5181	5270,5407	2737,7142	2,5511
8	5646,9932	3026,7469	5647,2355	3026,4016	0,4218
9	5997,9831	3310,8618	5995,5098	3309,3478	2,8999
10	7182,2854	2155,5778	7177,5610	2155,3631	4,7293
11	7262,5266	2130,2138	7256,9431	2129,3548	5,6492
12	4082,4929	590,4235	4078,3698	587,0563	5,3233
13	1758,0738	540,9915	1754,4230	539,8104	3,8371
14	2224,7918	437,8880	2223,5302	436,5799	1,8173
15	5652,9904	1343,1522	5646,9774	1344,8702	6,2536
16	1654,4971	2376,7907	1649,0211	2377,2202	5,4928
17	1835,2868	2545,5954	1831,4280	2545,2599	3,8734
Promedio					4,1422

car los retornos en dos categorías: suelo y vegetación. Se asumió que al menos un pulso cada 4 m penetraba por completo el dosel, con los cuales se creaba una superficie inicial del suelo, utilizando la interpolación de vecinos más próximos. Todos los retornos por debajo de 0 m se reclasificaron como suelo. Con estos retornos de suelo adicionales, se volvió a interpolar una nueva superficie del terreno. Este proceso continuó durante quince iteraciones. El 99% de los retornos convergieron después de seis iteraciones. Con el fin de evitar posibles valores atípicos, se permitió un máximo de 45 m de altura para el área de estudio, ya que no se encuentra vegetación con una altura mayor. Finalmente, se calcularon las alturas sobre esta superficie para todos los retornos restantes (García et al., 2015).

3.1.2.4. Cálculo de GF desde las HP

La ejecución por lotes del programa gratuito CIMES (http://jmnw.free.fr/) se usó para derivar el GF de las HP segmentadas. El programa necesita: 1) las coordenadas (X, Y) de tres puntos en el horizonte para determinar los límites de las HP, obtenidas explorando las imágenes con Fiji; 2) la distorsión geométrica de la lente ojo de pez; 3) la declinación magnética para rotar la imagen al Norte verdadero; 4) el número de divisiones del mapa del cielo en los ángulos θ y ϕ; y 5) el rango cenital. El número de divisiones de mapa de cielos en las HP, debe ser un compromiso de los siguientes criterios para una estimación confiable de GF: 1) lo suficientemente bajo como para que las estadísticas de GF sean significativas y también invertibles; 2) lo suficientemente alto como para que la suposición de aleatoriedad de la distribución de hojas dentro de un segmento de mapa del cielo siga siendo válida. Teniendo en cuenta estos dos factores, la cantidad mínima de píxeles en cualquier segmento del mapa del cielo, debe contener al menos diez píxeles (Lang y Xiang, 1986). Por lo tanto, se decidió contar con nueve anillos cenitales y 36 líneas radiales para dividir el mapa del cielo en un total de 324 segmentos, lo que aseguró al menos 700 píxeles para cada uno de ellos (figura 46). En lugar de usar el rango hemisférico completo, se prefirieron los ángulos cenitales comprendidos entre 30-60°, para calcular el GF siguiendo a Gonsamo et al. (2010) y Leblanc et al. (2005). La intensa dispersión de la luz difusa en ángulos cenitales muy bajos, afecta especialmente a las HP digitales (Frazer et al., 2001). Además, ángulos cenitales muy bajos y muy altos presentan errores más elevados; los primeros debido a que el follaje se muestrea pobremente y en los últimos por estar cerca del borde de la lente (Jonckheere et al., 2012). La prueba no paramétrica de Kruskal Wallis evaluó si había una diferencia estadística en términos de GF para las tres fechas en que se adquirieron las HP.

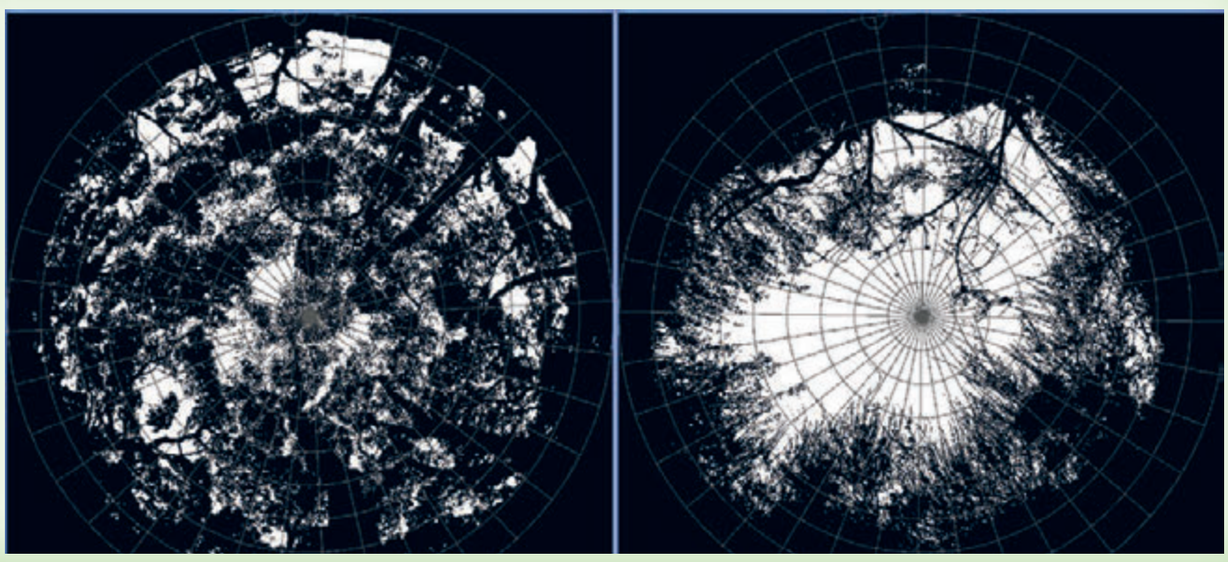


Figura 46: Mapa del cielo con 9 anillos cenitales y 36 segmentos acimutales para una parcela de bosque (izquierda) y de matorral (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

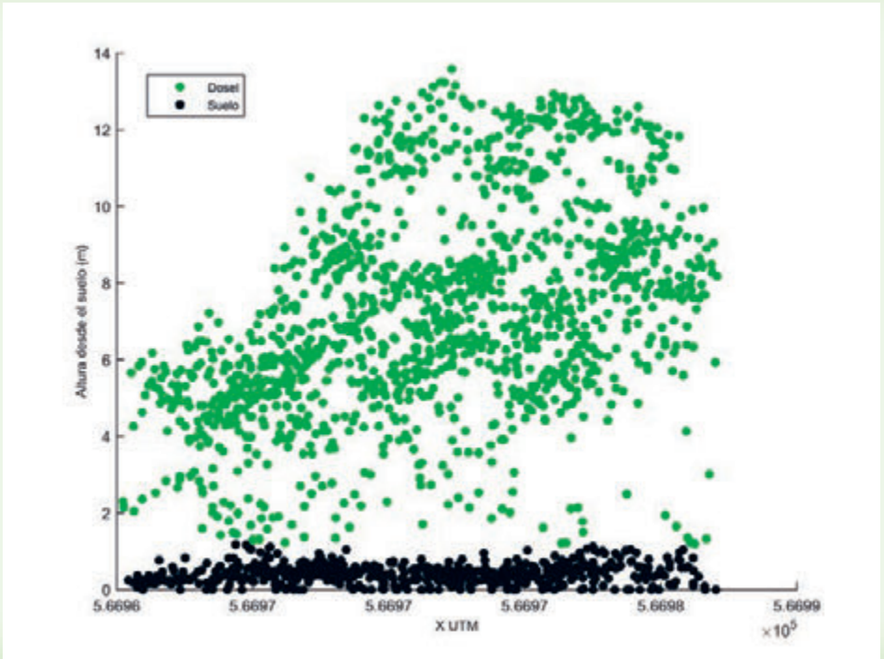


Figura 47: Parcela de bosque y sus retornos clasificados en suelo y dosel de acuerdo a la altura desde el piso. *Fuente: Elaboración propia.*

3.1.2.5. Cálculo de métricas ALS para estimar GF

El GF depende de la estructura del dosel, esto lleva a considerar el tamaño del radio de la parcela con datos de ALS para ajustarse a las HP (Riaño et al., 2004). Varios autores han extraído datos ALS en parcelas de distintos radios y en diversos ecosistemas (Riaño et al., 2004; Morsdorf et al., 2006; Solberg et al., 2009; Solberg, 2010), sin embargo, ninguno de los anteriores consideró una mezcla de cubiertas compuestas por bosques y arbustos como en nuestra zona de estudio. Se probaron parcelas con radios de 5-20 m, empleando incrementos de 1 m. Para cada tamaño de radio, todos los retornos fueron extraídos y separados en retornos del piso/sotobosque y del dosel, empleando un umbral de 0,7 m y 0,2 m que sigue los procedimientos de captura de las HP (figura 47).

Varias métricas de ALS fueron calculadas para las parcelas de diferentes radios, que luego fueron relacionadas con el GF de las HP, correspondiendo a: 1) percentiles de los retornos; 2) tasas de penetración de los pulsos, y 3) tasas de intensidad de los retornos. La premisa de estas métricas es que la interacción del dosel de la vegetación con los pulsos ALS, se puede considerar similar a la interacción que tiene el dosel con la radiación solar directa (Hopkinson y Chasmer, 2007). Riaño et al. (2004) probaron una relación empírica entre el GF y los percentiles P50th, P75th y P90th de todos los retornos, el promedio y la altura máxima de los datos de la parcela. Las métricas ALS basadas en la tasa de penetración de los pulsos, suponen que el GF se puede inferir directamente mediante una relación entre los primeros retornos pertenecientes al suelo y el total de los primeros retornos (Morsdorf et al., 2006; Hopkinson y Chasmer, 2009; Solberg, 2010) (fórmula 15). Por otra parte, Morsdorf et al. (2006) también probaron la diferenciación de los primeros y únicos retornos (fórmulas 16 y 17). Sin embargo, estos métodos no tienen en cuenta el hecho de que un pulso emitido puede encontrar en su trayectoria solo una pequeña área en el dosel, resultando en insuficiente energía reflejada para registrar un primer retorno del dosel. Teniendo esto en cuenta, considerar a todos los tipos de retornos puede proporcionar un aumento en la densidad de muestreo para predecir el GF (fórmula 18) (Riaño et al., 2004; Morsdorf et al., 2006; Hopkinson y Chasmer, 2007; Sasaki et al., 2008; Hopkinson y Chasmer, 2009). Mientras tanto, Sasaki et al. (2008) propusieron combinar los primeros y únicos retornos (fórmula 19). Por otra parte, Solberg et al. (2009) ponderaron a los primeros y últimos retornos con valores distintos a los de los retornos únicos (fórmula 20).

$$GF_F = \frac{\sum RGround_F}{\sum RTotal_F} \quad (15)$$

$$GF_L = \frac{\sum RGround_L}{\sum RTotal_L} \quad (16)$$

$$GF_S = \frac{\sum RGround_S}{\sum RTotal_S} \quad (17)$$

$$GF_A = \frac{\sum RGround_A}{\sum RTotal_A} \quad (18)$$

$$GF_{c1} = \frac{\sum RGround_A}{\sum RTotal_F + \sum RTotal_S} \quad (19)$$

$$GF_{c2} = \frac{\sum RGround_S + 0{,}5(\sum RGround_F + \sum RGround_L)}{\sum RTotal_S + 0{,}5(\sum RTotal_F + \sum RTotal_L)} \quad (20)$$

donde, RGround es la frecuencia del primer retorno (F), último (L), único (S) o todos (A), clasificados como suelo; mientras que RTotal es la frecuencia de retornos del dosel más el suelo con similar significado de las siglas.

3.1.2.6. Cálculo de los modelos de GF a partir de las métricas de ALS

La técnica de regresión lineal bivariada se usó para explorar las relaciones entre las métricas predictoras ALS y el GF de las HP. Se prefirió este enfoque, por sobre el multivariante, para evitar el riesgo de multicolinearidad y la posibilidad de correlaciones infladas cuando se cuenta con un alto número de variables predictoras, especialmente cuando todas se derivan de la misma fuente (Thomas et al., 2011). Además, el objetivo era encontrar métricas que estuvieran directamente relacionadas y pudieran predecir el GF, en lugar de elegir combinaciones complejas que pudieran representar un modelo muy específico del sitio (Xu y Zhang, 2001). Para probar que los modelos satisfacían los supuestos de la regresión bivariada (normalidad de los residuos), se aplicó la prueba de Shapiro Wilk. En esta prueba los residuos se distribuyen normalmente, cuando la estadística de Shapiro-Wilk (W) es cercana a 1 y el valor p no es significativo (Royston, 1995). El error cuadrático medio (RMSE, fórmula 21) se considera una buena medida de la precisión con que el modelo predice la respuesta y es el criterio de selección más importante, si el propósito es la predicción (Sweet y Grace-Martin, 2011). Por lo tanto, se seleccionaron los modelos con el R^2 más alto y el RMSE más bajo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(GF_i - \widehat{GF_i})^2}{n}} \quad (21)$$

donde, n es el número de muestras, GF_i y $\overline{GF_i}$ son el GF medido y el estimado por el modelo.

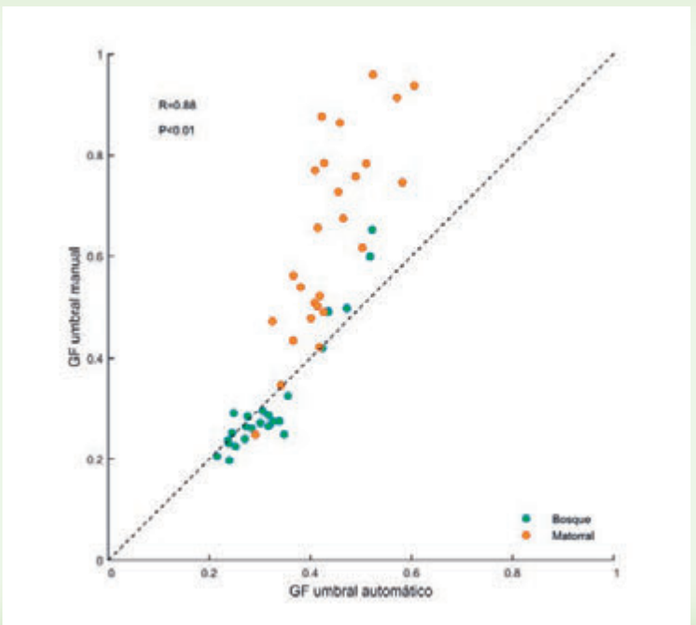


Figura 48: Comparación entre el GF derivado con un umbral automático versus umbral manual. *Fuente: Elaboración propia.*

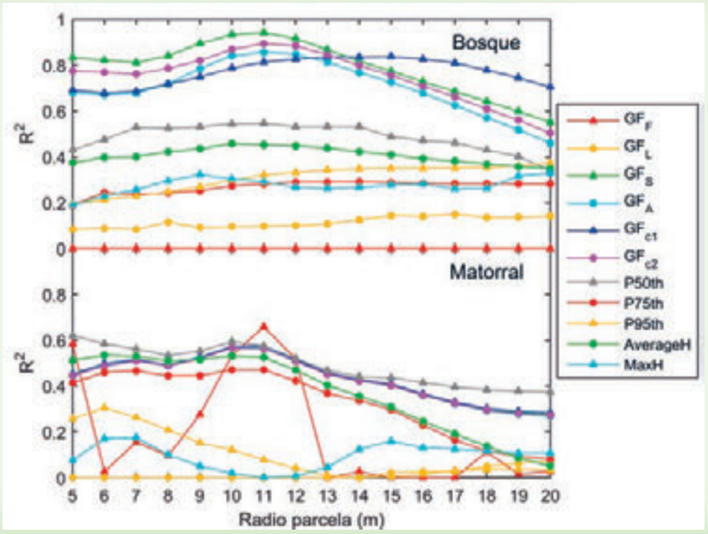


Figura 49: R^2 para las relaciones entre las métricas ALS y el GF de las HP considerando parcelas de diferentes radios en entornos de bosque y matorral. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 9: Modelos seleccionados para la estimación de GF para parcelas (r = 11 m). *Fuente: Elaboración propia.*

	Modelo (GF)	R^2	RMSE	W-statistic	p-value
Bosque	$0{,}462xGF_S+0{,}230$	0,93	0,024	0,912	0,196
Matorral	$0{,}612xGF_S+0{,}304$	0,59	0,042	0,907	0,119

3.1.3. Resultados

La umbralización automática empleada permitió el cálculo del GF para la mayoría de las HP. Después de la inspección visual, solo 12 de las 347 HP (~ 3%) tuvieron que ser reprocesados con un umbral manual. Las imágenes que requirieron umbralización manual correspondieron a dos parcelas de bosque y una de matorral. Después de volver a procesar estas HP, su GF por parcela aumentó 5, 9 y 9%, respectivamente. Se compararon el GF estimado con el umbral automático y con uno manualmente calculado según Casas et al. (2014). La figura 48 muestra que hay una relación significativa entre los dos métodos (R= 0,88, valor de p <0,01), donde el umbral automático subestima el GF en aproximadamente 12%. Al separar por tipo de cobertura, el bosque demostró un mejor desempeño que los arbustos, con un R^2 de 0,89 versus 0,62, y una sobreestimación promedio de 0,6% versus una subestimación de 20%, respectivamente.

La figura 49 muestra la relación entre el GF calculado a partir de las HP y las métricas ALS, para diferentes tamaños de radios. En el caso de las parcelas de bosques, los valores de R^2 variaron desde 0,1 a 0,9 para las métricas de GF_L y GF_S, respectivamente. Las correlaciones más altas para la mayoría de las métricas ALS ocurrieron en un radio de 11 m, sin embargo, para la métrica GFc1 se encontró a los 15 m. Los valores de R^2 en el caso de los matorrales variaron desde 0,007 (MaxH) a 0,59 (GF_S), con las correlaciones más altas entre los 11y 12 m. La tabla 9 muestra los mejores modelos obtenidos que tienden a subestimar el GF tanto en bosque como en matorrales en comparación con las HP. La estadística W y su valor p demostraron que en los modelos sus residuales se distribuyeron normalmente.

3.1.4. Discusión

Varias razones podrían explicar las diferencias obtenidas entre los GF calculados con los umbrales automáticos y manuales. Casas et al. (2014) eligieron todo el rango cenital (0-90°) para calcular el GF, enmascarando además los materiales leñosos. En contraste, este trabajo seleccionó un rango de 30-60° para calcular el GF, pero no enmascaró nada. Las parcelas de matorrales mostraron una mayor proporción de materiales leñosos que las parcelas de bosque en las HP, lo que generó una mayor proporción de huecos en Casas et al. (2014) después de aplicar la máscara, por lo tanto, esto podría explicar las diferencias entre ambos trabajos. Otra posible razón de discrepancia es que el umbral

manual suele ser parcial, ya que un operador se encarga de encontrar el límite entre el follaje y el cielo para establecer un valor umbral, que a veces solo es útil para algunas áreas de la imagen (Jonckheere et al., 2005). En lugar de esto, los algoritmos de cluster se aplican para establecer un umbral automático que diferencia el follaje del cielo en las HP. Finalmente, Casas et al. (2014) prefirieron los tres canales RGB en las HP, mientras que aquí se eligió solo el canal azul, porque tiene un mejor contraste entre los elementos del follaje y del cielo (Gonsamo et al., 2010). Con el umbral automático, solo el 3% de las HP tuvo que volver a ser procesadas después de la inspección visual. Estas HP se capturaron cuando estaba demasiado oscuro. Incluso modificando la exposición, el GF resultante seguía estando demasiado bajo. Además, Jonckheere et al. (2005) señalaron que los algoritmos de agrupamiento funcionan mejor en condiciones de iluminación que presentan una mayor cantidad de luz, por sobre situaciones con una reducida iluminación.

Las diferencias entre las estimaciones de GF para HP y ALS pueden explicarse en parte por las diferencias de punto de vista, así como por el rango de ángulos utilizados para su cálculo (Riaño et al., 2004; Morsdorf et al., 2006). El ALS captura el dosel desde la parte superior hacia abajo, con un ángulo de escaneo de aproximadamente 18°; mientras que las HP lo hacen desde la parte inferior hacia arriba, con un rango cenital de 30-60°. En consecuencia, habrá algunas áreas que serían visibles desde el HP e invisibles desde el ALS, y viceversa. Con respecto de los radios de la parcela, Morsdorf et al. (2006) encontraron el mejor acuerdo a 15 m con un ángulo de escaneo de 7,15°, no obstante 11 m fue el radio óptimo en este estudio, como también informaron Hopkinson et al. (2007) (figura 49). A pesar de estas discrepancias, se escogió un rango de radios adecuado que contenía una correlación máxima y que disminuía en ambas direcciones (figura 49). El tamaño de radio óptimo fue prácticamente el mismo para las parcelas de bosques y matorrales. Contrariamente, Riaño et al. (2004) encontraron un tamaño de radio óptimo diferente para un bosque de pino y de roble, que dichos autores explicaron debido al tamaño y la distribución de los elementos dentro del dosel. Las diferencias en los radios óptimos encontrados en los distintos estudios, reflejan las diferentes características estructurales (densidad, altura y cobertura de los rodales) de las áreas de estudio.

Las métricas ALS (GF_S) mostraron buenos niveles de correlación, pero los resultados difirieron según el tipo de dosel. Para las parcelas de bosque, GF_S proporcionó un R^2 muy alto = 0,93 (tabla 9). Esta simple proporción, que solo considera los retornos únicos desde el dosel o el suelo, evita la divergencia generada por esos pulsos que golpean dos superficies diferentes para producir un primer y último retorno (Sasaki et al., 2008). Un acuerdo similar para GF_S (R^2 = 0,83) fue encontrado en un bosque siempre verde y de hoja perenne por Sasaki et al. (2008). Estos autores demostraron que la densidad de los retornos no influye mayormente en la estimación de GF con GF_S, bajando de 11 hasta 1,13 puntos/m^2 y manteniendo un R^2 relativamente alto, mientras que para nuestro estudio la densidad fue de 4,0 puntos/m^2. Resultados más bajos (R^2 = 0,73 y 0,70) fueron encontrados por Morsdorf et al. (2006) y Hopkinson et al. (2009), con densidades de 20,0 y 1,0 puntos/m^2, respectivamente. En cuanto a las métricas que consideraron un peso diferente para los distintos tipos de retornos, el GF_{c2} mostró un mejor rendimiento con 0,89 en comparación con 0,61 obtenido por Solberg et al. (2009), sin embargo, este fue aún más bajo que las relaciones entregadas por GF_S. La tasa de penetración de la métrica GF_{c2} está condicionada por los factores de peso asignados, los que en este caso intentan dar una participación similar tanto a los retornos de tipo único como a los primeros y últimos (Solberg et al. 2009). Las parcelas de matorrales mostraron correlaciones más débiles con GF_S que las parcelas de bosque (tabla 9). Varias métricas como GF_A, GF_{c1} y GF_{c2}, tuvieron desempeños parecidos a GF_S (figura 49), lo que indica un comportamiento similar para los retornos de tipo único y totales en estas parcelas. El GF promedio de los bosques estimado con las HP fue de un 9% más bajo que el GF de los matorrales (32% versus un 41%), no obstante, el GF_S predijo una diferencia de 1%, con un GF de 19% para bosque versus un 18% para matorrales. En el caso de los bosques, estas subestimaciones fueron mayores cuando los valores de GF eran pequeños. Esto se puede explicar porque en doseles más cerrados, se esperan relativamente menos retornos del suelo (Sasaki et al., 2016). En el caso de los matorrales, las subestimaciones fueron similares en todo el rango de valores de GF. Aunque el GF de las HP para los matorrales sugiere una estructura más abierta que las parcelas de bosque, el umbral usado para discriminar retornos del suelo fue de 0,2 m, lo cual reduce bastante las posibilidades de encontrar retornos que viajen

hasta alturas inferiores al umbral. Además, Hopkinson et al. (2009) informaron que las métricas ALS basadas en las tasas de penetración como el GF_S, son dependientes de la altura del dosel. Esta tendencia se corrobora en el presente estudio, ya que GF_S presentó una correlación de $R^2 = 0,67$ con la altura del dosel (datos no mostrados).

La falta de últimos y primeros retornos provenientes del suelo en las parcelas de bosques y matorrales, causó el fallo de GF_L y GF_F, respectivamente (figura 49). El GF_L mostró algunos valores altos de R^2 en las parcelas de matorrales, pero estos no fueron significativos (valor de $p > 0,05$). El GF_L usa un tipo de retorno que es residual al alcanzar múltiples superficies y, por lo tanto, es raro o inexistente en cualquiera de los doseles para los radios considerados. En el caso del GF_F, no se pudo calcular ya que no se encontraron primeros retornos del suelo tanto para las parcelas de bosque como de matorrales. Sin embargo, Hopkinson et al. (2009) aplicaron la métrica de GF_F y obtuvieron un acuerdo de $R^2 = 0,65$ con una subestimación de 30% con respecto de las mediciones de HP. Además, Morsdorf et al. (2006) obtuvieron un $R^2 = 0,73$ para la misma métrica, con una tendencia a la subestimación. Hopkinson et al. (2009) mencionó que esta métrica está influenciada por la estructura y la altura del dosel, dando un mejor resultado en un bosque mixto que en un bosque cerrado de coníferas. Además, Lovell et al. (2003) indicaron que estas métricas de primer y último retorno están sesgadas por la interacción entre la estructura del dosel, en términos de su tamaño de huecos y el tamaño de la huella. Las métricas empíricas derivadas de la altura de la vegetación (P50th, P75th, P95th, AverageH y MaxH) no proporcionaron resultados cercanos a GF_S para parcelas de bosques, pero sí lo hicieron para los matorrales. El P50th ofreció un $R^2 = 0,62$ en parcelas de matorrales y magnitudes de correlación similares fueron encontradas por Riaño et al. (2004) para la misma métrica y tamaño de radios en un bosque de robles. Además, Riaño et al. (2004) encontraron que los parámetros de regresión con estas métricas son específicos del tipo de dosel como sucede en este caso (figura 49).

3.1.5. Conclusiones

Con base en la ley de Beer Lambert, los sistemas de ALS estiman el GF del dosel utilizando diferentes índices construidos a partir de la frecuencia de los retornos obtenidos desde el suelo. Estas medidas tuvieron diferentes desempeños dependiendo de la vegetación y el tamaño del radio extraído para los datos ALS. El mejor predictor de GF fue el GF_S para el bosque y para los matorrales. Las estimaciones ALS mostraron una subestimación para ambos tipos de parcelas. Existe una relación entre las métricas de GF y la altura de la vegetación, lo que sugiere que la incorporación de datos de altura en los modelos de GF podría mejorar su rendimiento. Contrariamente a algunos estudios previos (Solberg et al., 2009; Solberg, 2010), la métrica de GF_{C2}, que consideró diversos factores de ponderación para los diferentes tipos de retornos, no mejoró en comparación con la métrica simple de frecuencia GF_S. Las métricas basadas en los primeros (GF_F) o últimos (GF_L) retornos, no funcionaron debido a la inexistencia o la reducida cantidad de estos tipos de retornos en los datos. Las métricas empíricas de alturas ALS no dieron cuenta de la estimación del GF, a excepción del P50th que mostró un buen resultado para las parcelas de matorrales. Las métricas ALS tienen la ventaja de ser espacialmente más amplias y flexibles que las HP para producir mapas de GF, una vez que los mejores modelos han sido seleccionados y validados.

3.1.6. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España para el proyecto Biospec (CGL2008-02301 / CL) y FLU PEC (CGL2012-34383). John Gajardo recibió el apoyo del programa Doctorado Becas Chile de CONICYT. Agradecemos a la gente de CSTARS en la Universidad de California, Davis por su asistencia durante la campaña de campo y especialmente a María Santos por su contribución a todas las colecciones de datos. Damos las gracias a G. Asner, D. Knapp y al equipo del Carnegie Airborne Observatory por recopilar y proporcionar los datos de ALS, que fue financiado por una subvención a G. Asner de Gordon y Betty Moore Foundation. El Carnegie Airborne Observatory fue posible gracias a: Avatar Alliance Foundation, Margaret A. Cargill Foundation, John D. y Catherine T. MacArthur Foundation, Grantham Foundation for the Protection of the Environment, W.M. Keck Foundation, Gordon y Betty Moore Foundation, Mary Anne Nyburg Baker y G. Leonard Baker Jr., y William R. Hearst III. También agradecemos al equipo de la reserva biológica de Jasper Ridge de la Universidad de Stanford por todo su apoyo a lo largo de este trabajo, muy especialmente a Nona Chiariello.

3.2 Separación automática de áreas de bosque a través de una aproximación temática por frecuencia temporal de clases con índice SAVI bajo

Francisco Darío Maldonado,[a] Pablo Gilberto Aceñolaza,[a,c] Walter Fabián Sione[a,b]

[a]Centro Regional de Geomática, Universidad Autónoma de Entre Ríos, Argentina
[b]Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina
[c]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas, Entre Ríos, Argentina

3.2.1. Introducción

La separación automática de áreas de bosque nativo para el monitoreo continuo del uso de tierras de alto valor pecuario, es actualmente necesaria para el desarrollo sustentable de la actividad económica en el territorio provincial. En este paisaje, la heterogeneidad ambiental, de suelos y coberturas vegetales presenta un desafío a la automatización, tanto para las técnicas de detección, como para las de clasificación, y para la aplicación de una leyenda temática.

En el Centro Regional de Geomática de la Universidad Autónoma de Entre Ríos, Argentina, se desarrolló un sistema manual de detección y monitoreo anual de cambios, basado en un sistema automático de generación de regiones de interés (ROI). Este permitió probar disminuyendo el tamaño del muestreo (subset) desde departamentos y distritos administrativos, a la escala de predios. El presente estudio fue precedido por uno de monitoreo histórico manual, el cual, en sus recomendaciones, remarcó la necesidad de la articulación de varias técnicas para resolver el problema de la heterogeneidad del paisaje y recomendó la disminución del tamaño del subset para el buen funcionamiento de las técnicas aplicadas (Maldonado et al., 2016).

La articulación de técnicas aunque permite al método resolver situaciones ambientales diferentes, aumenta la complejidad y dificulta las posibilidades de una automatización metodológica. En la práctica, un sistema operacional automático de detección necesita una fuente de información simple de operar con mínima intervención humana; algo que actualmente se puede alcanzar mediante el uso de productos Landsat-8 OLI (Operative Land Imager), cuyo estándar de datos permiten la automatización de parte del proceso, en base al archivo acompañante de metadatos (USGS, 2016).

En desarrollos anteriores para el monitoreo del bosque nativo de Entre Ríos, fue utilizado un sistema manual con un abordaje simple para la transformación temática por enmascaramiento sucesivo, generando máscaras periódicas de no bosque (Maldonado et al., 2013). De esta forma, se obtuvo un sistema operacional simple con buenas posibilidades de automatización, tratando sucesivamente detecciones entre fechas consecutivas, en el que la inicial ya fue enmascarada. Este sistema todavía presenta el desafío de minimizar la propagación de errores y aún no logra resolver adecuadamente el principal problema de la transformación temática, que es la definición radiométrica de límites entre clases cuando estos son transiciones.

Algunos índices de vegetación como el SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), se han mostrado capaces de acompañar las transiciones en áreas de bosques (Huete y Glenn, 2011), posiblemente por su relación mejorada con la componente vegetal y los suelos sombreados (Quintano et al., 2013). Sin embargo, aún persisten algunas dificultades al definir la radiometría del momento del desmonte, cambio temático de bosque a no bosque, sobre todo en áreas con uso agropecuario, donde el raleo de arbustos del sotobosque es parte del manejo. El momento del desmonte es determinado por un salto abrupto de los valores de los índices de vegetación (Richardson y Wiegand, 1977); cuando este ocurre paulatinamente

en el tiempo, con raleados y entresacas para establecer pasturas, el momento del cambio temático no es definido claramente y se necesita una combinación de técnicas que lo revelen (Maldonado et al., 2012).

Una aproximación metodológica que articula varias técnicas, aunque mejore la precisión del mapeo, aumenta la complejidad y dificulta la automatización. Sin embargo, esta articulación basada en una definición multitemporal del bosque, puede hacerse con técnicas simples que aumentan su precisión en cada aplicación, como ocurre si se consideran las variaciones intranuales de los índices de vegetación, donde los ciclos estacionales con valores bajos, caracterizan áreas que no son de bosque, como se aprecia en la figura 50. Esta figura muestra los ciclos estacionales de distritos donde predomina la vegetación natural del bosque nativo (2a) y de áreas donde predomina una mezcla de bosque, agricultura y ganadería. En (2b) se observan frecuencias con valores bajo 7 de áreas sin bosque.

Se observa en la figura 50a que el ciclo estacional del bosque tiene valores bajos de SAVI. En época invernal, estos valores no son menores de 7. En la figura 50b, se observa un conjunto de píxeles del distrito predominantemente agrícola, que presenta valores bajos, durante algunas prácticas agrícolas, lo que puede usarse para una definición temporal de no bosque, articulando técnicas simples en una metodología.

En el presente trabajo se aborda una aproximación automatizada basada en el tratamiento de subsets espaciales pequeños. Como varios autores reconocen, esto favorece al algoritmo k-means, muy sensible al ruido y a valores intermedios entre posibles clusteres (Khan y Ahmad, 2004; Erisoglu et al., 2011; Verma y Srivastava, 2012). Las clases definidas por k-means en una fecha son acumuladas en iteraciones temporales de clases, cuya precisión inicialmente es baja, pero que mejora a cada iteración. Esto aumenta el número de clases en base a la definición de frecuencia del índice de vegetación bajo, relacionada con propiedades ambientales simples que definen la estacionalidad de las áreas sin bosque.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un sistema de separación automática de áreas de bosque nativo de áreas de uso agrícola o agropecuario sin bosque. Este objetivo está orientado a la generación automática continua de máscaras de bosque nativo y no bosque, para alimentar un sistema automático de detección y monitoreo continuo de los desmontes por enmascaramiento sucesivo.

3.2.2. Material y método

El área de estudio se limitó a tres departamentos de la provincia de Entre Ríos, situados al noroeste provincial, que abarcan 15.000 km², entre las latitudes 30° y 31,5° Sur. Estos tres departamentos están compuestos por diecisiete distritos administrativos, los que limitan al oeste

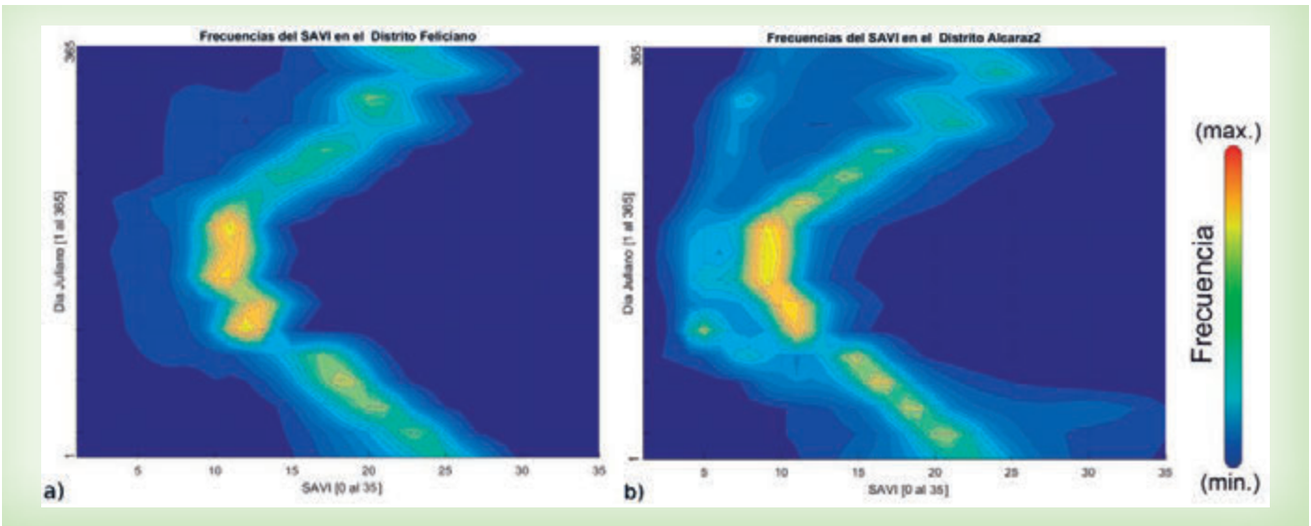


Figura 50: Ciclos estacionales del SAVI de los distritos administrativos. *Fuente: Elaboración propia.*

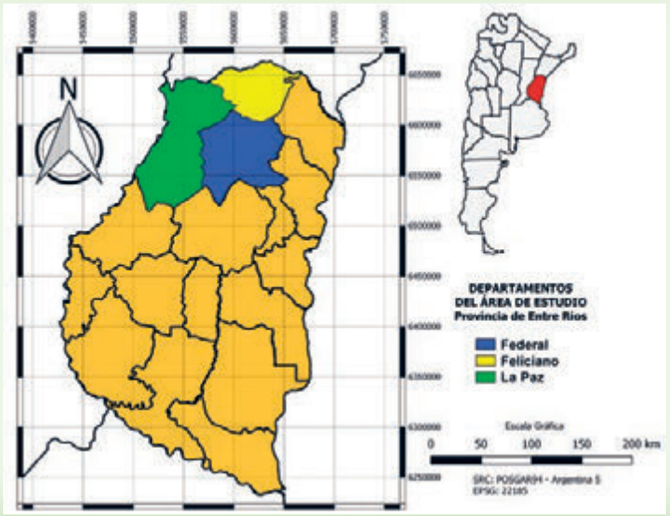


Figura 51: Localización del área de estudio. *Fuente: Elaboración propia.*

con el río Paraná y al norte con la provincia de Corrientes, como se muestra en la figura 51.

El departamento La Paz, al oeste, es el tercero más poblado de la provincia, y el departamento Feliciano, al norte, el segundo menos poblado del territorio provincial. El área tiene clima subtropical sin estación seca, con temperatura media de 26 °C en el mes más cálido y 12 °C en el mes más frío. En esta región las precipitaciones disminuyen en forma gradual de noreste a suroeste, la parte norte de la provincia es la que recibe las precipitaciones más abundantes superando los 1.100 mm anuales, presentando las mayores lluvias entre octubre y abril.

La vegetación natural corresponde a fisonomías arbóreo-arbustivas, siendo característicos de la provincia fitogeográfica del Espinal los bosques nativos del distrito del Ñandubay (Keinerman y Pérez, 1997). Otras áreas que caracterizan al norte de la zona son las sabanas, consideradas como sectores de ecotono entre el pastizal y el bosque. Además, presenta un mosaico de áreas con monte bajo abierto (Sabattini, 2009). En la figura 52 se muestra el aspecto típico del bosque abierto con alta cobertura herbácea, considerados campos de pastoreo de gran valor agropecuario en el espinal entrerriano.

Se utilizaron 36 imágenes Landsat-8 OLI, adquiridas entre los años 2013 (comienzo de la operación de Landsat-8) y el año 2016. Las fechas en día Juliano son 117 del 2013 al 174 del 2016. Las imágenes fueron preprocesadas para extracción de nubes y sombras con la rutina de Zhu et al. (2015) y posterior extracción de subsets (polígonos



Figura 52: Ganadería bovina en bosque nativo. *Fuente: Trabajo de campo 2012.*

menores) de imágenes correspondientes a los distritos político/administrativos. Los softwares utilizados fueron Matlab 2015b y QGIS 2.16.

La metodología aplicada articula una técnica no supervisada de clasificación k-mean, una de cálculo del índice SAVI y una de aplicación de la leyenda del mapa en base al promedio del SAVI para cada fecha.

La metodología se inició con la aplicación del k-mean con doce clases. El resultado de la aplicación de este índice puede producir imágenes temáticas con diferente número de clases, según sea la heterogeneidad de la imagen en cada fecha, donde solo las que corresponden a suelo desnudo o con baja cobertura son relevantes.

El cálculo del SAVI para generación de una banda índice fue realizado en base a un valor de L, extraído de la imagen de un área de suelo desnudo. En este sistema se usa un valor de L predefinido, idéntico para todas las imágenes del set de datos. El L fue extraído de una imagen de invierno del centro de la provincia, donde se encuentran los suelos más oscuros. El uso del mismo L para todos los cálculos es un requisito para mantener la compatibilidad entre imágenes índice de todas las fechas (Gilabert et al., 2002). Este índice no normalizado tiene valores cuyo intervalo varía en relación con el valor del parámetro L. En los casos de la provincia de Entre Ríos, varía generalmente entre -35 a 35. El cálculo del SAVI fue realizado según la fórmula de la figura 53 (Huete y Glenn, 2011). Esta necesita del parámetro L, que puede ser extraído en el espacio R-NIR o directamente de las imágenes, y es el valor, en la banda del rojo, del brillo del suelo más común en el área, medido sobre la línea de los suelos, como se muestra en la figura 53. Sobre la figura se muestra un ejemplo de extracción de L directamente de la imagen, sobre la línea de los suelos, línea que para el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y SAVI es igual a 0.

La selección de píxeles para la obtención del L directamente desde las bandas, puede ser orientada por una imagen NDVI, en la que los píxeles con NDVI próximos a 0 están sobre la línea de los suelos. De esta forma, se puede extraer con mayor confianza el valor de la banda del rojo del suelo con baja cobertura vegetal.

Luego, es calculado el promedio de los valores del SAVI de todos los píxeles correspondientes a cada clase temática del mapa clasificado en la fecha de la iteración. Así, es aplicada la leyenda temática media del SAVI a cada una de las clases del mapa.

En la extracción de las clases con valores bajos del SAVI (menores de 7), los píxeles de estas clases tendrán valor 1 en una imagen para cada fecha. Estas clases son acumuladas por simple suma a cada iteración en un mapa final de frecuencias. En este mapa de frecuencias acumuladas, denominado mapa de frecuencias del SAVI

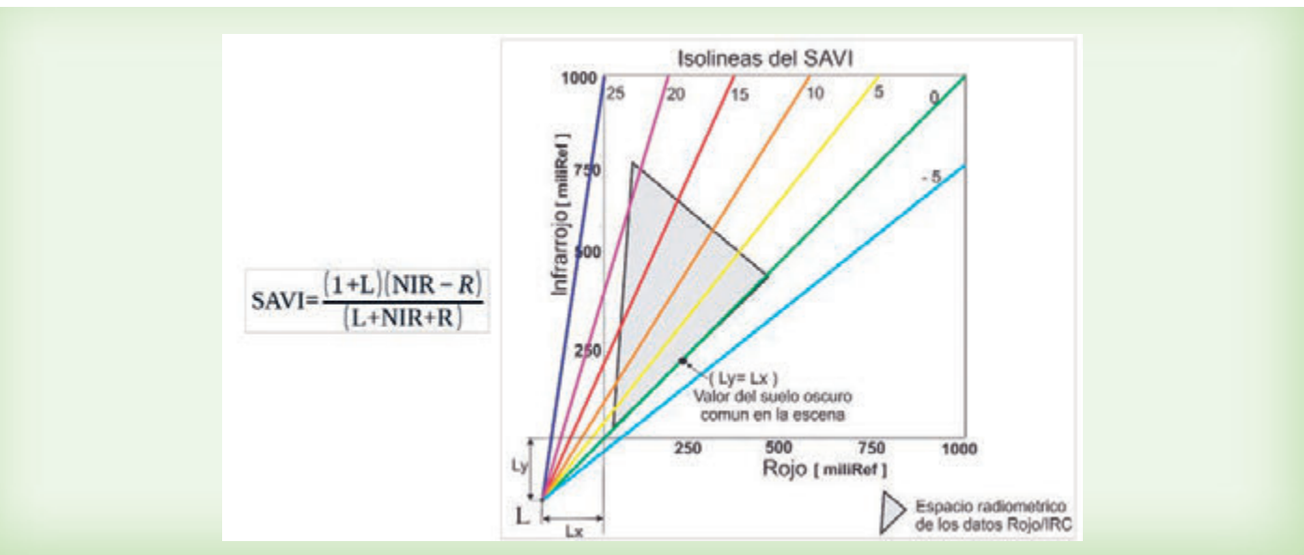


Figura 53: Espacio radiométrico rojo-infrarrojo cercano, con las isolíneas del SAVI. *Fuente: Castellanos et al. (2016).*

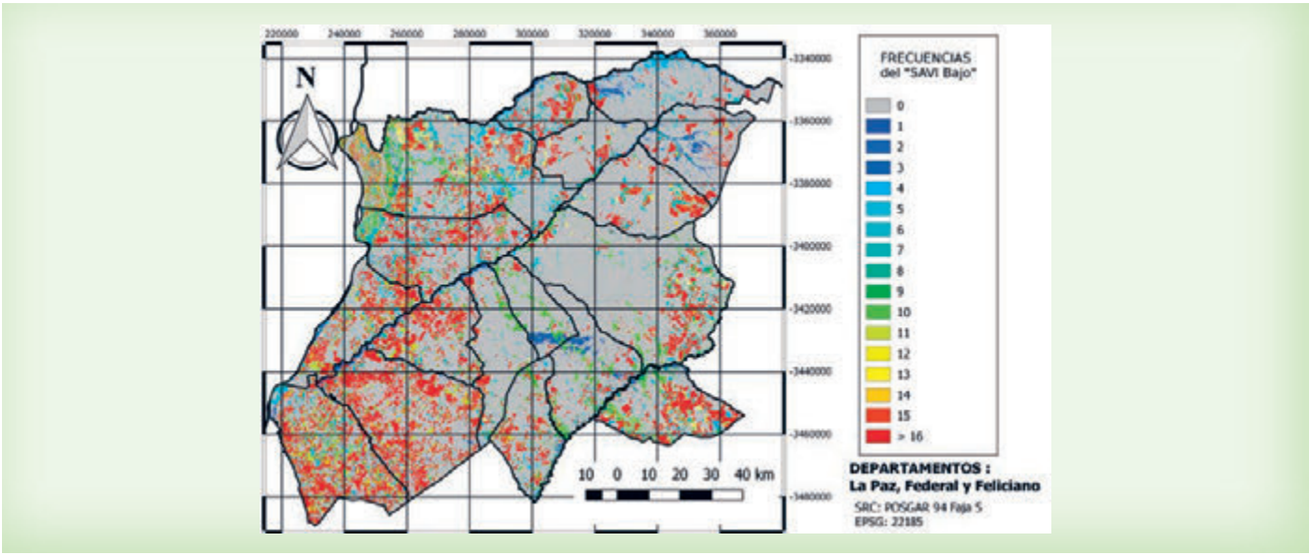


Figura 54: Frecuencias del SAVI bajo. *Fuente: Elaboración propia.*

bajo, las clases 0 (ceros) corresponden a píxeles que nunca, en el período del monitoreo, han tenido baja cobertura vegetal o suelo expuesto.

Luego correspondió la extracción de la clase frecuencia 0 de SAVI bajo para generar un mapa temático de dos clases: 1) bosque nativo en la que no fue registrado un valor de SAVI bajo por ninguna de las imágenes del periodo considerado, y 2) no bosque, cuyos píxeles registraron en alguna fecha un valor índice menor a 7. Esta separación simple se basa en que las áreas de bosque nativo del Espinal, poseen un tipo de cobertura vegetal que se caracterizan por no tener, en ninguna época del año, valores del índice de vegetación bajos, ni valores asociados a suelo desnudo.

Finalmente, el mapa es revisado con imágenes de alta resolución espacial de Google Earth para estimar el error de la máscara de la clase bosque.

3.2.3. Resultados y discusión

Los resultados se presentan en forma cartográfica en la figura 54, que muestra las clases cuya leyenda temática está compuesta en base a la frecuencia de ocurrencia del índice de vegetación bajo; mientras que la figura 55 muestra clases con la leyenda en base al agrupamiento temático de áreas consideradas no monte, que poseen valores de frecuencia mayores a 0.

En la figura 54, se muestra el mosaico de 17 mapas de los distritos administrativos y sus clases de frecuencias del SAVI bajo en el periodo abril de 2013 a junio de 2016, obtenido automáticamente a partir de imágenes Landsat-8 OLI. En términos generales, se observan diferencias entre los distritos administrativos. Los del sureste, predominantemente agrícolas, presentan alta proporción de áreas con frecuencia mayores a 0; mientras que los distritos del centro este, presentan predominancia de áreas con frecuencias 0. En base a esto es posible distinguir distritos predominantemente agrícolas, distritos mixtos y distritos donde predomina la ganadería en bosque nativo. En la misma figura se puede observar que los mayores valores acumulados de frecuencias de SAVI bajo, mayores de 12, presentan formas regulares características de predios agrícolas, a pesar de ser producto del cruzamiento de una serie de transformaciones temáticas independientes. Las áreas con frecuencias 0 están poco fragmentadas. Este resultado es relevante para este tipo de monte, ya que el Espinal posee variabilidad fisonómico-estructural en su área de distribución, presentando tanto bosques altos y cerrados (próximos a cauces y arroyos), como montes cerrados de espinal o abiertos de fisonomía arbustivo-arbórea tipo sabana. Esta variabilidad fisonómico-estructural y de cobertura total del suelo, en la misma región fitogeográfica del Espinal entrerriano, hace que el límite de detección sea complejo. Sin embargo, la metodología probada estaría resolviendo esto en forma automática y con buen desempeño, considerando la relación costo/be-

neficio aceptable para establecer un sistema operacional de monitoreo continuo de grandes áreas.

La figura 55 muestra el mosaico de máscaras de bosque nativo de junio de 2016, obtenido automáticamente a partir de imágenes Landsat-8 OLI. Las líneas corresponden a las divisorias de los distritos administrativos, que fueron procesados separadamente. En el mosaico de máscaras de los 17 distritos se observa que los del oeste, corresponden a áreas con la mayor actividad agrícola, y los del este, predominantemente de actividad pecuaria. Esta máscara fue contrastada a través de casos puntuales en las imágenes de alta resolución espacial de Google Earth, encontrándose muy buena concordancia según interpretación visual del bosque nativo.

3.2.4. Conclusiones y recomendaciones

Se puede concluir que la transformación de datos continuos a temáticos fue mejorada al reducir el tamaño del subset de datos, disminuyendo así la continuidad de los datos en el espacio radiométrico. Esta mejora se observa en el mapa de frecuencias, donde no hay clases muy fragmentadas como se esperaría del cruzamiento de una serie de transformaciones temáticas independientes.

Por esto también es posible concluir que el k-mean no supervisado tuvo buen desempeño, considerando que una de las características de estas áreas es la heterogeneidad ambiental, lo que produce continuidad de los datos en el espacio radiométrico. En este contexto, la reducción del tamaño de subset mejoró la determinación de los grupos temáticos, centros y límites en el espacio radiométrico correspondiente a cada distrito. Este desempeño permitiría articular un clasificador no supervisado k-mean en un sistema automatizado.

Se puede indicar que la alternancia intranual de índices altos y bajos caracterizan las áreas de agricultura y que, en el diseño metodológico propuesto, la agricultura puede tener conteos bajos o medios, ya que solo los índices SAVI bajos se acumulan en el conteo si las imágenes corresponden a periodos intersiembras.

Se puede concluir que el sistema es resistente a la falta de imágenes en algunas fechas, cuando aumenta el número de imágenes incorporadas al mismo; lo que hace que la acumulación con el tiempo de índices SAVI bajos aumente la confiabilidad de la leyenda temática del área de no bosque.

Se recomienda el análisis de la serie de imágenes para la detección del momento del desmonte, ya que este puede basarse en la revisión de las primeras ocurrencias de SAVI bajos en áreas anteriormente de bosque natural. Esto podría estimar el momento del desmonte, siendo que una vez definida un área como desmontada, la fecha de la imagen con SAVI bajo puede corresponder a una fecha próxima con posterioridad a la del desmonte.

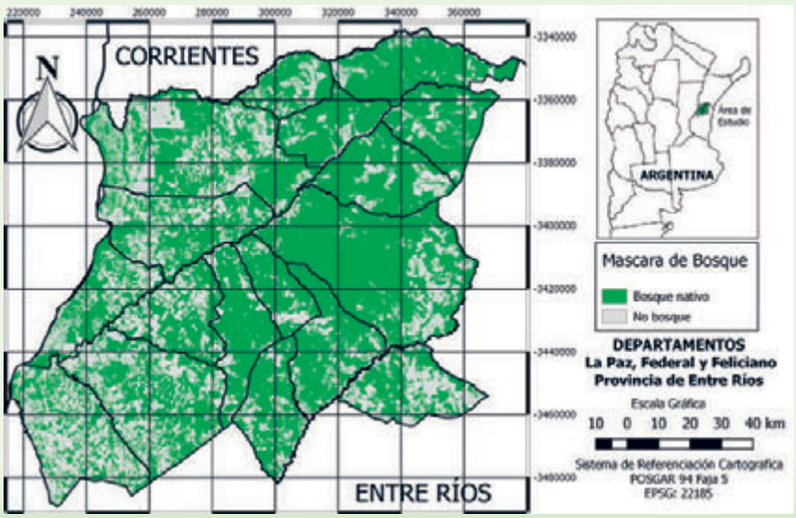


Figura 55: Mosaico de máscaras de bosque nativo. *Fuente: Elaboración propia.*

3.3 Uso de tecnología de datos LiDAR en inventarios forestales remotos

Marco Contreras,[a] Hamid Hamraz,[b] Jun Zhang[c]

[a]Profesor asociado de manejo forestal, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de Kentucky
[b]Estudiante de doctorado, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Kentucky
[c]Profesor, Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Kentucky

3.3.1. Introducción

Tradicionalmente, las decisiones de manejo forestal se basan en información a nivel de rodal obtenida a través de inventarios forestales (Davis et al., 2005; Avery y Burkhart, 2002). Como esta información de terreno toma tiempo y es costosa de obtener, la intensidad de muestreo es relativamente baja, proporcionando solo estimaciones aproximadas que ignoran la variabilidad de vegetación y del terreno dentro de rodales. Recientes avances en tecnologías de sensores remotos, sistemas de información geográfica y ciencias de la información, han traído cambios dramáticos a la adquisición de datos a través de inventarios forestales a escalas temporales y espaciales sin precedente (Shao y Reynolds, 2006). En las últimas dos décadas, la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) ha sido usada para obtener datos forestales a nivel de rodal (Goerndt, 2010; Gupta, 2010) e incluso a nivel de árbol, que incluyen posición, ancho y altura de copa, como también atributos derivados como el DAP (Diámetro a la Altura del Pecho), volumen, y especies (Kim, 2007; Packalén y Maltamo, 2006; Maltamo et al., 2006; Maltamo et al., 2004). Sin embargo, para obtener información precisa a nivel de árbol es necesario desarrollar métodos automáticos y eficientes para la detección de árboles en áreas extensas.

Se han desarrollado numerosos métodos que usan datos LiDAR para la detección de árboles. Los primeros métodos usan datos preprocesados en la forma de modelos digitales de superficie, que representan la altura de la vegetación. Métodos más recientes usan directamente la nube de puntos tridimensionales (Wang et al., 2008; Persson et al., 2002; Hyyppä et al., 2001). Independiente de los datos de entrada, los métodos de detección de árboles se clasifican como paramétricos y no-paramétricos. En general, métodos paramétricos ajustan volúmenes 3D fijos (Holmgren et al., 2012) o aplican filtrajes en distintas etapas (Wolf y Heipke, 2007; Falkowski et al., 2006; Pitkänen et al., 2004), asumiendo que tanto los volúmenes 3D como las funciones de filtraje, representan adecuadamente la forma de copa de árboles. Los parámetros que especifican volúmenes y funciones, se definen manualmente de acuerdo a la forma y tamaño típicos de árboles medidos en terreno; lo que no es trivial debido a la gran variedad de copas, especialmente en bosques deciduos naturales. Métodos no-paramétricos detectan la posición de árboles identificando máximos locales (LMX), que se asumen como los ápices de árboles, o usando mínimos locales (LMS) para encontrar el borde de la copa (Alizadeh Khameneh, 2013; Véga y Durrieu, 2011; Morsdorf et al., 2004; Persson et al., 2002). Métodos que usan LMX, buscan ápices dentro de ventanas de búsqueda y luego, usan rutinas de expansión para delinear la copa de árboles. La determinación del tamaño de la ventana se dificulta porque depende del tipo de bosque y fácilmente puede resultar en la omisión o detección falsa de árboles (Chen et al., 2006; Popescu y Wynne, 2004; Popescu et al., 2002). Métodos que usan LMS adaptan rutinas diseñadas para estudios hidrológicos de identificación de límites de cuencas y de relleno de valles, para detectar los bordes y el área de la copa, respectivamente (Leckie et al., 2003). Estos métodos se caracterizan por una sobre o subdetección de árboles, debido a la alta variabilidad de altura de la vegetación dentro de copa de árboles (Hu et al., 2014; Jing et al., 2012).

Los métodos existentes de detección de árboles se desarrollaron principalmente para su uso en bosques de coníferas, en bosques con follaje no denso, o con espaciamiento regular como plantaciones, en donde supuestos de forma y tamaño de copa son relativamente adecuados

(Heurich, 2008; Kaartinen et al., 2012). Estos supuestos limitan la aplicación generalizada de estos métodos, a bosques con otras condiciones (Vauhkonen et al., 2011). Bosques deciduos presentan una estructura de rodal más compleja debido a la alta variabilidad de tamaño y forma de copa, alto número de especies, y follaje más denso, que dificulta la detección de árboles individuales (Véga et al., 2014; Jing et al., 2012; Heurich, 2008; Koch al., 2006). Estos estudios revelan que la tasa de detección de árboles varía drásticamente dependiendo del tipo de bosque y estructura de rodal, pero en general, se han podido detectar cerca de 90% de los árboles dominantes y co-dominantes, y alrededor de 50% de los árboles intermedios y suprimidos (Kaartinen et al., 2012; Vauhkonen et al., 2011). Estos resultados sugieren que no existe un método superior y que estos métodos se diseñan para tipos de bosques específicos, evidenciando la necesidad de desarrollar un método más generalizado para su aplicación en bosques con diversas estructuras de rodal y que asegure una robusta tasa de detección de árboles.

Adicionalmente, la mayoría de estos métodos se han aplicado a áreas de muestreo relativamente pequeñas con el propósito de evaluar la tasa de detección y sin prestar atención a la escalabilidad y la aplicación a áreas más extensas (Swatantran et al., 2016; Thiemann et al., 2013). No existen estudios que midan la eficiencia de estos métodos para detectar árboles a nivel de rodal o bosque, donde la memoria de datos LiDAR que cubren estas superficies, excede la memoria de computadores normales (Wu et al., 2011). Considerando el continuo avance de la tecnología, se estima que datos LiDAR sean obtenidos a mayor resolución y a menor costo, lo que justifica la necesidad de desarrollar métodos de detección más eficientes y escalables.

En este trabajo se presenta un enfoque nuevo y generalizado para la detección de árboles usando datos LiDAR de huella pequeña, que representan bosques deciduos con alta variabilidad de estructura de rodal. El método propuesto es no-paramétrico, detecta la ubicación de árboles, delinea la copa de árboles basado en información local de puntos LiDAR y no requiere supuestos a priori de forma y tamaño de copa ni de estructura de rodal. Esta obtención de información local de forma dinámica es la mayor contribución de este trabajo. Adicionalmente, se desarrolló una estrategia de procesamiento paralelo de datos LiDAR para la aplicación del método de detección de árboles a nivel de bosque. La estrategia usa un modelo maestro-esclavo para procesar múltiples cuadrículas con datos LiDAR y fue implementada usando la interfaz de paso de mensajes.

3.3.2. Metodología

3.3.2.1. Área de estudio y datos LiDAR

El método de detección de árboles (MDA) se aplicó en Robinson Forest (RF), un bosque experimental de la Universidad de Kentucky de 7.742 ha, ubicado en el sureste del estado de Kentucky en los condados de Breathitt, Perry y Knott (figura 1a, latitud 37,4611° longitud -83,1555°). El relieve se caracteriza por tener un drenaje ramificado con numerosos cauces intermitentes y laderas seccionadas y aterrazadas. Las pendientes varían desde 20% a 100%, con elevaciones entre los 252 y 503 m.s.n.m. La vegetación es característica de bosques mesolíticos y está compuesta por más de 80 especies, siendo northernred oak (Quercus rubra), white oak (Quercus alba), yellow-poplar (Liriodendron tulipifera), American beech (Fagus grandifolia), east-ern hemlock (Tsuga canadensis) y sugar maple (Acer saccharum) las especies más dominantes (figura 56b). El sotobosque está compuesto principalmente por eastern redbud (Cercis canadensis), flowering dogwood (Cornus florida), spicebush (Lindera benzoin), umbrella magnolia (Magnolia tripetala), y bigleaf magnolia (Magnolia macrophylla) (Overstreet, 1984; Carpenter y Rumsey, 1976). El bosque se caracteriza por un follaje denso, con un porcentaje de cobertura de copa promedio sobre el 90%. Después de su tala en 1920s, RF se considera como zona de renovales de 80 a 100 años, los que están actualmente protegidos contra la explotación forestal y minera típica de la región.

El levantamiento se realizó por la empresa PhotoScience (Lexington, Kentucky, EE.UU.), en mayo de 2013, durante el periodo de follaje completo, con el propósito de obtener información detallada de la vegetación en RF. La empresa usó un sistema Leica ALS60 con huella pequeña que resultó en una densidad de puntos cerca de 50 pts/m^2 y un espaciamiento promedio (EP) de 0,2 m. Los vuelos se realizaron a una velocidad promedio de 105 nudos y a una altura promedio de 1.305 m sobre el nivel del suelo. La

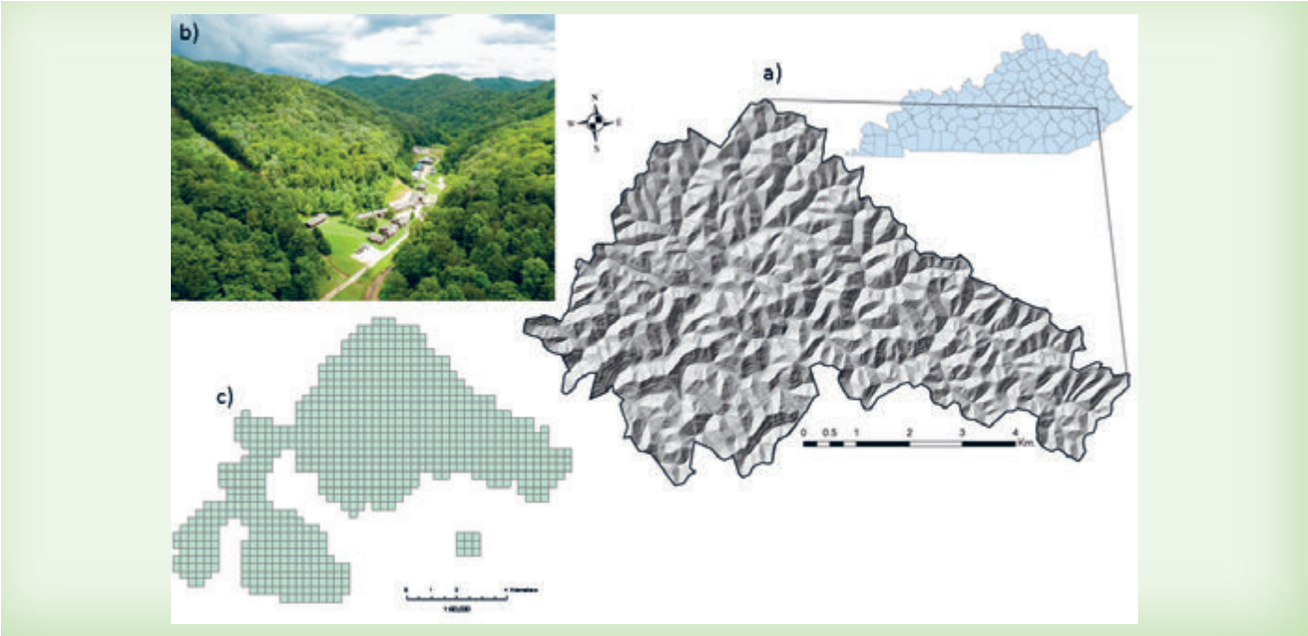


Figura 56: a) ubicación y relieve del bloque principal de Robinson Forest (RF) en el estado de Kentucky, Estados Unidos; b) vista de la vegetación y cobertura típica de RF; c) distribución de las 801 cuadrículas con datos LiDAR. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 10: Parámetros de adquisición de datos LiDAR usados en el levantamiento sobre Robinson Forest. *Fuente: Elaboración propia.*

Ítem	Dato
Fecha del levantamiento	Mayo 28-30, 2013
Sistema LiDAR	Leica ALS60
Elevación promedio de vuelo sobre el suelo	1,305 m
Velocidad promedio de vuelo	105 nudos
Frecuencia del escáner	200 kHz
Ángulo de escáner	< 40°
Sobre posición de barridos adyacentes	50%
Ancho promedio de barrido	183 m
Número máximo de retornos capturados	5
Ancho promedio de huella	0,1 m
Espaciamiento promedio de puntos	< 0,2 m

tabla 10 presenta los parámetros del sistema y vuelo. Los datos LiDAR fueron entregado por la empresa en 801 cuadrículas de 9,3 ha (301x301 m) (figura 56c). En promedio, cada cuadrícula contiene cerca de 4,5 millones de puntos LiDAR, los que ocupan 400 MB de memoria. Las 801 que cubren la totalidad de RF, contienen más de 3.650 millones de puntos LiDAR que ocupan 320 GB de memoria.

3.3.2.2. Método de Detección de Árboles (MDA)

Los principales datos de entrada del MDA son la nube de puntos y el Modelo Digital de Terreno (MDT) derivado de los datos LiDAR. Primero, el método usa una rutina de preprocesamiento de datos para homogenizar horizontal y verticalmente la nube de puntos. La rutina filtra horizontalmente la nube de puntos, seleccionando el punto de mayor elevación dentro de celdas de tamaño igual al espaciamiento promedio (0,2 m), los cuales son llamados Puntos de Superficie (PS). La altura sobre el suelo de cada PS (altura de la vegetación), se calcula restando el valor del MDT correspondiente. PS con altura menor a los 5 m se eliminan del análisis debido a que probablemente representan sotobosque o vegetación cerca del suelo, en vez de la copa de árboles. Dependiendo de la estructura de rodal,

al eliminar estos puntos de baja altura se crean espacios sin vegetación. Luego, la rutina homogeniza verticalmente los PS para reducir la microvariación de la altura de la vegetación dentro de la copa de árboles individuales y mantener solo patrones generales de variación. Para tal efecto se usa un filtro Gaussian (Ito y Xiong, 2000) con desviación estándar igual al EP y un radio de 3×EP.

Después del preprocesamiento de datos, el MDA consiste en la aplicación de las siguientes cinco rutinas (figura 57): 1) identificación del máximo global (GMX), el PS de mayor altura, el cual se asume que representa el ápice de árbol más alto dentro del área de estudio; 2) generación de perfiles verticales de 0,5 m de ancho con origen en la ubicación del GMX y que se expanden inicialmente en las ocho direcciones cardinales y ordinales; 3) identificación del PS a lo largo del perfil vertical que representa el borde de la copa, usando la identificación de espacios en la vegetación o un mínimo local; 4) generación de la envoltura convexa formada por los ocho LS que representan el borde de copa y, 5) agrupación de todos los PS dentro de la envoltura convexa y asignación a la copa de árbol más alto del área de estudio. Este proceso se repite de forma iterativa hasta que todos los PS sean asignados a un árbol. Agrupaciones de puntos (copa de árboles) con diámetro promedio menor a 1,5 m se consideran ruido

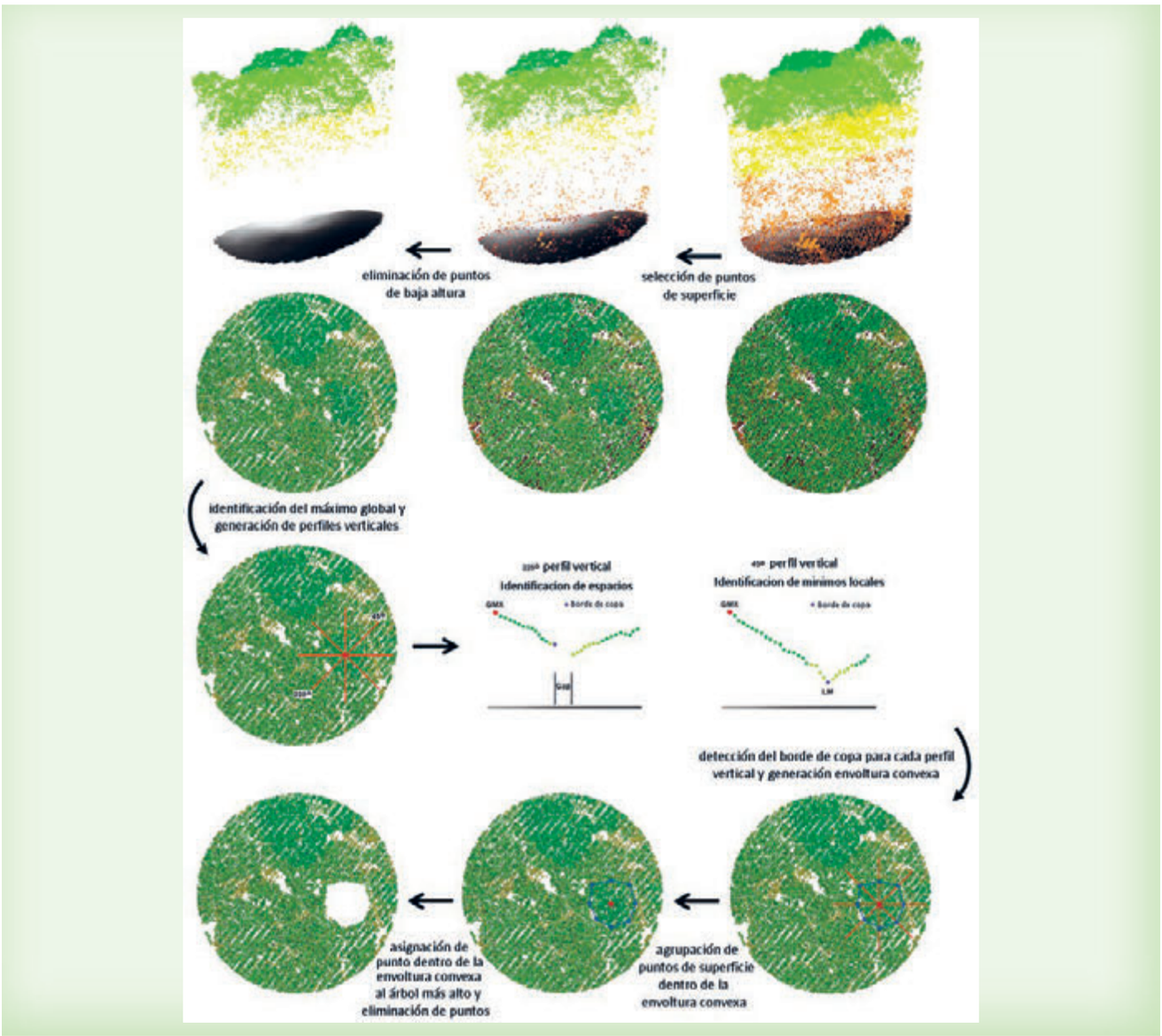


Figura 57: Demostración de las rutinas de preprocesamiento de datos y del método de detección de árboles. *Fuente: Elaboración propia.*

y son eliminados del análisis. La parte más crítica y no trivial del MDA es la generación del número apropiado de perfiles verticales y la identificación del borde de copa a lo largo de cada perfil. Para una descripción más completa de estos procedimientos y del MDA en general, ver Hamraz et al. (2016).

3.3.2.3. Evaluación

Dentro del bloque principal de RF (figura 56a), se instalaron 103 tableros de madera contrachapada de 1,2 x 1,2 m en el centro de parcelas de muestreo circular de 0,04 ha. Los tableros se instalaron antes del levantamiento, fueron pintados de color blanco para aumentar la reflexión del láser, y fueron nivelados con el propósito de luego encontrar los tableros en los datos LiDAR y así obtener la ubicación exacta del centro de cada parcela. En cada parcela se colectó el DAP (cm), la altura de árbol (m), especies, tipo de copa (dominante, codominante, intermedio y suprimido), condición (vivo o muerto), y tipo de tronco (individual o múltiple), para cada árbol con DAP mayor a 12,5 cm. Además, se midió la dirección (grados) y distancia horizontal, desde el centro de la parcela a cada árbol a la altura del pecho para crear un mapa de la ubicación espacial de los árboles dentro de cada parcela. Se recolectaron también variables de sitio como pendiente, orientación y posición de la ladera.

La evaluación de los resultados del MDA consistió en comparar la ubicación de los árboles detectados por el MDA y la ubicación de árboles medida en terreno en cada parcela de muestreo. Como la ubicación del tronco a la altura del pecho raramente coincide con la ubicación del ápice de un árbol, la comparación no utiliza las coordenadas 2D (x,y) exactas. Un árbol detectado por el MDA se considera pareado (AP) con la ubicación de un árbol medido en terreno sí: 1) el ángulo entre la proyección vertical de las coordenadas del tronco del árbol medidas en terreno y el ápice del árbol detectado por el MDA, es menor a 10 grados, y 2) la diferencia de altura entre ambos árboles es menor a 20%.

Un árbol medido en terreno se clasifica como error de omisión (AO) si no existe un árbol detectado por el MDA dentro de los límites de ángulo y diferencia de altura. Un árbol detectado por el MDA se clasifica como error de comisión (AC) si no existe un árbol medido en terreno dentro de los límites de ángulo y diferencia de altura. El número de AP es una indicación de la calidad de detección de árboles, y el número de AO y AC indica la subdetección y sobredetección, respectivamente. La calidad de los resultados del MDA se expresa en términos de la sensibilidad (Sn), precisión (Pr), y valor-F (F), que se calculan con las siguientes tres fórmulas [22, 23, 24]:

$$Sn = \frac{AP}{AP+AO} \qquad (22)$$

$$Pr = \frac{AP}{AP+AC} \qquad (23)$$

$$F = 2\times\frac{Pr\times Sn}{Pr+Sn} \qquad (24)$$

La sensibilidad representa la tasa de detección de árboles, la precisión es una medida de la exactitud de los árboles detectados, y el valor-F indica la calidad general de los resultados tomando en cuenta los errores de omisión y comisión.

3.3.2.4. Estrategia de procesamiento paralelo de datos

En un entorno de procesamiento distribuido, los datos LiDAR que representan la copa de árboles ubicadas en dos o más cuadrículas, se deben procesar por diferentes núcleos de computador. Las mayores dificultades de la estrategia son identificar las porciones de copa en cada cuadrícula, unirlas, y manejar los núcleos de manera eficiente. La estrategia usa un modelo maestro-esclavo para procesar múltiples cuadrículas con datos LiDAR. En la estrategia el maestro está a cargo de mantener el mapa de distribución de cuadrículas (figura 56c) y coordinar cómo procesar las cuadrículas y los datos de los bordes, mientras los esclavos realizan la detección de árboles por medio del MDA.

Los PS cerca de los lados (PS de lados) probablemente representan copas de árboles ubicados entre dos cuadrículas y los PS cerca de las esquinas (PS de esquinas) probablemente representan copas de árboles ubicados entre tres o cuatro cuadrículas (figura 58). Después de aplicar el MDA en una cuadrilla, los grupos de PS que representan árboles que se encuentran a menos de 0,5

m, se consideran parte de los PS de borde, tanto de lados como de esquinas. En la estrategia el proceso se inicia cuando el maestro carga el mapa de cuadrículas y asigna una cuadrícula a cada esclavo para su procesamiento. Los esclavos cargan los PS de las respectivas cuadrículas, aplican el MDA en toda la cuadrícula, e identifican los PS de borde formando ocho subsets (cuatro esquinas y cuatro lados). Los esclavos retornan los resultados de los árboles detectados dentro de las cuadrículas al maestro, y esperan por una nueva asignación. El maestro actualiza el mapa de cuadrículas procesadas y revisa si los ocho subsets pueden ser unificados con subsets adyacentes. Los PS de borde se unifican cuando las dos cuadrículas han sido procesadas y los PS de esquina se unifican cuando las tres o cuatro cuadrículas asociadas se han procesado. El maestro unifica los PS de borde o esquina y asigna a un nuevo esclavo para aplicar nuevamente el MDA, el que notifica al maestro cuando la detección se completa. El maestro termina el proceso cuando todas las cuadrículas y los PS de borde han sido procesados. De esta forma, la estrategia garantiza el procesamiento de los PS de borde de todas las cuadrículas. Para una descripción más detallada de la estrategia paralela de procesamiento de datos LiDAR, ver Hamraz et al. (2017).

La estrategia de maestro-esclavo se implementó usando la interfaz de paso de mensajes y se corrió en el supercomputador Lipscom cluster de la Universidad de Kentucky, que posee 256 nodos simétricos (servidor Dell C6220 y 4 nodos por 2U chasis), cada uno con 16 procesadores (dual Intel E5-2670 de 8 núcleos - Sandy Bridge) que funcionan a 2,6 GHz y 645 GB de RAM a 1600 MHz. En el supercomputador, los nodos están interconectados vía Mellanox Fourteen Data Rate InfiniBand (2:1 oversubscripcion, 14,0625 Gbits/s) y equipados con un sistema de archivos global (DDN GridScaler SFA12K storage appliance with the IBM GPFS - Read: 25 GB/s throughput and 780,000 IO/S, Write: 22 GB/s throughput and 690,000 IO/S) (University of Kentucky Analytics & Technology, 2017).

3.3.3. Resultados y discusión

3.3.3.1. Evaluación de la calidad de resultados del MDA

Después de inspeccionar manualmente los puntos LiDAR sobre cada parcela, se pudieron identificar tableros (y así la ubicación exacta del centro) en solo 23 de las 103 parcelas, que luego fueron considerados en la evaluación de los resultados del MDA. Aunque la ubicación del centro de las demás parcelas se pudo encontrar mediante triangulación con objetos claramente visible en terreno y en los datos LiDAR (por ejemplo: árboles grandes, formaciones rocosas y características de caminos cercanos), se eliminaron del análisis para no introducir errores en el pareo de árboles. Estas 23 parcelas se ubicaron en laderas con diversas orientaciones y en pendientes entre 10% y 70%

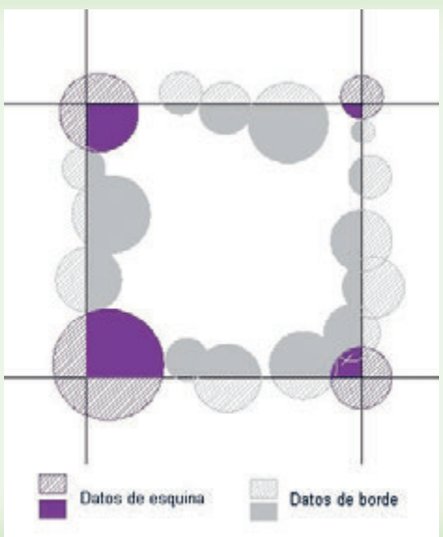


Figura 58: Esquema de una cuadrícula de datos LiDAR con los PS de borde (cuatro lados y cuatro esquinas). *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 11: Resumen de datos recolectados en 23 parcelas en Robinson Forest. *Fuente: Elaboración propia.*

Variable	Unidad	Min	Max	Promedio	Total	Porcentaje del total (%)
Pendiente	(%)	10	70	41,0		
Orientación de ladera	°	16	359	185,0		
Árboles por parcela		6	27	13,4		
Dominantes		0	3	0,6	14	4,6
Codominantes		0	10	3,4	78	25,7
Intermedios		2	10	5,5	126	41,6
Suprimidos		0	15	3,1	72	23,8
Muertos		0	5	0,6	13	4,3
Altura de árbol promedio	(m)					

(tabla 11). En promedio se encontraron 13,2 árboles por parcela de 5,6 distintas especies y una altura promedio de 18,3 m. Las parcelas se encuentran en sitios con estructuras de rodal complejas: Más del 40% de los árboles son intermedios, cerca de 25% codominantes y suprimidos, y solo una menor parte ~5% son dominantes.

Un resumen de la calidad de los resultados del MDA aplicados a las 23 parcelas, se presenta en la tabla 12. En general, la tasa de detección de árboles fue de 72% y 86%. Estos fueron detectados correctamente, lo que resulta en una calidad de detección combinada de 77%. Los valores de sensibilidad varían entre 31% y 100% y los valores de precisión varían entre 50% y 100%. El MDA no pudo detectar varios árboles en parcelas densas con una mayor cantidad de árboles intermedios y suprimidos, lo que produjo bajos valores de sensibilidad. Por ejemplo, en las parcelas 4 y 11, solo 6 de 19 y 0 de 11 de árboles intermedios y suprimidos, fueron detectados. Sin embargo, todos los árboles dominantes y codominantes en estas parcelas fueron detectados. Como es de esperar, los resultados del MDA fueron mejores para árboles dominantes y codominantes, comparados con árboles intermedios y suprimidos. La sensibilidad o tasa de detección fue de 94% para árboles dominantes y codominantes, y de 62% para árboles intermedios y suprimidos. La precisión se mantuvo estable para árboles con todo tipo de copa, alrededor de 86%. Al considerar resultados por tipo de copa, al MDA detectó el 100% de los árboles dominantes, 92% de los árboles codominantes, 74% de los árboles intermedios, y 39% de los árboles suprimidos.

Se evaluó también la relación entre las tres medidas de calidad de resultados y las variables de sitio, incluyendo pendiente, densidad de árboles, diversidad de especies, porcentajes de árboles de cada tipo de copa, y variabilidad de altura de copa. Ninguna de estas relaciones fue significativa para árboles dominantes y codominantes. Sin embargo, para árboles intermedios y suprimidos se observó una relación negativa entre la sensibilidad y altura promedio ($P = 0,004$, $R^2 = 0,33$), entre sensibilidad y número de especies ($P = 0,03$, $R^2 = 0,20$), entre precisión y porcentaje de árboles dominantes ($P = 0,02$, $R^2 = 0,24$), y entre valor-F y altura promedio ($P = 0,03$, $R^2 = 0,21$). Estas relaciones evidencian la dificultad de detectar árboles intermedios y suprimidos en rodales con estructuras complejas. Como el MDA considera puntos LiDAR de superficie, árboles dominantes y codominantes son detectados más fácilmente que árboles intermedios y suprimidos. Estos últimos, poseen copas que son parcialmente visibles desde arriba y en muchos casos, están completamente bajo árboles más grandes, lo que dificulta su detección. Además, las correlaciones entre las medidas de calidad y las variables de sitio son débiles y no significativas para árboles dominantes y codominantes, mostrando que la calidad de los resultados del MDA no es sensible a las diferencias en las características de rodal. Esto muestra lo robusto del MDA y su potencial aplicación a distintos tipos forestales.

Otros modelos aplicados para detectar árboles en bosques deciduos con estructuras de rodales complejas y follaje denso, reportan tasas de detección de alrededor de 50% (Koch et al., 2006; Weinacker et al., 2004), 65% (Jing et al., 2012), y 72% (Hu et al., 2014). Vauhkonen et al. (2011) compararon seis modelos distintos de detección de árboles en dos sitios en bosques deciduos, reportando una calidad de resultados similares. El valor-F varió

Tabla 12: Resumen de la calidad de resultados del método de detección de árboles en las 23 parcelas en Robinson Forest.
Fuente: Elaboración propia.

Parcela	Árboles detectados por el mda /arboles medidos en terreno por clase de copa					Número de árboles pareados y errores			Calidad (%)			Calidad por clase de copa (%)					
												D Y C			I Y S		
	D[1]	C[2]	I[3]	S[4]	Muertos	Ap	Ao	Ac	Sn[5]	Pr[6]	F[7]	Sn[5]	Pr[6]	F[7]	Sn[5]	Pr[6]	F[7]
1	0/0	3/3	6/10	1/3	0/0	10	6	3	62,5	76,9	69,0	100,0	75,0	85,7	53,8	77,8	63,6
2	1/1	3/3	4/4	2/6	0/0	10	4	1	71,4	90,9	80,0	100,0	100,0	100,0	60,0	85,7	70,6
3	0/0	3/3	4/4	0/5	0/1	7	6	1	53,8	87,5	66,6	100,0	75,0	85,7	40,0	100,0	57,1
4	1/1	4/4	3/4	3/15	2/3	13	14	0	48,1	100,0	65,0	100,0	100,0	100,0	36,4	100,0	53,3
5	1/1	4/4	9/9	6/7	0/0	20	1	0	95,2	100,0	97,5	100,0	100,0	100,0	93,8	100,0	96,8
6	2/2	1/2	3/3	0/0	0/0	6	1	1	85,7	85,7	85,7	75,0	100,0	85,7	100,0	75,0	85,7
7	0/0	9/10	2/8	0/3	0/0	11	10	4	52,4	73,3	61,1	90,0	75,0	81,8	18,2	66,7	28,6
8	1/1	5/6	5/8	0/1	0/0	11	5	1	68,8	91,7	78,6	85,7	85,7	85,7	55,6	100,0	71,4
9	0/0	2/2	7/9	2/3	0/0	11	3	1	78,6	91,7	84,6	100,0	66,7	80,0	75,0	100,0	85,7
10	0/0	1/1	2/2	3/6	1/5	7	7	0	50,0	100,0	66,7	100,0	100,0	100,0	46,2	100,0	63,2
11	1/1	4/4	0/8	0/3	0/0	5	11	2	31,3	71,4	43,5	100,0	71,4	83,3	0,0	0,0	0,0
12	0/0	4/4	3/4	2/3	0/0	9	2	4	81,8	69,2	75,0	100,0	57,1	72,7	71,4	83,3	76,9
13	0/0	3/3	7/7	0/0	0/0	10	0	1	100,0	90,9	95,2	100,0	100,0	100,0	100,0	87,5	93,3
14	0/0	2/2	3/3	1/1	0/0	6	0	0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
15	0/0	9/9	3/3	0/0	0/1	12	1	2	92,3	85,7	88,9	100,0	81,8	90,0	75,0	100,0	85,7
16	1/1	1/2	5/8	3/6	0/0	10	7	0	58,8	100,0	74,1	66,7	100,0	80,0	57,1	100,0	72,7
17	0/0	4/4	6/6	2/2	1/1	13	0	4	100,0	76,5	86,7	100,0	66,7	80,0	100,0	81,8	90,0
18	3/3	0/0	1/3	0/0	0/0	4	2	1	66,7	80,0	72,7	100,0	100,0	100,0	33,3	50,0	40,0
19	2/2	0/2	2/4	0/1	0/0	4	5	4	44,4	50,0	47,0	50,0	66,7	57,1	40,0	40,0	40,0
20	0/0	2/2	4/6	0/0	0/0	6	2	2	75,0	75,0	75,0	100,0	100,0	100,0	66,7	66,7	66,7
21	0/0	2/2	4/5	2/4	1/1	9	3	0	75,0	100,0	85,7	100,0	100,0	100,0	70,0	100,0	82,4
22	1/1	1/1	6/6	0/1	0/1	8	2	0	80,0	100,0	88,9	100,0	100,0	100,0	75,0	100,0	85,7
23	0/0	5/5	2/2	0/2	0/0	7	2	3	77,8	70,0	73,7	100,0	83,3	90,9	50,0	50,0	50,0
Detección promedio	14/14 100%	72/78 92,3%	93/126 73,8%	27/72 37,5%	5/13 38,6%	206/303 68,0%	94/303 31,1%	35/303 11,6%	71,7	85,5	76,7	94,2	87,1	89,5	61,6	84,7	70,9

[1] Dominantes, [2] Codominantes, [3] Intermedios, [4] Suprimidos, [5] Sensibilidad, [6] Precisión, [7] Valor-F

entre 57% y 64% y los valores promedio de sensibilidad y precisión fueron 47% y 74%, respectivamente. También, Duncanson et al. (2014) usaron un método de detección de árboles que emplea múltiples capas de follaje, pudiendo detectar correctamente 70% de los árboles dominantes, 58% de árboles codominantes, 35% de árboles intermedios, y 21% de los árboles suprimidos. Los resultados de estos estudios previos en bosques deciduos son ligeramente peores que los resultados de este novedoso método propuesto, lo que indica el buen potencial de aplicación de este método a bosques con distintas condiciones de vegetación.

3.3.3.2. Aplicación de la estrategia de procesamiento paralelo de datos a Robinson Forest

Después de aplicar el MDA a las 801 cuadrículas que cubren las 7.742 ha de RF usando la estrategia de procesamiento paralelo, se detectó un total de 1.952.137 árboles. El MDA puede sobredetectar árboles (el método detecta múltiples árboles en la ubicación de un árbol recolectado en terreno, generalmente árboles dominantes) o subdetectar árboles (el modelo no detecta la ubicación de árboles medidos en terreno, generalmente árboles suprimidos). Consecuentemente, el número total de árboles detectados en todo RF se ajustó usando los resultados de la evaluación en las 23 parcelas. La tabla 13 muestra la proporción entre los árboles detectados en las 23 parcelas y el total de árboles detectados en RF, por tipo de copa. La suma de las proporciones por tipo de copa es mayor a 100%, debido a que se tomó en consideración la tasa de detección por tipo de copa. Usando esta proporción, la cantidad total de árboles detectados en RF y un intervalo de confianza de 95%, la estimación del número de árboles total fue de casi 2,55 millones (±13,5%) o 343 árboles por ha.

La distribución de la altura de copa de los árboles detectados sigue una forma bimodal, que se atribuye a la estructura de rodal con múltiples capas de follaje (figura 59):

una capa principal formada por árboles dominantes y codominantes y una capa secundaria formada por árboles intermedios y suprimidos. Por medio de un ajuste de una distribución normal, se obtuvo una altura promedio de 26,9 m y una desviación estándar de 6,6 m para la capa principal. La altura promedio y desviación estándar de la capa secundaria fue de 6,6 m y 2,6 m, respectivamente. Aunque aquí solo se presentan resultados de número de árboles y alturas, el MDA agrupa los puntos LiDAR que representan cada árbol. Análisis adicionales podrían medir el ancho promedio de copa de cada árbol. Estas dos variables derivadas de los datos LiDAR, altura y diámetro de copa, se pueden relacionar con información medida en terreno para estimar el DAP y otras variables de interés como volumen, biomasa y contenido de carbono.

Se usaron 192 nodos del supercomputador para procesar los datos de las 801 cuadrículas, con un tiempo de proceso de 2 hr y 29 min. Se estima que un computador personal con ocho núcleos de similares características demoraría 17 días y 3 hr para procesar todos los datos. Aunque 17 días puede ser razonable para realizar inventarios anuales, el uso de una estrategia de proceso paralelo de datos implementada en supercomputadores, facilita la cuantificación expedita a nivel de bosque.

3.3.4. Conclusión

En este trabajo se desarrolló y aplicó un método generalizado para la detección de árboles que usa datos LiDAR de huella pequeña. Aunque el método fue diseñado para su aplicación en bosques deciduos con follaje denso y estruc-

Tabla 13: Estimación del número total de árboles en Robinson Forest basado en datos de las 23 parcelas correctamente georreferenciadas. *Fuente: Elaboración propia.*

	Proporción entre árboles detectados en las 23 parcelas y total detectados en RF		Número estimado de árboles en RF	
Tipo de copa	**Promedio**	**95IC[1] (gl = 22)**	**Total**	**Por ha**
Dominante	0,0785	± 75,50%	156.539	21,0
Codominante	0,3069	± 23,07%	612.252	82,3
Intermedio	0,5376	± 17,84%	1.072.473	144,4
Suprimido	0,2928	± 43,29%	584.062	78,5
Muerto	0,0625	±104,70%	124.592	16,7
Total	1,2782	± 13,52%	2.549.918	342,7
[1]Límites de intervalos de confianza de 95% con 22 grados de libertad				

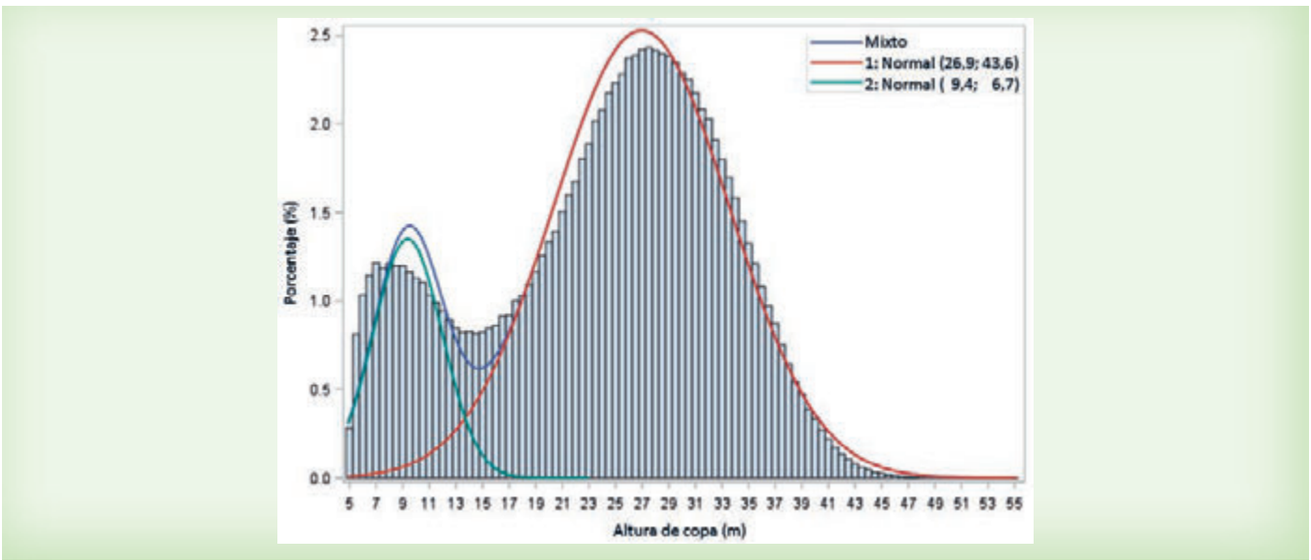


Figura 59: Distribución de altura de copa de los 1.952.137 árboles detectados por el MDA en Robinson Forest. *Fuente: Elaboración propia.*

turas de rodal compleja, puede ser aplicado a cualquier tipo de bosques porque no requiere de supuesto de tamaño ni forma típica de árboles. Una ventaja significativa del método propuesto es la obtención dinámica de información local de puntos LiDAR para extraer la forma y altura de copa, la que es usada para mejorar la identificación de los bordes de copa. La calidad de los resultados del MDA, evaluados en 23 parcelas circulares de 0,04 ha, muestran una tasa de detección de árboles del 72%. De estos árboles, 86% fueron detectados correctamente, lo que resultó en una calidad general de 77%. Al examinar los resultados por tipo de copa, el MDA detectó 95% de árboles dominantes y codominantes, y 62% de árboles intermedios y suprimidos. Se observaron resultados similares en parcelas con distinto número de árboles, número de especies y proporción de árboles dominantes. Esta insensibilidad a la estructura de rodal es una buena indicación del potencial para la aplicación del MDA a distintos tipos de bosques.

La estrategia de procesamiento de datos paralelos permitió la aplicación del MDA a un bosque de miles de ha. Como existe un creciente interés en la cuantificación remota de información forestal a nivel de bosque, el desarrollo de estas estrategias es de crucial importancia para obtener datos de árbol individuales y así contar con información más detallada para el monitoreo, manejo y conservación de recursos. La implementación de la estrategia en un supercomputador con 192 nodos demoró solamente cerca de 2,5 hr en procesar. El área total fue de 7.742 ha, cubiertas por 801 cuadrículas de 9,3 ha, cada una ocupando una memoria de 400 MB y con un total de más de 3.650 millones de puntos LiDAR que ocupan 320 GB de memoria. Se estima que un computador personal con ocho núcleos con similares características tomaría 17 días y 3 hr para procesar todos los datos.

3.3.5. Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por: i) el Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad de Kentucky y el proyecto McIntire-Stennis KY009026 Accession 1001477, ii) la Fundación de Ciencias e Ingeniería de Kentucky bajo el proyecto KSEF-3405-RDE-018, y iii) el Centro de Ciencias Computacionales de la Universidad de Kentucky.

3.4 Clasificación de cubiertas de suelo a partir de imagen Landsat-8 y mediante algoritmo de máquinas de soporte vectorial: el caso de las cuencas de los ríos Lingue y Budi

Fernando Peña-Cortés, Cristián Vergara-Fernández, Natalia Gallardo, Gonzalo Rebolledo

Laboratorio de Planificación Territorial, Universidad Católica de Temuco, Chile

3.4.1. Introducción

La clasificación de las coberturas del suelo por medio de imágenes satelitales representa un insumo fundamental para el estudio de un importante número de fenómenos dinámicos, que permiten brindar información significativa para apoyar los procesos de toma de decisión en el ordenamiento territorial (Sohl y Claggett, 2013). Dentro de estos fenómenos se encuentran las dinámicas de cambio de cobertura de suelo (Foley et al., 2005), el cambio climático (Deng et al., 2013) y las variaciones en la provisión de servicios ecosistémicos (Jacobs et al., 2015). Lamentablemente, la información de coberturas de suelo no siempre está disponible o las metodologías utilizadas para levantar esta información no permiten realizar análisis temporales debido al cambio de criterios de clasificación (Altamirano et al., 2013; Zhao et al., 2016). Actualmente, para realizar clasificaciones de cubiertas de suelo existe una gran diversidad de imágenes satelitales disponibles, al igual que se han propuesto nuevos algoritmos de clasificación que permiten explorar nuevas posibilidades en el estudio de la biosfera (Gómez et al., 2016).

El programa Landsat representa un insumo fundamental para clasificar las coberturas del suelo y realizar estudios temporales, debido a que posee aproximadamente 40 años de observaciones de la superficie de la Tierra que, junto a su accesibilidad y temporalidad, lo han convertido en la base de datos más utilizada a nivel global (Woodcock et al., 2008). De esta manera, Landsat-8, puesto en órbita el 2013, ha dado continuidad al programa, y a pesar de haber sido diseñado para maximizar la compatibilidad con los anteriores satélites, cuenta con una serie de diferencias, entre las que destacan dos nuevos sensores, el Operational Land Image (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS). El sensor OLI integra dos nuevas bandas, una en el azul (b1 0,43-045 µm) que permite mejorar el estudio de aerosoles y aguas costeras, y una banda en el infrarrojo cercano (b9 1,360-1390 µm) que permite la detección de nubes (Irons et al., 2012). Por otra parte, mejoras en la resolución espectral permiten detectar con mayor detalle la variabilidad en la radiancia de la superficie de la Tierra, con una resolución temporal de 16 días (Irons et al., 2012). A partir de esto, Landsat-8 ha comenzado a ser ampliamente utilizado a nivel global para realizar clasificaciones de cobertura de suelo (Zhao et al., 2016).

Paralelamente, al desarrollo del programa Landsat, ha existido un importante avance en los algoritmos de clasificación. Nuevos algoritmos no paramétricos como las Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) han mostrado consistentemente mejores resultados que el, hasta ahora, comúnmente utilizado algoritmo de máxima probabilidad (Huang et al., 2002). El algoritmo SVM en vez de usar datos sobre la media asumiendo una distribución normal de las clases, se basa en la identificación de una frontera de separación óptima (Huang et al., 2002). Esto ha liberado a la fase de entrenamiento de estrictos supuestos de representatividad, disminuyendo en muchos casos la necesidad de obtener un extenso número de sitios de entrenamiento para obtener buenos resultados (Foody et al., 2006, Gómez et al., 2016).

En Chile, durante la última década, distintos grupos de investigación han realizado una serie de clasificaciones de cobertura del suelo para el estudio de las dinámicas del paisaje (Heilmayr et al., 2016; Peña-Cortés et al., 2006).

Estas investigaciones han sido fundamentales para aportar evidencia significativa sobre la continua pérdida y fragmentación del bosque nativo en los últimos 30 años (Miranda et al., 2016). De igual manera, las clasificaciones han permitido determinar las causas de la deforestación, y realizar modelos que proyecten los cambios de cobertura de suelo a futuro (Nahuelhual et al., 2012).

El paisaje de la macrozona sur de Chile presenta una serie de desafíos para la clasificación de sus distintas coberturas de suelo (Zhao et al., 2016). En general, las clasificaciones determinan entre cinco a diez coberturas (Miranda et al., 2016), dependiendo de los objetivos del estudio. Las principales dificultades se presentan en la clasificación de coberturas vegetales (Zhao et al., 2016), siendo particularmente difícil distinguir entre distintos estados de crecimiento o degradación del bosque nativo (Altamirano et al., 2013), por ejemplo, entre renoval, matorral y bosque adulto. De igual manera, la clasificación de humedales presenta limitaciones debido a la gran variabilidad de ambientes que se asocian a esta cobertura y a sus variaciones estacionales (Gallant, 2015).

El objetivo de este trabajo es realizar una clasificación de cobertura de suelo por medio de una imagen del satélite Landsat-8, para evidenciar la capacidad de distinguir los principales elementos del paisaje, en dos cuencas costeras con paisajes contrastantes de la macrozona sur de Chile, como base para próximos estudios que busquen dar cuenta del cambio de cobertura de suelo en estos espacios.

3.4.2. Desarrollo

3.4.2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a las cuencas costeras del río Budi y del río Lingue (figura 60), ubicadas en la Región de La Araucanía y la Región de Los Ríos, respectivamente, más un área de amortiguamiento de 2 km, debido a que las clasificaciones resultantes serán utilizadas para el cálculo de métricas del paisaje espacialmente explícitas. En este sentido, se puede indicar que cuando se trabaja con este tipo de métricas es importante contar con un área de amortiguación para que no existan problemas con el cálculo de las métricas en el borde del área de estudio (Díaz-Varela et al., 2009)

Estas cuencas fueron elegidas debido a que presentan paisajes con elementos diferenciadores y singulares dentro del contexto del relieve costero de la macrozona sur. En el caso de la cuenca del río Budi, se trata de un paisaje de secano costero, altamente fragmentado, con remanentes de bosques de roble-laurel-lingüe, bosques de temo-pitra (hualve), y extensos humedales con un gran valor ecológico y cultural. Por el contrario, la cuenca del río Lingue presenta cordones montañosos y vastas áreas de planicies fluviomarinas, con presencia de humedales ribereños y grandes extensiones de plantaciones forestales que se han emplazado en la cuenca durante los últimos 30 años (CONAF, 2014).

3.4.2.2. Metodología

a. Preprocesamiento: Para este trabajo se descargó una imagen Landsat-8 (Path 233, Row 087) desde el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con fecha de adquisición 30 de diciembre de 2015 (figura 60). La imagen fue recortada con un polígono vectorial que incluía ambas cuencas (área buffer de 2 km).

b. Corrección atmosférica y conversión a reflectancia: La corrección atmosférica y la transformación a reflectancia no es necesaria cuando se clasifica una sola imagen (Song et al., 2001). Sin embargo, se vuelve importante cuando se quiere obtener una serie temporal para evaluar los cambios en el paisaje (Song et al., 2001). Por esta razón, la imagen fue corregida atmosféricamente y transformada de niveles digitales a reflectancia, utilizando el software QGIS, el que contiene un módulo de corrección atmosférica basado en la sustracción del píxel más oscuro (Chávez, 1996).

c. Corrección topográfica: El efecto de la topografía en la imagen, caracterizado por la proyección de sombras sobre áreas contiguas a relieves montañosos, produce una disminución de la reflectancia en la ladera sombreada y aumenta la reflectancia en la superficie bien iluminada (Riaño et al., 2003). Esto conlleva un aumento en la variabilidad espectral de una misma cobertura, lo que puede dificultar el proceso de clasificación (Tan et al., 2013). En este trabajo se realizó una corrección topográfica para la cuenca del río Lingue, por medio del método de corrección C (Teillet et al.,1982), que ha sido

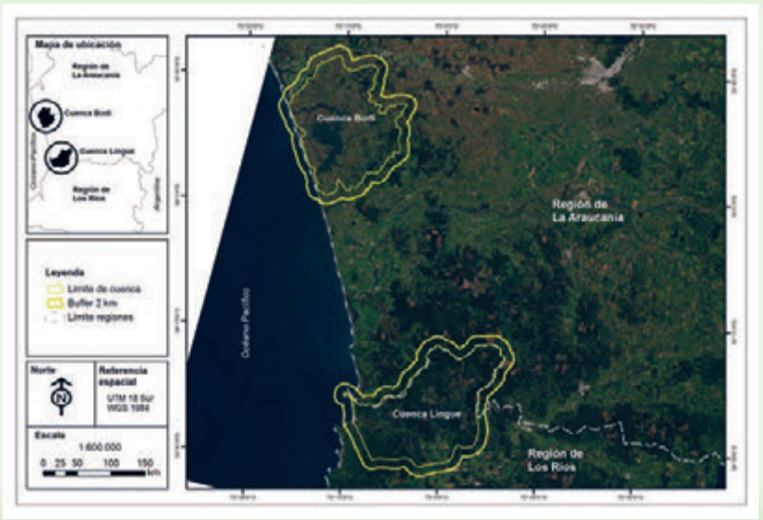


Figura 60: Área de estudio. *Fuente: Elaboración propia.*

ampliamente utilizado, mostrando en un número importante de casos mejores resultados que otros métodos de corrección (Hantson y Chuvieco, 2011).

El método C es un método empírico que busca corregir la dependencia entre los distintos niveles de iluminación y la respuesta espectral de una misma cobertura (Teillet et al., 1982). Para realizar esta corrección, se calculó un modelo de sombras en el software ENVI, utilizando la herramienta Topographic Modeling, a partir de un modelo digital de elevación (MDE) ASTER (30 metros de resolución), usando el ángulo de elevación y el azimut de la imagen satelital Landsat-8 (Figura 61c). Esto permitió identificar por medio de polígonos, zonas con distintas condiciones de iluminación para una misma cobertura (figura 61b). El valor promedio de reflectancia e iluminación de estos polígonos fue exportado a una planilla Excel, donde se determinó la constante C para cada banda, a partir de la relación entre reflectancia e iluminación. Finalmente, estos valores de C fueron utilizados para corregir la imagen, banda por banda (figura 61a) (Teillet et al., 1982).

Esta corrección topográfica fue realizada solo en la cuenca del río Lingue, ya que en la cuenca del río Budi el relieve no produce un efecto de sombra que altere significativamente la respuesta espectral de la imagen.

3.4.2.3. Sitios de entrenamiento

Los sitios de entrenamiento permiten caracterizar espectralmente las clases que luego, por medio de un algoritmo de clasificación, serán generalizadas a toda la imagen.

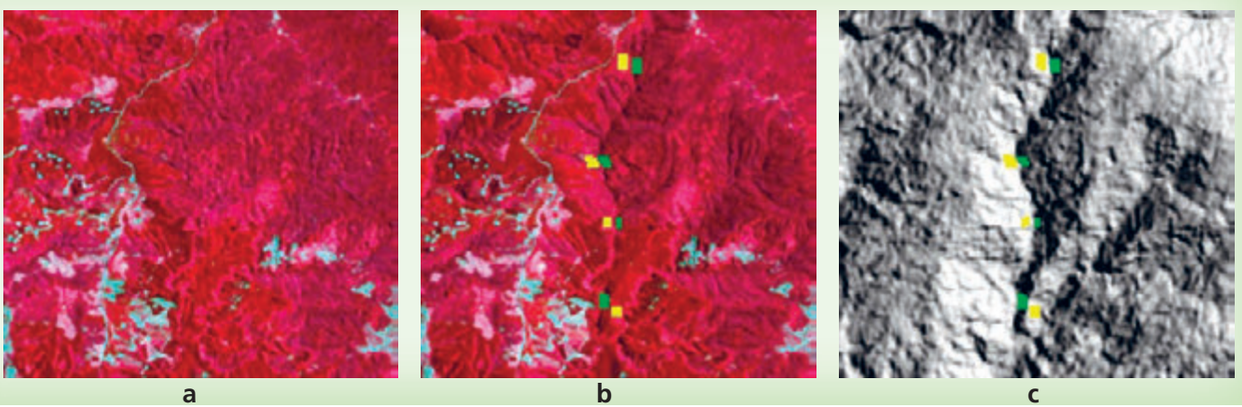


Figura 61: Corrección topográfica cuenca del río Lingue, a) Imagen corregida, b) imagen original, c) modelo de sombra.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14: Categorías de coberturas de suelo. *Fuente: Elaboración propia.*

Nombre categoría	Descripción
Estrán arenoso	Zona de transición entre las olas marinas y la playa, generalmente cubierta por la espuma de las olas.
Cuerpos de agua	Agua de profundidad media-alta, la cual se encuentra presente en lagos, ríos y mar.
Agua superficial	Agua de poca profundidad, que corresponden a humedales.
Bosque nativo	Bosque nativo principalmente del género Nothofagus, incluye bosque maduro y secundario.
Matorral	Zonas con presencia de árboles y arbustos con menor cobertura, dejando expuestas zonas de pastizales. Esta categoría da cuenta de un estado de degradación del bosque nativo.
Plantación	Zona con presencia de árboles exóticos adultos (Pinus radiata, Eucalyptus globulus).
Terrenos con escasa vegetación	Esta categoría agrupa distintos tipos de suelo desnudo o escasa vegetación. En la cuenca del río Lingue, esto corresponde principalmente a plantaciones cosechadas. Sin embargo, se encuentran también terrenos de rotación cultivo-pradera que pueden estar arados, o cultivos como el trigo y la avena, próximos a su cosecha.
Playas y dunas	Áreas sedimentarias compuestas principalmente por arena.
Praderas-cultivos	Cuenca del río Lingue: Zonas con pastizales con casi nula presencia de vegetación arbórea. Cuenca del río Budi: diferenciamos en pradera-cultivo verde y pradera cultivo seca, debido a la extensión de esta clase en la cuenca, esta diferenciación permitió clasificar cultivos de avena o trigo o terrenos en arados como pradera-cultivo seca.
Suelo desnudo	Zonas de suelo desnudo desprovistas de vegetación, corresponden a los lechos de los ríos.
Zonas urbanas	Zonas de casas e infraestructura urbana de baja densidad.
Humedales	Cuenca del río Budi: Terrenos que presentan características de haber estado anegados durante parte del año, muestran suelos húmedos y distintos tipos de vegetación. Cuenca del río Lingue: Adicionalmente a los humedales descritos para la cuenca del río Budi, se encontraron humedales (ñadis). Los humedales ñadis corresponden a suelos de origen volcánico que presentan una baja capacidad de infiltración por lo que suelen anegarse con facilidad.
Plantación creciente	Plantaciones que presentan suficiente cobertura vegetal para distinguirse de una plantación recién cosechada.

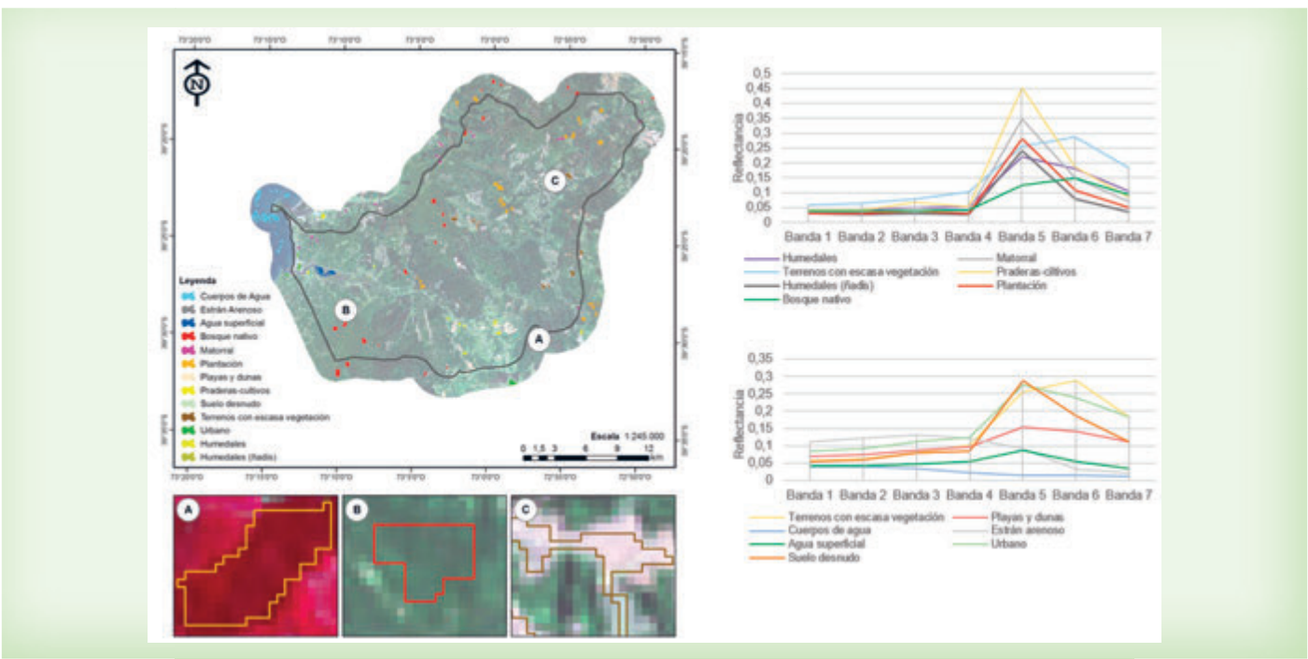


Figura 62: Sitios de entrenamiento de la cuenca del río Lingue, con las firmas espectrales por cada cobertura de suelo. *a) Muestra un sitio de entrenamiento de plantación, b) un sitio de entrenamiento de bosque nativo, c) un sitio de entrenamiento de terrenos con escasa vegetación. Fuente: Elaboración propia.*

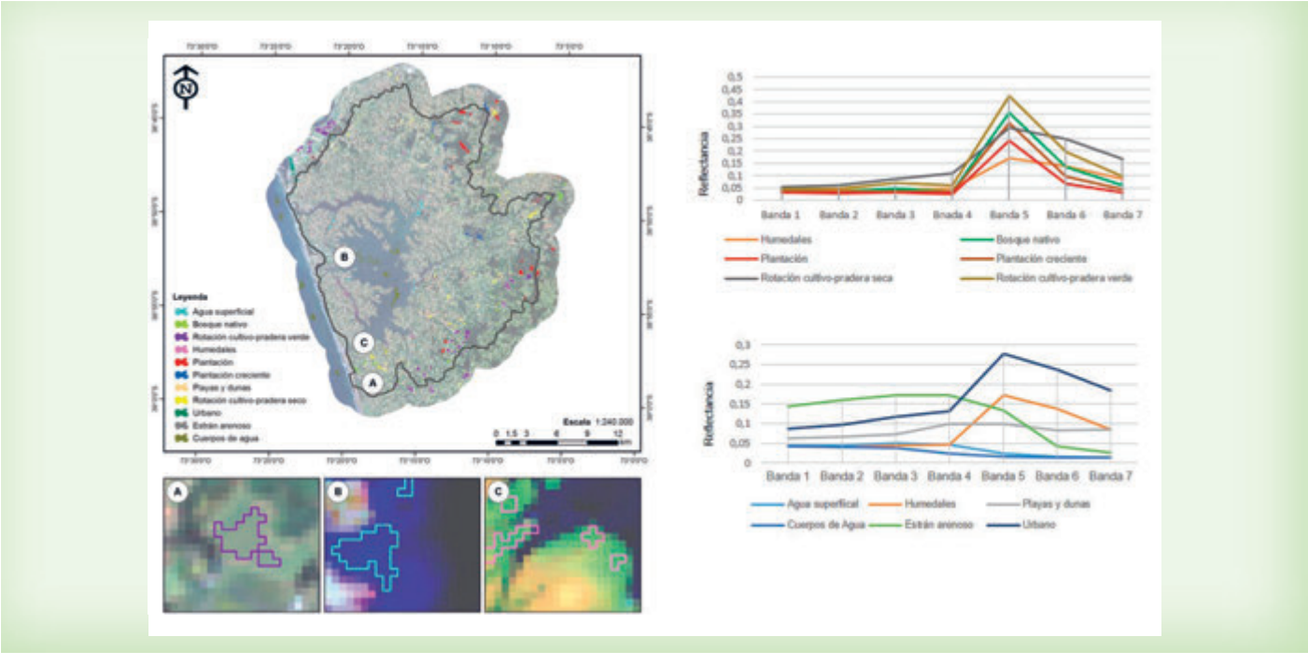


Figura 63: Sitios de entrenamiento de la cuenca del río Budi, con las firmas espectrales por cada cobertura de suelo. *a) Sitio de entrenamiento de cultivo-pradera verde, b) sitio de entrenamiento de agua superficial, c) sitio de entrenamiento de humedales. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 15: Número de píxeles de sitios de entrenamiento para cada cuenca. *Fuente: Elaboración propia.*

Lingue	B.N.	PLAN.	URB.	P.-C.	A.S.	ESTR.	C.D.A.	P.D.	T.C. E.V.	HUM.	HUM. (ÑADIS)	MAT.	S.D.
	1907	2771	572	813	643	402	1478	54	1171	80	26	548	139
Budi	**B.N.**	**PLAN.**	**URB.**	**C.-P.V.**	**C.-P.S**	**A.S.**	**ESTR.**	**C.D.A**	**P.D.**	**P.C.**	**HUM.**	**-**	**-**
	766	1174	570	2218	1390	677	1129	1559	269	584	349	-	-

donde: B.N. Bosque nativo; Plan. Plantación; Urb. Urbano; P.-C. Praderas-cultivos; A.S. Agua superficial; Estr. Estrán arenoso; C.D.A. Cuerpos de agua; P.D. Playas y dunas; T.C.E.V. Terrenos con escasa vegetación; Hum. Humedales; Hum. (ñadis) Humedales (ñadis); Mat. Matorral; S.D. Suelo desnudo; C.-P.V. Rotación cultivo-pradera verde; C.-P.S. Rotación cultivo-pradera seco; P.C. Plantación creciente.

Para definir estos sitios se consideraron las últimas actualizaciones del Catastro de recursos vegetacionales nativos, para la Región de Los Ríos y La Araucanía, Google Earth e imágenes de alta resolución SPOT-6 (resolución de 6 m). Esto permitió lograr una adecuada representatividad espectral y espacial de cada cobertura (figura 62 y figura 63). Adicionalmente, se utilizaron composiciones de bandas de la imagen Landsat-8, principalmente, la combinación 432, para identificar coberturas en el color verdadero, 543 para distinguir distintos tipos de vegetación, y 564 para diferenciar arena y zonas húmedas. La estrategia fue seleccionar un amplio número de píxeles, para capturar la máxima variabilidad espectral dentro de una misma clase.

De esta manera, se definieron 13 clases para la cuenca del río Lingue y 11 para la cuenca del río Budi, que mejor representaban la variabilidad de las coberturas presentes en el área de estudio (tabla 14). Los sitios seleccionados y las curvas espectrales se presentan en las figuras 62 y 63, y el número de píxeles para cada clase se muestra en la tabla 15.

3.4.2.4. Máquina de soporte vectorial

Para lograr la generalización de los sitios de entrenamiento y la asignación de todos los píxeles de la imagen a una de las categorías definidas, se han desarrollado diferentes algoritmos que se basan en distintas reglas de decisión (Lu

y Weng, 2007). Dentro de estos algoritmos, las Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) se han utilizado de manera creciente, debido a que han mostrado consistentemente mejores resultados que otros clasificadores (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012). Gómez et al. (2016) en su revisión de métodos ópticos para clasificación de cubiertas de suelo, destaca que el algoritmo de MSV muestra buenos resultados con un número reducido de sitios de entrenamiento, y no cae habitualmente en un sobreajuste de los datos. La regla de decisión del MSV se basa en la identificación de una frontera de separación entre clases, por medio de un proceso de optimización (Huang et al., 2002). En este proceso, se busca definir un hiperplano de separación óptimo, el que es evaluado por medio de un proceso iterativo, eligiendo el que minimiza los errores de clasificación (Mountrakis et al., 2011). En esta fase, los píxeles de entrenamiento que se encuentran en el borde de la distribución de las clases, juegan un rol fundamental (Foody et al., 2006). Una completa revisión de este algoritmo de clasificación puede encontrarse en Burges (1998).

La clasificación de la cuenca del río Lingue y del río Budi fue realizada en el software ENVI, usando el algoritmo de las máquinas de soporte vectorial y dejando los valores por defecto. El algoritmo de MSV para poder encontrar un hiperplano de separación óptimo en un análisis multivariante, necesita calcular el producto escalar entre vectores en un espacio hiperdimensional, para lo cual se hace uso de una función kernel. Las funciones más comunes son la función polinomial y la función de base radial (Huang et al., 2002; Burges, 1998). Por otra parte, los valores de gamma otorgan el nivel de influencia que tienen los puntos en la definición del hiperplano de separación, en función de su distancia al hiperplano. De esta manera, valores altos de gamma permiten una mayor influencia de los puntos que están más cercanos a la zona de frontera, valores bajos facultan la participación de los puntos más alejados (Huang et al., 2002; Burges, 1998). Algunos estudios muestran que la elección de estos parámetros puede ser crítica a la hora de lograr buenos resultados en el proceso de clasificación (Mountrakis et al., 2011; Huang et al., 2002). Sin embargo, en el caso del presente estudio se realizaron pruebas para ver el efecto de los cambios en los valores del kernel y función gamma, sin observar cambios significativos en los resultados.

3.4.3. Resultados

3.4.3.1. Clasificaciones

El resultado de las clasificaciones para las cuencas de los ríos Lingue y Budi, se muestra en la figura 64. Un pri-

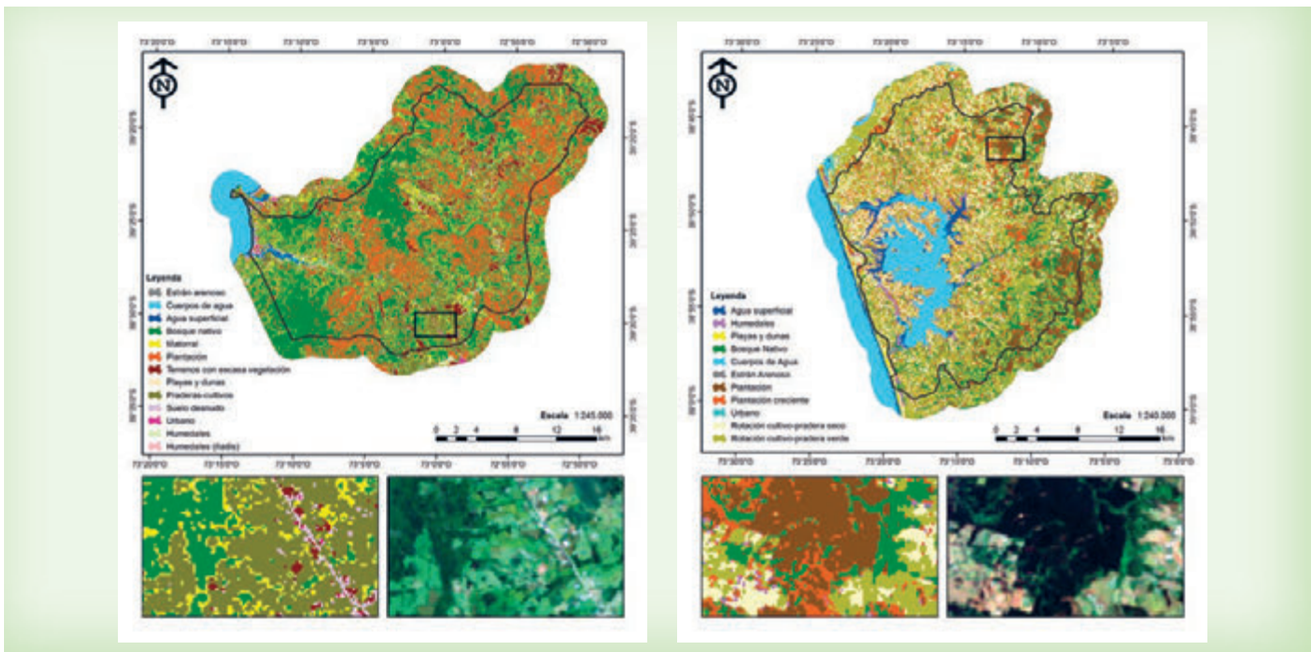


Figura 64: Resultado de la clasificación para la cuenca del río Lingue (izquierda) y para la cuenca del río Budi (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

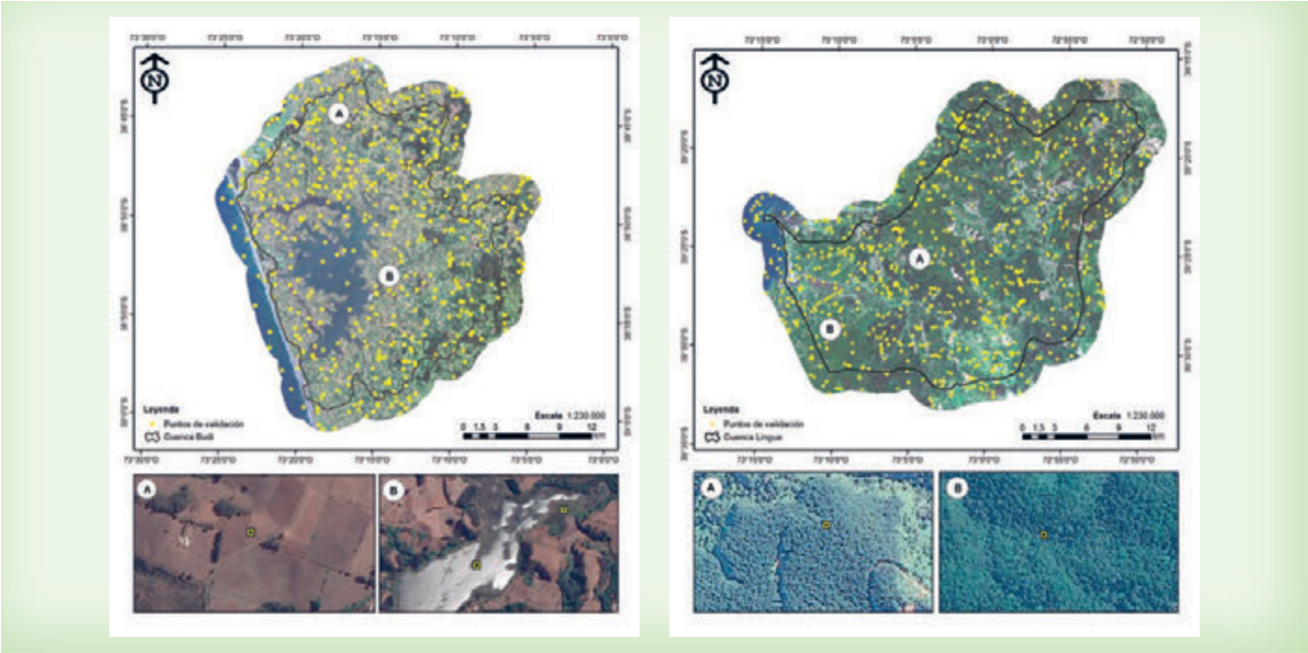


Figura 65: Distribución de los puntos de validación para cada cuenca, determinados a través de un muestreo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

mer análisis visual permite identificar que los principales elementos del paisaje fueron correctamente identificados en el proceso de clasificación. Se pueden reconocer fácilmente, en la cuenca del río Lingue, las zonas donde se emplaza el bosque nativo y las áreas de plantación, siendo estas las coberturas que presentan una mayor superficie dentro de la cuenca. De igual manera, la clasificación de la cuenca del río Budi reconoce los principales componentes del paisaje, como la cobertura rotación cultivo-pradera, parches de bosque nativo y plantaciones de distintas superficies (figura 64).

3.4.3.2. Validación

A pesar de existir un relativo consenso práctico en la forma de validar las clasificaciones realizadas a partir de imágenes satélites, este sigue siendo un asunto en constante debate (Pontius et al., 2011). Hasta ahora tradicionalmente las clasificaciones se validan a través de puntos de control, que son obtenidos idealmente de forma aleatoria (Olofsson et al., 2014). La cobertura de estos puntos puede ser determinada en terreno, con imágenes aéreas o satelitales de alta resolución y frecuentemente, durante los últimos años, con el uso de Google Earth (Bey et al., 2016). Todo esto para alcanzar la mayor representatividad espacial del área de estudio que se necesita validar (Olofsson et al., 2014).

En este trabajo, se realizó la validación por medio de la determinación de puntos de referencia obtenidos a través de un muestreo aleatorio estratificado que se realizó en ENVI, generando alrededor de 651 puntos para la cuenca del río Lingue y 549 para la cuenca del río Budi (figura 65). Estos puntos fueron exportados a KML y visualizados en Google Earth, buscando la imagen más cercana a la fecha de adquisición de la imagen Landsat-8. De esta manera, se determinó la cobertura de cada punto, y se creó un archivo de formato shape, que luego fue convertido a ráster, para ser utilizado en las herramientas de validación de QGIS, obteniendo así las matrices de confusión (tablas 16 y 17).

La clasificación para la cuenca del río Budi, con 11 categorías, alcanzó una exactitud general de 86%, en tanto la clasificación de la cuenca del río Lingue, con 10 categorías, alcanzó 83%; ambos valores dan cuenta de una buena clasificación, en torno a 85% sugerido en la literatura (Foody, 2008).

Las tres principales coberturas de la cuenca del río Lingue, bosque nativo, plantación y pradera, alcanzaron altos valores de exactitud del productor (84%, 87%, y 89%) y del usuario (88%, 87%, y 83%) (tabla 16), mostrando la mayor confusión entre las categorías de bosque nativo, matorral y plantación. Por otro lado, las categorías de

Tabla 16: Matriz de confusión para la cuenca del río Lingue. *Fuente: Elaboración propia.*

Matriz de confusión											
Clasificación	Referencia (píxeles)									Total	E.U. (%)
	C.D.A.	B.N.	Mat.	Plan.	P. D.	S.D.	P.-C.	Urb.	Hum.		
C.D.A.	**35**	0	0	0	0	0	0	0	0	35	100
B.N.	0	**252**	8	21	0	0	0	0	3	284	88
Mat.	0	22	**27**	1	0	11	1	0	4	66	40
Plan.	0	23	0	**154**	0	0	0	0	0	177	87
P.D.	1	0	0	0	**1**	0	0	0	0	2	50
S.D.	0	3	4	1	0	**33**	0	0	1	42	78
P.-C.	0	0	0	0	0	4	**25**	0	1	30	83
Urb.	0	0	0	0	0	0	0	**2**	0	2	100
Hum.	0	0	0	0	0	0	2	0	**11**	13	84
Total	36	300	39	177	1	48	28	2	20	**651**	
E.P. (%)	97	84	69	87	100	70	89	100	55	83	

donde: C.D.A. Cuerpos de agua; B.N. Bosque nativo; Mat. Matorral; Plan. Plantación; P.D. Playas y dunas; S.D. Suelo desnudo; P.-C. Pradera-cultivo; Urb. Urbano; Hum. Humedales; E.U. Exactitud usuario; E.P. Exactitud productor.

Tabla 17: Matriz de confusión para la cuenca del río Budi. *Fuente: Elaboración propia.*

Matriz de confusión												
Clasificación	Referencia (píxeles)										Total	E.U. (%)
	A.S.	Hum.	P.D.	B.N.	C.D.A.	Estr.	Plan.	P.C.	Urb.	R.C.P.S.	R.C.P.V.	
A.S.	**15**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	100
Hum.	0	**8**	0	6	0	0	1	2	0	1	2	20	40
P.D.	0	0	**2**	0	0	0	0	0	1	0	0	3	67
B.N.	0	0	0	**82**	0	0	4	0	0	1	0	87	94
C.D.A.	2	0	0	0	**33**	0	0	0	0	0	0	35	94
Estr.	0	0	0	0	0	**2**	0	0	0	0	0	2	100
Plan.	0	0	0	0	0	0	**36**	0	0	0	0	36	100
P.C.	0	1	0	10	0	0	7	**32**	0	7	1	58	55
Urb.	0	0	0	0	0	0	0	0	**3**	0	0	3	100
R.C.P.S.	0	0	0	0	0	0	0	0	1	**96**	6	103	93
R.C.P.V.	0	0	0	16	0	0	3	1	0	3	**164**	187	88
Total	17	9	2	114	33	2	51	35	5	108	173	**549**	
E.P. (%)	88	89	100	72	100	100	71	91	60	89	95	86	

donde: A.S. Agua superficial; Hum. Humedales; P.D. Playas y dunas; B.N. Bosque nativo; Estr. Estrán arenoso; C.D.A. Cuerpos de Agua; Plan. Plantación; P.C. Plantación creciente; Urb. Urbano; R.C.P.S. Rotación cultivo-pradera seco; R.C.P.V. Rotación cultivo-pradera verde; E.U. Exactitud usuario; E.P. Exactitud productor.

matorral y suelos desnudos quedaron clasificadas de forma menos certera, alcanzando una exactitud de 69% y 70% para el productor y de 40% y 78% para el usuario. En este caso, la principal confusión estuvo entre matorral y bosque nativo, lo que es esperable debido a la similitud de sus firmas espectrales.

Para el caso de la cuenca del río Budi, las clases rotación-cultivo pradera verde y rotación cultivo pradera seca, fueron muy bien clasificadas, mostrando una exactitud del productor de 95% y 89% y exactitud del usuario de 88% y 93% (tabla 17). De igual manera, las coberturas de bosque nativo, plantación y plantación creciente, fueron correctamente asignadas, pero con un menor grado de certeza, alcanzando una exactitud del productor de 71%, 70% y 91%, y 94%, 100% y 55% de exactitud del usuario, respectivamente. Esto quiere decir que el bosque nativo y las plantaciones fueron subestimadas, en cam-

bio, la plantación creciente fue sobrerrepresentada en la clasificación. La mayor confusión se presentó entre las clases bosque nativo, plantación reciente y rotación cultivo-pradera verde, al igual que entre plantación y plantación reciente. Adicionalmente, el agua superficial alcanzó una exactitud del productor de 88% y de 100% del usuario, lo que da cuenta de la posibilidad de distinguir el agua superficial de las aguas más profundas. La categoría humedales, alcanzó una exactitud del productor de 89% y 40% del usuario.

3.4.4. Discusión

La clasificación de cobertura de suelo para el año 2015 de dos cuencas costeras con paisajes contrastantes a partir de una imagen Landsat-8 y el algoritmo MSV, logró una exactitud general de 86% para la cuenca del río Budi y de 83% para la cuenca del río Lingue. En el detalle, ambas clasificaciones lograron una buena exactitud en las categorías que presentan una mayor superficie y que son de mayor interés para los objetivos de este trabajo, estas son: plantación, bosque nativo y pradera-cultivo en la cuenca del río Lingue; y rotación cultivo-pradera verde, rotación cultivo-pradera seca, bosque nativo, plantación y agua superficial en la cuenca del río Budi.

Al igual que en otros trabajos (Altamirano et al., 2013; Miranda., 2016; Zhao et al., 2016), los resultados mostraron, por un lado, ciertos niveles de confusión entre coberturas con vegetación y, por otro lado, ciertos niveles de confusión entre coberturas con escasa vegetación, evidenciando efectos distintos en cada cuenca. En la cuenca del río Lingue, la clase matorral mostró una alta confusión con bosque nativo, alcanzando bajos niveles de exactitud del productor y del usuario. Esto en parte, puede deberse a una incorrecta identificación de algunos sitios de entrenamiento, o a la incorrecta identificación de puntos de validación, debido a la dificultad de reconocer de forma precisa y consistente, coberturas de matorral a través de fotointerpretación usando Google Earth, lo que agrega un grado de incertidumbre mayor a la validación de esta categoría (Foody, 2008).

Por otro lado, en la cuenca del río Budi las plantaciones y el bosque nativo tuvieron menor exactitud de productor, presentando ambas coberturas un error de omisión de alrededor de 30% (tabla 17), esto en parte debido a que la estructura del paisaje en la cuenca del río Budi hace más difícil su clasificación. Esta estructura, está definida por una matriz agrícola, que presenta, en general, pequeños parches de bosque nativo degradado y plantaciones forestales de diversa superficie (Peña-Cortés et al., 2006).

La investigación muestra la posibilidad de diferenciar de forma bastante certera entre agua superficial y cuerpos de agua con una mayor profundidad (lago Budi, río y mar), lo que facilita la identificación de áreas de humedales, principalmente en la cuenca del río Budi (tabla 16). De forma contraria, es sumamente difícil determinar humedales o zonas anegadas o parcialmente anegadas, con distintos niveles de cobertura vegetal, logrando en ambas cuencas una baja exactitud tanto del productor como del usuario (tablas 16 y 17). Para lograr una mayor rigurosidad en la clasificación de esta cobertura, es necesario utilizar índices espectrales como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o el NDWI (Normalized Difference Water Index) (Jones, 2015), o el uso de imágenes LIDAR (Wu et al., 2014).

Las limitaciones de clasificar en detalle la vegetación por medio de imágenes multiespectrales Landsat ha sido documentada en distintas regiones del mundo (Stow et al., 2004; Walker et al., 2010), abarcando una diversidad de ecosistemas y especies dominantes. Para lograr una clasificación más exacta y definida de la vegetación, se han sugerido diversas alternativas metodológicas que deben ser evaluadas con mayor detalle en el área de estudio. Estas posibilidades van desde usar información complementaria, como el uso de modelos de elevación digital (Göttlicher et al., 2009), realizar series temporales de imágenes (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2012), incorporar texturas (Paneque-Gálvez et al., 2013) o realizar la fusión de imágenes Landsat con imágenes de radar (Attarchi y Gloaguen, 2014).

3.4.5. Consideraciones finales

La clasificación de cobertura de suelo utilizando imágenes Landsat-8 y el algoritmo MSV, permite la clasificación de coberturas con una alta exactitud para, por ejemplo, diferenciar entre bosque nativo, plantación, pradera-agrícola, agua y suelos con escasa vegetación. No obstan-

te, la clasificación con un mayor nivel de diferenciación dentro de estos grupos, presenta menores niveles de exactitud, lo que representa una limitación y, a la vez, un desafío. Esto debe ser considerado a la hora de definir las categorías necesarias para estudios que pretendan dar cuenta de cambios de cobertura en el tiempo, para no introducir excesivos niveles de incerteza en los resultados. Nuevos métodos que sean accesibles y eficientes deben ser incorporados para lograr clasificaciones con un mayor número de clases.

3.4.6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Proyecto FONDECYT 1151375 Escenarios prospectivos del paisaje para la planificación territorial: Un marco adaptativo de apoyo a las decisiones en espacios costeros integrando modelación de cambio de uso/cobertura de suelo y dinámica de producción de servicios ecosistémicos, por el financiamiento de la investigación.





SECCIÓN 4

RECURSOS HÍDRICOS Y SUELOS

“Las plantas y los árboles no podrían prosperar sin la acción capilar. Las plantas echan raíces en el suelo que son capaces de transportar agua desde el suelo hacia la planta. El agua, que contiene nutrientes disueltos, se introduce en las raíces y comienza a trepar por el tejido de la planta. A medida que la molécula de agua 1 comienza a subir, arrastra a la molécula de agua 2, que, por supuesto, arrastra la molécula de agua 3, y así sucesivamente”.

The USGS Water Science School

SECCIÓN IV

Recursos hídricos y suelos

Esta sección trata de temas relacionados con los recursos hídricos y de suelo. El capítulo 1 muestra las diversas técnicas que existen para estimar la humedad del suelo con énfasis en los métodos de regresión óptico-microondas pasivos aplicados en Chile. Asimismo, analiza el impacto de diferentes indicadores de vegetación sobre la estimación de la humedad del suelo utilizando el algoritmo óptico-microondas pasivo (OPM). La humedad del suelo es una de las variables climáticas esenciales de la biósfera debido a que dirige los flujos de agua y energía entre la superficie de la Tierra y la atmósfera. Su estimación es importante para gran cantidad de estudios, entre ellos los relacionados a la demanda hídrica, modelos de predicción climática, estudios sobre la cobertura de vegetación y las actividades agrícolas. Entre los métodos para estimar la humedad del suelo se han desarrollado modelos semiempíricos que utilizan la sinergia generada entre datos ópticos y las microondas pasivas en banda L provenientes de sensores remotos. La ventaja de estos modelos es que consideran los efectos producidos por la cubierta vegetal sobre la señal captada por el sensor, permitiendo estimaciones desde escalas locales a globales. Esto fue realizado para un período entre enero del 2010 hasta diciembre del 2015 considerando los datos de temperatura de brillo bipolarizada en banda L de la misión Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS); el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área foliar (LAI) del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) y la humedad y temperatura de los primeros 7 cm de suelo provenientes del reanalysis ERA-Interim. Diferentes cartografías realizadas sobre Chile fueron utilizadas para determinar el impacto del tipo de clasificación sobre las estimaciones de la humedad del suelo tales como las cartografías de uso de suelo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), de la European Space Agency Climate Change Iniciative (ESA-CCI) y de ECOCLIMAP. Los resultados mostraron que al incluir un indicador de vegetación en el método OPM se generaron en la mayoría de las cartografías disminuciones en la raíz del error cuadrático medio (RMSE) superiores a 8% m^3m^{-3} en las coberturas de bosque, matorral, pradera y áreas sin vegetación, tanto utilizando NDVI como el LAI. Las estimaciones de humedad del suelo realizadas a partir de NDVI pueden generar una importante fuente de información para futuras aplicaciones en el estudio de variables ambientales en Chile como por ejemplo índices de sequía a través de datos satelitales o mapas nacionales de riesgo de incendios.

El capítulo 2 presenta los principales aspectos teóricos del uso de herramientas de teledetección satelital para estimar requerimientos hídricos en cultivos vegetales, especialmente considerando su aplicabilidad para zonas sensibles, como las áreas de secano. Los datos obtenidos desde plataformas de teledetección satelital, en conjunto con datos meteorológicos, en la actualidad se presentan como medios adecuados para estimar los requerimientos hídricos de las coberturas vegetales presentes en la superficie, tanto a escala predial como regional. Teóricamente los dos métodos de teledetección satelital más comúnmente utilizados para estos fines son: 1) el método basado en índices de vegetación y 2) el basado en el balance de energía superficial. El potencial que existe al analizar la variabilidad espacial y temporal de los datos de consumo de agua es enorme. No obstante, es importante señalar que el uso de imágenes satelitales por sí solo no es suficiente para la administración del riego pues no son mediciones, sino simplemente estimaciones de diversas variables que requieren el desarrollo de competencias profesionales que son clave para que estas herramientas tecnológicas apoyen la toma de decisiones para manejo de un recurso tan preciado como el agua.

En el capítulo 3 se realiza una caracterización geomorfológica de área de estudio a partir de un método jerár-

quico basado en secuencias topográficas, análisis morfométrico y validación en terreno con el uso de imágenes satelitales de alta resolución y DEM ERS interferométrico. La interpretación visual de la imagen permitió separar los sistemas presentes y definir los procesos que conllevan a la morfogénesis de las geoformas en cada sistema. Las características litoestructurales de la microcuenca demuestran que los procesos presentes se deben al intenso fallamiento, así como, a la topografía de alta montaña, la influencia glacial y la convergencia entre los sistemas definidos, derivados de procesos dinámicos aún activos. En el área de estudio se delimitaron cinco sistemas geomorfológicos: litoestructural, glacial, nival, gravitacional y aluvial, cada uno con características propias.

En el capítulo 4 se detectan variaciones de la temperatura superficial del mar en relación a los valores climatológicos durante períodos de actividad sísmica a lo largo de la fosa de Perú-Chile, presentando una estructura, en términos de espacio, muy irregular. Esto quiere decir que parecen existir algunos lugares específicos y privilegiados junto a la fosa de Perú-Chile donde se pueden observar las diferencias en la temperatura con respecto a los valores climatológicos. Además, se observó una definida gradiente de temperatura en descenso en dirección norte-sur; en este sentido, la fosa de Perú-Chile se puede dividir en dos secciones: la norte (Colombia, Perú, y Chile hasta el norte de Iquique), donde se detectaron las diferencias de temperatura más altas con respecto a los valores climatológicos; y la sur (Chile, desde el sur de Iquique), donde las diferencias de temperatura fueron mucho más bajas o inexistentes. Se observó una cierta correlación entre los epicentros de los terremotos y los puntos más calientes de las diferencias de temperatura con respecto a los valores climatológicos, pero no se encontró ninguna correlación entre estos valores de temperatura de la magnitud de los terremotos.



“Plants and trees couldn’t thrive without capillary action. Plants put down roots into the soil which are capable of carrying water from the soil up into the plant. Water, which contains dissolved nutrients, gets inside the roots and starts climbing up the plant tissue. As water molecule 1 starts climbing, it pulls along water molecule 2, which, of course, is dragging water molecule 3, and so on”.

The USGS Water Science School

SECTION IV

Water resources and soils

This section deals with issues related to water and soil resources. Chapter 1 shows several techniques currently used to estimate soil moisture specially focusing on optical-passive microwave regression models in Chile. Moreover, the impact of different vegetation indicators is also detailed through the optical passive microwave approach (OPM). Soil moisture is one of the essential climate variables of the biosphere owing its driving the water and energy fluxes between land surface and atmosphere. Its estimation is crucial for several works related to water demand, climate forecast modeling, vegetation cover and agriculture. Above all methods used for estimating soil moisture, semi-empirical models using the synergy between optical and passive at L band microwave gathered more attention. The advantage of these models enables to account vegetation cover effects on the microwave signal, allowing to estimate from local to global scale. The application of OPM in Chile were done between January 2010 and December 2015 accounting L-band brightness temperature from Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), the normalized difference vegetation index (NDVI) and the leaf area index (LAI) from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and soil moisture and temperature for the first 7 cm depth derived from ERA-Interim reanalysis. Furthermore, land cover cartography such as the ESA CCI, the National Forest Corporation (CONAF) and Ecoclimap were also used. Results shown vegetation indicator are key for soil moisture retrievals at using OPM approach where the Root Mean Square Error (RMSE) was equivalent to 8% m^3m^{-3} on forest, shrublands, grasslands and barren land covers at using NDVI or LAI. Soil moisture retrievals at using NDVI can improve the accuracy and could be used for further application in Chile revealing an environmental condition in case of drought and risk forest map.

Chapter 2 presents the main main theoretical aspects of satellite remote sensing as a tool to estimate the water requirements of plant crops, emphasizing its applicability to sensitive areas, such dryland regions. remote sensing data along with meteorological data are currently adequate methods to estimate the water requirements of the vegetation cover, at both the field and regional scales. Theoretically the two most common used methods in satellite remote sensing for these purposes are: 1) the vegetation indices and 2) the surface energy balance. There is a great potential of analyzing the spatial and temporal variability of water consumption data. However, it is important to point out that the only use of satellite images is not sufficient for irrigation management planning because they are not ground-truth, but simply estimates of several variables that require the development of professional skills in order to these technological tools support decision-making for managing a precious resource like water.

In chapter 3 a geomorphological characterization of the study area is made from a hierarchical method based on topographic sequencing, morphometric analysis and field validation using high-resolution satellite imagery and interferometric DEM ERS. The visual interpretation of the image made it possible to separate the present systems and define the processes that lead to the morphogenesis of the geoforms in each system. The litho-structural characteristics of the micro-watershed demonstrate that the present processes are due to the intense failure, as well as the high mountain topography, the glacial influence and the convergence between the defined systems, derived from dynamic processes that are still active. Five geomorphological systems were defined in the study area: litho-structural, glacial, nival, gravitational and alluvial, each with its own characteristics.

In the chapter 4 sea surface temperature variations with respect to climatological values during periods of seis-

mic activity were detected along the Peru-Chile Trench presenting spatially a very patchy structure. That means that there seems to exist some very specific, privileged places along the Peru-Chile Trench where temperature differences with respect to the climatological values are observed. In addition, a definite North-South decreasing temperature gradient was observed; in this respect, the Peru-Chile Trench may be divided into two sections: a north one (Colombia, Peru, and Chile, north of Iquique) where the highest temperature differences with respect to the climatological values were detected, and a south one (Chile, south of Iquique) where temperature differences were much smaller or nonexistent. A certain correlation between earthquakes' epicenters and the hottest spots in temperature differences with respect to the climatological values was observed, but no correlation was found between these temperature values and the earthquakes' magnitudes.

4.1 Hacia el monitoreo de la humedad del suelo en Chile

Diego Uribe, Cristian Mattar

Laboratorio para el Análisis de la Biosfera (LAB), Universidad de Chile, Chile

4.1.1. Introducción

La humedad del suelo es una de las variables climáticas esenciales de la biósfera debido a que dirige los flujos de agua y energía entre la superficie de la Tierra y la atmósfera (Kerr, 2007; Mittelbach et al., 2011; Albergel et al., 2012). La humedad del suelo juega un rol fundamental controlando la evaporación y transpiración, desde coberturas de suelos desnudos hasta coberturas con vegetación densa (Albergel et al., 2012); así como también, controla el particionado de precipitación en escorrentía e infiltración (Famiglietti et al., 1998; Kerr, 2007). Los estudios de la humedad del suelo a escalas globales o continentales son un importante input para diversas áreas. Entre estos se encuentran: estudios de la variación del tiempo y el clima (Douville y Chauvin, 2000; Drusch, 2007), estudios de crecimiento vegetal (Diermeyer et al., 1999; Georgakakos y Carpenter, 2006; de Wit y van Diepen, 2007; Guerif y Duke, 2000) y también en aplicaciones en la agricultura (Berg et al., 2005; Shin et al., 2006; Liu et al., 2008).

A escala global, la humedad del suelo presenta una variabilidad temporal y espacial que está determinada por factores como la topografía, las propiedades del suelo, radiación solar, precipitación y el tipo de cobertura de la superficie (Korres et al., 2015). Sobre suelos desnudos, la humedad del suelo está determinada por su constante dieléctrica, la variación de textura, el contenido de materia orgánica, el color, la estructura y la existencia de macroporos (Wang y Schmugge, 1980; Famiglietti et al., 1998). Sin embargo, para las superficies con algún grado de cobertura vegetacional, la estimación de la humedad del suelo resulta dependiente de las características propias del dosel como el vigor, fase fenológica, índice de área foliar, estructura del dosel, entre otras (Reynolds, 1970; Famiglietti et al., 1998).

Para la estimación de la humedad del suelo sobre estas coberturas existen diversos métodos, como la toma de muestras in situ o a través de mediciones remotas provenientes de satélites. No obstante, realizar mediciones in situ en escalas regionales y de manera regular es difícil debido a su complejidad, alto costo financiero, y además es posible solo en un limitado número de estaciones (Mallick et al., 2009). Por lo tanto, mediciones remotas con el uso de teledetección son utilizadas para obtener productos globales y continuos de humedad del suelo (Shaoning et al., 2014). En este contexto, una de las técnicas de mayor uso es a través de microondas pasivas, específicamente, mediante el rango de la banda L (1-1,4 GHz) (Jackson y Schmugge, 1995). Esto debido a que no sufren grandes perturbaciones por factores como las cubiertas de nubes, la rugosidad de la superficie del suelo o la cubierta vegetal (Kerr et al., 2001).

Entre las misiones que utilizan la banda L en el rango de las microondas, se encuentra la misión Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS), lanzada en noviembre de 2009. El funcionamiento de SMOS consiste en un radiómetro interfereométrico en banda L, que permite obtener, mediante un algoritmo iterativo, la temperatura de brillo (TB) y el espesor óptico de la vegetación (τ), utilizando observaciones multiangulares (0-65°) y bipolarizadas (horizontal y vertical) de la radiación emitida por la Tierra (Kerr et al., 2001; Kerr et al., 2010). El núcleo del algoritmo es el modelo L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB; Wigneron et al., 2007), el que está fundamentado en el modelo tau-omega (τ - ω) propuesto por Ulaby et al. (1986). Una aproximación al modelo tau-omega sobre suelos desnudos o cobertura sin vegetación, fue presentada por Wigneron et al. (2004) utilizando datos in situ. Sin embargo, recientes estudios han logrado generar estimaciones en base al modelo tau-omega a partir de un parámetro de vegetación que relaciona el espesor óptico de la vegetación y los patrones propios de esta, como el vigor y la estructura foliar (Mattar et al., 2012; Parrens et al., 2012; Lawrence et al., 2014; Miernecki et al., 2014). Estos datos de vegetación provienen de sensores ópticos,

que han presentado una operacionalidad y sinergia con las microondas pasivas (Jones et al., 2011).

Entre los productos de sensores ópticos comúnmente utilizados, están el Leaf Area Index (LAI) y el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). El primero se define como el área proyectada de hojas por unidad de área del suelo, y su estimación se basa en el análisis multiespectral y multidireccional de las firmas de reflectancia de la vegetación fotosintética. De esta forma, los algoritmos para su estimación varían para cada fuente de donde provengan los datos (Wang et al., 2005; Garrigues et al., 2008). El índice NDVI, por su lado, es una transformación espectral entre las bandas de infrarrojo cercano y del rojo, y se basa en las diferencias que las hojas generan en la reflectancia que llega al sensor debido a la absorción por pigmentos en la banda del rojo y la dispersión por la estructura de las hojas en la banda del infrarrojo cercano. Este índice está diseñado para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación y permite generar comparaciones intertemporales y espaciales de la actividad fotosintética y las variaciones estructurales del dosel (Tucker, 1979; Huete et al., 2002). A diferencia del LAI, su algoritmo es similar entre distintas fuentes de donde provengan los datos. Por lo tanto, se observa que las medidas espectrales como el NDVI están fuertemente relacionadas al LAI (Tucker, 1979), lo que se ha demostrado de forma teórica (Myneni et al., 1995) y de forma empírica sobre distintos tipos de cobertura, (Cohen et al., 2003; Friedl et al., 1994; Law y Waring, 1994; Chen y Cihlar, 1996; Cohen et al., 2003; Fassnacht et al., 1997), concluyendo que los índices espectrales como el NDVI presentan sensibilidades considerables al LAI. Esto resulta más notorio en valores relativamente bajos de este índice, debido a que con grandes valores de LAI, el NDVI tiende a saturarse (Birky, 2001). Es en este contexto, donde los métodos ópticos microondas pasivos (OPM) se caracterizan por utilizar datos tanto de la banda L en las microondas, como de sensores ópticos tales como el LAI o NDVI, con el fin de mejorar la estimación de la humedad de la superficie.

Los métodos semiempíricos OPM han sido demostrados a nivel in situ, utilizando el NDVI (Mattar et al., 2012), a nivel de píxel con el uso del LAI (Miernecki et al., 2014) y a escala regional con el uso del LAI (Parrens et al., 2012). En Chile, destaca el estudio de Santamaría-Artigas et al. (2016), en donde se realizó una calibración del OPM entre los años 2010 y 2012, bajo la clasificación temática de cobertura de suelos de la base de datos de ECOCLIMAP y utilizando el índice NDVI como indicador de vegetación. Un estudio similar fue realizado en Mattar et al. (2016a), utilizando una nueva versión de los datos de SMOS y agregando el índice LAI como indicador de vegetación. De esta forma, se describieron los distintos ajustes de la regresión del método semiempírico, bajo dos índices de vegetación de uso común. Sin embargo, en ambos estudios no se desarrolló un robusto análisis estadístico sobre el impacto de la vegetación en el OPM, o el tipo de cartografía utilizada y sensibilidad del método OPM a distintos índices de vegetación. Respecto a las coberturas de vegetación, en el estudio de Santamaría-Artigas et al. (2016) se observó que ciertas discrepancias pueden ocurrir en Chile entre las coberturas de suelo actuales y las presentes en ECOCLIMAP por lo que se hace importante generar un análisis más detallado de la homogenización de estas clasificaciones de cobertura a una escala especifica, considerando otras cartografías más actualizadas como ESA-CCI o locales como CONAF. En este contexto, el objetivo de este capítulo es analizar el impacto de la vegetación sobre el cálculo de la humedad del suelo a través de diferentes indicadores de vegetación, utilizando el algoritmo OPM y diferentes cartografías temáticas de cobertura del suelo en Chile, entre la región de Coquimbo y la región de Los Lagos.

4.1.2. Caso estudio de Chile

4.1.2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a Chile entre la región de Coquimbo y la región de Los Lagos, lo que se extiende desde los 29° a 43° de latitud sur, respectivamente (figura 66). Según di Castri y Hajek (1976), en esta extensión estaría presente una zona de tendencia mediterránea con precipitaciones concentradas en inviernos fríos y un período seco estival. En el sector sur, estaría presente una zona de tendencia oceánica, específicamente una región húmeda similar al tipo mediterráneo con máximo de lluvias en invierno, pero con ausencias el período seco estival. El área de estudio fue separada en tres zonas, estas son: zona norte entre los 29° y 32° de latitud sur, zona central entre los 32° y 38° de latitud sur, y zona sur entre los 38° y 43° de latitud sur.

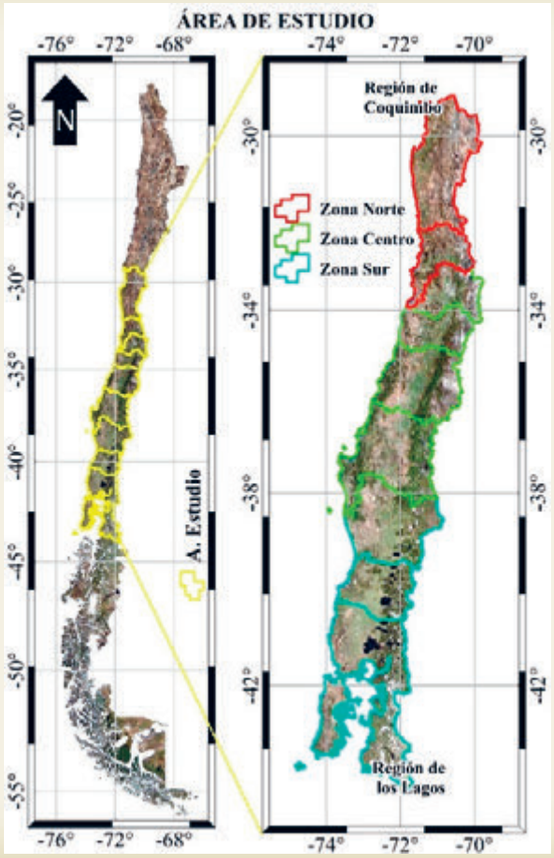


Figura 66: Área de estudio. *Fuente: Elaboración propia.*

4.1.2.2. Datos

Para la calibración y validación del método OPM se utilizaron: datos de temperatura de brillo (TB) y humedad del suelo de microondas en banda L; datos de humedad y temperatura del suelo entre 0-7 cm; el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de área foliar (LAI); datos de cobertura de superficie y datos in situ de precipitación y humedad del suelo. Todos los datos fueron obtenidos para el período comprendido entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2015, y se detallan a continuación.

a. SMOS: se utilizó el producto de temperatura de brillo bipolarizada de nivel 3 (L3TB), el que es un producto diario de temperatura de brillo con ángulos de incidencia ajustados entre 2,5° a 62,5° en intervalos de 5°, y está presentado en formato Equal-Area Scalable Earth Grid versión 2 (EASE-Grid V2) con una proyección cilíndrica de 25 km^2 (Kerr et al., 2012; Kerr et al., 2016). En este trabajo se ocupó información de TB a 42,5°, y en polarización vertical (TBh) y horizontal (TBv).

b. MODIS: se utilizó información de dos productos proveniente del sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo de la plataforma TERRA. Estos son:

- MOD13Q1 V5 Vegetation Index Product, que corresponde al Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Este producto consiste en una composición de imágenes, cada 16 días, con una resolución espacial de 250 m y con una proyección sinusoidal (Huete et al., 2002).

- MOD15A2 Leaf Area Index (LAI) y Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR), compuesto cada ocho días, de 1 km de resolución, con una proyección sinusoidal (Myneni et al., 2002).

c. **ERA-INTERIM:** creado por el European Centre for Medium-Range Weather Forescast (ECMWF), ERA-INTERIM es una base de datos global de la cobertura de la Tierra, que cubre el período de 1979-2010. Entre sus datos se utilizó:

- El producto STL1 de temperatura de suelo en la primera capa de profundidad (0 - 7 cm).
- El producto SWVL1 de la capa volumétrica de agua en el suelo (0 - 7 cm).

Ambos productos tienen una resolución espacial de 0,125 x 0,125 grados y una resolución temporal de tres horas (Bálsamo et al., 2015).

d. **Cartografías temáticas:** Donde se incluye:

- **ECOCLIMAP:** consiste en una clasificación de 215 ecosistemas a nivel global, a una resolución de 1 km. Estos ecosistemas fueron clasificados utilizando diversas cartografías de cobertura terrestre, mapas climáticos, base de datos de textura del suelo (FAO) y series temporales de NDVI producto del Radiómetro AVHRR (Masson et al., 2003).
- **CONAF:** la Corporación Nacional Forestal cuenta con un catastro de recursos vegetaciones dentro de su Sistema de Información Territorial (SIT-CONAF) que se actualiza periódicamente y que presenta nueve categorías de uso de suelo: "urbana e industrial, terreno agrícola, pradera, matorral, bosque, humedal, áreas sin vegetación, nieves y glaciares y cuerpos de agua".
- **ESA CCI-LC:** se utilizó el producto Land Cover (LC) de la Climate Change Initiative (CCI) dependiente de la European Space Agency (ESA) para el período 2010. Este producto consiste en mapas globales con 300 m de resolución espacial de 37 categorías de uso de suelo (Defourny et al., 2014).

e. **Datos in situ:** fueron utilizados datos de humedad del suelo y precipitación, para el período entre el 1 de enero al 31 de diciembre del año 2015, provenientes de la red de estaciones del Laboratorio para el Análisis de la Biosfera (LAB). Esta red de estaciones (LAB-net) cuenta con instrumentación meteorológica y de flujo radiativo que miden variables como humedad y temperatura del suelo, temperatura del aire y humedad relativa, radiación neta, radiación global, temperatura radiométrica, precipitación y flujo de calor del suelo (Mattar et al., 2016b). Para este trabajo fue utilizada la estación de Chimbarongo, localizada en 34°43'39,67"S 70°58'46,16"O, y la estación de Oromo, localizada en 40°52'23,160"S 73°0'41,400"O.

4.1.3. Método

4.1.3.1. Procesamiento espacial de datos

Para procesar los datos fue necesario realizar un filtro de moda a los productos STL1, SWVL1, NDVI, LAI y a las cartografías climáticas, con el fin de ajustar su resolución hacia la resolución espacial del producto SMOS L3TB (25 x 25 km). Además, previo a realizar una calibración, fue necesario filtrar datos anómalos que el producto SMOS L3TB puede poseer debido a suelos congelados, agua interceptada en la vegetación y valores de temperatura de brillo horizontal mayores que de temperatura de brillo vertical (Santamaría-Artigas et al., 2016). Esto se realizó a través del índice de polarización detallado en la fórmula 25 (Mattar et al., 2012).

$$PR = \frac{TB_V - TB_H}{TB_V + TB_H} \quad (25)$$

donde, TBV = temperatura de brillo vertical; TBH = temperatura de brillo horizontal.

Conjuntamente se realizó un filtro a los valores de NDVI y LAI de MODIS, a través del conjunto de datos pixel reliability, que establece cinco clases de confianza de la calidad de los píxeles: fill/no data", good data (única categoría a utilizar), maginal data, snow/ice y cloudy.

4.1.3.2. Calibración

Para estimar la humedad del suelo incluyendo los indicadores NDVI y LAI, se utilizó el método microondas pasivo de Santamaría-Artigas et al. (2016), según la fórmula 26. Este modelo es derivado de Ulaby et al. (1986).

$$\log(w_s) = a + b\left(\log\left(1 - \frac{TB(\theta,H)}{T_c}\right)\right) + c\left(\log\left(1 - \frac{TB(\theta,V)}{T_c}\right)\right) + d * VEG \quad (26)$$

donde, ws = humedad del suelo estimada [$m^3\ m^{-3}$]; a, b, c y d = coeficientes de regresión; TB (θ, V) y TB (θ, H) = temperatura de brillo vertical y horizontal a 42,5° [K]; Tc = temperatura efectiva del suelo [K]; VEG = indicador de vegetación.

Para calibrar los coeficientes de regresión utilizados en la fórmula 26 y establecer la mejor correlación entre las variables SM, TB, Tc y Veg, se utilizó el método de regresión lineal de mínimos cuadrados, generando además tres modelos en los cuales, como indicador de vegetación, se utilizó:

- NDVI (VEG = MOD13Q1);
- LAI (VEG = MOD15A2);
- Sin indicador de vegetación (VEG = 0).

Los modelos con NDVI y con LAI fueron comparados a través del coeficiente de determinación (R^2) y los coeficientes de regresión. El análisis se realizó año por año, desde el 2010 hasta el 2014, para todo el período y para cada clasificación dentro de las cartografías temáticas, con el fin de estimar el impacto de las cartografías en la estimación de la humedad del suelo.

4.1.3.3. Validación

La validación se realizó año a año para cada modelo (NDVI, LAI, VEG = 0). Los valores del producto SWVL1 fueron tomados como la variable observada de cada estimación de los modelos en el cálculo del Root Mean Squared Error (RMSE, fórmula 27). Este que considera el sesgo de la humedad del suelo y la desviación estándar de los residuos generados entre las estimaciones y los valores observados (Entekhabi et al., 2010)

$$RMSE = \sqrt{bias^2 + \sigma^2} \quad (27)$$

donde, bias = sesgo estadístico; σ = desviación estándar de los residuos.

4.1.4. Resultados

La figura 67 muestra el resultado del uso del filtro de moda sobre las cartografías de CONAF, ESA-CCI y ECOCLIMAP, en la zona de estudio, al generar una resolución de 25 x 25 km equivalente a la grilla espacial de SMOS (EASE V2). A partir de estos resultados se observa que, respectivamente, para cada cartografía utilizada se mantienen las superficies con mayor proporción de cobertura, tales como matorral en la zona norte, bosque y agrícola en la zona central, y bosque ubicados en la zona sur. Sin embargo, se aprecian ciertas diferencias entre las coberturas agrícola y pradera que existen en la zona central y en la zona sur entre los 32° y 42° de latitud sur, que cambian su proporción espacial al aplicar un filtro de moda, principalmente en la cartografía de ECOCLIMAP. Además, entre la zona norte y la zona centro, la cobertura de áreas sin vegetación disminuye en su proporción, asimilándose como cobertura matorral, lo que podría relacionarse con una acentuada fenología debido a la pluviometría del área de estudio. Similares resultados en términos de la variación espacial del tipo de cobertura, han sido evidenciados a escala global por Leroux et al. (2013), y para el área de estudio por Santamaría-Artigas et al. (2016) y Mattar et al. (2016a). El tipo de leyenda utilizada en este trabajo corresponde a una reclasificación aplicada a las tres cartografías, con el fin de visualizar el efecto de la distribución espacial de una cobertura en particular y su distribución espacial sobre el área de estudio. Es importante destacar que esta leyenda no implica una homologación o asimilación de las coberturas correspondientes a las tres cartografías utilizadas en este trabajo. De hecho, esto implicaría el desarrollo de una nueva metodología, tal como la descrita en Pérez-Hoyos et al. (2012), dedicada exclusivamente a un análisis de la equivalencia de los tipos de coberturas y no a la propia relación con la humedad del suelo, estimada mediante algoritmos ópticos de microondas pasivos o derivados de modelos e información satelital.

4.1.4.1. Coeficiente de determinación

La distribución espacial de los coeficentes de determinación generados a partir de la calibración del método OPM utilizando NDVI, LAI o VEG = 0, se presentan en la figura 68. En la figura 69, se presentan los incrementos generados al utilizar NDVI y LAI. Los resultados muestran

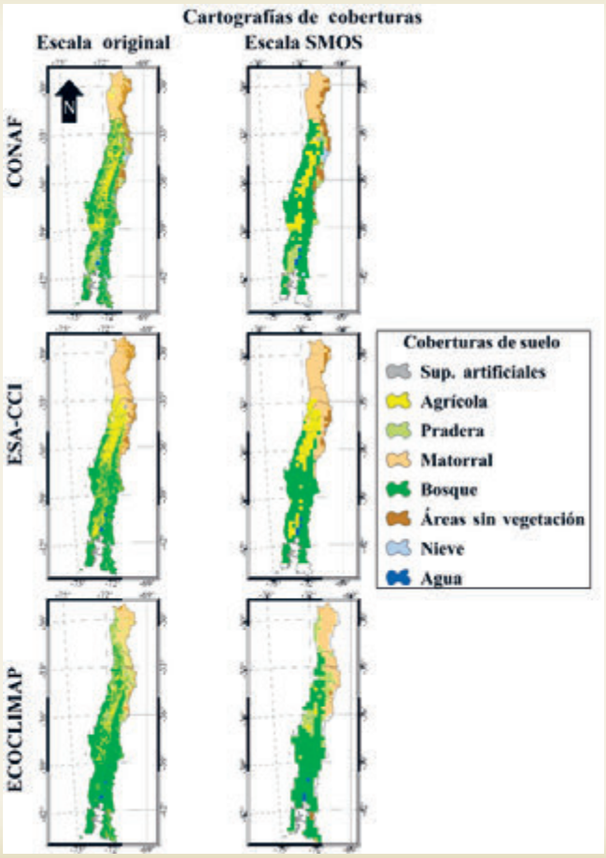


Figura 67: Clases de coberturas originales y procesadas extraídas de las bases de datos de CONAF (superior), ESA-CCI (medio) y ECOCLIMAP (inferior). *Fuente: Elaboración propia.*

que para todos los períodos de calibración, al utilizar un índice de vegetación se generan aumentos en el R^2. Estos aumentos se observan en toda el área de estudio en coberturas como matorral y áreas sin vegetación de la zona norte, y en bosque en la zona sur, generando incrementos entre 30% a 80%, los cuales elevan el R^2 a más de 0,8. Esto se explicaría debido a que cuando no se utiliza un indicador de vegetación en el modelo OPM, la zona central presenta valores de R^2 con un ajuste superior a un 0,8 similar a los valores estimados al utilizar un indicador de vegetación, mientras que en el resto del área de estudio existen valores inferiores a 0,5. Respecto al uso de vegetación en el método OPM, en toda el área de estudio se observa mejores ajustes en la regresión con el uso de NDVI en la cobertura agrícola, bosque y pradera, en comparación al uso del LAI, a excepción de ciertos píxeles de bosque en la zona sur en donde el LAI presenta R^2 superiores. Por otro lado, el impacto del período de calibración se hace notorio en la zona norte los años 2010 y 2011, y en la zona sur el año 2014, con el uso de LAI, NDVI y de VEG = 0. Esto se debe a la existencia de píxeles con valores superiores respecto al resto de los períodos, y de R^2 mayores a 0,8. Con VEG = 0 en la zona norte para el año 2012 existen píxeles con valores inferiores a 0,2 para R^2, lo que puede observarse en los incrementos del año 2012 con el uso del LAI, presentando mejoras superiores a 30%. Estudios similares han demostrado mejoras similares al utilizar indicadores de vegetación mediante un método OPM, como en la investigación de Parrens et al. (2012) sobre Francia. A nivel in situ, en el estudio de Mattar et al. (2012) fue demostrado el impacto de la vegetación sobre el sitio de estudio SMOSREX (Surface Monitoring of Soul Reservour Experiment), donde el uso del NDVI generaba aumentos de R^2 respecto a no considerar un indicador de vegetacion dentro del método OPM. A su vez, Miernieki et al. (2014) compararon el desempeño de distintos métodos para estimar la humedad del suelo, entre ellos, el método OPM sobre viñas en una zona mediterranea de España, resultando el uso del NDVI en una significativa mejora de las estimaciones de humedad. No

obstante, sobre la misma área de este trabajo, los resultados del estudio de Santamaría-Artigas et al. (2016) muestran que con el uso del NDVI y otra versión de SMOS, se genera aumentos en el ajuste lineal de la calibración del OPM sobre coberturas como matorral, bosque y áreas sin vegetación. Además, los resultados de este trabajo también son complementarios con los de Mattar et al. (2016a), donde se compara el uso de NDVI y LAI como indicador de espesor óptico en el método OPM, dando como resultado coeficientes de determinación similares al de este estudio, pero en un período de calibracion menor (2010-2012).

4.1.4.2. Variabilidad temporal de los coeficientes

La figura 70 muestra la dispersión de los valores de humedad de superficie estimados por el OPM en distintos períodos de calibración sobre distintas coberturas de suelo. Los diagramas de caja de la estimación de humedad del suelo utilizando la cartografía de CONAF, muestran que las coberturas de suelo tienen en promedio una estimación superior a 0,2 m^3 m^{-3}, con excepción de matorral con una media inferior a 0,2 m^3 m^{-3} para todos sus períodos. El uso de distintos índices de vegetación muestra estimaciones de humedad similares en la cobertura agrícola, a diferencia del resto de las coberturas donde el NDVI, en la mayoría de los períodos, tiende a estimar valores más bajos respecto al uso de LAI y VEG = 0, mientras que el uso del LAI tiende a estimar valores mayores que VEG = 0. Respecto a los períodos de calibración, se observan estimaciones de humedad del suelo similares, a excepción de la calibración del año 2012 y para algunas coberturas de suelo, como es el caso de la variabilidad en la humedad del suelo en bosque con el uso del NDVI y las bajas estimaciones de humedad que se observan para matorral y áreas sin vegetación. Destaca también la gran cantidad de outliers en las coberturas pradera, matorral, áreas sin vegetación y en menor medida en bosque.

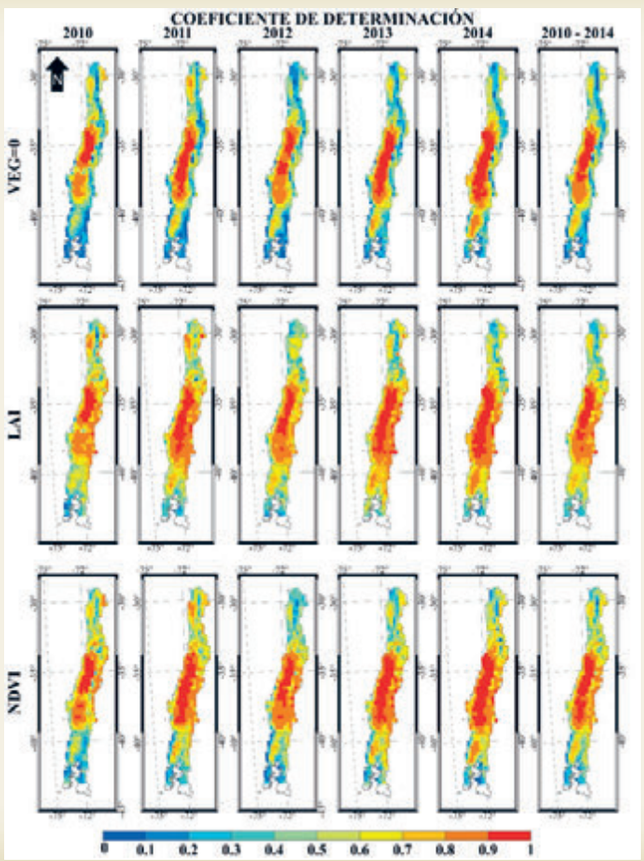


Figura 68: Mapas de coeficientes de determinación de las regresiones realizadas con VEG = 0 (superior), VEG = LAI (medio) y VEG = NDVI (inferior), para cada año y para un período general incluyendo todos los años. *Fuente: Elaboración propia.*

Las coberturas de la cartografía de ESA-CCI muestran gran similitud a la de CONAF en todas las estimaciones de humedad del suelo por período y por índice de vegetación. Solo se observan diferencias en la cobertura de pradera, ya que esta es la cobertura que presenta mayor discrepancia espacial en sus cartografías y que se hizo notoria al momento de utilizar el filtro de moda. Debido a la baja dispersión entre sus píxeles, presenta estimaciones de humedad sin outliers pero con mayor variabilidad que en CONAF. También, se repiten las diferencias entre las calibraciones del 2012 y el resto de los períodos, con estimaciones de humedad del suelo inferiores en las coberturas de bosque, matorral y áreas sin vegetación.

La cartografía de ECOCLIMAP tiende a ser más alejada a las estimaciones observadas en CONAF y ESA-CCI, pero manteniendo semejanzas en la cobertura agrícola, bosque y matorral. La cobertura de pradera presenta estimaciones de humedad del suelo similares entre cada período y respecto al uso de índices de vegetación, con valores medios entre 0,2 y 0,25 $m^3\ m^{-3}$. Por el contrario, en áreas sin vegetación existen diferencias entre períodos de calibración y el uso de índices de vegetación, ya que mientras en el año 2010 y 2012 presenta estimaciones medias superiores a 0,2 $m^3\ m^{-3}$ con el uso de LAI y VEG = 0, con el uso del NDVI las estimaciones son menores a 0,2 $m^3\ m^{-3}$. Asimismo, en esta cobertura, la calibración del período 2010-2014 presenta las estimaciones medias de humedad del suelo más altas, superiores a 0,3 $m^3\ m^{-3}$, tanto para el uso del LAI, NDVI y VEG = 0.

La baja variabilidad en la estimación de la humedad del suelo de cada período de calibración respecto al período que utilizó datos desde el 2010 al 2014, muestra que es posible consolidar una calibración del método OPM, incluyendo la influencia de factores temporales sobre la estimación de humedad, en la mayoría de coberturas de suelo. Esta calibración general permitiría su uso futuro en Chile, sin la necesidad de volver a recalibrar los coeficientes.

4.1.4.3. Validación del método óptico microondas pasivo de Mattar et al. (2012)

El RMSE obtenido entre la humedad de la superficie de referencia (ERA-INTERIM) y las tres estimaciones generadas por el OPM (VEG = LAI, VEG = NDVI, VEG = 0) utilizando

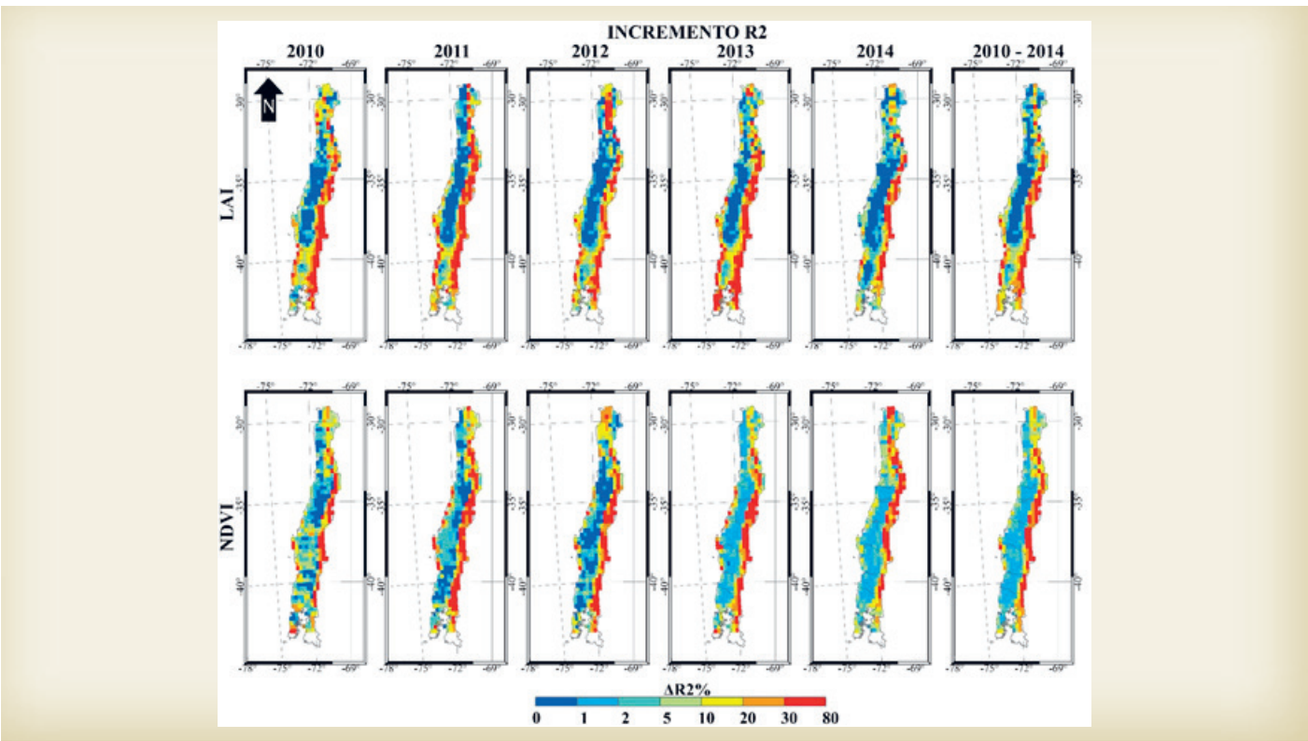


Figura 69: Mapas del incremento del coeficiente de determinación de las regresiones realizadas con VEG = LAI (superior) y VEG = NDVI (inferior), para cada año y para un período general incluyendo todos los años. *Fuente: Elaboración propia.*

la calibración del período del 2010-2014, se muestran en la figura 71. Los valores de RMSE fueron agrupados por clases de cobertura para las tres cartografías utilizadas. En todas las cartografías los resultados obtenidos muestran que el uso de vegetación en el modelo OPM genera disminuciones de RMSE respecto a VEG = 0, en la mayoría de coberturas de uso de suelo. En general, tanto con el uso de índices de vegetación como sin su uso, las categorías de matorral y áreas sin vegetación presentan los valores de RMSE más altos, con valores absolutos superiores a 0,052 m^3 m^{-3}; mientras que los valores más bajos se observan en la cobertura agrícola, con un RMSE absoluto inferior a 0,035 m^3 m^{-3}.

Para la cartografía de CONAF, los resultados muestran que al incorporar el NDVI o el LAI en el OPM, se generan disminuciones en la magnitud del RMSE, en promedio superiores a 9% de m^3 m^{-3}, para las coberturas de bosque, pradera y áreas sin vegetación, en comparación a los RMSE con VEG = 0. Por el contrario, matorral y agrícola presentan disminuciones en promedio de RMSE, inferiores a 3% de m^3 m^{-3} con el uso de estos índices. Para esta

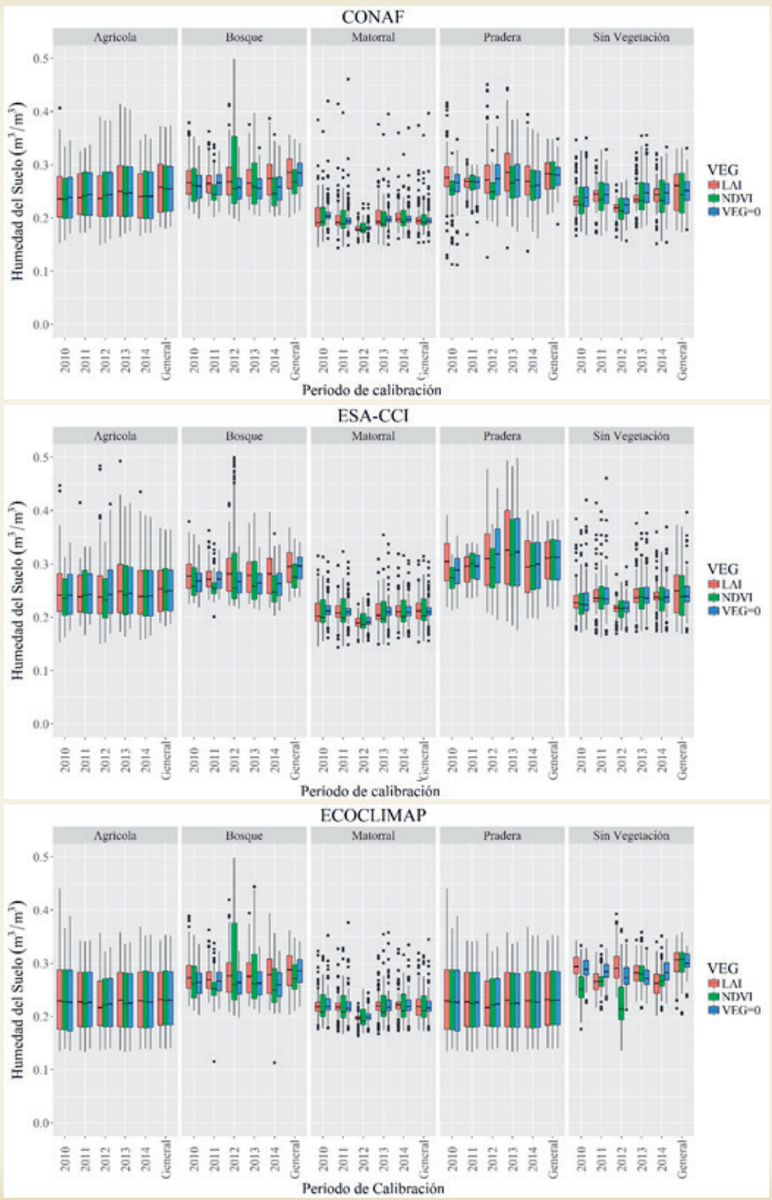


Figura 70: Diagrama de cajas de humedad del suelo estimada para el año 2015 para cada período de calibración agrupados en clases de cobertura de superficie y para cada cartografía. *Los outliers son representados como círculos. Fuente: Elaboración propia.*

cartografía se puede ver que las disminuciones de RMSE al utilizar el LAI respecto al uso de NDVI en el OPM, son mayores, pero con diferencias que van entre 5% de m^3 m^{-3} para bosque y menores a 1,5% de m^3 m^{-3} en pradera y áreas sin vegetación.

En la cartografía de ESA-CCI se observa que los valores de RMSE muestran similitudes con la mayoría de las coberturas de la cartografía de CONAF, excepto en la cobertura de matorral, donde las magnitudes de RMSE generados al incluir un indicador de vegetación son mayores a las vistas en la cartografía de CONAF, con disminuciones en promedio de 16,2% de m^3 m^{-3} y 10% de m^3 m^{-3} para el LAI y NDVI, respectivamente. Asimismo, en pradera se ve una disminución de las magnitudes de RMSE inferior a 1% de m^3 m^{-3} con el uso del NDVI, mientras que con el uso del LAI se generan aumentos de RMSE de 2,5% de m^3 m^{-3}. En esta cartografía se observa que el uso de un indicador de vegetación genera en promedio valores de RMSE más bajos en las coberturas agrícola, matorral y

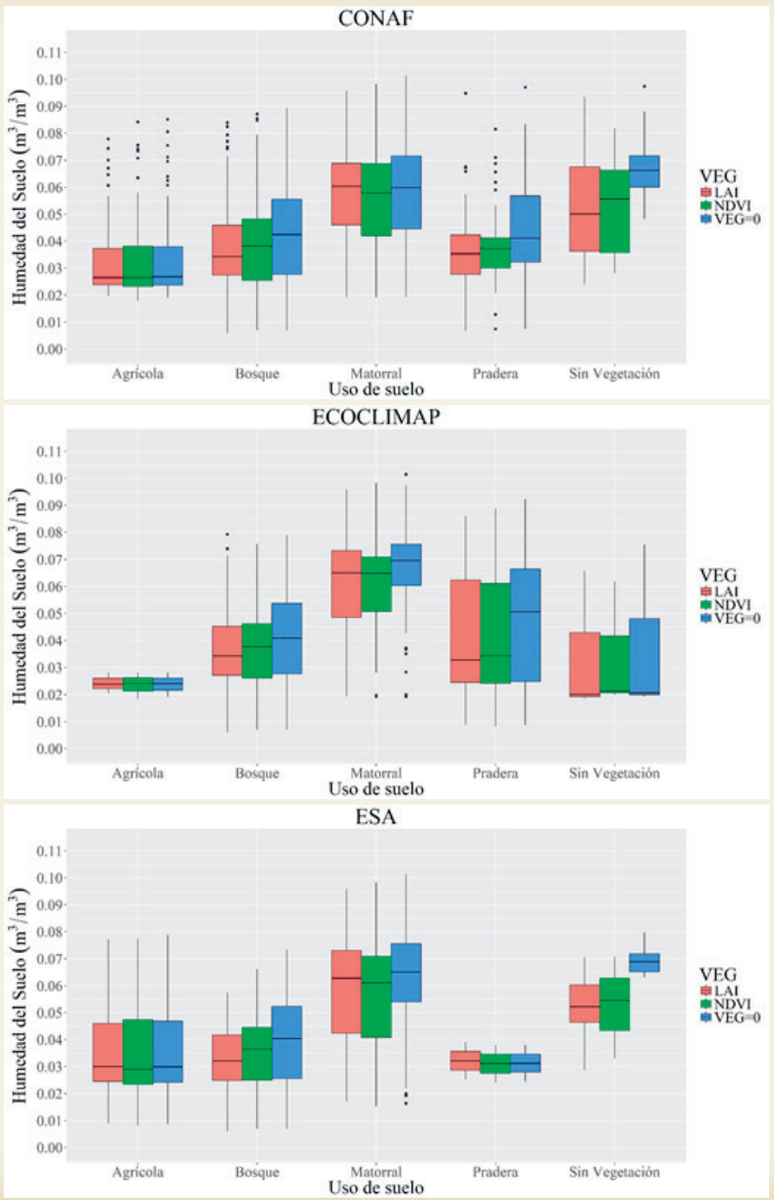


Figura 71: Diagramas de caja de RMSE según CONAF (arriba), ECOCLIMAP (medio) y ESA-CCI (abajo) para el año de validación agrupado en clases de cobertura de superficie. *Los outliers son representados como círculos. Fuente: Elaboración propia.*

pradera con el uso de NDVI, mientras que con el uso del LAI esto ocurren en bosque y áreas sin vegetación.

En el caso de la cartografía de ECOCLIMAP solo las coberturas de bosque y matorral, presentan similitudes con las cartografías de CONAF y ESA-CCI, respecto a los valores de RMSE. En la cobertura agrícola se generan incrementos en promedio de las magnitudes de RMSE de 1,5% de m^3 m^{-3} con el uso del LAI, mientras que la cobertura de áreas sin vegetación, matorral y pradera, presentan disminuciones en promedio de 10% de m^3 m^{-3} de RMSE, tanto con el uso del NDVI como el LAI.

Respecto al uso de un indicador de vegetación dentro de la calibración del método OPM, el uso del NDVI y LAI mejoran los resultados significativamente en gran parte de las coberturas analizadas, con disminuciones de RMSE para todas las coberturas en comparación a VEG = 0, a excepción de la cobertura agrícola donde se observa un menor impacto en las disminuciones de RMSE. Esto se explicaría debido a que en el caso de VEG = 0, la calibración del método OPM sobre la zona centro donde se ubica gran parte de la cobertura agrícola, muestra valores de R^2 muy similares a los vistos con el uso de NDVI y LAI. Estos resultados están de acuerdo a los obtenidos por Santamaría-Artigas et al. (2016) con el uso del indicador NDVI y por Mattar et al. (2016a), tanto con NDVI como con LAI, ya que esta cobertura también fue la que presentó menores aumentos de R^2 y menores disminuciones de RMSE utilizado el NDVI o LAI.

Respecto a las cartografías, si bien los resultados de R^2 y RMSE varían según el origen, existe una gran similitud en estos valores entre las cartografías de CONAF y ESA-CCI, difiriendo marcadamente en ciertas coberturas con la cartografía de ECOCLIMAP. Al igual que en el estudio de Santamaría-Artigas et al. (2016), ECOCLIMAP genera discrepancias originadas por la diferencia entre la cobertura de suelo actual y las que existen en su base de datos. Por lo tanto, se recalca la importancia de utilizar distintas fuentes de coberturas para analizar las estimaciones de humedad del suelo.

4.1.4.4. Series de tiempo

Con el fin de validar las estimaciones de humedad a partir del método OPM, las figuras 72a y 72b muestran una comparación con datos de humedad del suelo, derivados de estaciones in situ, SMOS y ERA-INTERIM. Esta comparación se realizó para el año 2015 con la estimación de la humedad de superficie generada con el método OPM, utilizando los coeficientes derivados del período de calibración 2010-2014 y utilizando los píxeles donde están localizadas las estaciones LAB-net de Chimbarongo y Oromo (Mattar et al., 2016b).

En la figura 72a, se observan los valores asociados al píxel en el cual se localiza la estación LAB-net de Chimbarongo. Se aprecia la influencia de la estacionalidad en la estimación de humedad del suelo del método OPM y de ERA-INTERIM, mostrando valores alrededor de 0,19 m^3 m^{-3} para el OPM y ERA-INTERIM desde enero hasta mayo, aumentos hasta más de 0,35 m^3 m^{-3} en el mes de agosto y disminuciones en el mes de octubre a valores alrededor de 0,19 m^3 m^{-3}. También, se observa que entre noviembre y abril las estimaciones de humedad del OPM tienden a sobreestimar los valores de ERA-INTERIM, mientras que entre abril y noviembre son subestimadas. Respecto de las mediciones in situ de humedad del suelo, se puede evidenciar la influencia tanto de los eventos pluviométricos en la zona, estimando valores de humedad que varían entre 0,25 y 0,35 m^3 m^{-3}, como del período de riego entre los meses de diciembre hasta abril con valores de humedad entre 0,25 y 0,3 m^3 m^{-3}.

En la figura 72b, se observan los valores asociados al píxel donde se localiza la estación LAB-net de Oromo. En este píxel las estimaciones de humedad del suelo del OPM muestran similitudes con las estimaciones de ERA-INTERIM, con valores que rodean los 0,32 m^3 m^{-3} entre abril y diciembre. En cambio, entre el período de enero a marzo, el OPM sobreestima los valores de humedad de ERA-INTERIM. Por su parte, entre abril y octubre las estimaciones in situ de humedad del suelo presentan valores superiores al OPM y ERA-INTERIM, que sobrepasan los 0,4 m^3 m^{-3} y que luego disminuyen bajo los 0,18 m^3 m^{-3} entre los meses de enero y abril. Sin embargo, se observa que las estimaciones de humedad de estas tres fuentes siguen un mismo patrón relacionado a máximos y a mínimos a lo largo del año, lo cual se relaciona con la presencia de eventos pluviométricos. Respecto a SMOS, la influencia de los eventos pluviométricos produce que las estimaciones de humedad del suelo varíen entre 0,3 a 1 m^3 m^{-3} entre los meses de

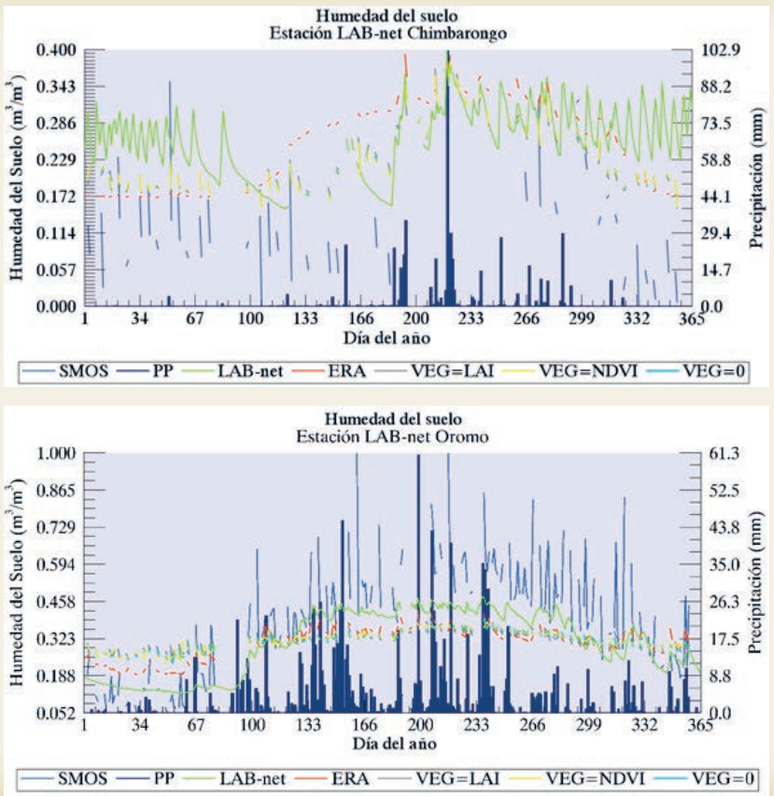


Figura 72: Humedad del suelo y precipitación (in situ) para el año 2015 en la estación LAB-net presente en la localidad de Chimbarongo (arriba) y Oromo (abajo), localizadas en 34°43'39,67"S 70°58'46,16"O y 40°52'23,160"S 73°0'41,400"O, respectivamente. *Fuente: Elaboración propia.*

abril y octubre, en donde existe mayor precipitación, pero disminuyan una vez alcanzado el mes de noviembre.

Si bien la diferencia entre utilizar o no utilizar un indicador de vegetación no es significativa para los dos píxeles seleccionados en la validación, si lo es la diferencia existente entre las estimaciones de humedad del suelo de OPM y la humedad del suelo estimada por SMOS. Por otra parte, las mediciones de humedad del suelo a nivel in situ y las estimaciones de humedad del OPM, están sujetas a diferencias propias de cada píxel, debido a que las estaciones LAB-net miden humedad del suelo a distintas profundidades. En el caso de Chimbarongo, la humedad es medida en los primeros 5 cm de suelo, mientras que en la estación de Oromo, se mide la humedad de los primeros 7 cm de suelo.

4.1.5. Discusión y conclusiones

En relación a los índices de vegetación utilizados en las estimaciones de humedad del suelo en el OPM, es necesario contrastar los métodos de estimación entre el LAI y el NDVI. El NDVI calcula la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano y rojo, en el cálculo de LAI de MODIS se utiliza un algoritmo que compara la reflectancia observada con una modelada en una variedad de estructuras de dosel y patrones del suelo (Garrigues et al., 2008; Zhen y Moskal, 2009). Si bien, el uso de LAI en el OPM genera RMSE más bajos respecto al uso del NDVI para la mayoría de coberturas, hay que considerar que el método OPM presenta una alta sensibilidad a las variaciones correspondientes a los valores de LAI, generando grandes impactos en las estimaciones de humedad del suelo. Esto implicaría que el potencial uso de LAI en las estimaciones de humedad del suelo, podría presentar ciertos sesgos al método de cálculo del indicador de vegetación y su uso en un método semiempírico. De hecho, algunos estudios han mostrado buenos resultados en la estimación de humedad utilizando métodos semiempíricos sin incluir un indicador de vegetación, como en el caso del estudio de Al-Yaari et al. (2016) a escala global y regional, utilizando el sensor AMRSE-E, y también en el

estudio de Albergel et al. (2011) sobre Francia, utilizando datos de SMOS. A pesar de que en estos estudios no fue considerado Chile, el uso de métodos que no utilizan un indicador de vegetación podría ser considerado sobre coberturas donde no hay un impacto significativo de estos indicadores. Tal es el caso de la cobertura agrícola, no obstante, en la mayoría de las cartografías tanto el NDVI como el LAI, generan mejoras en la estimación de humedad.

La sinergia presentada en este trabajo entre las microondas pasivas y los datos ópticos, también puede ser complementada con datos derivados de las bandas del infrarrojo térmico (TIR), como son la emisividad de la superficie (LSE) y la temperatura de la superficie (LST) (Mattar et al., 2016a). Hasta la fecha varios estudios han demostrado de forma parcial la relación que existe entre la humedad del suelo, el LST y el LSE. Por ejemplo, la existencia de una relación entre el LST con la estimación de la temperatura efectiva de la superficie (Wigneron et al., 2008 y Hasan et al., 2014). Por otra parte, existen estudios que demuestran la relación entre el LSE y las propiedades del suelo, mostrando su superioridad respecto al NDVI como un indicador de cambio en la cobertura del suelo (French et al., 2008; French y Inamdar, 2010; Sobrino et al., 2012). Actualmente, debido a los estudios que se han realizado para estimar LSE a partir de metodologías que utilizan sensores como ASTER, MODIS y SEVIRI (Gilliespie et al., 1998; Hulley y Hook, 2011; Jiménez-Muñoz et al., 2014), y también estudios comparativos entre estas metodologías (Sobrino et al., 2008), es posible generar estimaciones de LSE, permitiendo explorar la relación entre la humedad del suelo y el TIR. Por lo tanto, se abren nuevas posibilidades para generar enfoques que produzcan estimaciones de humedad del suelo más precisas del OPM, incluyendo una nueva sinergia con el TIR. Sin embargo, aún es necesario más análisis para comprender mejor la relación entre la humedad del suelo y el TIR.

El año 2015 fue lanzada la misión Soil Moisture Active-Passive (SMAP), una segunda misión para el monitoreo de la humedad del suelo que está utilizando la banda L con un sistema activo (radar) y pasivo (radiómetro) (Entekhabi et al., 2010). Sin embargo, hoy en día las estimaciones de humedad del suelo son generadas únicamente de forma pasiva por el radiómetro, debido a una anomalía en el sistema de amplificación de alta potencia del radar (Chan et al., 2016). Actualmente, en el estudio de Al-Yaari et al. (2016) se observó similitud entre los productos de temperatura de brillo de SMOS y SMAP, a través de un enfoque de regresión multilinear. Este aporte permitiría integrar la base de datos de SMOS y SMAP, con el fin de construir un registro humedad del suelo a largo plazo y con una frecuencia temporal mayor. No obstante, aún se hace necesario complementar este estudio al incluir otras variables importantes en la calibración de este modelo, como un factor de vegetación que considere su opacidad tal como lo hace el método OPM.

Tanto el uso del NDVI como el LAI mejoran más de 8% de $m^3\ m^{-3}$ el RMSE en las estimaciones de humedad del suelo, en la mayoría de las coberturas a excepción de la cobertura agrícola. Estos resultados están de acuerdo a los obtenidos en la calibración con aumentos significativos de R^2, para todas las coberturas menos la agrícola. Por otro lado, se observa gran sensibilidad del OPM a los errores relacionados al LAI, en comparación a los errores del NDVI.

El método OPM demuestra ser una herramienta útil para la estimación de humedad sobre la cobertura existente en la mayor parte de Chile. Debido a las características en la estimación de NDVI es posible el uso del OPM con datos de este índice provenientes de distintas fuentes, sin la necesidad de tener que recalibrar el modelo. Este método, también puede ser aplicable a otras escalas espaciales, además de ser útil con datos provenientes de otros sensores remotos que utilizan las microondas pasivas. Las mejoras que el OPM presenta sobre el área de estudio podrían ser un importante aporte en áreas de investigación y gestión que utilicen la humedad del suelo, por ejemplo, como base para cálculo de índices de sequía o para el monitoreo de incendios. No obstante, son necesarios estudios previos que relacionen el desempeño de este índice utilizando el método OPM y otros índices de sequías in situ. Respecto al riesgo de incendios, se ha establecido que los incrementos en la intensidad y duración de las sequías, conllevan a un aumento en los episodios de incendios forestales, habiéndose demostrado la aplicabilidad de los datos de humedad proporcionado por SMOS en la península Ibérica, en conjunto con otras variables como la temperatura del suelo y precipitación (Chaparro et al., 2014; Chaparro et al., 2016). De esta forma, la informa-

ción de humedad del suelo proporcionada por SMOS y por los métodos OPM, podrían generar un aporte en la modelación de riesgos de incendio en Chile. El impacto que podría tener el OPM en la estimación de índices de sequía y con el monitoreo de incendios a nivel nacional, estaría ligado a la nueva generación de fuentes de información y monitoreo satelital para enfrentar futuros períodos de escasez hídrica ocasionada por la actual disminución de precipitaciones relacionadas con el calentamiento global y, a su vez, ayudar en la toma de decisiones para la prevención de incendios en el territorio nacional.

4.1.6. Agradecimientos

Agradecimientos al proyecto Fondecyt Iniciación 11130359 Estimating the surface soil moisture at regional scale by using a synergic optical-passive microwave approach and Remote sensing data.

4.2 Uso de herramientas de teledetección para estimar requerimientos hídricos en zonas de secano

Rómulo Santelices Moya,[a] Sergio Espinoza Meza,[a] Antonio Cabrera Ariza[b] y Marcos Carrasco Benavides[b]

[a]Centro del Secano, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Católica del Maule, Chile
[b]Departamento de Ciencias Agrarias, Universidad Católica del Maule, Chile

4.2.1. Introducción

La zona central de Chile se caracteriza por presentar condiciones climáticas semiáridas con estación seca prolongada, donde las máximas temperaturas del año (> 30 °C) se concentran durante el período estival, que comprende los meses de octubre a marzo (primavera-verano en el hemisferio sur). Durante este período las precipitaciones son casi inexistentes, coincidiendo con el lapso donde se realizan gran parte de las actividades agrícolas y donde los cultivos forestales presentan el mayor requerimiento hídrico. De esta forma, la única alternativa para producir cultivos es suministrando agua en forma artificial mediante el riego. Todas las fuentes de agua utilizadas para el riego durante este período son de origen nivo-pluvial, donde el relleno de los principales acuíferos (naturales o artificiales) se realiza durante la estación de otoño-invierno (abril-agosto, en el hemisferio sur), lo que hace a la actividad agrícola altamente dependiente de las reservas de agua acumuladas durante el invierno.

En la actualidad existen estudios que prevén que, producto del cambio climático global, gran parte de las zonas de producción agrícola del mundo sufrirán una importante disminución en la disponibilidad anual de agua (Watson et al., 1997; Klop et al., 2008). Esta situación podría ser más crítica para Chile, porque, además del fenómeno del cambio climático global, se presenta, con cierta periodicidad, la anomalía climática de La Niña (ENSO). Esta anomalía produce la disminución de las precipitaciones en el continente, producto del enfriamiento de corrientes marinas del océano Pacifico-Ecuatorial, lo que disminuye la evaporación y precipitación. Al respecto, las estadísticas señalan que en años con presencia de La Niña, se produce en Chile una disminución en la pluviometría de hasta 70% con respecto a un año normal (MINAGRI, 2017).

Dada las condiciones indicadas anteriormente, gran parte de las soluciones para enfrentar la disminución del suministro de agua para riego pasan por mejorar su eficiencia (Pereira et al., 2002; Courault et al., 2005; Gowda et al., 2008; Klop et al., 2008;). Para ello se han hecho esfuerzos mundiales para desarrollar estrategias y tecnologías que permitan estimar, de manera confiable, los requerimientos hídricos de los cultivos o evapotranspiración real (ETa, mm día^{-1}). Actualmente, la ETa puede ser estimada de forma simple a través del producto entre la evapotranspiración de un cultivo en condiciones de referencia (ETo, mm día^{-1}) y un coeficiente de cultivo adimensional (Kc) (Doorenbos y Puitt, 1977; Allen et al., 1998). Al respecto, la estimación de la ETo se calcula a partir de datos meteorológicos obtenidos desde una estación meteorológica automática (EMA), mediante el modelo de Penman-Monteith modificado por la FAO (Allen et al., 1998). Este método para estimar la ETa posee limitaciones, específicamente por el uso de los Kc, ya que estos coeficientes son de origen empírico y su utilidad está normalmente circunscrita solo para las zonas y las condiciones particulares donde fueron desarrollados (Jagtap y Jones 1989; Annandale y Stockle, 1994; Allen et al., 1998; Courault et al., 2005; Tasumi et al., 2005; Ortega-Farias et al., 2007; Carrasco-Benavides et al., 2012). Es importante considerar que los Kc no incorporan la variabilidad espacial propia de los cultivos, lo que hace necesario calibrarlos y validarlos en cada lugar donde se quieran usar (Tasumi et al., 2005; Carrasco-Benavides et al., 2012). En general, los métodos para calibrar Kc se basan en las mediciones directas de la ETa, la que es desarrollada con equipamientos complejos y altamente costosos que representan una superficie limitada del terreno (Kleissl et al., 2009), lo que restringe su utilización principalmente

para fines de tipo científico. Ante esta situación, el uso de la teledetección o remote sensing ha permitido desarrollar algoritmos que estiman operacionalmente la ETa basado en las imágenes de satélite obtenidas, las cuales se combinan con los datos meteorológicos capturados en terreno. Estas estimaciones son consistentes y confiables, y pueden ser extrapoladas a términos diarios, permitiendo el desarrollo de Kc satelitales para cada píxel (Tasumi et al., 2005; Carrasco-Benavides et al., 2012). Diversos estudios sugieren que el nivel de error en las estimaciones es inferior a 20%, lo que, en términos de riego, es considerado como aceptable (Allen et al., 2011; González-Dugo et al., 2012). No obstante las ventajas, es importante señalar que el uso de imágenes satelitales por sí solo no es suficiente para la administración del riego pues no son mediciones de la ETa, sino simplemente estimaciones de esta variable (Allen et al., 2011). Lo anterior debido a que las imágenes satelitales manejan datos en escalas mayores a la predial, donde la frecuencia de obtención de la información es altamente dependiente de la periodicidad de las imágenes disponibles, el tiempo de procesamiento y la presencia de datos meteorológicos. Esto limita esta tecnología principalmente a ser solo un medio para evaluar lo que ya pasó en el terreno (Gowda et al., 2007; 2008). En definitiva, el uso de la teledetección satelital permite realizar una planificación del consumo de agua de la vegetación en las zonas en estudio a lo largo del tiempo, para elaborar presupuestos hídricos, es decir, definir la ETa versus la cantidad de agua que se dispone en cada fecha del período, considerando la variabilidad espacial.

Este capítulo tiene como objetivo presentar los principales aspectos teóricos del uso de herramientas de teledetección satelital utilizadas para estimar requerimientos hídricos en zonas de secano. Para ello, el trabajo se ha dividido en cuatro partes: la primera es la revisión presentada como introducción, la segunda presenta los aspectos teóricos de los principales métodos utilizados en la actualidad para estimar el consumo de agua, la tercera parte presenta los principales resultados, incorporando una demostración de uso para una zona de secano, y finalmente, en las conclusiones, se presentan los desafíos para su aplicación como herramienta de planificación para el uso racional de los recursos hídricos.

4.2.2. Desarrollo

4.2.2.1. Bases teóricas

Normalmente, las imágenes de satélite que se utilizan para estimar la ETa proporcionan información de la reflectancia para las bandas visible (VIS), infrarrojo cercano (IRC) e infrarrojo medio (IRM), además de los datos de la temperatura superficial radiométrica que se obtiene desde la banda del infrarrojo térmico (IRT) (Gowda et al., 2008). A partir de estos datos, se puede estimar la ETa utilizando modelos que han sido clasificados en dos grandes grupos: 1) modelos los basados en Índices Vegetativos (IV), y 2) modelos basados en el residuo del balance de energía superficial (RBES) (Gowda et al., 2008; Stancalie y Nertan, 2012; Petropoulos, 2013).

4.2.2.2. Modelos basados en Índices Vegetativos (IV)

En términos teóricos, estos modelos se basan en la reflectancia medida en las coberturas vegetales para las bandas VIS e IRC (Gowda et al. 2008). El comportamiento espectral en estas bandas es de mucha utilidad para estimar el contenido de agua, debido a que las hojas de plantas sometidas a alguna condición de estrés reflejan más luz en la banda roja (R) y absorben más para el IRC (Basso et al., 2004). De la misma forma, los suelos con altos contenidos de agua y materia orgánica presentan menos reflectancia que los suelos secos y erosionados. Esta propiedad, permite calcular IVs basados en relaciones lineales entre las bandas R e IRC (Basso et al., 2004). Dentro de los índices más utilizados en literatura para caracterizar la superficie se encuentran: el índice de vegetación de diferencia normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) (Rouse et al., 1973) y el índice vegetativo ajustado al suelo (Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI) (Huete, 1988) y sus derivados. De estas relaciones es posible calcular coeficientes de cultivo (Kc) basados en la reflectancia (Kcr) (Gowda et al., 2008; Allen et al., 2011). Para estimar los índices NDVI y SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), se utilizan las fórmulas 28 y 29.

$$NDVI=\frac{(\rho_{IRC}-\rho_R)}{(\rho_{IRC}+\rho_R)} \quad (28)$$

$$SAVI=\frac{(\rho_{IRC}-\rho_R)}{(\rho_{IRC}+\rho_R+L)}\cdot(1+L) \quad (29)$$

$$ETa=\frac{LE}{\lambda}=R_n\text{-}G\text{-}H \quad (30)$$

donde, P_{IRC} y P_R corresponden a la reflectancia para las bandas infrarroja cercana y roja, respectivamente. L es un factor de ajuste introducido para minimizar la influencia del brillo del suelo ($L \geq 0$).

En general, Allen et al. (2011) indicaron que este tipo de modelos funciona bien, pues presentan una buena correspondencia entre el monto de vegetación y su correspondiente transpiración. No obstante, dado su origen empírico, estos modelos necesariamente deben ser ajustados antes de su uso, pues las relaciones entre los IVs y ETa pueden variar dependiendo el tipo de vegetación, además de las variaciones debidas a los cambios en la humedad del suelo, para zonas donde no existen coberturas vegetales.

4.2.2.3. Modelos basados en el Residuo del Balance de Energía Superficial (RBES)

Este tipo de modelo se basa en los fundamentos físicos del flujo de agua entre la superficie y la atmósfera. En este caso, las variaciones en la cantidad de agua en la superficie se pueden explicar desde el punto de vista de la energía utilizada para vaporizarla y que es estimada a partir de la ecuación general del Balance de Energía Superficial (BES) (Gowda et al., 2008) (ecuación 30).

donde, λ es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}), LE es el flujo de calor latente y H es el flujo de calor sensible, Rn corresponde a la radiación neta y G es el flujo de calor del suelo. Rn, G, H y LE son todos expresados en W m^{-2}. ETa es en (mm h^{-1}).

Estas estimaciones son realizadas al momento de paso del satélite (mm h^{-1}) y pueden ser extrapoladas a términos diarios (mm $día^{-1}$), utilizando métodos de escalado que normalmente se basan en parámetros diurnos de radiación solar, balance de energía o la ET de referencia (Colaizzi et al. 2006). Como se indicó anteriormente, a partir del RSEB se han desarrollado una serie de modelos que permiten estimar la Eta, usando datos satelitales en combinación con datos meteorológicos (figura 73). Algunos modelos operacionales más utilizados en literatura, corresponden a SEBAL (Surface Energy Balance Algortihm for Lands) (Bastiaanssen et al., 1998) y METRIC (Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration) (Allen et al. 2007), los cuales han sido ampliamente estudiados para estimar la ETa en una serie de cultivos, para diferentes condiciones meteorológicas. En la figura 73 se representa de forma esquemática el proceso de determinación del mapa de flujo de calor latente, a partir de la información proporcionada por la imagen satelital.

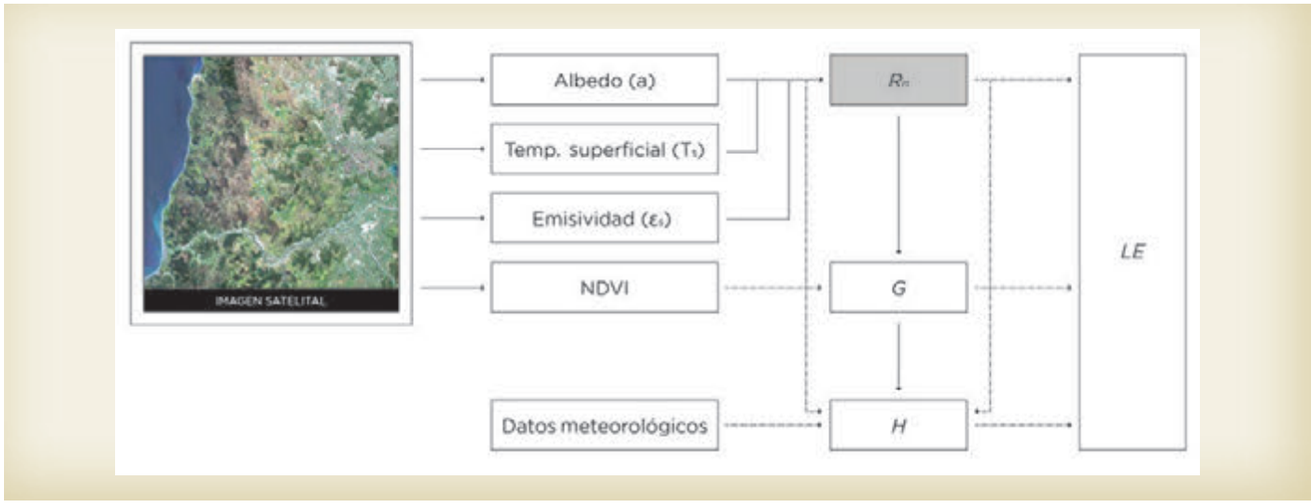


Figura 73: Diagrama de flujo modelo residual del balance de energía superficial (tipo SEBAL/METRIC). *Rn, G H y LE corresponden a la radiación neta, flujo de calor de suelo, flujo de calor sensible y flujo de calor latente, respectivamente. NDVI es el Índice de Vegetación de diferencia. Fuente: Adaptado de Reca et al. (1999).*

4.2.3. Principales resultados y un ejemplo de la aplicación de la teledetección en zonas de secano

En la actualidad existe una serie de estudios donde se han aplicado herramientas de teledetección para estimar la ETa en cultivos que se adaptan a las condiciones de secano. Por ejemplo, en viñedos (Campos et al., 2010; Galleguillos et al., 2011; González-Dugo et al., 2012; Carrasco-Benavides et al., 2012; 2014) y olivos (Santos et al., 2012; Pôças et al., 2014) se han hecho estimaciones de la ETa, con niveles de error inferiores al 20%. Gowda et al. (2008) indicaron que la precisión en la estimación de esta variable, cualquiera que sea el método utilizado, puede variar entre 67 a 97% para estimaciones diarias, y sobre 94% para estimaciones de la ETa a lo largo de toda una temporada. Estos resultados son promisorios y permiten evaluar la factibilidad de aplicar estas metodologías a zonas como el secano interior de Chile y en particular, para el secano de la Región del Maule, que se caracteriza por exhibir condiciones agroclimáticas y edafológicas que resultan marginales para los cultivos tradicionales, tanto agrícolas como forestales. En esta vasta área de más de medio millón de hectáreas, 51% de los suelos tiene algún grado de erosión y los cultivos tradicionales presentan rendimientos muy inferiores a los valores óptimos. En esta zona si bien la programación del riego en cultivos de tipo forestal es compleja y costosa, el uso de IVs como el NDVI y temperatura de brillo (Ts) permitiría monitorear el estado de los ecosistemas y las potenciales perturbaciones que estos podrían sufrir, por ejemplo, sobre el riesgo de incendios, permitiendo una mejor administración de los recursos para supresión y mitigando las tasas de propagación del fuego (Chuvieco et al., 2004). El índice NDVI es también un indicativo de la actividad fotosintética de un cultivo y puede ser utilizado como un indicador de estreses ambientales, particularmente estrés por sequía, lo cual indicaría posibles cambios en la acumulación y uso de carbono y agua a través del tiempo (Masselli, 2004).

En la Región del Maule, y en particular en las zonas de secano, existe una larga tradición para la producción vitivinícola, en especial de cepas tintas. De esta forma, para las zonas de secano, dadas sus características edafoclimáticas privilegiadas para la producción de vides, se visualiza a la viticultura como una actividad productiva interesante. Según el Catastro vitícola nacional (SAG, 2015), del total de la superficie de viñas viníferas plantadas hasta el año 2015 en Chile (aproximadamente 141.918 ha), la Región del Maule contaba con 53.838 ha (37,9%). Según el régimen hídrico, de este total, 46.515 ha (86%) están bajo riego, 6.618 ha (12%) son de secano y 704 ha (1%) se encuentran en vegas. En particular, en las comunas presentes en el área geográfica denominada secano de la Región del Maule, la distribución de viñedos, tanto para cepas blancas y tintas, se presenta en la tabla 18.

En este contexto, considerando las características productivas del secano, de bajas precipitaciones y la presencia de una temporada seca prolongada por casi ocho meses en el año, hacen necesaria la aplicación de métodos que permitan planificar la disponibilidad de recursos hídricos. En este sentido, el uso de herramientas de teledetección para estimar la ETa permitiría, entre otros aspectos, desarrollar a un bajo costo presupuestos hídricos por temporada, monitorear posibles usos ineficientes del agua, desarrollar coeficientes de cultivos ajustados a las condiciones edafoclimáticas para aumentar la eficiencia del uso del agua (Allen et al., 2007). Por ejemplo, en la figura 74a se muestra una imagen Landsat-5 TM en color verdadero, obtenida para la zona de Cauquenes el día 08/01/2011,

Tabla 18: Superficie (ha) de viñas viníferas para cepas blancas y tintas para las distintas comunas de la Región del Maule bajo condiciones de secano. *Fuente: Servicio Agrícola y Ganadero (SAG, 2015).*

Comuna	Blancas	Tintas	Total
Cauquenes	1.339	5.515	6.455
Curepto	96	426	522
Empedrado	0	37	37
Hualañé	396	291	687
Pencahue	451	4.247	4.699
San Javier	1.409	6.701	8.110
Total	3.681	17.217	20.510

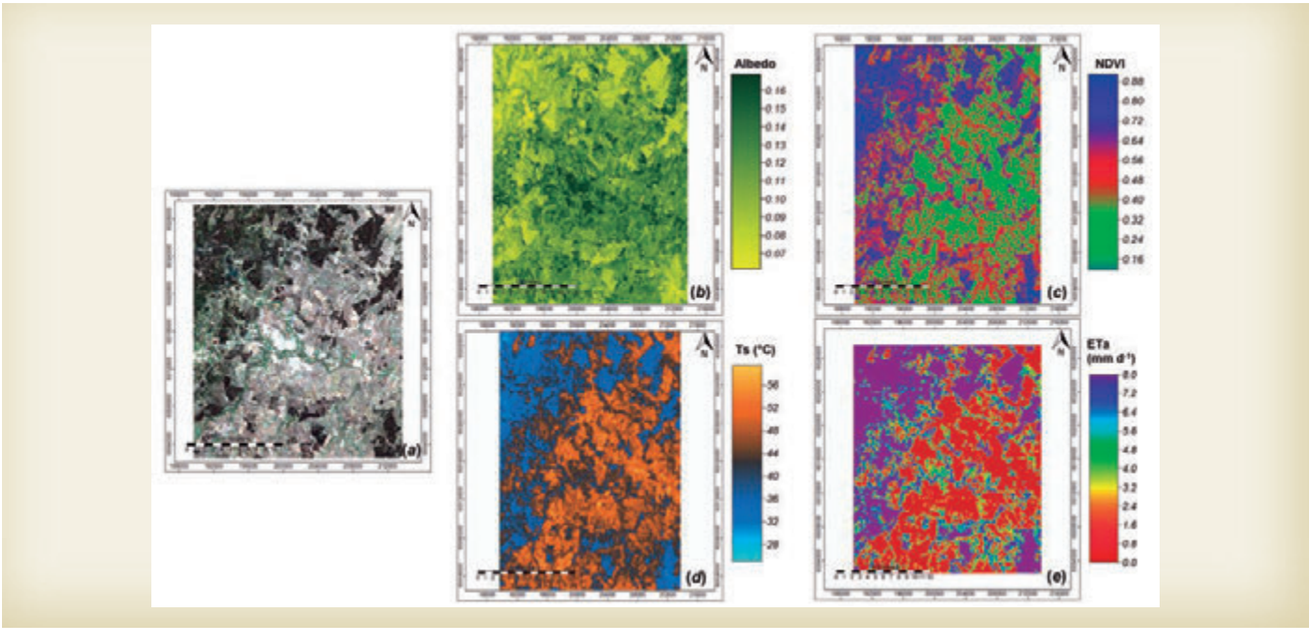


Figura 74: a) imagen satelital Landsat-5 TM (color verdadero); b) albedo: c) NDVI: d) temperatura de brillo (Ts); e) evapotranspiración real diaria (mm d-1), (Cauquenes, Chile, fecha 08/01/2011). *Fuente: Elaboración propia.*

en un cultivo de vid. Esta imagen satelital fue obtenida desde el servidor del US Geological Survey (http://glovis.usgs.gov/) y los datos de ETo desde una estación meteorológica de la red AGROMET (agromet.inia.cl). La imagen fue procesada usando el modelo METRIC (Allen et al., 2007), de acuerdo a lo indicado en Carrasco-Benavides et al. (2012; 2014). Las figuras 74b, 74c, 74d y 74e, muestran la variabilidad espacial de la estimación del albedo, NDVI, Ts y la ETa para ese mismo día, respectivamente.

4.2.4. Conclusiones

Las técnicas de teledetección permiten obtener información muy relevante para el manejo de los recursos hídricos en las actividades silvícolas, agricultura e hidrología. El empleo de satélites como los de la serie Landsat posibilita el desarrollo de herramientas que potencialmente permitirían mejorar la toma decisiones en terreno, por ejemplo, una adecuada planificación del riego en el caso de cultivos agrícolas, o una adecuada planificación de la fase preincendio en el caso de cultivos forestales. En la actualidad estas bases de datos satelitales son de fácil acceso, las que, en conjunto con la información meteorológica, permiten elaborar mapas de ETa, a lo largo del tiempo. De esta forma, los requerimientos hídricos de los cultivos pueden ser estimados para una amplia superficie.

La metodología propuesta permitiría establecer las estimaciones globales de consumo de agua para, por ejemplo, cultivos adaptados a las condiciones de secano como la vid. El conocer estas necesidades, ajustadas a las características específicas espaciales y temporales, permitirá diseñar planes de manejo de agua para la temporada. Los desafíos que presenta la aplicación de esta herramienta para su potencial uso en zonas de secano no radican solamente en el acceso a la información, sino además en el desarrollo de competencias profesionales para el manejo de estos datos y que estos sean transformados en información útil para la toma decisiones de manejo de un recurso tan preciado como el agua.

4.3 Caracterización geomorfológica de la microcuenca del estero Yerba Loca mediante imágenes de alta resolución

Waldo Pérez,[a,b] Idania Briceño,[a] Paulina Vidal[a]

[a]Hémera Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Chile
[b]Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, España

4.3.1. Introducción

Mediante el uso de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha logrado caracterizar, analizar y discretizar información ambiental de múltiples variables y escalas. Ejemplo de ello es el mapa geomorfológico, que permite entender el contexto físico de la superficie de la Tierra y proporciona una descripción objetiva y completa de las formas del relieve, incorporando: información sobre las propiedades espaciales (dimensiones, pendiente, curvatura, relieve); geometría del relieve (morfometría); su origen y evolución, debido agentes y procesos genéticos endógenos/exógenos (morfogénesis); su edad relativa o absoluta (morfocronología); su estado de actividad y la velocidad de los procesos genéticos (morfodinámica); y el tipo de roca y depósitos cercanos a la superficie (Dramis et al., 2011).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la cuenca del río Mapocho destacan los estudios realizados por Araya (1985, 1988 y 1996) y Börgel et al. (2004). Araya (1985) elaboró un análisis de la carta geomorfológica a escala 1:200.000, en la que clasifica los fenómenos en las vertientes, los talwegs (línea que unen puntos de máxima profundidad en el lecho de un río) y la morfotectónica presentes. La clasificación que muestra está orientada a exponer los encadenamientos entre ellos y destaca que gran parte de estas formas son herencias del cuaternario. Además, el autor correlaciona los sistemas de vertiente con las formas depositacionales basales; establece las relaciones entre el origen de la geodinámica actual del paisaje respecto a la acción de los agentes subaéreos; los aspectos genético-evolutivas a través del análisis de los depósitos basales coluviales; la escasa vegetación y la acción de relieves plegados.

Börgel et al. (2004) señalan que las sierras y los valles cordilleranos están representados por relieves plegados constituidos por sierras anticlinales y sinclinales. También indican que valles con igual evolución son indicadores de estructura impuesta por los procesos de orogénesis, donde el clima es el factor determinante en el modelado del territorio debido a un trabajo en forma selectiva, de acuerdo a la disposición y resistencia de las rocas, formando relieves en paisajes con diversos estados de equilibrio.

El presente trabajo tiene por objetivo la delimitación de los sistemas geomorfológicos presentes en la microcuenca del estero del Yerba Loca, mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución y un DEM (Digital Elevation Model o modelo de elevación interferométrico) obtenido de datos satelitales ERS-1 y ERS-2 (European Remote Sensing). La demarcación de los sistemas se realiza a partir de una metodología jerárquica que permite identificar y separar los sistemas presentes según criterios de secuencias topográficas y altitudinales, con énfasis en el análisis de formas derivadas de los procesos desencadenantes heredados o actuales.

4.3.2. Material y métodos

4.3.2.1. Área de estudio

La microcuenca del estero Yerba Loca se localiza en la comuna de Lo Barnechea, en la Región Metropolitana, y forma parte de la sección alta de la cuenca del río Mapocho (figura 75). Posee una superficie aproximada de 108,3 km^2 y se inserta en un clima mediterráneo con precipitaciones moderadas, concentradas en el invierno, y

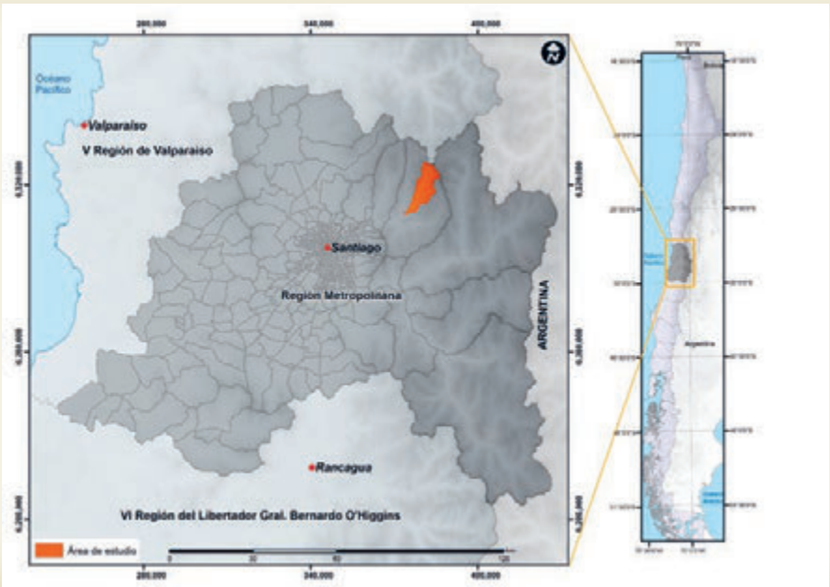


Figura 75: Localización microcuenca del estero Yerba Loca. *Fuente: Hémera (2017).*

con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses (DGA, 2016).

4.3.2.2. Datos remotos (Pléiades/ERS)

Se utilizó el mosaico de imágenes Pléiades de enero de 2015 y el DEM (Digital Elevation Model) ERS interferométrico, cuyas características técnicas se indican en las tablas 19 y 20.

4.3.2.3. Cálculo de parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos se definen como indicadores de las características dinámicas de los sistemas de drenaje que establecen los tipos de comportamiento y reacciones hidrológicas más probables (Ferrando, 1993). De acuerdo a Ritter et al. (1995), la morfometría de una microcuenca estudia la forma o geometría de la misma con la finalidad de describir procesos geomorfológicos. Estos procesos evalúan la producción de sedimentos, esti-

Tabla 19: Características técnicas de las imágenes Pléiades. *Fuente: Elaboración propia.*

Imagen	Resolución espectral	Longitud de onda (nm)	Resolución espacial	Fuente
PLÉIADES	Pan	480-820	50 cm	http://www.imagine-it.cl
	Azul	450-530	2 m	
	Verde	510-590	2 m	
	Rojo	620-700	2 m	
	IC	775-915	2 m	

Tabla 20: Características técnicas del DEM interferométrico. *Fuente: Elaboración propia.*

Imagen	Resolución espacial	Fuente
ERS interferométrico	30 m	www.esa.int

Tabla 21: Fómulas matemáticas para calcular parámetros morfométricos. *Fuente: Adaptado de Kummar et al. (2014).*

Parámetro morfométrico	Fórmula		Fuente
parámetros lineales			
Perímetro de la cuenca	Medición lineal de la divisoria de aguas de la microcuenca expresada en km		Horton (1945)
Longitud del cauce principal	Longitud del cauce en km		Horton (1945)
Longitud de red hídrica	Σ Longitud de los cauces presentes en la cuenca km		
Parámetros areales o superficiales			
Área o magnitud de una microcuenca (A_c):	Área plana en proyección horizontal delimitada por su divisoria expresada en km²		Horton (1932;1945)
Densidad de la red de drenaje (D_d)	$D_d = L/A_c$ dónde: L = Longitud total de los cauces dentro de la microcuenca; (A_c) el área total de drenaje en km²		Horton (1932;1945)
Coeficiente de compacidad (K_c):	$K_c = 0{,}282 * \frac{P}{\sqrt{S}}$ donde: P= Perímetro de la microcuenca, S= Superficie de la microcuenca, K_c = Coeficiente de compacidad		Gravelius (1914)
Forma de la microcuenca F*f*	$Ff = A / L^2$ A = área de la cuenca; perímetro de la cuenca		Horton (1932;1945)
Tiempo de concentración	$T_c = 60 \left(11{,}9 \frac{L^3}{H}\right)^{0{,}385}$ donde:T_c = Tiempo de concentración en minutos, L = Longitud del curso de agua principal, (millas), H = Desnivel de la cuenca (pies)		Li y Chibber (2008)
Parámetros de relieve			
Altitud, pendiente y exposición	Estos parámetros morfométricos fueron calculados a partir del DEM		
Desnivel	R = H-h donde: H=Altura máxima en m; H = Altura min. (m)		Hadley y Schumm (1961)
Pendiente promedio en °			
Rapidez de escurrimiento potencial	IC Gravelius	Rapidez de escurrimiento potencial	Ferrando (1981)
	>2	Muy lento	
	2-1,76	Lento	
	1,75-1,51	Moderado	
	1,50-1,26	Acelerado	
	1,26-0	Muy acelerado	
Curva hipsométrica	Se calculó con la extensión para ArcGIS CalHypso de (Pérez-Peña et al., 2009)		Strahler (1957)

man tasas de erosión, la rapidez de escurrimiento potencial de la escorrentía, entre otros.

En el área de estudio se calcularon los parámetros de drenaje lineales, areales o superficiales, y de relieve, para entender la influencia morfométrica en el relieve y sus características (Obi Reddy et al., 2004). Los parámetros morfométricos calculados en la microcuenca del estero Yerba Loca, se detallan en la tabla 21.

4.3.2.4. Definición de sistemas y geoformas

La definición de los sistemas geomorfológicos se realiza a partir de las relaciones verticales entre los sistemas presentes en el área de estudio, cuyas características morfológicas están determinadas por procesos litoestructurales, glaciales, nivales, gravitacionales y aluviales. Su funcionamiento lo determina la transferencia de materiales, a través de flujos de detritos, avalanchas, deslizamientos,

Tabla 22: Sistemas geomorfológicos, geoformas y morfogénesis. *Fuente: Hémera (2017).*

Sistema geomorfológico	Geoformas	Morfogénesis asociada
Lito-estructural Se definen como aquellas áreas donde los procesos del Cuaternario han dejado una impronta de escasa profundidad	Afloramientos rocosos, cornisas	Escarpe erosivo, ruptura de pendiente, falla observada e inferida, traza de plano axial, anticlinal
Glacial Está representado por las masas de hielo situadas en las cabeceras del sistema fluvial. Este sistema gestiona el aporte hídrico (pluvio-nival) a la microcuenca y da valor paisajístico al entorno cordillerano	Glaciar de valle, glaciar de montaña, glaciar rocoso, morrena: frontal, de fondo y lateral	Traza de plano axial, sinclinal, corona circo glaciar, grietas longitudinales, grietas transversales, flujo de detrito glacio aluvial
Nival Está representado por las alturas máximas y mínimas que ha alcanzado la nieve en el periodo 2003 a 2011 de acuerdo al movimiento de la isoterma 0 °C	Nicho de nivación, superficie con cobertura nival estacional	Isoterma 0° media anual mínima ±3,350 m.s.n.m., isoterma 0° media anual máxima ±4,050 m.s.n.m.
Gravitacional Estas formas y procesos caracterizan un amplio ambiente superficial recubriendo al sistema lito-estructural con diferentes tipos de detritus. Lo representa los movimientos de material no consolidado en las laderas en respuesta la atracción de la gravedad	Cono coluvial, cono coluvial coalescente, coluviones antiguos	Deslizamiento, desprendimiento o caída de rocas, flujo de detritos
Aluvial Define las formas y procesos vinculantes con las actividades de erosión, transporte y sedimentación en la microcuenca hidrográficas en estudio	Abanico aluvial, cono aluvial	

entre otros, y el transporte de materiales por el agua; así como por las condiciones imperantes en los afloramientos rocosos, que presentan una morfología y pendientes condicionadas por las características litológicas y estructurales, y por la dinámica y procesos propios de la evolución de laderas adyacentes (Ramonell, 1997).

A partir del análisis jerárquico, se identificaron los sistemas geomorfológicos en el área de estudio, con sus respectivas geoformas y morfogénesis asociada (ver tabla 22).

4.3.2.5. Interpretación visual, digitalización y validación en terreno

La caracterización de los sistemas geomorfológicos se realizó a partir de la interpretación visual del mosaico de imágenes Pleiádes y mediante el desarrollo de las siguientes fases de trabajo: a) división la microcuenca del estero Yerba Loca en cinco (5) cuadrantes a escala 1:25.000, con el fin de obtener una observación de los distintos sistemas presentes en el área de estudio; b) descripción y tipificación de los sistemas geomorfológicos; c) clasificación, delimitación y categorización de las geoformas, manteniendo una coherencia en la asignación de áreas basados en los sistemas definidos; d) validación y corrección de la información interpretada, mediante la realización de dos (2) campañas a terreno (ver tabla 23); e) diseño de la simbología; y f) cartografía y elaboración de mapa geomorfológico, mediante el uso del software ArcGIS 10.1. El sistema de referencia usado en la cartografía es Datum WGS84, proyección UTM Huso 19 Sur.

Tabla 23: Campañas de terreno. *Fuente: Hémera (2017).*

N° Campaña	Sector	Fechas
1	Estero de la Yerba Loca	Del 16 al 26 de enero, 2016
2	Estero de la Yerba Loca	Del 15 al 18 de febrero, 2016

4.3.3. Resultados

4.3.3.1. Morfometría de la microcuenca del estero Yerba Loca

El análisis morfométrico señala que la red de drenaje de la microcuenca es controlada por las fallas presentes en el área en estudio. El factor de forma (Ff), indicador de los flujos máximos de las cuencas, muestra que los factores hidrogeológicos afectan directamente o indirectamente al entorno geomorfológico del área en estudio. Por otro lado, los elementos fisiográficos como el relieve y la pendiente (Singh et al., 2011), revelan que la escorrentía e infiltración presentan un potencial moderado.

Los parámetros morfométicos areales, como la densidad de drenaje (Dd), determina que la microcuenca tiene estratos resistentes/permeables, indicador que se condice con las características litológicas presentes en el sector.

Asociado al relieve de alta montaña, las pendientes se presentan de moderadas a fuertes, con valores que fluctúan entre los 3° y 75°. El 41% y 36% de la superficie de la microcuenca presenta pendientes que oscilan entre los 15°-30° y 30°-45°, respectivamente. La pendiente es el principal factor de desarrollo y control de las formas del relieve, y permite entender el movimiento del agua en la microcuenca. Los valores máximos de las pendientes se localizan en la parte alta de la microcuenca, y corresponden a pendientes muy escarpadas que favorecen la caída y desprendimientos de rocas.

Las altitudes de la microcuenca oscilan entre los 1.300 y 5.350 m.s.n.m. aproximadamente, donde el 43% de la superficie se localiza entre los 3.000 y 4.000 m.s.n.m.

La red de drenaje de la microcuenca presenta, en orden de superficie, una exposición oeste, noroeste y suroeste, que representan el 25%, 19% y 16%, respectivamente, debido a un probable control de la tectónica. Los resultados del análisis morfométrico se detallan en la tabla 24. La figura 76 muestra la distribución de la altitud, pendiente y exposición en la microcuenca del estero Yerba Loca.

El índice de compacidad de Gravelius presenta un valor de 1,53 que es característico de una microcuenca de forma alargada que posee rapidez de escurrimiento potencial moderado, y cuyo cauce principal puede recibir aportes de manera gradual sin represamientos debido a la presencia de altas pendientes. Este índice también indica una tendencia de la microcuenca a concentrar grandes volúmenes de agua en su escurrimiento, lo que sumado al desnivel (4.051 metros aproximados), podría provocar

Tabla 24: Parámetros morfométricos del estero Yerba Loca. *Fuente: Hémera (2017).*

Parámetro morfométrico	Resultados
Parámetros lineales	
Perímetro de la cuenca	56,9 km
Longitud del cauce principal	22 km
Longitud de red hídrica	52 km
Parámetros areales o superficiales	
Área o magnitud de una microcuenca ():	108,3 km^2
Densidad de la red de drenaje ()	0,48
Coeficiente de compacidad	1,53
Forma de la microcuenca	Alargada
Tiempo de concentración	82,71 min
Parámetros de relieve	
Altitud, pendiente y exposición	ver figura 76
Desnivel	4.051,76 m
Pendiente promedio en grados (°)	29°
Rapidez de escurrimiento potencial	Rapidez de escurrimiento potencial moderado
Curva hipsométrica	ver figura 77

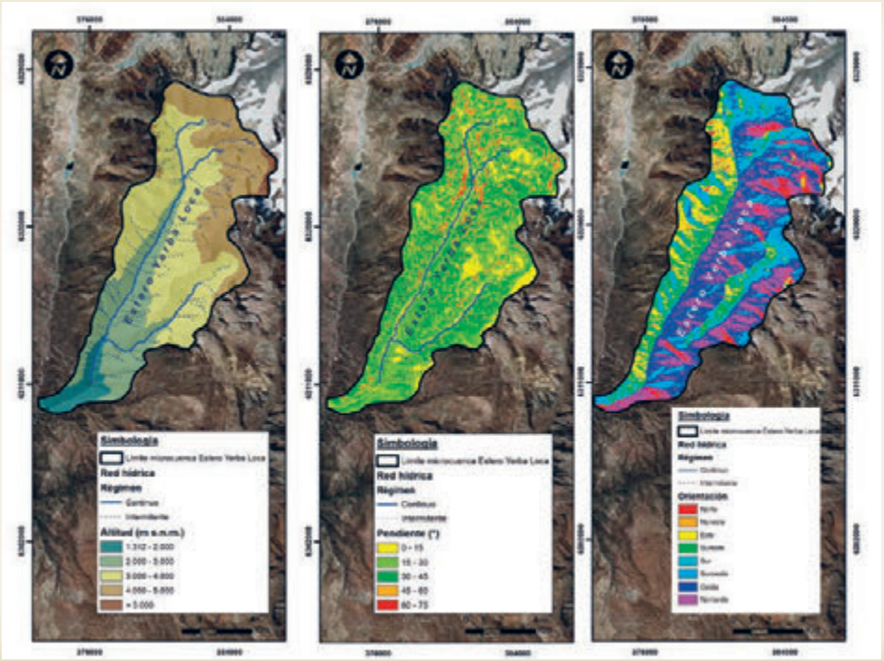


Figura 76: Altitud (m), pendiente (°) y exposición del estero Yerba Loca. *Fuente: Hémera (2017).*

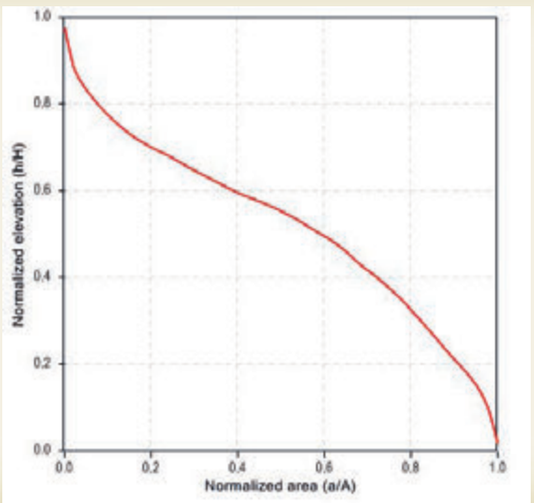


Figura 77: Curva hipsométrica estero del Yerba Loca. *Fuente: Hémera (2017).*

inundaciones en sus puntos de descarga, en eventos de precipitaciones extremas.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Campos (1992) y Chow et al. (1994), la microcuenca del estero Yerba Loca corresponde a una cuenca pequeña (25-250 km²), sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración.

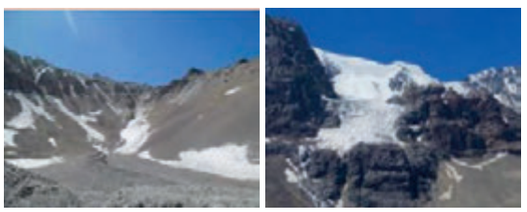
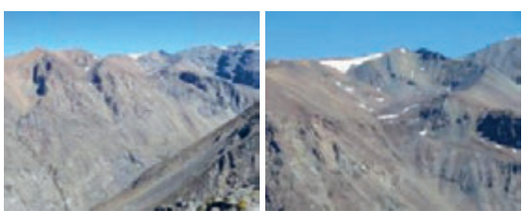
La microcuenca presenta un patrón de drenaje de Trellis, caracterizado por cursos de aguas paralelos entre sí, debido a la influencia de fallas y diaclasas (fractura en la roca en la que no hay desplazamientos de bloques) de origen estructural. Por otro lado, presenta una densidad de drenaje (Dd) de 0,48 km/km², el cual indica un alto potencial de erosión y estructuración de la red fluvial. Los parámetros morfométricos medidos muestran coherencia con la información de la curva hipsométrica (ver figura 77), en la que se observa que la microcuenca en estudio se caracteriza por ser geológicamente joven, capaz de movilizar grandes bloques de rocas.

4.3.3.2. Sistemas y geoformas de la microcuenca del estero Yerba Loca

Las características de los sistemas y geoformas asociados a la microcuenca, se describen de forma detallada en la tabla 25.

Cada uno de los sistemas y geoformas identificados, muestran la riqueza de procesos y factores que interactúan en el sector andino de Chile central. La influencia estructural se ve reflejada en las formas del relieve, a través de la disposición tectónica, así como en los agudos contrastes de resistencia litológica que producen erosión selectiva. Se muestra como

Tabla 25: Características de los sistemas y geoformas del estero Yerba Loca. *Fuente: Elaboración propia.*

Sistema	Geoformas	Fotografía
Litoestructural	Las geoformas asociadas al sistema lito-estructural incluyen afloramientos rocosos, que corresponden a superficies constituidas por rocas expuestas sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestos en laderas abruptas. La influencia estructural se ve reflejada en: Las formas del relieve a través de la disposición tectónica; en agudos contrastes de resistencia litológica que producen erosión selectiva; en los escarpes marginales en el que se resaltan sistemas depositacionales y gravitacionales, y se da paso a formas coluviales que favorecen los depósitos al pie de las laderas y en los taludes.	
Glacial	El sistema glaciar está integrado por circos glaciales, morrenas, glaciares rocosos y glaciar de valle. En la cabecera de la microcuenca se localiza el glaciar La Paloma a 4.486 m.s.n.m. (DGA, 2010), con una superficie de 1,2 km². Los glaciares rocosos que se localizan entre los 3.800 y 5.000 m.s.n.m., están compuestos por detritos pobremente clasificados y suelen adoptar formas lobuladas. Se caracterizan por tener un frente y pendientes laterales escarpadas, localizándose algunos de ellos en las coordenadas 384.436 E, 6.324.171 N, 382.997 E, 6.322.806 N. El modelado glacial, que se evidencia por encima de los 3.500 m.s.n.m., destaca en vertientes con profundas excavaciones en forma de circo glacial, con disección nival y fluvial. En este sistema, se observan, además, distintas acumulaciones en las vertientes asociadas a procesos glaciares y gravitacionales. Las morrenas se observan como grandes bloques heterométricos, con una escasa matriz fina. Se reconocen varios conjuntos morrénicos frontales (en torno a las coordenadas 380.995 E, 6.315.077 N, 380.794 E, 6.325.638 N), conformados por varios circos glaciales, colgados sobre los barrancos, que indican el límite máximo de extensión del glaciar La Paloma.	
Nival	Los nichos de nivación corresponden a depresiones cóncavas, abandonadas por los hielos cuaternarios. En las zonas de sotavento aumentan su potencial de riesgo cuando la nieve es empujada, y es favorecido este empuje con la inclinación y las formas de las laderas (Acosta, 2006). La pérdida de cobertura de hielo expone los materiales del sustrato y de las formaciones superficiales a otros procesos. En el extremo altitudinal inferior y por el aumento de la temperatura, ocurren procesos de fitocolonización, con especies pioneras herbáceas. También se hacen evidentes los depósitos constituidos por materiales detríticos heterométricos, abandonados en el pasado reciente por los glaciares. Se puede observar los nichos de acumulación nival en la ladera oeste de la cuenca superior del estero de la Yerba Loca (localización 379.995 E, 6.324.138 N).	

Sistema	Geoformas	Fotografía
Gravitacional	El sistema gravitacional tiene una gran extensión a lo largo de la microcuenca, que se expresa en formas de conos coluviales y conos coluviales coalescentes, sobre los 2.500 m.s.n.m., dependiendo de las condiciones morfoestructurales. En la sección baja de la microcuenca, se observan coluviones antiguos cubiertos de vegetación. Por encima de estas altitudes se plantea la existencia de una marcada disimetría entre las vertientes, dominados por los procesos glaciares y periglaciares. Por otro lado, los taludes con coluvios se caracterizan por fuertes pendientes (>20°), y se observan en las porciones distales, grandes bloques, procedentes de la pared y caídas de roca. Estos taludes con coluvios se ubican en las laderas adyacentes del estero del Yerba Loca, en su margen derecho (en sentido de la dirección de la corriente), tapizando el talud de forma continua desde la coordenada 380.944 E, 6.324.460 N, hasta la coordenada 378.117 E, 6.316.069 N, con alternancia de conos coluviales, producto de microcuencas aportantes.	
Aluvial	El sistema aluvial lo representan pequeños conos aluviales y abanicos aluviales, constituidos por sedimentos originados por distintos procesos erosivos torrenciales, depositados en las partes más bajas de los valles y en los pies de las laderas. Los conos y abanicos de mayor desarrollo están surcados en toda su longitud por desprendimiento de rocas, que dispersan los bloques por toda la ladera. Los conos presentan formas variadas que denotan un funcionamiento complejo. Se aprecia la distribución de procesos gravitacionales, destacando las pendientes rectilíneas, con la presencia de canales de flujos bien definidos. Se observan valles en forma de U.	

sistemas denudativos, que permiten la delimitación de superficies a través de escarpes marginales, sistemas depositacionales y gravitacionales, dando paso a formas coluviales que favorecen los depósitos al pie de las laderas. Desde el punto de vista aluvial, en el área del Yerba Loca se distinguen abanicos y conos en los que se demuestra la presencia de sedimentos heterométricos hacia los cauces; su topografía escarpada indica que es el primer factor geomorfológico a considerar para la generación de flujos, deslizamientos y derrumbes. En la figura 78, se identifican los sistemas geomorfológicos de la microcuenca del estero de Yerba Loca.

4.3.4. Conclusiones

El área de estudio, ubicada en la cordillera de Chile central se encuentra sometida a diversos procesos geomorfológicos (tectónica reciente, erosión glaciar, fluvial y gravitacional) debido, en parte, a su localización, condiciones orográficas, altitud y precipitación, generando una alta inestabilidad derivada de procesos dinámicos aún activos. Estos procesos conllevan la formación de una serie de sistemas geomorfológicos, que mediante la utilización de una metodología jerárquica y representados a escala 1:50.000, caracterizan la microcuenca en cinco grandes grupos, que son los sistemas litoestructural, gravitacional, glacial, nival y aluvial.

El estudio entrega como resultados las características que definen la geomorfología de alta montaña, la influencia glacial y la convergencia de procesos entre los sistemas y geoformas definidos.

Por otro lado, se establece que las relaciones espaciales y altitudinales presentes el área de estudio puedan servir

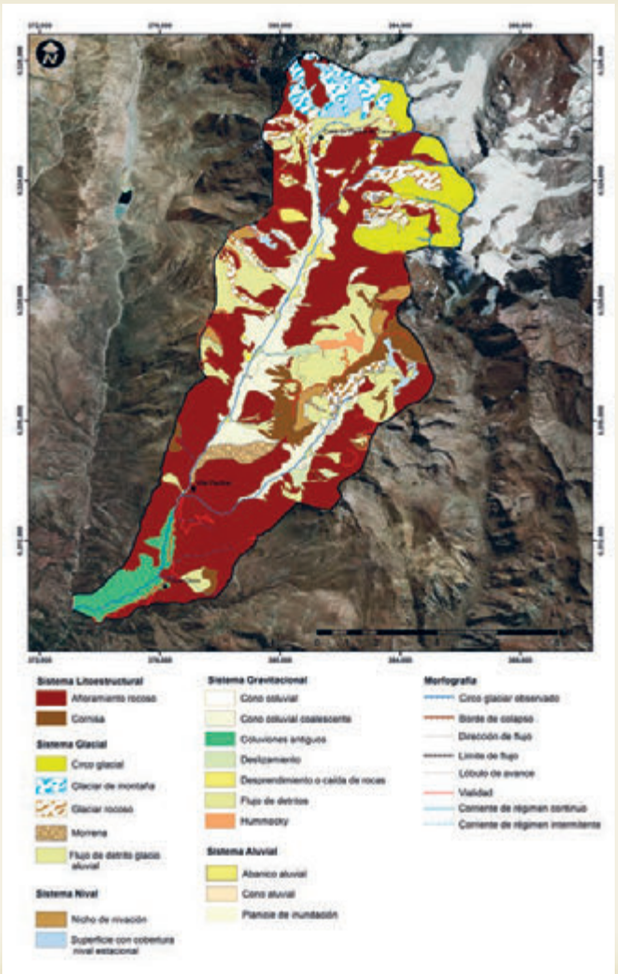


Figura 78: Mapa de sistemas geomorfológicos. *Fuente: Elaboración propia.*

de base para estudios posteriores de amenazas por inundaciones y deslizamientos de laderas o movimientos en masa, ante un escenario de cambio climático proyectado. Este escenario conllevaría un aumento global de las temperaturas para la zona, así como una disminución de las precipitaciones, que se concentrarían en ciertos períodos y con mayor intensidad, pudiendo condicionar una mayor ocurrencia de remociones en masa en la zona de estudio.

Debido a las condiciones climáticas, topografía, accesibilidad y extensión del área de estudio, el uso de imágenes de satélite de alta resolución, integradas en un SIG, ha demostrado una vez más la importancia que tienen en el levantamiento y producción de información temática digital.

Este trabajo es un aporte a los sistemas ambientales regionales, debido a que se generó información a escala mediana, que no se dispone actualmente.

4.4 Variaciones en la temperatura superficial del mar en la fosa de Perú-Chile durante períodos de actividad sísmica

Alfonso Condal,[a] Luis Echeverry,[b] Francisco Hernández[b]

[a]Departamento de Geomática, Laval University, Quebec, Canadá
[b]Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia

4.4.1. Introducción

Se han reportado cambios en las temperaturas superficiales antes de grandes terremotos desde principios del siglo XX (Milne, 1913). Estudios de campo más recientes (Ouzounov y Freund, 2004) y el acceso a datos de imágenes satelitales térmicas de los últimos 50 años, a lo menos ha expandido lo que ya se sabía sobre las emisiones térmicas terrestres antes de grandes terremotos. Por ejemplo, la revisión de la literatura sobre percepción remota indica claramente que los datos de imágenes satelitales térmicas presentan dos componentes relacionados con las anomalías térmicas durante los períodos de actividad sísmica: i) un campo térmico de larga duración asociado a estructuras lineares grandes y sistemas de fallas en la corteza de la Tierra (Carreno et al., 2001), y ii) una anomalía de corta duración antes de los sismos grandes (Tronin et al., 2002). Las anomalías cortas típicamente aparecen siete a catorce días antes de un sismo, afectando a varios miles o a decenas de miles de kilómetros cuadrados, mostrando una desviación positiva de dos a cuatros grados Celsius o más, para luego desaparecer unos cuantos días después del evento. En el pasado, varios procesos se han considerado como posibles contribuyentes a los componentes de larga y poca duración, aunque, a pesar de la multitud de modelos, no se ha ofrecido una explicación extensa que la comunidad científica haya encontrado totalmente aceptable hasta el ahora (Ouzounov y Freund, 2004).

La mayoría de las anomalías en la temperatura reportadas, que están relacionadas con terremotos inminentes, se han observado estudiando la actividad sísmica sobre la Tierra. En contraste, pocos estudios que se han enfocado en la actividad sísmica sobre el agua, aunque se sabe que más de 60% de los terremotos mundiales con magnitudes mayores a cinco ocurren en los océanos (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2017). En este sentido, el océano Pacífico que está junto a la costa oeste sudamericana, es el lugar ideal para este tipo de estudio debido a la presencia de la fosa de Perú-Chile, correspondiente a una fosa oceánica ubicada aproximadamente a 160 kilómetros en las afueras de la costa del continente sudamericano. Esta fosa marca el límite entre la placa de Nazca subductante y la placa Sudamericana obductante. Es la región donde la corteza oceánica y la litósfera de la placa de Nazca, comienzan su descenso hacia el manto debajo de la placa Sudamericana (figura 79). En la figura 79, la variación de los valores de la temperatura superficial del mar es representada por una tabla de consulta de colores de manera tal que se muestra los valores de temperatura más altos en rojo y los valores más bajos en verde agua, respectivamente. Las nubes y la Tierra se muestran en negro. El perfil amarillo en el mapa de temperaturas superficiales del mar que sigue a la línea costera, representa la ubicación aproximada de la fosa de Perú-Chile en la imagen.

Esta es una región sísmica muy activa, que tiene un largo aproximado de 5.900 km, con un ancho medio de cerca de 64 km, y que cubre alrededor de 590.000 km^2 (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2017). A pesar de estas características, se han encontrado poquísimos estudios en la literatura, si es que se ha encontrado alguno, que analice la relación entre las emisiones termales terrestres y la actividad sísmica a lo largo de la fosa de Perú-Chile. El principal objetivo de este artículo científico es, por lo tanto, muy específico: analizar la relación entre las emisiones termales terrestres producidas en el lecho marino de la placa de Nazca y los sismos que han tenido sus epicentros en la proximidad de la fosa de Perú-Chile. Par-

ticularmente, se han abordado dos interrogantes: i) cómo los componentes reportados por Carreno et al. (2001) y Tronin et al. (2002), se relacionan en tiempo y espacio con los sismos y sus epicentros a lo largo de la fosa de Perú-Chile, y ii) cómo la fuerza de las anomalías térmicas se vinculan con la magnitud de los sismos.

Para alcanzar estos objetivos exitosamente, es esencial el uso de bases de datos apropiadas al largo plazo. En este sentido, este es un campo altamente impulsado por los datos donde es indispensable la visión sinóptica y la capacidad para medir las emisiones termales desde el espacio a través de los satélites, junto con los diversos resultados geomáticos de la temperatura superficial del mar derivados de estos datos. En este aspecto, los resultados a nivel mundial de la temperatura superficial del mar obtenidos por el sensor MODIS TERRA y AQUA, pertenecientes a la NASA, son un recurso valioso. Para este estudio se descargaron los mapas diarios, los compuestos de uno a tres días y los compuestos semanales, así como mapas climatológicos diurnos y nocturnos, de temperatura superficial del mar, directamente de la página web de Ocean Color de la NASA (Ocean Color, 2017). Los siguientes puntos de este artículo describen en detalles los datos y métodos utilizados, para luego presentar los resultados y posteriormente, presentar el análisis y las conclusiones.

4.4.2. Datos y metodología

4.4.2.1. Adquisición de los datos

Para lograr el objetivo de este trabajo se necesitaron estimadores diarios y semanales de la temperatura superficial del mar, así como valores climatológicos, junto a información in situ adecuada como, por ejemplo, de la ubicación de los epicentros.

Las temperaturas superficiales del mar se pueden obtener en organizaciones internacionales responsables de procesar y distribuir los resultados de datos satelitales, mientras que la información terrestre relativa a la actividad sísmica esta disponible en institutos sismológicos y geológicos. Específicamente, los datos satelitales requeridos para este proyecto se obtuvieron del sitio web de Ocean Color, perteneciente a la NASA (Ocean Color, 2017), mientras que la información terrestre necesaria se obtuvo del sitio web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2017). El sitio web de Ocean Color proporciona la información

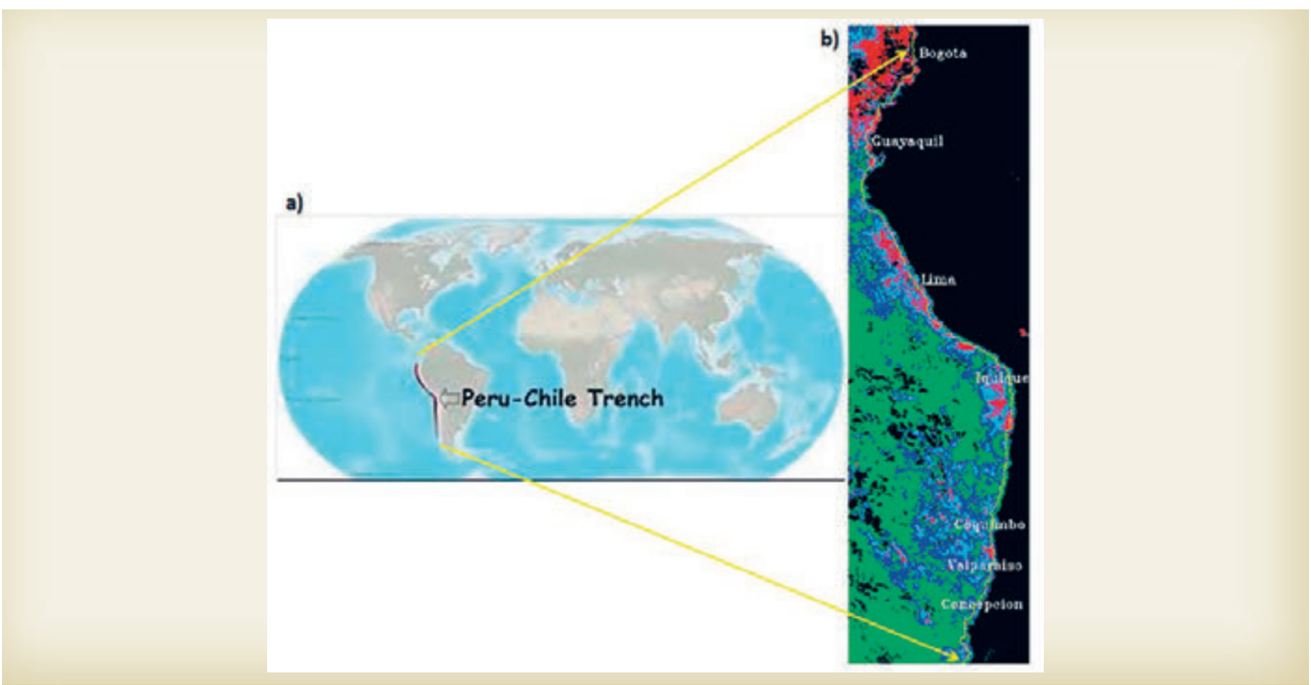


Figura 79: a) identificación y ubicación geográfica de la fosa de Perú-Chile; b) la visualización en colores falsos del mapa de temperaturas superficiales del mar de la región de interés es dada por el sensor MODIS en el satélite Terra. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 26: Listado de eventos sísmicos considerados para este trabajo. *Las coordenadas geográficas ubicaron a los epicentros con una precisión de aproximadamente 3 a 5 km (USGS, 2017). Fuente: Elaboración propia.*

Ubicación	Fecha (UTC)	Hora (UTC)	Latitud (°)	Longitud (°)	Magnitud	Profundidad (km)
En las afueras de la costa de Biobío	02/27/2010	08:01:23	-37,773	-75,048	8,8	35,0
En las afueras de la costa de Iquique	03/16/2014	23:57:58	-19,983	-70,945	6,9	28,4
En las afueras de la costa de Iquique	04/01/2014	23:46:47	-19,769	-70,769	8,2	25,0

relativa a las condiciones del mar obtenidas desde el espacio, desde la época del escáner color de zona costera (Coastal Zone Color Scanner, CZCS) hasta el presente. En relación específicamente a la situación de los estimadores de temperaturas superficial del mar, la NASA proporciona mapas con brillo diurno y nocturno de esta temperatura, desde muchas plataformas espaciales a nivel mundial, en forma de mosaicos con resoluciones temporales y espaciales diferentes. Para este trabajo, se seleccionó el sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que corresponde a un radiómetro lanzado por NASA a principios de este siglo, a bordo de las plataformas satelitales AQUA y TERRA. Proporciona estimadores de la temperatura superficial del mar, mediante: mapas compuestos de 11 m diurnos (Sea Surface Temperature, SST), de 11 m nocturnos (Nighttime Sea Surface Temperature, NSST) y de 4 m nocturnos (short-wave SST, SST4). Estos mapas compuestos están disponibles en variadas resoluciones, desde el compuesto diario, al de tres días, de ocho días, mensual, por temporada y el anual. Los mosaicos climatológicos por temporada y mensuales, también están disponibles y representan las condiciones de las temperaturas válidas a lo largo de toda la vida útil de satélite. Esto es, para AQUA desde el 8 de febrero de 2002 al presente, y para TERRA desde el 4 de febrero de 2000 al presente. Todo esto en una resolución de píxel de 4 y 9 km.

Los datos in situ correspondieron a las fechas, al tiempo de inicio del evento sísmico y a la ubicación geográfica de los epicentros, además de sus respectivas profundidades. La locación de los epicentros es entregada por el Servicio Geológico de Estados Unidos con una precisión de 3 a 5 kilómetros (tabla 26). Por consiguiente, y considerando la resolución espacial de la información in situ, se seleccionaron para este estudio mapas de la temperatura de la superficie del mar con una resolución de 4 km por píxel. Tres eventos sísmicos fueron elegidos para ser analizados en este artículo (tabla 26). El período de estudio exacto para cada evento sísmico fluctuó en función de la cobertura de nubes, pero correspondió a una o dos semanas antes y después del evento sísmico, aproximadamente.

4.4.2.2. Metodología

Se ilustra la metodología ocupada en este trabajo en la figura 80, que consistió de los siguientes pasos:

a. Selección de la región de interés: los mapas compuestos de temperatura (MCT) de la NASA están disponibles solo a escala mundial, por lo tanto, fue necesario seleccionar primero una ventana de estudio apropiada que incluyera la región de interés (figura 80a).

b. Obtención de los mapas compuestos: correspondientes a Mapas Compuestos de Temperatura (MCT) y Mapas Compuestos Climatológicos (MC), para la región de interés (figura 80a, b). Se obtuvieron mapas compuestos de temperatura, tanto diarios como de ocho días. Los mapas diarios, en general, presentaban una fuerte contaminación a causa de las nubes; los mapas de ocho días, por el contrario, casi no tenían presencia de nubes. Los mapas de temperatura climatológicos tenían una ausencia total de nubes (figura 80a, b).

c. Cálculo de los mapas con diferencia de temperaturas (ΔT): los mapas ΔT fueron calculados al sustraer los datos del mapa climatológico, de los datos del mapa que representan el período de interés: $\Delta T = MCT - CM$ (figura 80a, b). $\Delta T > 0$ identifica a los píxeles que muestran una temperatura mayor, durante el período de

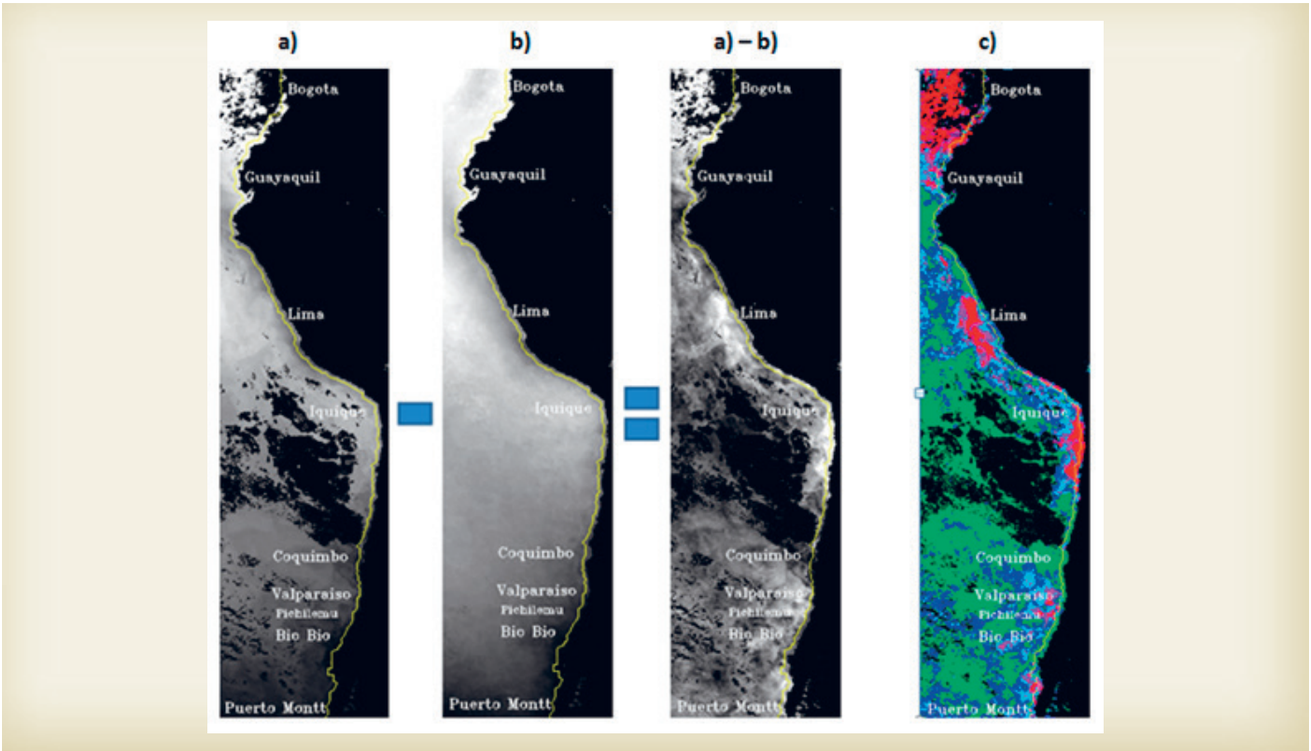


Figura 80: Procedimiento para el análisis de datos. *Fuente: Elaboración propia.*

interés, a la ocurrida a lo largo del valor climatológico; mientras que $\Delta T < 0$ identifica a los píxeles que muestran una temperatura que, durante el período de interés, fue menor a las ocurridas en todo el período climatológico.

d. Agrupamiento de los mapas ΔT: las categorías se definieron a través de una serie de umbrales de temperatura (figura 80c).

e. Trazado de transectos: se trazaron transectos ΔT a lo largo de la fosa de Perú-Chile, para luego ser guardados en la memoria del computador y posteriormente, añadir las regresiones lineales (figura 83).

Este procedimiento se aplicó a los mapas SST, NSST y SST4. La figura 80 es un ejemplo ilustrando la metodología seguida en este trabajo, donde: a) es el mosaico de temperaturas superficiales del mar válido para la semana del 18 al 25 de febrero de 2010, b) es el mosaico climatológico de las temperaturas superficiales del mar válido para el mes de febrero (2000 a 2015), a) - b) corresponde a las variaciones en la temperatura ΔT entre la semana del 18 al 25 de febrero de 2010 y los valores climatológicos válidos por el mes de febrero entre el 2000 y el 2015, y c) corresponde a la representación en colores falsos de a)-b) utilizando el siguiente rango de consulta: $\Delta T \leq 0{,}0$ °C verde agua; 0,0 °C < ΔT < 0,5 °C azul; 0,5 °C < ΔT < 1,0 °C cian; 1,0 °C < ΔT < 1,5 °C magenta; $\Delta T > 1{,}5$ °C rojo. Se ocultó el suelo y las nubes, representándolos en color negro. El contorno amarillo en los cuatro mapas indica la ubicación aproximada de la fosa de Perú-Chile.

4.4.3. Resultados

Para estudiar la relación entre la actividad sísmica y la temperatura superficial del mar a lo largo de la fosa de Perú-Chile, estuvieron disponibles tres mapas ΔT en resolución diaria, de ocho días y por temporada (SST, NSST y NSST4). La elección entre cualquiera de estos mapas ΔT y la selección de los eventos sísmicos a estudiar, fue dictada principalmente por la presencia de nubes.

4.4.3.1. Eventos sísmicos en febrero, marzo y abril de 2010

Durante los primeros seis meses de 2010 ocurrió una actividad sísmica continua e intensa a lo largo, principalmente, de la sección sur de la fosa de Perú-Chile. Esta

actividad alcanzó su máximo en un poderoso terremoto de 8,8 de magnitud que golpeó la parte central de Chile (la región del Biobío), el 27 de febrero de 2010. De hecho, el Servicio Geológico de Estados Unidos informó que el número de sismos con magnitud de 4,0 o mayor se incrementó drásticamente de cuarenta y siete durante el mes de enero a 688 en febrero, llegando a un número máximo de 871 en marzo del 2010, y luego disminuir gradualmente. Esta institución también informó que 14 sismos de magnitud 6 o mayor, ocurrieron en febrero, 12 sismos con las mismas magnitudes ocurrieron en marzo y dos sismos de similares características ocurrieron en abril de 2010, respectivamente. Por lo tanto, el mes de marzo de ese año correspondió al período con la mayor actividad sísmica (réplicas). La disponibilidad de los datos para este período se obtuvo de mapas ΔT compuestos diarios y de ocho días, no obstante, los mapas diarios tenían una fuerte presencia de nubes, por lo que los mapas ΔT compuestos de ocho días fueron los únicos que se guardaron para un análisis posterior. Específicamente, se estudió en detalle la semana previa al evento sísmico (18 al 25 de febrero de 2010), la semana del evento (26 de febrero al 4 de marzo de 2010), y la semana posterior a evento (5 al 12 de marzo de 2010) (figura 81).

La situación predominante antes del terremoto de 8,8 de magnitud del 27 de febrero, se muestra en la figura 81a; la situación durante la semana del terremoto de 8,8 de magnitud, se puede observar en la figura 81b; mientras que la situación predominante una semana después del evento sísmico, es presentada en la figura 81c. Los círculos en azul claro indican, en las tres figuras, la ubicación del sismo más poderoso ocurrido durante la semana estudiada. Una revisión de la figura 81 señala tres hechos adicionales relativos a la ubicación de los epicentros: Primero, la ubicación de los epicentros se centró principalmente en la región del Biobío en Chile, junto a la fosa de Perú-Chile; segundo, al norte de esta área, los epicentros fueron menos numerosos y principalmente situados sobre el suelo; y tercero, los epicentros se situaron predominantemente a lo largo de la fosa de Perú-Chile, pero ocasionalmente también aparecieron en la intersección de las placas de Nazca y Cocos en el norte, y la placa de Nazca y Antártica en el sur (figura 81b).

La figura 81, por lo tanto, es una comparación de los mapas que muestran la ubicación de los epicentros a lo largo de la fosa de Perú-Chile, con mapas compuestos T semanales válidos para la semana entre el 18 y el 25 de febrero

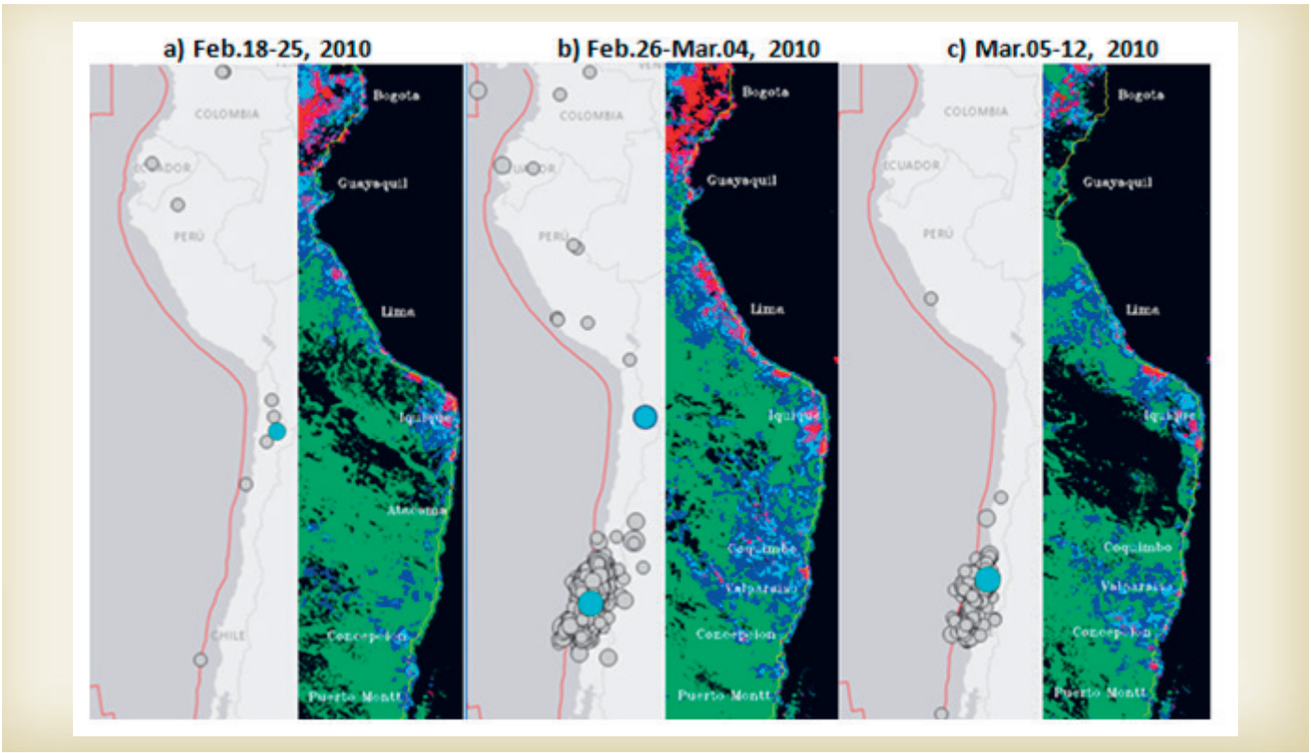


Figura 81: Actividad sísmica desde el 18 de febrero al 12 de marzo de 2010. *Fuente: Elaboración propia.*

de 2010 (figura 81a), entre el 26 de febrero y el 4 de marzo de 2010 (figura 81b), y entre el 5 y el 12 de marzo de 2010 (figura 81c). El ΔT se expresa en °C, utilizando el siguiente rango de consulta de colores: Verde agua corresponde a ΔT ≤ 0,0 °C; azul corresponde a 0,0 < ΔT < 0,5 °C; cian corresponde a 0,5 < ΔT < 1,0 °C: magenta corresponde a 1,0 < ΔT < 1,5 °C, rojo corresponde a ΔT > 1,5 °C. Se ocultaron el suelo y las nubes, representándolos en color negro. El transecto amarillo que están en los mapas compuestos ΔT semanales, muestra la ubicación aproximada de la fosa de Perú-Chile. Las líneas rojas en los mapas de los epicentros, indican los límites de la placa de Nazca. El círculo celeste en cada uno de los mapas del USGS, indica la ubicación de los sismos más fuertes en cada semana respectiva. El radio de cada círculo es un estimador de la magnitud del sismo. Los tres mapas que muestran las ubicaciones de los epicentros se obtuvieron del sitio web de dicha institución.

4.4.3.2. Eventos sísmicos de febrero, marzo y abril de 2014

Una actividad sísmica continua y muy intensa ocurrió a lo largo de la fosa de Perú-Chile, entre febrero y abril de 2014. Esta actividad alcanzó su máxima expresión con dos fuertes terremotos de magnitudes 6,7 y 8,2 de magnitud, que golpearon la región de Iquique en el norte de Chile el 16 de marzo y el 1 de abril de 2014, respectivamente. De manera similar a la situación descrita en el ejemplo previo, el número de eventos sísmicos se incrementó drásticamente dos semanas antes de estos dos terremotos (USGS, 2017). Hubo una fuerte presencia de nubes durante gran parte de febrero y durante todo el mes de abril y mayo de 2014, sin embargo, fue posible visualizar una serie cronológica de ΔT diario desde el 22 de febrero al 2 de abril de 2010. Esta serie cronológica muestra claramente un aumento en ΔT los días previos a ambos eventos (15 y 31 de marzo), sumado a una rápida reducción de ΔT durante los días posteriores (figura 82). La presencia de nubes no permitió visualizar la situación después del 1 de abril de 2014.

La figura 82 incluye mapas compuestos ΔT diarios antes y después de los dos principales eventos sísmicos ocurridos en las afueras de la costa de Iquique el 16 de marzo y el 1 de abril de 2014. El ΔT se expresa en °C, utilizando el siguiente rango de consulta de colores: azul fuerte corresponde ΔT ≤ -0,5 °C; azul claro corresponde a -0,0 < ΔT < -0,5 °C; negro corresponde a ΔT = 0 °C; rojo claro corresponde a 0,0 < ΔT < 0,5 °C; y rojo fuerte corresponde a ΔT ≥ 0,5 °C.

4.4.3.3. Transectos de ΔT

Para cuantificar la variación de los grados que presenta la tendencia al descenso de Norte a Sur en los valores ΔT observados a lo largo de la fosa de Perú-Chile desde el 18 de febrero al 12 de marzo de 2010, se obtuvieron los valores ΔT junto a tres transectos que representan a la fosa de Perú-Chile en la figura 81 y las regresiones lineares que se les añadieron (figura 83). Durante el período previo y hasta el 27 de febrero de 2010, se identificó una tendencia hacia pendientes negativas e intercepciones positivas (líneas rojas y amarillas en la figura 83). En la semana inmediatamente posterior al evento sísmico, tanto la pendiente como la intercepción llegaron a cero (línea

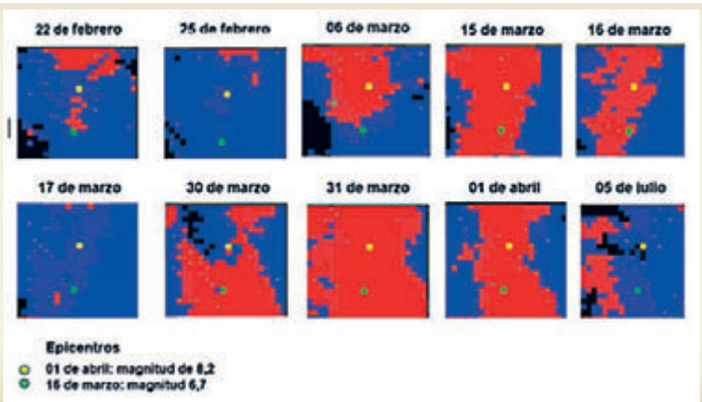


Figura 82: Actividad sísmica desde el 22 de febrero al 1 de abril de 2014. *Fuente: Elaboración propia.*

negra en la figura 83). Los valores de la pendiente y la intercepción confirmaron de esta manera que existe tal tendencia.

4.4.4. Análisis y conclusiones

El análisis utilizado en este trabajo se basa en el supuesto de que cualquier incremento en la temperatura del mar durante un evento sísmico, será detectado al restar los datos del mapa climatológico relevante de los datos del mapa de temperatura respectivo. Esto es efectivamente el caso, tanto el mapa ΔT diario como el semanal representados en las figuras 81 y 82, claramente muestran valores ΔT positivos previos a un evento sísmico grande. Específicamente, los mapas ΔT diarios confirman los hallazgos reportados por Tronin et al. (2002), en relación con un incremento repentino en la temperatura del mar previo a un evento sísmico, seguido por un rápido descenso en la temperatura inmediatamente después de dicho evento (figura 82). También, la utilización de mapas compuestos de ocho días y la comparación entre los datos in situ y los mapas ΔT, permitieron descubrir otras características de la relación entre las anomalías en la temperatura del mar y la actividad sísmica. Los datos in situ mostraron que después del terremoto con magnitud de 8,8 (27 de febrero de 2010) ocurrió un notable aumento en la actividad sísmica (réplicas). Por ejemplo, 16 réplicas de magnitud 6 o más ocurrieron solo en la región del Biobío, exceptuando un terremoto de magnitud 6,3 cuyo epicentro fue en el norte de Chile (figura 82b). En otros términos, el número de eventos sísmicos, su magnitud y la distribución de densidad espacial, se incrementaron de norte a sur. Los valores ΔT tuvieron, por otro lado, un comportamiento muy opuesto. Las masas de agua en la costa colombiana, al sur de Panamá, presentaron valores ΔT máximos del orden de 5,0 °C (figura 82b). Por su parte, al norte de Lima existieron valores ΔT máximos de alrededor de 2,5 °C; al sur de Lima y hasta Iquique, se alcanzaron valores ΔT máximos de alrededor 2,0 °C; mientras que, al sur de Iquique los valores ΔT máximos fueron de alrededor de 1,5 a 2,0 °C. Por consiguiente, los valores ΔT presentaron una tendencia definitiva hacia valores más bajos en la dirección norte a sur. Se debe tener presente que los valores ΔT presentaron una estructura irregular y la superficie (número de píxeles) que estaba cubierta por irregularidades, que representaban valores ΔT sobre 1 °C, también disminuyó en la dirección norte a sur. En resumen, los valores ΔT presentaron una clara tendencia: tanto las superficies cubiertas por irregularidades representando valores ΔT sobre 1 °C, como sus valores ΔT, disminuyeron en dirección norte a sur.

Este trabajo permitió también abordar la pregunta sobre una posible relación entre la magnitud y la ubicación del epicentro con los valores ΔT. El terremoto de magnitud 8,8 que ocurrió en la región del Biobío en el año 2010 no presentó una obvia relación entre estas variables, ya que los valores ΔT más altos se encontraron al norte de Iquique. Como parte de este trabajo, pero no mostrado en el mismo, se estudiaron dos terremotos con magnitud menor a 5 y cuyos epicentros

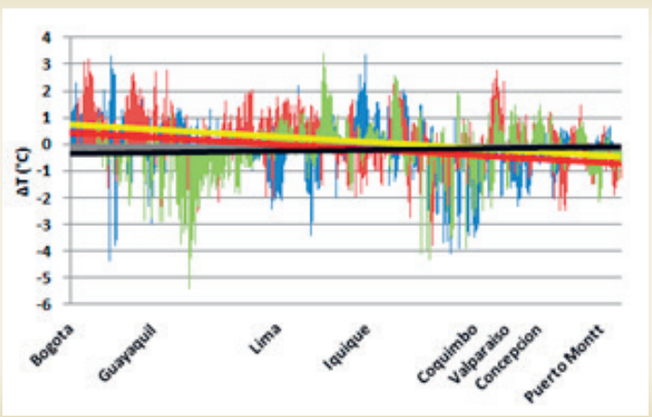


Figura 83: Regresión Linear (RL) añadida a los transectos a lo largo de la fosa de Perú-Chile, 18 al 25 de febrero = ΔT en azul, RL en rojo; 26 de febrero - 4 de marzo = ΔT en café, RL en amarillo; 5 al 12 de marzo = ΔT en verde, RL en negro, los valores ΔT están expresados en °C. *Fuente: Elaboración propia.*

estuvieron entre las regiones de Coquimbo y Valparaíso, siguiendo la misma metodología presentada en este artículo. No se observaron apreciables valores positivos en la masa de agua entre Coquimbo y Valparaíso, pero definitivamente se detectaron valores positivos en las masas de agua localizadas en el norte de Iquique. Por lo tanto, en este momento sería prematuro llegar a conclusiones definitivas. Este es una interrogante que aún requiere más trabajo.

4.4.5. Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud al Servicio Geológico de Estados Unidos, ubicado en Reston, VA 20192, en Estados Unidos, y al Grupo de Procesamiento de la Biología Oceánica del Centro de Vuelos Espacial Goddard perteneciente a la NASA, ubicado en Greenbelt, MD 20771, también de Estados Unidos, por entregar los datos satelitales e información in situ requeridos para este trabajo.







SECCIÓN 5

ESTUDIO DE DESASTRES AMBIENTALES

“La idea de que los desastres representan ‘problemas no resueltos del desarrollo’ se inserta dentro de un paradigma social en Latinoamérica, cuyas bases fueron asentadas originalmente por científicos europeos y norteamericanos durante los años 70 y se contrapone al llamado paradigma ‘fisicalista’, basado en el trabajo de las Ciencias Básicas, que ha incitado, consciente o inconscientemente, a la idea de que los desastres son productos de extremos de la naturaleza y que hacen impacto sobre una sociedad neutra o inocente”.

Ania González Mora (Humanidades médicas)

SECCIÓN V

Estudio de desastres ambientales

Esta sección trata de temas relacionados con el estudio de los desastres ambientales. En el primer capítulo se revisan las principales aplicaciones de la percepción remota en incendios forestales. Inicialmente, se exponen algunas técnicas para evaluar las condiciones previas a un incendio tales como el combustible vegetal que puede ser quemado durante un incendio. Luego, se describen algunos enfoques útiles para la detección de incendios forestales activos en tiempo real, tarea fundamental para evitar daños a mayor escala y en la gestión del control. Además, se revisan los métodos para evaluar el área quemada posincendio utilizando información espectral o térmica y se presentan productos satelitales para el monitoreo global. Finalmente, se entregan antecedentes de los incendios forestales en Chile con especial mención a los mega incendios del verano 2016-2017.

El segundo capítulo trata de un trabajo desarrollado en un Bosque de Alto Valor de Conservación (BAVC) dominado por Ruil, en la cordillera de la costa maulina, comuna de Empedrado, con el objetivo de evaluar la severidad de daño por incendios forestales. Durante la temporada estival de 2017, la Región del Maule fue afectada por un incendio que devastó bosques templados, matorrales esclerófilos, espinales, praderas y plantaciones forestales. Uno de los bosques afectados es el dominado por la especie endémica Nothofagus alessandrii (Ruil), declarada en peligro de extinción y Monumento natural el año 1995. Para la investigación, se utilizaron herramientas de teledetección para el análisis espectral de imágenes satelitales Landsat-8 OLI y la aplicación de los índices Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) y Relative Difference Normalized Burn Ratio (RdNBR). El resultado fue un mapa de severidad de daño, cuya cobertura se contrastó con una metodología de campo (Composite Burn Index: CBI), a través de información obtenida en 32 parcelas circulares de 30 metros de diámetro. La validación de los índices indica que el RdNBR tiene una mayor concordancia con los datos de campo, alcanzando una fiabilidad global de 70% (Kappa = 0,46); mientras que el dNBR solo alcanza el 60% de fiabilidad (Kappa = 0,32). El análisis de severidad indica que 15,66 ha tuvieron daño bajo (11,45%); 57,68 ha tuvieron daño medio (42,24%) y 63,36 ha tuvieron daño alto (46,31%). Estos resultados muestran la necesidad de probar diversas herramientas para medir el grado de severidad del daño por incendios, a objeto de alcanzar mayores niveles de confiabilidad, en particular para la planificación de procesos de rehabilitación y restauración de especies amenazadas o en peligro de extinción, como es el caso de Nothofagus alessandrii (Ruil).

El capítulo 3 trata de los análisis de susceptibilidad de remoción en masa basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos cuantitativos. Estos han sido ampliamente usados para la identificación de zonas de peligro debido a las ventajas que ofrece, como la rapidez, certeza, costos y cobertura territorial. Tanto las técnicas probabilísticas como heurísticas permiten llegar a resultados de gran calidad. Sin embargo, ambas aproximaciones presentan importantes diferencias. El propósito de este trabajo es comparar los modelos probabilísticos no lineales (GAM) y los métodos de evaluación multicriterio (EMC) usando técnicas SIG. Se concluye que ambos enfoques metodológicos son de gran ayuda para la planificación territorial y la gestión de riesgos.

En el cuarto capítulo, la severidad del fuego se ha estimado a partir de dos modelos de simulación PROSPECT y GeoSail. El modelo desarrollado se ha aplicado a imágenes de cinco distintos sensores espaciales (SPOT HR, Landsat TM, AWIFS, MERIS y MODIS), sobre la misma área de estudio (el incendio de Riba de Saelices, 2005), con el fin de comparar su precisión en la estimación de la severidad. La validación se ha realizado comparando los valores de severidad simu-

lados para cada sensor, con los estimados en campo en 81 parcelas. La severidad del fuego es un elemento clave para la estimación de los efectos a medio y largo plazo de los incendios forestales y consecuentemente para la previsión de la evolución ecológica de las áreas quemadas. Generalmente la severidad se evalúa en campo (a corto o medio plazo) o mediante ajustes empíricos a partir de imágenes de satélite, apoyados en parcelas de campo tomadas justo después del incendio. Pero, debido la escasa representatividad espacial del primer método y a la difícil generalización del segundo, se ha propuesto como alternativa el empleo de modelos de simulación (RTM). Los RTM estiman la reflectividad a partir de asunciones físicas y resultan ser más precisos que los métodos empíricos tradicionales. Los resultados obtenidos en la investigación muestran que el sensor Landsat TM es el que presenta el menor error en la estimación (RMSE = 0,2) y su precisión es homogénea en todo el rango de GeoCBI analizado.

En el capítulo 5, se habla de la vanguardia de los estudios de la percepción remota hiperespectral y de radar en Brasil para el mapeo de la sabana y la correspondiente caracterización de usos terrestres y cubiertas terrestres (LULC). Las sabanas en Brasil son unos de los epicentros con la mayor biodiversidad del mundo, pero el mapear la vegetación aún es un desafío debido a las gradientes, desde pastizales a zonas boscosas, y a la similitud espectral entre algunas fisionomías. Esto es lo crítico en el contacto con otras biomasas, donde LULC necesitan ser discriminados uno del otro. En el capítulo se presentan dos casos de estudio. El primero, datos de Hyperion/EO-1 son utilizados para discriminar fisonomías de sabanas en dos áreas protegidas del centro de Brasil. En el segundo caso, se combinó información del generador de imágenes de vigilancia terrestre (OLI)/Landsat-8 para mapear LULC en las zonas de transición entre las sabanas y las selvas tropicales al norte de Brasil. Los resultados mostraron ganancias de hasta 8% en todas las clasificaciones de precisión por el estudio completo de áreas y clasificadores, que resulta de la combinación diferenciada de las métricas hiperespectrales (reflectancia, índices de vegetación, datos de derivados de primer orden y parámetros de banda de absorción) o desde la integración de los datos de PALSAR y OLI (amplitud y reflectancia de HH y HV).



“The idea that disasters represent ‘unsolved problems of development’ is inserted within a social paradigm in Latin America, whose bases were originally settled by european and north american scientists during the 70s and is opposed to the so-called ‘physicalist’ paradigm, based on the work of the Basic Sciences, which has incited, consciously or unconsciously, to the idea that disasters are products of extremes of nature and that make an impact on a neutral or innocent society”.

Ania González Mora (Humanidades médicas)

SECTION V

Study of environmental disasters

This section deals with issues related to the study of environmental disasters. The first chapter reviews the main applications of remote sensing in forest fires. Initially, some techniques are exposed to evaluate pre-fire conditions such as vegetable fuel that can be burned during a fire. Then, some useful approaches for the detection of actives forest fires in real time are described, a fundamental task to reduce damages on larger scales and in the controlling tasks. In adittion, the methods to evaluate the post-fire burned area using spectral or thermal information are reviewed and satellite products are presented for global monitoring. Finally, we provide some antecedents of the forest fires in Chile, with special mention to the mega fires of 2016-2017 summer.

The second chapter deals with a work developed in a forest of high conservation value dominated by Ruil, in the mountain range of the Mauline coast, commune of Empedrado, with the objective of evaluating the severity of damage by forest fires. During summer season of 2017 the Maule Region was affected by a fire that devastated temperate forests, sclerophyllous shrub, spurs, meadows and forest plantations. One of the affected forests is the one dominated by the endemic species Nothofagus alessandrii (Ruil), declared in danger of extinction and natural monument in 1995, For this research, Remote sensing tools were used for the spectral analysis of Lansadt 8 OLI satellite images and the application of the Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) and Relative Difference Normalized Burn Ratio (RdNBR). The result was a map of damage severity, whose coverage was contrasted with a field methodology (Composite Burn Index: CBI), through information obtained from 32 circular plots of 30 meters in diameter. The validation of the indices indicates that RdNBR has a greater concordance with the field data, reaching an overall reliability of 70% (Kappa = 0,46); while the dNBR only reaches 60% of reliability (Kappa = 0,32). The severity analysis indicates that 15,66 ha had low damage (11,45%); 57,68 ha had medium damage (42,24%) and 63,36 ha had high damage (46,31%). These results show the need to test various tools to measure the degree of severity of fire damage, in order to achieve higher levels of reliability, particularly for the planning of rehabilitation processes and restoration of threatened or endangered species, as is the case of Nothofagus alessandrii (Ruil).

Chapter 3 deals with landslide susceptibility analyzes based on Geographic Information Systems (GIS) and quantitative methods. These have been widely used for the identification of hazardous areas due to advantages such as their quickness, accuracy, low cost and spatial coverage. Both probabilistic and heuristic techniques are capable of producing high-quality results, although both present important differences. The purpose of this study is to compare nonlinear probabilistic methods (the GAM) and multicriteria evaluation methods (MCE) using GIS techniques. It is concluded that both approaches are of great utility in spatial planning applications and risk management.

In chapter 4, burn severity has been estimated from two simulation models PROSPECT and GeoSail. The model developed was applied to images of five different spatial sensors (SPOT HR, Landsat TM, AWIFS, MERIS and MODIS), on the same area of study (the fire of Riba de Saelices, 2005), in order to compare its accuracy in the estimation of severity. The validation was performed by comparing the simulated burn severity values for each sensor, with the field estimates in 81 plots. Burn severity is a key element for the estimation of the medium- and long-term effects of forest fires and consequently for the forecast of the ecological evolution of the burned areas. It is usually assessed in the field (short- or medium-term)

or by empirical fitting between satellite images and post-fire field plots. However, due to the scarce spatial representativeness of the first method and the difficult generalization of the second method, the use of simulation models (RTM) has been proposed as an alternative. RTMs estimate the reflectivity from physical assumptions and prove to be more accurate than traditional empirical methods. The results obtained in the investigation show that the Landsat TM sensor has the lowest error in the estimation (RMSE = 0,2) and its accuracy is homogeneous throughout the analyzed GeoCBI range.

Chapter 5 discuss the state-of-the art of the hyperspectral and radar Remote sensing studies in Brazil for savanna mapping and related land use and land cover (LULC) characterization. The savannas in Brazil are one of the world's hotspots of biodiversity, but vegetation mapping is still challenging due to the gradient, from grasslands to woodlands, and to the spectral similarity between some physiognomies. This is critical in the contact with other biomes where other LULC classes need to be discriminated from each other. In the chapter, two case studies are presented. In the first one, Hyperion/EO-1 data are used to discriminate savanna physiognomies in two protected areas from central Brazil. In the second, data from the Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR-2)/ALOS-2 is combined with those from the Operational Land Imager (OLI)/Landsat-8 to map LULC in the transition zone between savannas and tropical forests in northern Brazil. Results showed gains of up to 8% in overall classification accuracy for the different study areas and classifiers, resultant from the combination of distinct hyperspectral metrics (reflectance, vegetation indices, first-order derivative data and absorption band parameters) or from the integration of PALSAR and OLI data (HH and HV amplitude and reflectance).

5.1 Percepción remota de incendios forestales

Jaime Hernández, María Paz Acuña, Patricio Corvalán

Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de Naturaleza, Universidad de Chile, Chile

5.1.1. Introducción

Los incendios forestales no solo afectan a las comunidades rurales o periurbanas presentes en las áreas quemadas, sino que también pueden tener importantes efectos negativos en el funcionamiento de los ecosistemas (Moritz et al., 2014) (ver figura 84). Desde el punto de vista socioecológico, los análisis deben reconocer explícitamente el vínculo de los seres humanos y sus entornos naturales para desarrollar un enfoque de desarrollo sostenible que considere a los incendios forestales como parte activa del ecosistema (Berkes y Folke, 1998). El rol del fuego varía según el tipo de ecosistema que sea perturbado. En Norteamérica y Australia, los incendios juegan un papel importante en la mantención de algunas características del hábitat y para provisión de varios servicios ecosistémicos. En zonas mediterráneas, los paisajes característicos mezclan matorrales, bosques, praderas, zonas de cultivos y áreas urbanizadas, entre otras coberturas menores. Esta diversidad, sumada a su distribución heterogénea, elevan la capacidad de resiliencia de estos paisajes ante perturbaciones mayores como son los incendios forestales (Scheffer et al., 2001).

Los efectos del fuego pueden ser evaluados en un amplio rango de escalas, desde estudios globales hasta escalas muy locales. La teledetección, especialmente la satelital, es una de las fuentes de datos más usadas para la evaluación preincendio, detección de incendios activos y evaluación posincendio (Xiao-rul et al., 2005). En esta revisión se presenta el uso de sensores remotos en el dominio espectral óptico y termal, dejando fuera las aplicaciones de sensores activos como LiDAR y radar SAR (Synthetic Aperture Radar).

5.1.2. Evaluación preincendio

Existe un conjunto de condiciones previas a un incendio que pueden ser evaluadas a través de percepción remota. Entre las más comunes está la evaluación del combustible vegetal, o biomasa, que podría ser quemado durante un incendio.

Para ello se han usado imágenes del rango óptico o de radar de diferentes resoluciones espaciales (Chuvieco et al.,



Figura 84: Plantación de pino insigne quemada en el megaincendio de Las Máquinas, comuna de Constitución, en enero de 2017.
Fuente: Elaboración propia.

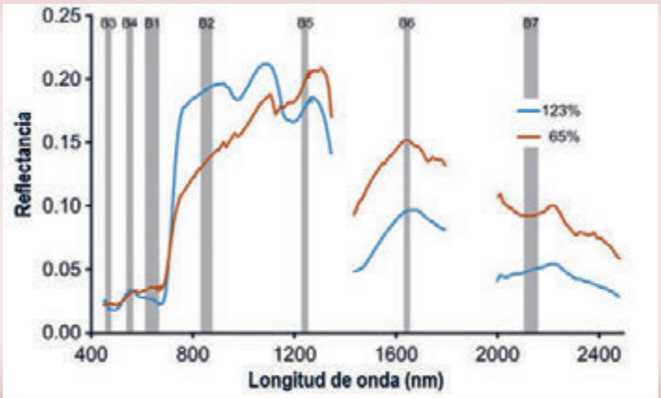


Figura 85: Reflectancia espectral para dos tipos de formaciones vegetales con diferentes contenidos de humedad (65% y 123%). *Las franjas grises muestran las bandas espectrales de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Fuente: Adaptado de Yebra et al. (2013).*

2002; Crabtree et al., 2006). La aproximación metodológica general es usar mapas de tipos vegetales o cobertura de suelos (land cover), a partir de los cuales se obtienen atributos adicionales. Es usual estimar el contenido de humedad del combustible, correspondiendo a un dato de entrada necesario para varios modelos de predicción del comportamiento del incendio, debido a que explica en gran medida las condiciones de ignición y dispersión del fuego. En particular, es de mayor interés estimar el contenido de humedad de la vegetación viva (CHVV), debido a que responde a las variaciones climáticas de largo plazo y a las condiciones de sequía (Yebra et al., 2013). La relación entre el CHVV y el comportamiento espectral de la vegetación, se puede observar en los ejemplos de la figura 85.

Las primeras imágenes usadas para estimar las condiciones de humedad del combustible fueron del sensor NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer). Específicamente, se utilizó el índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) como indicador de sequía y subsecuentemente, como indicador de la humedad disponible en las plantas (Paltridge y Barber, 1988). Otros usos de NDVI como indicador de estrés hídrico y peligro de incendios han sido reportados por varios estudios (Burgan et al., 1998; Kogan, 2001). Con el tiempo, se han incorporado otros sensores (por ejemplo, MODIS, Landsat, Sentinel) y se han desarrollado más métodos para estimar el CHVV, los que pueden agruparse en dos grandes categorías:

a. Métodos estadísticos (Caccamo et al., 2012, García et al., 2008): corresponden a modelos empíricos, en los cuales se utiliza la correlación del CHVV (%) con bandas o índices espectrales para, a través de algoritmos de regresión estadística, obtener una expresión matemática que sirva para estimar el CHVV (figura 86).

b. Basados en modelos biofísicos (Colombo et al., 2008; Yebra y Chuvieco, 2009): esta aproximación integra modelos de transferencia radiativa, como PROSPECT (Jacquemoud y Baret, 1990) o SAILH (Verhoef, 1984), con parámetros biofísicos de la vegetación y condiciones de observación para estimar el comportamiento espectral de la vegetación con diferentes % de CHVV. Una vez obtenido un modelo que satisfaga los requerimientos de precisión y exactitud, se puede invertir para estimar los parámetros biofísicos, conocido el comportamiento espectral de la vegetación y la geometría de observación del sensor.

Adicionalmente, es posible usar bandas espectrales termales para estimar la temperatura superficial en lugares con vegetación (Vidal et al., 1994). Existen dos aproximaciones principales para ello, la ecuación de transferencia radiativa (RTE) y la técnica llamada split window, que son expuestas en detalle por Dash et al. (2001) y Weng (2009). Una vez estimada la temperatura superficial, se puede usar para relacionar la evapotranspiración de la cobertura vegetal (LE), a través de la ecuación de balance de energía, con su evapotranspiración potencial (Vidal et al., 1994).

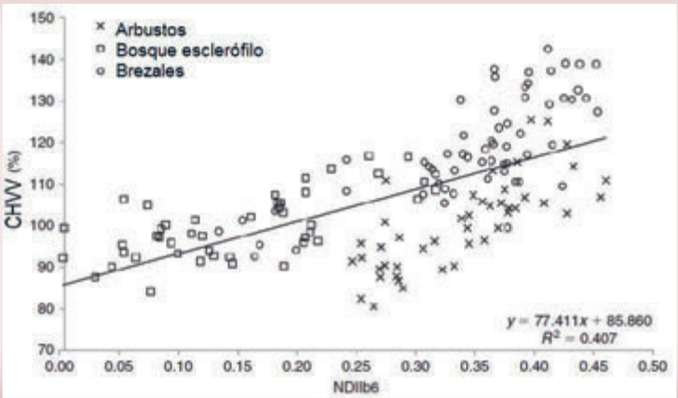


Figura 86: Diagrama de dispersión entre el CHVV (%) y el índice espectral NDIIb6 (MODIS: b2-b6/b2+b6) para tres tipos de vegetación (n = 150). *Fuente: Adaptado de Caccamo et al. (2012).*

5.1.3. Detección de incendios activos

La detección de incendios forestales en tiempo real es una necesidad para evitar daños a mayor escala y poder gestionar los recursos necesarios para su control. Para ello, desde el punto de vista de los sensores remotos, se conjugan dos características de los datos de percepción remota que tienden a relacionarse en forma inversa: la resolución espacial (o tamaño del píxel) con la resolución temporal (o tiempo de revisita del sensor al mismo lugar).

Los sensores con mayor resolución temporal, como MODIS y NOAA-AVHRR (cuatro visitas por día), tienen píxeles de 250 y 1100 m, respectivamente. En cambio, sensores con alta resolución espacial, como WorlView-3 (0,31-4,1 m) o QuickBird (1,5 m), tienen mayores tiempos de revisita (uno-cuatro días). La tabla 27 presenta un resumen de satélites relevantes en la detección y monitoreo de incendios forestales.

Tabla 27: Sensores relevantes en la detección y monitoreo de incendios. *Fuente: Modificado de Lentile et al. (2016).*

Sensor	Resolución	
	Temporal (días)	Espacial (m)
AATSR	2	1000
EO-1 ALI	16	10-9
Reflection Radiometer	16	15-9
ATSR	3	1000
AVHRR	0,25	1100
HSRS	16	370
Hyperion	3	30
IKONOS	22	1-4
IRS-1 A, B	24	3,6-7,2
IRS-1 B, C	16	23-188
Landsat 5,7	4	15-90
MODIS	1,25	250-1000
Quickbird	1-5	1-4
VEGETATION	1	1150
WorldView-3	1	0,31-4,1

Tabla 28: Bandas de MODIS usadas en el algoritmo de Giglio et al, (2003). *Fuente: Elaboración propia.*

Banda	Longitud de onda (µm)	Propósito (detección)
1	0,65	Resplandor solar y costero
2	0,86	Brillo superficial, resplandor solar y costero, máscara de nubes
7	2,10	Resplandor solar y costero
21	4,00	Detección de incendios activos (high-range)
22	4,00	Detección de incendios activos (low-range)
31	11,00	Detección de incendios activos y máscara de nubes
32	12,00	Máscara de nubes

Los incendios activos pueden ser detectados usando las bandas termales disponibles en varios sensores satelitales, tales como: Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Along Track Scanning Radiometer (ATSR), o el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS); todos de resolución espacial gruesa. La región espectral termal característica es aquella que tiene longitudes de onda entre 8 y 14 µm (Chuvieco, 2010), aunque también es usada la ventana del infrarrojo medio, entre 3 y 5 µm. La emisión de energía que provoca un incendio es muy superior a la emisión del paisaje circundante, lo que provoca un contraste que es detectable por los sensores termales, incluso cuando el incendio no abarca grandes superficies. Robinson (1991) indica que es posible detectar un incendio cuando abarca solo una fracción del píxel (< 0,01%). Esto quiere decir que, si el píxel es de 1 km^2 (~AVHRR), se pueden detectar incendios mayores a 1 hectárea. Existen varias aproximaciones metodológicas para la detección de incendios activos entre las cuales, como caso representativo, se puede mencionar el algoritmo desarrollado para MODIS.

Kaufman et al. (1998) desarrollaron el algoritmo inicial para MODIS, que posteriormente fue mejorado por Giglio et al. (2003). El producto final detecta incendios en píxeles de 1 km^2 que están activos al momento de la adquisición de la imagen, aplicando un algoritmo contextual bajo condiciones libres de nubes. En primer lugar, se aplican valores umbrales a los niveles digitales de la banda infrarroja media e infrarroja termal observadas y, en segundo lugar, se descartan los falsos incendios al comparar los niveles digitales con el promedio de la vecindad. Los detalles se pueden revisar en el trabajo de Giglio et al. (2003). En la tabla 28 se presentan las bandas MODIS usadas en el algoritmo y su utilidad.

Otros autores han desarrollado técnicas adicionales para estimar otros atributos de los fuegos activos. En la tabla 29 se presenta un resumen de variables descriptivas de incendios activos posibles de obtener usando percepción remota.

La figura 87 muestra en tonos rosados una máscara de incendios activos (píxel de 1 km^2), entre el 25 de enero y el 2 de febrero del 2017, obtenida del producto MOD14A1 (Giglio y Justice, 2015), usando la banda termal (11 µm de longitud de onda).

5.1.4. Evaluación posincendio

La gran mayoría de los métodos para evaluar el área quemada posincendio, utiliza información espectral o propiedades térmicas derivadas de ellas. En la práctica, se ha desarrollado un conjunto de índices que permiten cuantificar el área y algunas características adicionales, como la severidad del daño.

Tabla 29: Selección de ejemplos de variables descriptivas de incendios activos. *Fuente: Adaptado de Lentile et al. (2006).*

Variable	Fuente
Largo y alto de llama	Hely et al., 2003; Stocks et al., 1996
Temperatura	Hely et al., 2003; MacNaughton et al., 1998
Tasa de dispersión	Smith et al., 2005; Stocks et al., 1996
Intensidad	Smith y Wooster, 2005

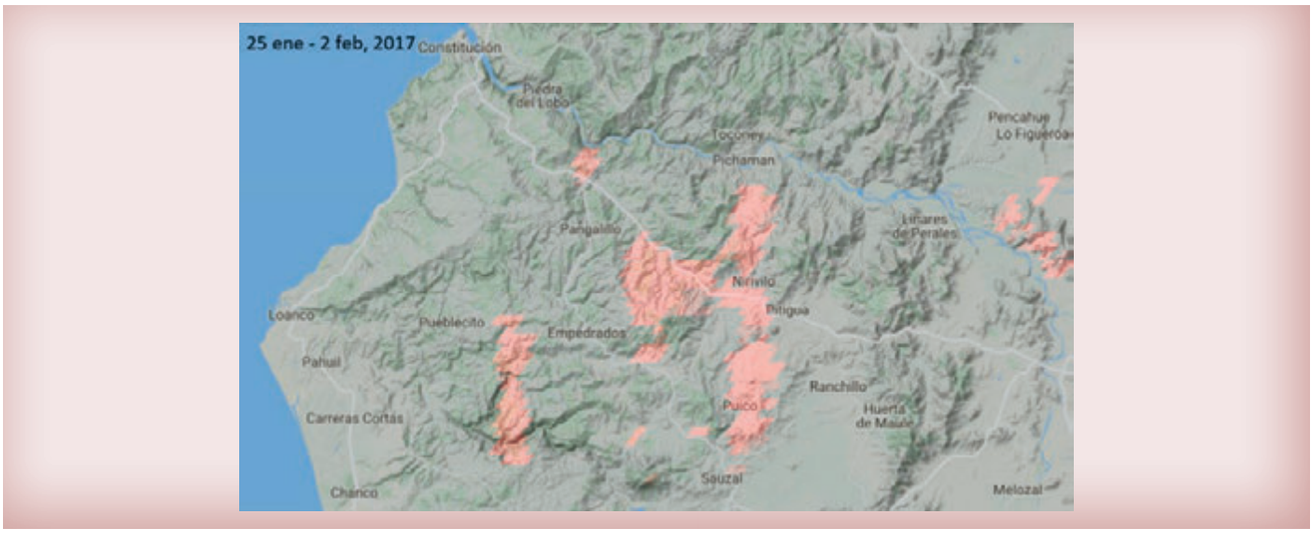


Figura 87: Máscara de incendios activos entre 25 de enero y 2 de febrero (2017) de la zona del Constitución-Empedrado (producto MOD14A1 con resolución espacial de 1 km²). *Fuente: Elaboración propia.*

a. **Índice de área quemada (Burn Area Index, BAI):** este índice (fórmula 31) resalta la superficie quemada en las bandas rojas (R) y en la infrarroja cercana (NIR), destacando la señal proveniente del carbón remanente en la imagen posfuego (Chuvieco et al., 2002; Martin, 1998). Los datos deben estar calibrados radiométricamente antes de calcular el índice, el cual se calcula a partir de la distancia espectral de cada píxel a un punto espectral de referencia.

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - R)^2 + (0.06 - NIR)^2} \quad (31)$$

b. **Razón de quema normalizada (Normalized Burn Ratio, NBR):** este índice (fórmula 32) se usa para destacar áreas quemadas mayores a 200 hectáreas (López-García y Caselles, 1991; Key y Benson, 2005). Su fórmula es similar a índice NDVI, excepto que utiliza longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR).

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (32)$$

Para obtener información de la severidad del fuego se calcula la diferencia para dos fechas, antes (a) y después del fuego (d): NBR a - NBR d. Los valores obtenidos se relacionan directamente con la severidad, siendo los píxeles más oscuros los más afectados.

c. **Razón de quema termal normalizada 1 (Normalized Burn Ratio Thermal 1, NBRT1):** este índice (fórmula 33) agrega una banda termal (BT) para mejorar el desempeño del índice NBR. Con ello, logra una mejor separación entre el área quemada y no quemada (Holden et al., 2005). Antes de su cálculo, la banda térmica debe calibrarse a temperaturas en grados Kelvin y las bandas del rango óptico, infrarrojo cercano (NIR: 0,76-0,9 µm) y de onda corta (SWIR: 2,08-2,35 µm), deben calibrarse a reflectancia al tope de la atmósfera (top-of-atmosphere, TOA).

$$NBRT1 = \frac{(NIR + SWIR(\frac{BT}{1000}))}{(NIR - SWIR(\frac{BT}{1000}))} \quad (33)$$

5.1.5. Productos satelitales para el monitoreo global

Las emisiones de carbono provocadas por los incendios forestales han sido señaladas como uno de los impulsores del cambio climático reciente. En la década de los 80 se iniciaron los primeros esfuerzos a escala global para cuantificar el impacto de estas perturbaciones. Desde entonces, los sensores remotos han avanzado mucho, por lo que hoy se pueden encontrar varios productos derivados de imágenes satelitales útiles en el monitoreo y evaluación de áreas quemadas a escala global (Mouillot et al., 2014). La tabla 30 presenta un resumen de los productos globales.

Tabla 30: Resumen de los productos satelitales para la evaluación de áreas quemadas a escala global, Frec = frecuencia temporal (M = mensual, S = semanal, D = diaria). *Fuente: Modificado de Mouillot et al. (2014).*

Producto	Vida Útil	Satélite	Píxel	Frec.	Propósito	Fuente
GFED3	1996-2012	MODIS 500 M TRIM/VIRS ATSR	0,5° * 0,5°	M	Modelos atmosféricos y bio-geoquímicos	Giglio y Justice (2015)
MCD45A1	2000-2009	MODIS	500 m * 500 m	M	General	Roy et al. (2008)
L3JRC	2000-2007	SPOT VEGETATION	1 km	D	General	Tansey et al. (2008a,b)
Globcarbon	1998-2007	SPOT VEGETATION ATSR-2, AATSR	1 km 0,25° - 0,5°	M	Ciclo de carbón y modelos climáticos	Plummer et al. (2006)
GBS	1982-1999	NOAA-AVHRR GAC 8 km DATA	8 km	S	Datos globales de incendios	Carmona-Moreno et al. (2005)
GLOBSCAR	>2000	ERS2-ATSR2	1 km	M	Mapas incrementales de incendios	Simon et al. (2004)
GBA2000	2000	SPOT VEGETATION	1 km	M	General	Tansey et al. (2004)

5.1.6. El caso chileno

Chile, producto de la expansión de las plantaciones forestales y su industria asociada, cuenta a la fecha con 2.400.000 ha de plantaciones (año 2017), distribuidas principalmente a lo largo de la costa y la precordillera andina, entre las regiones de Valparaíso y de Los Ríos (INFOR, 2016). Esta vasta amplitud territorial, sumada a las 4.300.000 ha de bosque nativo existente en la misma zona, genera la necesidad de una vigilancia permanente de incendios forestales. De acuerdo con Hernández et al. (2017), las principales variables que determinan la frecuencia y magnitud de los incendios forestales varían con el tamaño de este, siendo siempre la distancia a centros urbanos la que está presente en la principal explicación del evento y, en segundo lugar, el tipo de cobertura. De acuerdo con las estadísticas de CONAF (2017a), entre la temporada 2003 y 2016 la cifra total de incendios forestales alcanzó un total de 6.120 incendios por año, siendo las principales causas las accidentales con 55,5%, y las intencionales con 32%. La tendencia histórica es creciente tanto en número como en superficie afectada, alcanzando esta a 59.600 ha año^{-1}. Durante la temporada 2016-2017 se produjo un megaincendio forestal en la zona centro-norte de la distribución de las plantaciones, que afectó aproximadamente 467.000 ha (Cavieres, 2017). Independientemente del impacto del cambio climático o la intencionalidad del fuego en la ocurrencia del megaincendio (Hernández et al., 2017), es necesario extremar la vigilancia, por lo que la percepción remota es la herramienta genérica más adecuada por escala, tiempo y nivel de detalles que entrega.

La figura 88 muestra la frecuencia de incendios en la zona central del país y su tamaño en hectáreas. La figura 89 muestra un análisis de densidad de los mismos datos, realizado con el paquete spatstat de R-project (Baddely et al., 2016), para visualizar el patrón espacial de: i) frecuencia, que tiende a tener dos zonas calientes asociadas a los grandes centros urbanos (Valparaíso-Viña y Concepción-Arauco), y ii) magnitud, asociada a la concentración de mayor biomasa y coberturas de suelo forestales (Hernández et al., 2017).

En Chile se usa fundamentalmente la detección terrestre, a través de redes de torres de vigilancia, para determinar los focos mediante triangulación y supervisión aérea. CONAF (2017b) utiliza el NBR (Normalized Burn Ratio) como índice para establecer la severidad del fuego en la vegetación, utilizando imágenes Landsat-8 y Sentinel-2, antes y después de incendio.

Por su parte, Blondel y Fernández (2012) estudiando el efecto de la fragmentación en el tamaño y frecuencia de los incendios forestales en la zona central de Chile, utilizaron imágenes multiespectrales de los años 1987, 1989, 1999 y 2006, obtenidas del satélite Landsat-5 TM. Estos autores, evaluaron la frecuencia y el área de propagación

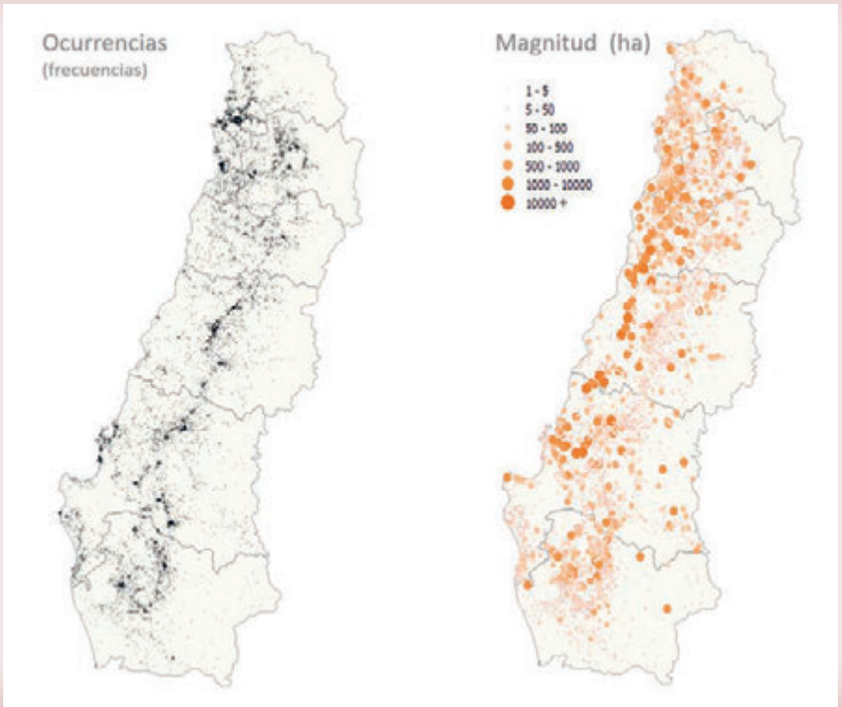


Figura 88: Datos de incendios forestales ocurridos entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía, mayores a 1 ha, entre la temporada 2005-2006 y 2016-2017. *Fuente de los datos para construir los mapas: CONAF (solicitados por Ley de Transparencia por los autores). Fuente: Elaboración propia.*

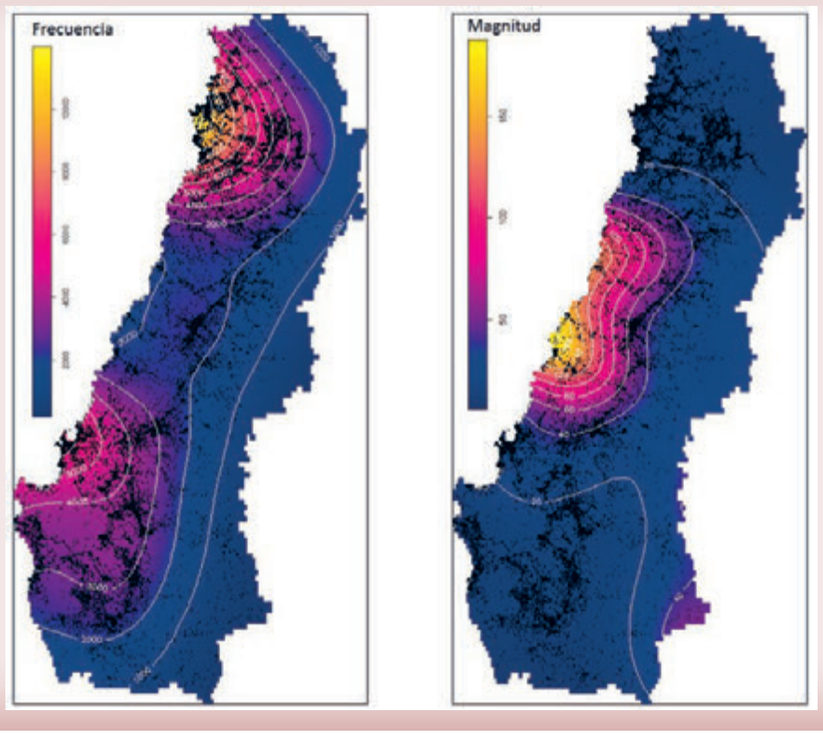


Figura 89: Análisis de densidad de la frecuencia de incendios (izquierda) y su magnitud (derecha) de incendios forestales ocurridos entre las regiones de Valparaíso y La Araucanía, mayores a 1 ha, entre la temporada 2005-2006 y 2016-2017. *Fuente: Elaboración propia.*

de los incendios asociados a los intervalos de tiempo de cada imagen analizada, correlacionando luego con métricas de paisajes para la misma cronología, de lo que determinaron que el desempeño de la clasificación espectral supervisada obtuvo del orden de 89 a 92% de acierto. Los coeficientes Kappa obtenidos fueron mayores a 0,8 lo que indica una clasificación espectral satisfactoria.

Por otro lado, Muñoz et al. (2007) utilizaron 33 imágenes NOAA-16 AVHRR, correspondientes a la temporada de incendios del año 2004, con el fin de proponer un modelo de red neuronal perceptron para detección automática de fuegos forestales. Las entradas a la red correspondieron a los valores de píxel en cada una de las cinco bandas del sensor satelital, más información del gradiente de temperatura en la banda infrarroja número 3. El resultado del modelo validado predice con mayor efectividad los incendios grandes que los pequeños.

5.1.7. Conclusiones

Los sensores remotos son capaces de generar información útil en todas las fases que involucran a los incendios forestales. En primer lugar, son utilizados para evaluar las condiciones previas, entregando datos del tipo de combustible, su contenido de humedad y otros atributos importantes para la modelación anticipada de potenciales incendios. En segundo lugar, permiten detectar incendios activos a través del contraste espectral y termal que se produce entre los píxeles de la zona quemada y su entorno. El desafío en esta etapa es integrar de mejor forma la frecuencia de obtención de las imágenes, el tamaño del píxel y el tamaño de las imágenes a procesar (ver figura 90). Por último, para las evaluaciones posincendios, los datos satelitales son útiles tanto en la cuantificación de los daños como en la calificación del mismo, por ejemplo, en términos de la severidad.

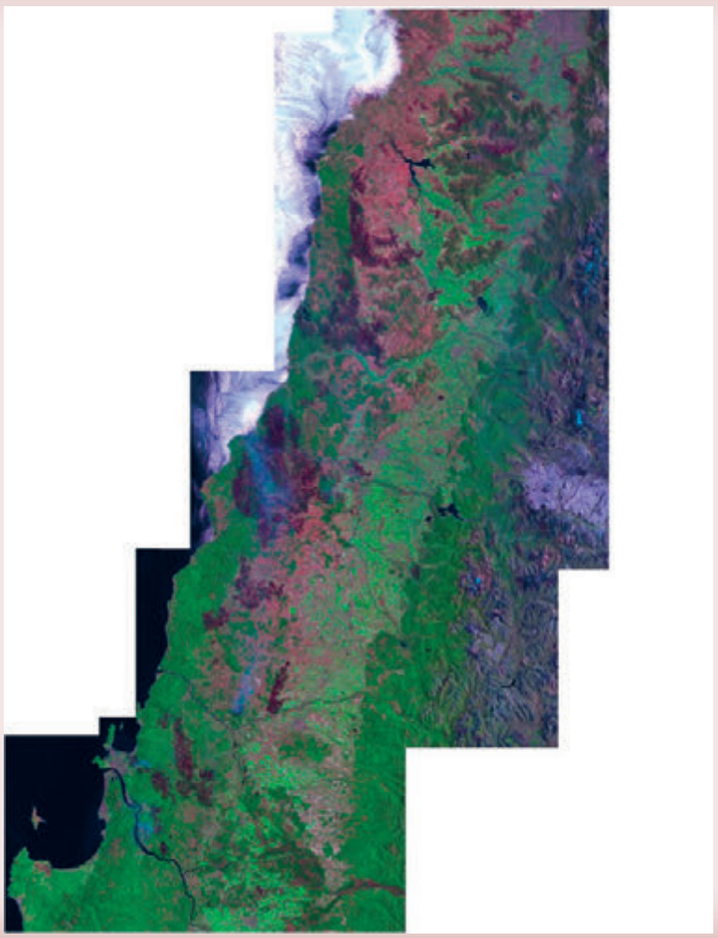


Figura 90: Imagen Sentinel-2 (Programa ESA-Copernicus), de la zona centro costera de Chile, procesadas con Google Earth Engine del día 29 de enero de 2017. *Fuente: Elaboración propia.*

5.2 Severidad del daño por incendios en un bosque de alto valor de conservación dominado por Nothofagus alessandrii (Ruil) en la cordillera de la Costa, Región del Maule, Chile central

Persy Gómez,[a] Pedro Garrido,[b] John Gajardo,[c] Yony Ormazábal,[c] Carlos Mena[c]

[a]Jardín Botánico, Universidad de Talca, Talca, Chile
[b]Darwin-Maule, Talca, Chile
[c]Centro de Geomática, Universidad de Talca, Talca, Chile

5.2.1. Introducción

En Chile, el 80% de los bosques nativos se encuentran degradados y estructuralmente modificados (Burschel et al., 1991). Este valor demuestra el problema de conservación del bosque, tanto de las especies propias que lo definen, como de otras asociadas. Para la zona mediterránea y particularmente en la cordillera de la Costa de la región del Maule, se ha identificado y reconocido el estado de vulnerabilidad de los bosques a causa del cambio de uso del suelo, con disminución de la superficie ocupada y existencia de una configuración espacial de fragmentos dentro de una matriz de plantaciones forestales (Cerda et al., 1993). Este proceso se promueve a partir de 1974 (Lara et al., 1996) y en la actualidad, uno de los bosques con mayor grado de amenaza son los ruilares de Nothofagus alessandrii (ruil) que registran una disminución histórica de superficie de 824,8 ha (Donoso y Landaeta, 1983; Garrido y Landaeta, 1983) a 314 ha (Santelices et al., 2012). Dentro de las consecuencias e impacto de la disminución de la superficie se encuentra: la alteración del hábitat, la restructuración del bosque, la sustitución y fragmentación del bosque nativo y su reemplazo por plantaciones de pino. Esto ha generado un escenario adecuado para que ocurra invasión de Pinus radiata D. Don desde las plantaciones, un fenómeno que ha sido documentado en otras regiones del mundo (Richardson y Brown, 1986; Kruger et al., 1989; Richardson y Higgins, 1998; Gómez et al., 2011). En efecto, las plantaciones forestales liberan cada año una gran cantidad de semillas hacia el paisaje, lo que incrementa la probabilidad de invasión solo por un efecto masa (Richardson y Brown, 1986; Kruger et al., 1989; Richardson y Higgins, 1998). Por otra parte, una gran amenaza son los incendios forestales, cuyos últimos eventos (período 2017) han sido por lejos uno de los más complejos y de mayor extensión (más de 500.000 ha) de la historia en Chile (CONAF, 2017), afectando bosques templados, matorrales esclerófilos, espinales, praderas y plantaciones forestales.

Ruil es un árbol endémico de la flora arbórea chilena, con distribución espacial reducida a la región del Maule (Rodríguez et al., 1983). Dentro del conjunto florístico de las especies con problemas de conservación, Ruil es una de las especies con mayor riesgo de extinción en Chile. En la actualidad, es una especie reconocida como amenazada con status de conservación en peligro, declarada monumento natural. Sus poblaciones están muy fragmentadas (Olivares et al., 2005), encontrándose dentro de un área de ocupación aproximada de unas 350 ha, 55% de las cuales fueron afectadas por los últimos incendios forestales (período 2017), dejando a la especie en un estado de conservación aún más crítico.

Los efectos de los incendios sobre los ecosistemas se pueden clasificar en efectos de primer y segundo orden (Key y Benson, 2006). Los efectos de primer orden involucran aquellos daños causados directamente por el efecto de la combustión y ocurren en el corto plazo después del incendio; los efectos de segundo orden son causados por agentes ajenos al fuego y ocurren en el largo plazo (Chuvieco et al., 2006). Ambos efectos pueden ser estimados en términos de severidad (De Santis y Chuvieco, 2009).

La severidad del daño puede ser entendida como la magnitud de los cambios ecológicos que se han producido en un área quemada con respecto a las condiciones que existían preincendio (De Santis y Chuvieco, 2009). En este contexto, cuando se habla de severidad del incendio, se está discutiendo sobre los cambios físicos y químicos que se producen en el suelo, la conversión de la vegetación en elementos carbonizados, los cambios estructurales y de composición que generan condiciones de microclima para el establecimiento de nuevas especies (Key y Benson, 2006) Así, de acuerdo a van Wagtendonk (2004), en el corto plazo es esencial contar con información del nivel del daño, de manera rápida y espacialmente distribuida. Esto permitirá priorizar las zonas que se encuentren más afectadas, para aplicar los tratamientos de recuperación y obtener información base para el monitoreo posterior (Brewer, 2005).

Si bien se reconoce que los ruilares representan remanentes del bosque original, que en la mayor parte de los casos provienen de regeneración vegetativa y que han estado sometidos a prácticas históricas de cortas y quemas sucesivas (San Martín y Donoso, 1996), no existen antecedentes que den cuenta del nivel de daño y los posibles cambios en la estructura y composición de las poblaciones de la especie luego de incendios de la magnitud y extensión de los ocurridos la temporada estival de 2017, en particular, considerando que el régimen de propiedad dominante es de tipo privada y que la superficie con protección estatal no supera las 50 ha (Olivares et al., 2005).

A causa de la singularidad, endemismo y distribución geográfica reducida a la región de la Maule, N. alessandrii requiere de la implementación de programas y acciones orientadas a la recuperación, conservación y restauración de sus poblaciones y su hábitat. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el desempeño de dos índices espectrales obtenidos a partir de datos satelitales y diseñados para estimar la severidad del daño en ruil provocado por incendios forestales.

5.2.2. Metodología

Se trabajó en la comuna de Empedrado, región del Maule, específicamente en el predio El Desprecio, sitio donde se encuentra inserto el Bosque de Alto Valor de Conservación (BAVC) Los ruiles de Empedrado, dominado por la especie arbórea Nothofagus alessandrii (Ruil) y perteneciente a la empresa Forestal Mininco S.A. (figura 91).

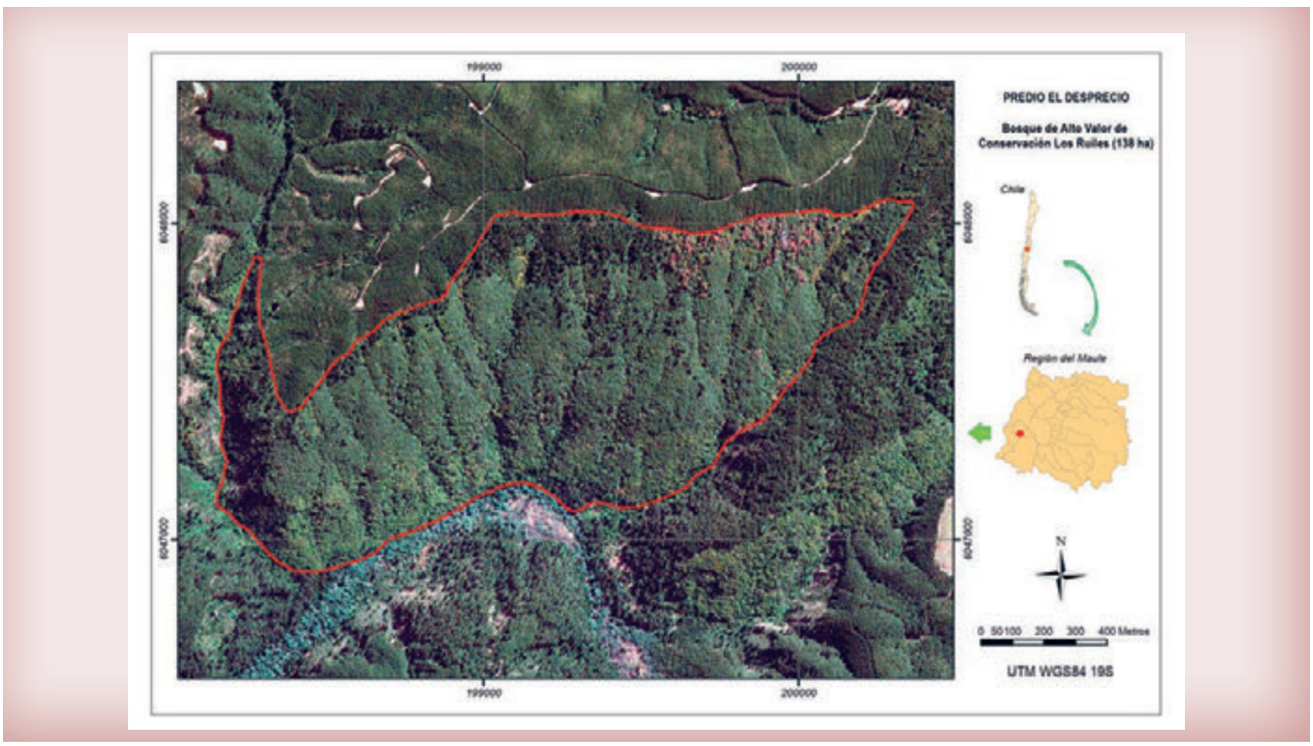


Figura 91: Ubicación geográfica del BAVC Los ruiles de Empedrado, comuna de Empedrado, Región del Maule.
Fuente: Elaboración propia.

Para la estimación de la severidad del daño se usaron dos aproximaciones, la primera basada en datos de campo y la segunda sustentada en datos satelitales. Respecto a la primera, 32 parcelas circulares con un diámetro de 30 m fueron delimitadas al interior del BAVC. Siguiendo el protocolo desarrollado por Key y Benson (2006), se procedió a la identificación de la parcela y la determinación sus coordenadas geográficas (centro), la medición de la pendiente, la toma de una fotografía representativa, el registro de la fecha del incendio y la fecha de la visita. En cada parcela el método Composite Burn Index (CBI) (Key y Benson, 2006), se empleó para la evaluación de los efectos de la severidad (Chuvieco et al., 2006; Key y Benson, 2006; De Santis y Chuvieco, 2007, 2009).

El CBI está diseñado para funcionar operativamente con información de sensores remotos de mediana resolución espacial (De Santis y Chuvieco, 2009). El CBI se calculó promediando las evaluaciones visuales de las condiciones del suelo y la vegetación posincendio en las parcelas. En cada parcela, cinco estratos verticales fueron considerados: sustratos, hierbas y matorrales, arbustos altos, árboles intermedios y dosel superior (De Santis y Chuvieco, 2007). En cada estrato se consideraron cambios en el color y cantidad de sustrato y combustible consumido, alteraciones en el dosel, cobertura y mortalidad, así como también la altura de la carbonización (De Santis y Chuvieco, 2009). Estos atributos se calificaron en una escala numérica que va desde 0 (situación no quemada) hasta 3 (situación completamente quemada).

Respecto de la segunda aproximación, la severidad del daño fue estimada usando datos del sensor OLI de la plataforma Landsat-8. Los datos son de libre acceso y fueron descargados desde el sitio web de GloVis (Campbell, 2008). Se usaron dos imágenes, una previa al incendio con fecha enero de 2017, y otra posterior al incendio con fecha de marzo de 2017. Posteriormente, los datos satelitales fueron corregidos atmosféricamente para obtener reflectancia de superficie, usando el algoritmo LEDAPPS (Masek et al., 2006).

Por otra parte, se calcularon los índices Normalized Burn Ratio (NBR) (fórmula 34) y Difference Normalized Burn Ratio (dNBR) (fórmula 35), según Key y Benson (2006). En la misma línea se aplicó también la modificación del NBR, el Relative Difference Normalized Burn Ratio (RdNBR) (fórmula 36), de acuerdo a Miller y Thode (2007). Los datos de dNBR y RdNBR fueron discretizados en categorías de severidad, de acuerdo a los umbrales propuestos por Key y Benson (2006) y Miller y Thode (2007), respectivamente. Finalmente, las estimaciones de dNBR y RdNBR fueron validadas empleando una matriz de confusión (Congalton, 1991) que conjuga las observaciones de campo CBI con los valores de severidad de las imágenes.

$$NBR = \frac{\rho IRC - \rho SWIR}{\rho IRC + \rho SWIR} \qquad (34)$$

$$dNBR = NBR_{PRE} - NBR_{POST} \qquad (35)$$

$$RdNBR = \frac{NBR_{PRE} - NBR_{POST}}{\sqrt{ABS(\frac{NBR_{PRE}}{1000})}} \qquad (36)$$

donde, el ρIRC y ρSWIR representan la reflectancia de superficie en las zonas del espectro del infrarrojo cercano y del infrarrojo cercano de onda corta. NBR_{PRE} y NBR_{POST} corresponden al valor del NBR para la situación previa y posterior al incendio, respectivamente.

5.2.3. Resultados

Los índices evaluados presentaron diferentes comportamientos. La tabla 31 muestra las categorías de daño y nivel de superficie afectada para el dNBR (figura 92), destaca la alta proporción alcanzada por las categorías de daños medio y alto y la ausencia de la categoría sin daño para el BAVC.

Tabla 31: Categorías de daño (dNBR), superficie y porcentaje de afectación del BAVC. *Fuente: Elaboración propia.*

Categorías	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Daño bajo	1,98	1,45
Daño medio	39,06	28,61
Daño alto	95,49	69,94
Total	136,53	100

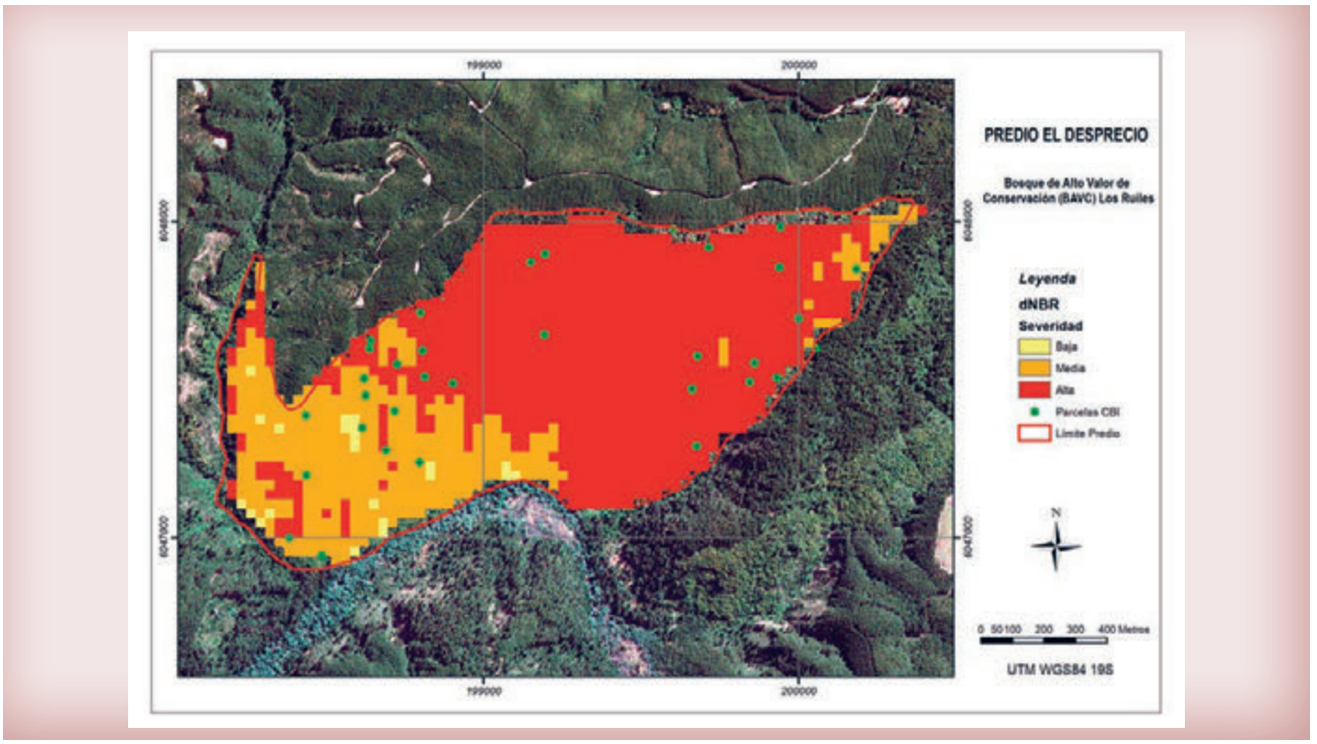


Figura 92: dNBR y distribución de parcelas en el BAVC. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 32: Categorías de daño (RdNBR), superficie y porcentaje de afectación del BAVC. *Fuente: Elaboración propia.*

Categorías	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Daño bajo	15,48	11,34
Daño medio	57,69	42,25
Daño alto	63,36	46,41
Total	136,53	100

En la tabla 32 se muestran las categorías de daño y nivel de superficie afectada para el índice RdNBR (figura 93). Igualmente destaca la alta proporción de las categorías de daños medio y alto, aunque en distinta proporción, y la completa ausencia de la categoría sin daño.

De acuerdo con los datos de campo, el índice RdNBR alcanzó una mayor concordancia al obtener una fiabilidad global de 70% (Kappa = 0,46), por sobre el 60% de fiabilidad (Kappa = 0,32) alcanzada por el dNBR. Esto genera diferencias importantes que se pueden observar en los mapas de severidad obtenidos y sus categorías, donde se aprecia un mayor porcentaje de severidad alta del índice dNBR sobre el RdNBR (figuras 92 y 93).

En términos generales, los resultados muestran que el BAVC fue severamente afectado por los incendios forestales (88,55% de la superficie con severidad media o alta), no registrándose sectores sin daños. Sin embargo, observaciones de campo a través de parcelas de monitoreo, luego de ocho meses posincendio, reportan recuperación de una proporción importante de individuos de ruil, principalmente a través de rebrotes vegetativos ubicados en la base de las cepas (Darwin Maule, datos no publicados).

De acuerdo a los resultados, la validación en terreno mediante el cálculo del CBI es fundamental para corroborar la información obtenida mediante las imágenes satelitales, y de este modo, efectuar ajustes que permitan alcanzar un mayor nivel de exactitud entre los resultados del análisis con sensores remotos y lo que se observa en terreno. Bajo esta perspectiva, resulta fundamental experimentar con diferentes herramientas de teledetección para medir correctamente el grado de severidad del daño por incendios, de manera permitir la complementariedad

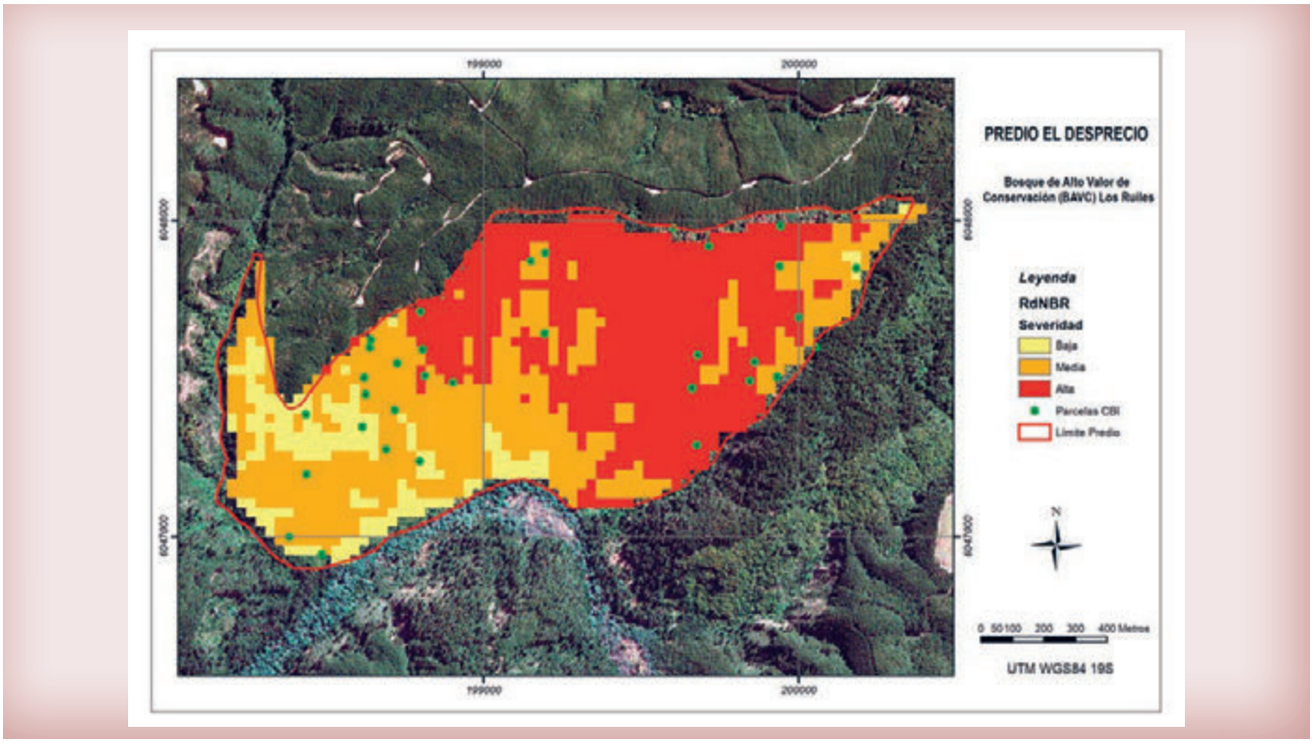


Figura 93: RdNBR y distribución de parcelas en el BAVC. *Fuente: Elaboración propia.*

entre métodos revisados. La periodicidad adecuada y la elección de indicadores sensibles a la respuesta de la flora y vegetación, se pueden usar para alcanzar mayores niveles de confiabilidad en la implementación de programas de monitoreo posincendio que son elementos de base para la planificación de procesos de rehabilitación o restauración de especies amenazadas o en peligro de extinción, como es el caso del ruil.

5.2.4. Conclusiones

Los índices evaluados presentaron diferentes comportamientos, siendo el RdNBR el que alcanzó un mejor nivel de correspondencia con las parcelas de validación de CBI. Esto genera diferencias relevantes en la generación de mapas de severidad de daño y la delimitación de categorías.

Los índices derivados de imágenes satelitales se convierten en información esencial para la implementación de programas de rehabilitación y monitoreo posincendio, que deben combinarse con indicadores sensibles a la respuesta de la flora y vegetación, con el objeto de evaluar el éxito de las acciones sobre todo en especies en peligro de extinción.

5.3 Mapeo de la susceptibilidad de remoción en masa usando modelos probabilísticos y heurísticos

Cristián Henríquez,[a,b] Alexander Brenning,[c] Jorge Qüense[a]

[a]Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile
[b]Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CONICYT/FONDAP N° 15110020), Chile
[c]Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Alemania

5.3.1. Introducción

El análisis de susceptibilidad a la remoción en masa basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha sido ampliamente usado en investigación geomorfológica como en planificación del territorio y gestión de desastres. Distintas aproximaciones que combinan técnicas cuantitativas con cartografía, permiten llegar a resultados de gran calidad en la evaluación o predicción de la peligrosidad para este tipo eventos, especialmente cuando se deben analizar grandes superficies en poco tiempo.

El concepto de susceptibilidad a deslizamientos ha sido introducido en sus inicios por investigadores del U.S. Geological Survey en Estados Unidos (Pourghasemi et al., 2012). Este se entiende como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización, determinada a través de un análisis compartido entre factores condicionantes o desencadenantes, de carácter cualitativo o cuantitativo, con las áreas movidas o alcanzadas. Este análisis se materializa en forma de mapa de susceptibilidad y suele presuponer que el comportamiento futuro de la ladera seguirá las mismas pautas mostradas hasta el presente (Ayala Carcedo y Corominas, 2003). Esto último se sustenta en el principio geológico de actualismo, que plantea que los fenómenos de inestabilidad en el futuro están relacionados con las situaciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas de las inestabilidades presentes y pasadas (Irigaray y Chacón, 2003). El análisis de susceptibilidad no considera la variable temporal ni corresponde al cálculo de probabilidad de ocurrencia, sino que estima la sumatoria de factores favorables a la generación del fenómeno (SERNAGEOMIN, 2004). Uno de los autores que más ha trabajado el mapeo de susceptibilidad de deslizamientos es Guzzetti et al. (1999).

En general, una remoción en masa se puede definir como un proceso de movilización pendiente abajo de un determinado volumen de suelo, roca o una combinación de ambos, generado bajo la influencia directa de la gravedad (Hauser, 2000). Aunque dicha acción es la razón primaria para una remoción en masa, hay otros factores que contribuyen a esta, como el debilitamiento progresivo de los materiales por meteorización u otros fenómenos naturales y ambientales, o como lluvias intensas o terremotos (Mardones y Vidal, 2001). El desplazamiento puede ser a diferentes velocidades y puede involucrar cantidades variables de agua (SERNAGEOMIN, 2004).

De acuerdo a Bonachea (2006), en el estudio de la remoción en masa y su representación espacial se pueden distinguir cuatro grandes enfoques, que difieren en los métodos, alcances, escalas y propósitos. En primer lugar, se encuentran los estudios directos o empíricos. Estos se basan principalmente en criterios geomorfológicos y geológicos, partiendo con la realización de inventarios de deslizamientos ocurridos en el pasado. La idea subyacente es que las áreas afectadas por procesos pasados son las que tienen mayor probabilidad de experimentarlo en el futuro (Bonachea, 2006; Guzzetti et al., 1999). Dentro del segundo grupo se encuentran los métodos determinísticos, estos se utilizan principalmente en el campo ingenieril para determinar la estabilidad de un talud, con condiciones geomorfológicas y geológicas particulares, en el cual se pueden aplicar modelos físicos de estabilidad de laderas, hidrológicos, entre otros (Brunsden y Prior, 1984). Una de las dificultades de este método son los altos costos que implica su aplicación (Bonachea, 2006). Por su parte, los métodos estadísticos o probabilísticos permiten establecer relaciones indirectas entre los even-

tos pasados y la susceptibilidad de ocurrencia mediante distintos métodos como: regresión logística, random forest, máquina de soporte de vectores, redes neurales artificiales, entre otros (Brenning, 2012). Para ello se debe relacionar la variable independiente, esto es, el inventario de deslizamientos, con una serie de factores condicionantes del terreno o variables independientes como la litología, pendiente, forma de ladera, entre otros. Los resultados son validados con indicadores que permiten determinar la confianza y exactitud del modelo. Este conjunto de métodos también se denomina como clasificaciones supervisadas y se pueden acoplar fácilmente a los SIG (Brenning, 2012; Guzzetti et al., 2005). Finalmente, dentro de los métodos indirectos no supervisados, se encuentran los métodos heurísticos, que se basan en el criterio experto para clasificar las clases de peligrosidad. Este método presenta un alto nivel de subjetividad como consecuencia de la asignación de pesos a los factores, así como por el proceso de normalización de estos (Barredo et al., 2000; Bonachea, 2006; Gorsevski y Jankowski, 2010; Pourghasemi et al., 2012). Dentro de este grupo se encuentran los métodos de Evaluación Multicriterio que, al igual que el anterior, pueden ser aplicado en SIG. Es un método de fácil y rápida implementación.

En este contexto, el propósito de este trabajo es comparar las dos últimas aproximaciones, esto es, métodos estadísticos no lineales, en particular el modelo aditivo generalizado (GAM), y técnicas heurísticas de Evaluación Multicriterio (EMC), integrando el uso de los SIG con softwares estadísticos. Para el análisis se usó la conurbación La Serena-Coquimbo, región de Coquimbo, Chile, como caso de estudio.

5.3.2. Metodología

5.3.2.1. Modelo aditivo generalizado (GAM)

Dentro de los modelos relativamente simples, pero con resultados adecuados para la espacialización de la susceptibilidad de deslizamiento, se encuentra el modelo GAM (Goetz et al., 2015; Hastie y Tibshirani, 1990; Wood, 2006). El modelo GAM se relaciona con el modelo lineal generalizado (GLM), permitiendo que las variables predictoras sean transformadas de forma no lineal, usando funciones no-paramétricas tipo spline univariados (Goetz et al., 2015). El GAM usa la regresión logística para una variable de respuesta dicotómica (ocurrencia de deslizamiento / no ocurrencia de deslizamiento). El GAM puede tener un desempeño predictivo ligeramente mejor, así como también ser un modelo más acotado y físicamente más significativo que el GLM, especialmente si se usan componentes físicos en la modelación (Budimir et al., 2015; Goetz et al., 2011; Park y Chi, 2008). Para re-

Tabla 33: Variables utilizadas en el modelo GAM. *Fuente: Elaboración propia.*

Variables	Unidad de medida	Valor máximo	Valor mínimo	Valor medio
Altitud	m	530	0	63
Pendiente	°	81,9	0	4,6
Curvatura total	m/100	6,0	0	0,0001
Curvatura horizontal	m/100	2,21	-3,1	0,0001
Curvatura perfil	m/100	0,63	-0,58	0,0007
Distancia a caminos	m	1.560	0	132
Distancia a drenaje	m	3.255	0	462
Ambientes geológicos	categorías	Sedimentario continental, sedimentario marino, sedimentario (relaves), plutónico y metamórfico		

ducir la complejidad del modelo y evitar un sobre-ajuste, se usaron criterios como el Akaike Information Criterion (AIC) (Petschko et al., 2014).

En primer lugar, se realizó un inventario de deslizamientos en el área de estudio, lográndose registrar un total de 37 lugares con evidencias de deslizamientos (DESE, 2017). Estos sitios se asocian, fundamentalmente, a márgenes fluviales y sectores de altas pendientes. Luego se analizaron las variables predictoras detalladas en la tabla 33.

Las variables morfométricas del terreno se calcularon en el programa SAGA-GIS 2.1.0, utilizando los criterios de Zevenbergen y Thorne (1978). La información de altitud se derivó de una imagen ASTER. Todas las coberturas se transformaron a formato raster (.sgrd) para poder ser desplegadas y analizadas (Brenning, 2008; Conrad, 2015), a una resolución espacial de 10 m (figura 94).

El modelo parte con la selección de la pendiente (variable obligatoria que no se remueve), y luego se van incluyendo y removiendo las variables alternativas, paso por paso, mientras se mejora el ajuste del modelo según el AIC. Con el fin de reducir la influencia de posibles artefactos en el MDE, se cortaron las colas de las distribuciones de algunas variables predictoras de la siguiente forma: curvaturas totales superiores a -0,03 e inferiores a +0,03 se remplazaron con los valores -0,03 y +0,03 respectivamente. En el caso de la curvatura horizontal y de perfil, se cortaron las distribuciones a ±0,03 y ±0,02 respectivamente. Celdas con valores superiores a 200 m se remplazaron con el valor 200 m, y pendientes superiores a 15° se cambiaron a un valor de 15°. Este último cambio se realizó puesto que con las pocas zonas de pendientes mayores a 15° en el área de estudio, sería imposible modelar la relación entre pendiente y susceptibilidad a mayores pendientes. Las variables de distancia a caminos y a la red de drenaje, se transformaron usando el logaritmo con base 10 debido a que una disminución exponencial de la susceptibilidad sería más realista que una lineal. Además, no se esperaría una relación entre la ocurrencia de deslizamientos y estas variables, a grandes distancias. Por ello, las distancias superiores a 250 m fueron remplazados por el valor de 250 m. Las condiciones geológicas se representaron en forma simplificada debido a la escasez de observaciones de deslizamientos disponibles para entrenar el modelo. Solo se consideraron las clases sedimentario marino (y dunas), sedimentario continental (incluyendo relave), plutónico y metamórfico.

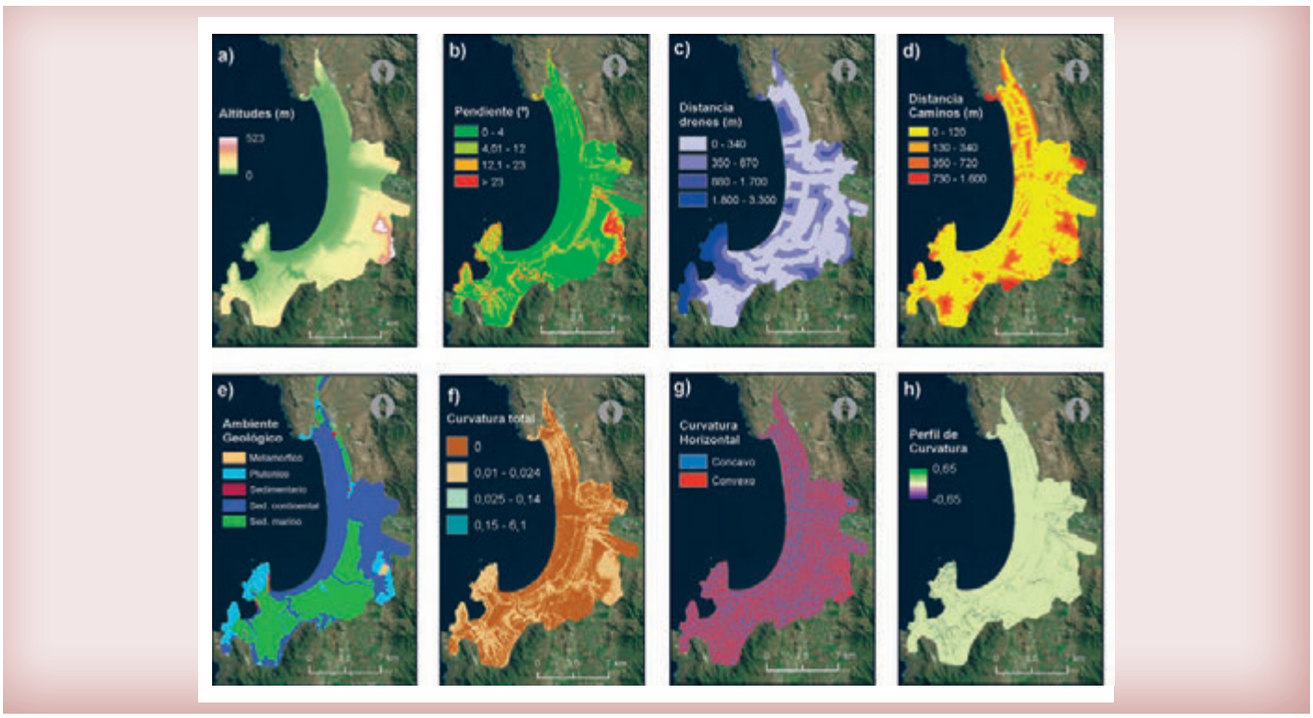


Figura 94: Variables predictoras del modelo GAM. *Fuente: Elaboración propia.*

Debido a que la influencia de la pendiente puede variar según la distancia del camino, o la influencia de caminos puede variar según la pendiente, también se incluye un término de interacción (lineal) entre ambas variables como variable candidata (Brenning et al., 2015).

5.3.2.2. Evaluación Multicriterio (EMC)

Para aplicar el método de Evaluación Multicriterio se importaron todas las coberturas base al programa ArcGIS 10.5 y se ha realizado una programación en el módulo ModelBuilder (figura 95). En primer lugar, se realizó un proceso de normalización de variables (fuzzy) en una escala de aptitud de 0 a 1, donde 0 representa nula aptitud y 1 máxima aptitud. En este proceso se han usado las mismas variables de entrada y criterios del modelo GAM. Los puntos de control (c) y tipos de funciones, se muestran en la tabla 34. La variable altitud no se ha considerado en la modelación.

Una vez normalizadas las coberturas de entrada se procedió a ponderar el peso de cada variable mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (PJA), que consiste en comparar por pares, de acuerdo al método propuesto por Saaty (1980). Este método requiere la valoración comparativa de importancia entre pares de factores, es decir, indicar cuál es la importancia de un factor respecto a otro, utilizando una escala de nueve posibilidades (9, 7, 5, 3, 1, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9), que abarca de la mayor importancia (9), igual importancia (1) a la menor importancia (1/9).



Figura 95: Modelado cartográfico del EMC. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 34: Proceso fuzzy de variables utilizadas en el modelo EMC.*Fuente: Elaboración propia.*

Variables	c1	c2	c3	c4	Función fuzzy (x)
Pendiente (°)	0	7,5	7,5	15	Gausiano
Curvatura total (m/100)	-0,03	0	0	0,03	Gausiano
Curvatura horizontal (m/100)	-0,03	0	0	0,03	Lineal
Curvatura perfil (m/100)	-0,02	0	0	0,02	Lineal
Distancia a caminos (m)	0	250	250	250	Logarítmica
Distancia a drenaje (m)	0	250	250	250	Logarítmica
Ambientes geológicos	*	*	*	*	Asignación directa
Nota: * los puntajes de aptitud asignados a los ambientes geológicos son: sedimentario continental (0,3); sedimentario marino y transcional (0,6); plutónico y metamórfico (1).					

Para ello se realizó una revisión de la literatura respecto a los factores más relevantes en el proceso de remoción en masa, tanto por sismos como por lluvia intensas. Este paso se basa en el hecho que no todos los factores incluidos en el modelo tienen la misma importancia y se comportan de la misma manera al momento de presentarse el fenómeno. De esta forma, se obtuvieron los pesos indicados en la tabla 35.

Finalmente, el modelo de susceptibilidad de remoción en masa se integró mediante una sumatoria lineal ponderada, usando la fórmula 37.

$$rm = \sum_{j=1}^{n} x_i w_j \quad (37)$$

donde, rm corresponde a la susceptibilidad de remoción en masa, X_i es el valor normalizado del factor, y W_j es el peso del factor.

Los resultados finales se agruparon en cuatro categorías de susceptibilidad: bajo, medio, alto y muy alto, según cuartiles.

5.3.3. Resultados

Los modelos GAM y EMC utilizados para la determinación de la susceptibilidad de remoción en masa, se aprecian en la figura 96. Si bien las unidades de medidas no son iguales, ya que los puntajes del GAM se pueden considerar de cierto modo como probabilidades y los valores de EMC son

Tabla 35: Ponderación de los pesos de las variables. *Fuente: Elaboración propia.*

Variables	Peso (w)
Pendiente	0,4138
Curvatura total	0,0693
Curvatura horizontal	0,0361
Curvatura perfil	0,0361
Distancia caminos	0,0626
Distancia drenaje	0,1743
Ambientes geológicos	0,2078
Nota: el valor de ratio de consistencia fue de 0,09, lo que corresponde a un valor aceptable (<0,1).	

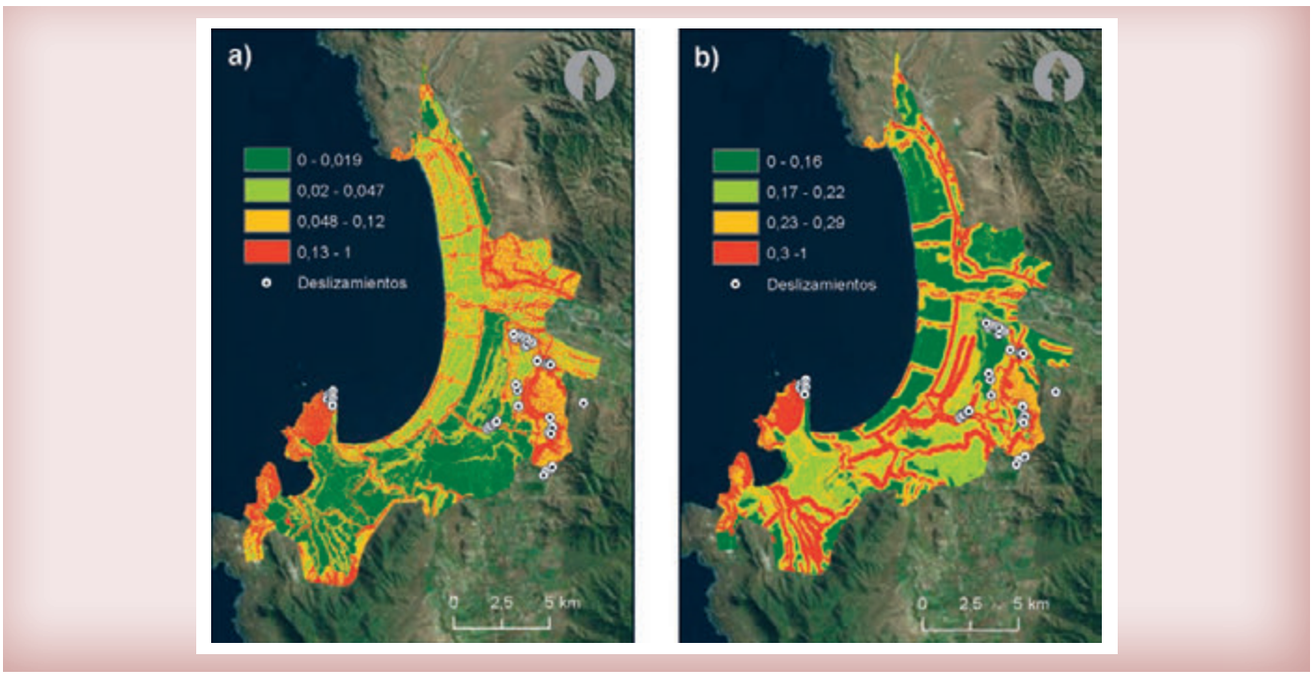


Figura 96: Mapa de susceptibilidad de deslizamientos basado en a) modelo GAM y b) modelo EMC. *Fuente: Elaboración propia.*

solo puntajes de susceptibilidad, se procedió a realizar una comparación cartográfica y estadística de los resultados.

El modelo GAM fue verificado a través de una validación cruzada repetida, subdividiendo el conjunto de datos, aleatoriamente, en subconjuntos de igual tamaño, típicamente en 10 subconjuntos. Nueve de estos subconjuntos se combinan para formar los datos de entrenamiento (90% de los datos), y los datos restantes se usaron como datos de prueba (10% de los datos). Después de haber usado cada subconjunto de 10% como datos de prueba de una vez, se utilizó el conjunto completo para la estimación del error. Este procedimiento, además, se repite para obtener resultados que no dependan de la subdivisión aleatoria generada. Se utilizaron diez subconjuntos y la validación se repitió 100 veces.

Como medida general de la bondad de ajuste del modelo GAM, se seleccionó el área debajo de la curva ROC (AUROC). El AUROC es un valor entre 0,5 y 1 que expresa la medida en que el modelo es capaz de separar los deslizamientos de las zonas no afectadas por deslizamientos. La validación cruzada indica una muy buena capacidad predictiva (AUROC = 0,818). El ajuste del modelo a los datos de entrenamiento es mejor aún (AUROC = 0,900), lo que indica un sobreajuste del modelo que, sin embargo, se detectó a través de la validación cruzada.

Si bien la interpretación de la estructura del modelo GAM es limitada debido al tamaño y a la distribución de la muestra, en la figura 97 se muestra que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos es más alta a mayor pendiente, en cercanías a caminos y al sistema de drenaje, con curvaturas negativas (topografía convergente), y en las unidades geológicas sedimentarias marinas y metamórficas.

En el modelo GAM se puede apreciar que los sitios de mayor susceptibilidad de remoción en masa (sobre 75% de probabilidad), no son tan extensos en la conurbación La Serena-Coquimbo. En efecto, los valores por sobre 50% de probabilidad de remoción representan menos del 2% de la superficie evaluada (290 ha). Estas se concentran en las quebradas y esteros principales (Peñuelas, Culebrones, Los Chiñes, Las Rosas, Panules), márgenes del río Elqui y cerros de mayor pendiente (Peñascoso, Grande, Coquimbo y Doña Goya).

Por su parte, como se señaló antes, el modelo EMC se categorizó en cuartiles al igual que el modelo GAM (tabla 36). En general, se observa una superficie mayor de la clase muy alta susceptibilidad de deslizamientos respecto al modelo GAM (823 ha y más). En términos comparativos, se observa que el modelo EMC presenta solo 29 eventos en las dos más altas categorías, mientras que la totalidad de los deslizamientos observados fueron mode-

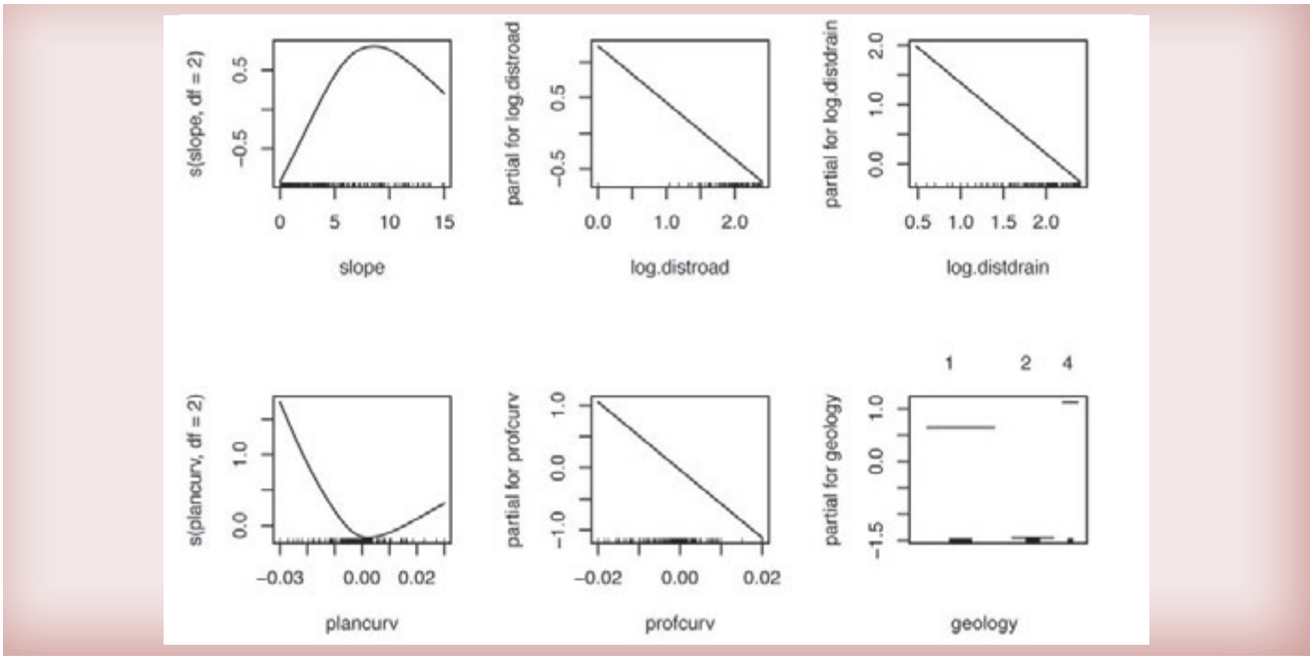


Figura 97: Resumen de las funciones de transformación del modelo GAM. *Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 36: Comparación de resultados de los modelos GAM y EMC. *Fuente: Elaboración propia.*

Categorías de susceptibilidad (cuartiles)	GAM		EMC	
	Superficie (ha)	N° de deslizamientos	Superficie (ha)	N° de deslizamientos
Baja	3.854,6	0	3.841,1	2
Moderada	4.440,1	0	3.911,7	5
Alta	4.418,1	5	4.079,0	6
Muy alta	3.128,6	32	3.952,3	24
Sin dato	0	0	57,2	0

lados en el GAM en las categorías alta o muy alta. En las categorías más bajas se constata que el modelo EMC registra siete casos, mientras que el modelo GAM ninguno, lo que en este caso demuestra que el modelo GAM tiene mejor desempeño para la estimación de la peligrosidad de remoción en masa.

Para validar el modelo se ha realizado un terreno (DESE, 2017) y revisado la literatura. Respecto a los sectores con mayor nivel de susceptibilidad, estos corresponden a los márgenes del río Elqui (sector El Olivar), quebrada Peñuelas, ruta D-401, zona urbana sobre cerro Coquimbo, donde hay una serie de niveles aterrazados que se asocian a escombros al pie de laderas de la terraza superior y conos de deyección, que forman peldaños naturales sobre los cuales se han asentado gran parte de la estructura y ocupación urbana del sector (Ilustre Municipalidad de Coquimbo, 2015); y el parque Coll, donde se aprecian deslizamientos sobre la ruta de acceso (18 de septiembre) en laderas con pendientes muy altas. También en los márgenes del estero Culebrón se aprecia rocas y bloques en ángulos de caída bastante acentuados (INFRACON, 2008), en categorías de alta y muy alta susceptibilidad.

Comparando el índice de susceptibilidad del modelo EMC con los deslizamientos observados, se obtiene un valor AUROC de 0,754. Según ello, la capacidad de este modelo de identificar sitios de alta y baja peligrosidad es aceptable, pero no alcanza la misma capacidad predictiva del modelo GAM. Ello también se manifiesta en los números de remociones en masa observados en las clases de susceptibilidad baja, moderada y alta (tabla 36).

5.3.4. Conclusiones

Ambos enfoques metodológicos (GAM y EMC) demuestran ser eficientes en la determinación de la susceptibilidad de remoción en masa con las variables utilizadas. Sin embargo, el análisis de la susceptibilidad requiere que se tomen decisiones críticas en cada estudio individual, ya que no hay una receta única para todos los casos (Brenning, 2012) en términos de elegir el modelado cartográfico automatizado más adecuado. Mientras el método GAM ofrece grandes ventajas por sus potencialidades para la predicción y su integración en un entorno integrado con software estadístico y SIG, el método EMC también ofrece ventajas en la capacidad de recoger la visión de expertos y su rapidez en su aplicación en plataforma SIG, sin la necesidad de contar con un inventario de deslizamientos ya ocurridos.

Uno de los principales desafíos de este tipo de modelos es enlazar la susceptibilidad de manera directa con factores desencadenantes, como precipitaciones extremas y terremotos, así como con la modelación del área de alcance (run-out) de un deslizamiento. La capacidad de estos modelos para integrarse con los SIG y programas estadísticos demuestra que son de gran ayuda para la planificación territorial y la gestión de riesgos.

5.3.5. Agradecimientos

Esta investigación ha contado con el soporte del proyecto Actualización Estudio de Riesgos Bahía de Coquimbo, encargado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y realizado por la Dirección de Extensión y Servicios Externos (DESE) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

5.4 Efectos de la resolución espacial y espectral de los sensores espaciales en la estimación de la severidad de los incendios forestales

Angela De Santis

Centro Regional Fundación CEQUA, Punta Arenas, Chile

5.4.1. Introducción

Los efectos de los incendios forestales sobre la cubierta vegetal, y su impacto en la erosión del suelo, son muy dependientes del nivel de severidad del fuego. Este concepto identifica los daños causados al ecosistema, principalmente en términos de biomasa quemada (materia seca en el suelo, hojas y troncos de especies a diferentes alturas). El análisis de los niveles de severidad del fuego resulta así un elemento clave para prever la evolución ecológica de las áreas afectadas, y los efectos a mediano y largo plazo que el incendio supone sobre el ecosistema. La severidad de un incendio está directamente relacionada con la intensidad y el tiempo de residencia del fuego. En incendios muy intensos, con una elevada liberación de energía en el frente de llamas o en aquellos que se propagan lentamente y cuentan con períodos largos de quema, se destruye buena parte de los elementos vitales de las plantas y de la materia orgánica del suelo, lo que supone una pérdida de protección del suelo y una regeneración posterior más lenta. Las estrategias de reproducción de las plantas son también claves en la evolución posterior al fuego: las germinadoras requieren disponer de un banco de semillas en buen estado y de condiciones meteorológicas favorables; mientras que las rebrotadoras están mejor adaptadas a fuegos periódicos, ya que pueden emitir nuevos brotes a partir de distintas partes de la planta justo después del incendio (Díaz-Delgado et al., 2003). Habitualmente, la severidad del fuego se evalúa según el grado de carbonización de los diferentes estratos vegetales y la proporción carbón/ceniza en la capa más superficial del suelo. Existen varios métodos de estimación disponibles en la literatura, principalmente apoyados en trabajo de campo (Key y Benson, 2005). El inventario de campo puede realizarse poco después del fuego (evaluación inmediata), o varios meses después (evaluación a medio plazo). La primera opción es útil para la gestión inmediata del área quemada, mientras que la segunda es más recomendable en diversos ecosistemas, al ofrecer un balance más riguroso de los daños reales del fuego y la regeneración potencial (Key y Benson, 2005). Además, en la evaluación inmediata pueden detectarse como persistentes, especies que pocos meses más tarde acaban muriendo a consecuencia de tener partes vitales seriamente dañadas.

La dificultad para abarcar un amplio territorio a partir de observaciones de campo, ha llevado a diversos autores a plantearse el empleo de imágenes de satélite en la cartografía de niveles de severidad, de cara a garantizar una cobertura actualizada y completa del territorio afectado (Díaz-Delgado, et al. 2003; van Wagtendonk, et al. 2004). El principal reto en el empleo de la teledetección en los estudios de severidad del fuego es demostrar que los niveles de daño están asociados a la variación espectral que pueda recoger el sensor. Esto supone explorar la discriminabilidad teórica entre distintos niveles de severidad, por ejemplo, usando Modelos de Transferencia Radiativa (MTR) (Chuvieco et al., 2006). Una vez que se demuestra la sensibilidad teórica de las distintas bandas de reflectividad, se debe constatar si se dispone de sensores con el suficiente nivel de detalle (resolución espacial y espectral) para evaluar la severidad de una manera más o menos automática. La mayor parte de los estudios de teledetección y severidad del fuego actualmente disponibles están basados en ajustes empíricos, apoyados en parcelas de campo tomadas poco después del incendio (por ejemplo, van Wagtendonk et al., 2004). Los modelos empíricos son relativamente sencillos de calcular, pero tienen poca capacidad de generalización. La alternativa es emplear modelos de simulación (RTM) (De Santis y Chuvieco, 2007), que intentan estimar la reflectividad

procedente de una determinada cubierta a partir una serie de asunciones físicas. Variando las condiciones de entrada del modelo, puede simularse la reflectividad de un dosel, lo que ayuda a entender mejor la acción de esos factores (por ejemplo, caracterización geométrica), cuando se usan en modo directo; o a estimar los mismos factores de entrada, habitualmente, manteniendo algunos constantes o extrayéndolos de otras fuentes, cuando se usan en modo inverso (Jacquemoud et al., 2000). Hasta el momento, los modelos RTM no se han aplicado extensamente al análisis de áreas quemadas, orientándose los pocos trabajos publicados a la determinación de quemado/no quemado (Roy et al., 2002). Chuvieco et al. (2006) plantearon el uso de modelos de simulación en modo directo para la cartografía de niveles de severidad mediante un enlace entre dos modelos, de hoja (PROSPECT) y de dosel (Kuusk), empleados para simular diversos escenarios de daño, señalando las potencialidades de los RTM. Posteriormente, De Santis y Chuvieco (2007) emplearon ese mismo modelo de simulación en modo inverso para estimar la severidad y comprobaron que los RTM resultaban más precisos que los métodos empíricos tradicionales, sobre todo en los valores extremos de severidad. Chuvieco et al. (2007) extendieron la simulación a diversas condiciones de entrada. El escenario simulado, seleccionando las combinaciones de parámetros de entrada de acuerdo con la experiencia de campo, proporcionó resultados mejores, aunque todavía se registraron importantes errores de subestimación. Finalmente, De Santis et al. (2008) mejoraron la estimación de la severidad a corto plazo utilizando el modelo PROSPECT para simular dos tipos de hoja (verde y quemada), y un modelo geométrico a nivel de dosel (GeoSail). En este estudio obtuvieron un ajuste homogéneo en todo el rango de severidad analizado, en tres áreas de estudio distintas situadas en España y Portugal.

Una vez identificada una técnica eficaz para cartografiar la severidad, se plantea el problema de identificar qué sensor espacial entre los más comúnmente utilizados es el más adecuado para este tipo de estudio. Con gran diferencia, las imágenes Landsat (TM o ETM+) han sido las más frecuentemente utilizadas en este contexto (por ejemplo, van Wagtendonk et al., 2004; Miller y Thode, 2007; De Santis y Chuvieco, 2007; Chuvieco et al., 2007), existiendo también otros estudios que emplean otros sensores como SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) (por ejemplo, Chafer et al., 2004; Chuvieco et al., 2007). Finalmente, la teledetección hiperespectral resulta particularmente adecuada para estas aplicaciones (van Wagtendonk et al., 2004), aunque al momento existen pocos satélites que propocionen este tipo de datos a una escala adecuada.

Tratándose de una estimación que requiere una sola imagen posincendio, el tiempo de revisita de los sensores no constituye una limitación, por esto este estudio se centra en la comparación de las características espectrales y espaciales de cinco distintos sensores: SPOT-5 HRG (High Resolution Geometric), Landsat TM (Land Satellite Thematic Mapper), AWIFS (Advanced Wide Field Sensor), MERIS y MODIS, utilizando la simulación presentada en De Santis et al. (2009), para la estimación de la severidad a corto plazo. La validación se llevará a cabo utilizando como referencia las medidas de severidad realizadas en campo.

5.4.2. Materiales y métodos

5.4.2.1. Área de estudio

El área de estudio está localizada en el noreste de la provincia de Guadalajara (40-41° latitud norte y 1-2° longitud oeste), España (figura 98). El área fue afectada por un gran incendio en julio de 2005, causado por una negligencia humana. Las condiciones de extrema sequía, alta temperatura y fuerte viento, contribuyeron al crecimiento incontrolado del fuego que duró cuatro días, quemando 13.000 ha. El incendio fue tristemente célebre por la muerte de 11 bomberos forestales que trabajaban en la extinción, lo que causó un gran impacto en la opinión pública. Mayores detalles sobre flora, fauna y condiciones del terreno se pueden encontrar en De Santis y Chuvieco (2007).

5.4.2.2. Trabajo de campo

El análisis de la severidad en campo se basó en el método GeoCBI (Geometrically structured Composite Burn Index), propuesto por De Santis y Chuvieco (2009). La figura 98

muestra la localización del área de estudio sobre una imagen Landsat-5 TM. Los puntos amarillos identifican las parcelas muestreadas en campo. La escala propuesta en el CBI va de 0 (sin daño) a 3 (máximo daño), y se basa en considerar el impacto del fuego sobre cinco estratos de vegetación (substrato, herbáceo, matorral y árboles pequeños, árboles intermedios y árboles grandes). Los tres primeros forman el sotobosque y sustrato, y los dos últimos el dosel. Las variables que recoge el GeoCBI hacen referencia al cambio causado por el fuego sobre la estructura vegetal, por lo que se recomienda analizar previamente zonas no quemadas en los alrededores para estimar las condiciones de partida. El GeoCBI se calcula a partir de unas variables parametrizadas que describen distintos rangos de daño. Las más importantes son el cambio en el color del suelo, la presencia de materia orgánica, la pérdida de hojas, el cambio en el color de la hoja, la altura del carbón en los troncos, y la mortalidad de la vegetación. Dos parámetros adicionales ajustan este índice de campo al análisis de imágenes de satélite:

- El porcentaje de cambios en el área foliar (Leaf Area Index, LAI = área foliar por unidad de superficie de suelo).

- La cabida cubierta de la vegetación (Fraction of Cover, FCOV = porcentaje de cabida cubierta respecto al total de la parcela).

Al porcentaje de cambios en el LAI se le asignaron valores entre 0 (no cambio, ausencia de daño) y 3 (100% de cambio, daño máximo); mientras que la FCOV se utilizó para ponderar el peso de cada estrato en el cálculo del valor de severidad de toda la parcela. De este modo, se obtiene una mejor caracterización de la estructura y de la composición de las parcelas quemadas. Tres semanas después del incendio, se muestrearon 103 parcelas distribuidas en toda el área de estudio, donde las zonas resultaban razonablemente accesibles. Cada parcela tenía un diámetro aproximado de 30 m, situadas en áreas homogéneas desde el punto de vista de la severidad.

5.4.2.3. Imágenes de satélite

Para este trabajo se emplearon imágenes de cinco distintos sensores: SPOT-5 HRG1, Landsat-5 TM, AWIFS, MERIS y MODIS. La imagen SPOT-5 HRG1 se adquirió el 20 de septiembre de 2005, y pertenece a la cubierta nacional preparada para el Plan Nacional de Teledetección (cortesía IGN, Instituto Geográfico Nacional de España). Lamentablemente, la imagen no cubre toda la superficie del incendio, a consecuencia de la traza del satélite y la cobertura de nubes, por lo que se seleccionó únicamente el sector más oriental. Para la corrección geométrica se utilizó como referencia una ortofoto digital posincendio (píxel de 50 cm), proporcionada por TRAGSA (Empresa

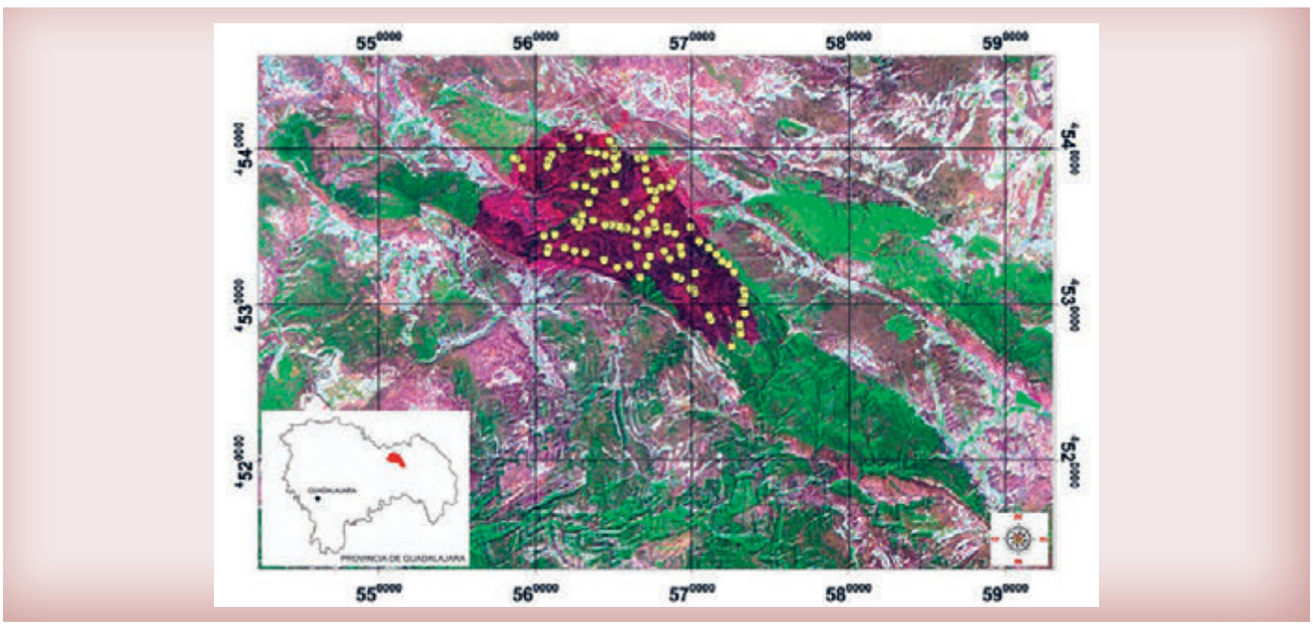


Figura 98: Área de estudio. *Fuente: De Santis y Chuvieco (2008).*

de Transformación Agraria, S.A.). Se empleó un modelo polinomial de primer grado (error < 0,5 píxel). La calibración radiométrica se basó en los coeficientes de cabecera de la imagen y en el método del objeto oscuro propuesto por Chavez (1996). Tras estas correcciones, se abordó una corrección de efecto de sombreado topográfico, empleando un modelo digital de elevaciones de alta precisión (10 m) y el método de corrección lambertiano propuesto por Civco (1989). La imagen Landsat-5 TM (path 200, row 32) correspondió al 5 de agosto de 2005 (diez días después de la extinción del incendio). Los valores brutos (ND, Niveles Digitales) fueron convertidos a reflectividad empleando los valores de calibración propuestos por Chander y Markham (2003) y el método de corrección atmosférica del objeto oscuro. La corrección geométrica se basó en un conjunto de puntos de control, empleando como referencia la ortoimagen Landsat-7 ETM+, utilizada en el proyecto CORINE 2000 (proyección UTM 30 T, datum europeo medio de 1950). Se usaron funciones polinómicas de primer grado. Los residuales medios están por debajo de 0,5 píxeles. Al igual que con la imagen SPOT, se aplicó la corrección de iluminación de Civco. La imagen AWIFS fue adquirida el 22 de agosto de 2005, y fue corregida geométrica y radiométricamente siguiendo el mismo esquema de la imagen Landsat-5 TM. La imagen MERIS es del 12 de agosto de 2005, y se consiguió a través del servicio de distribución de datos de la Agencia Espacial Europea (ESA), en el marco del proyecto europeo Preview (www.previewrisk.com). Los datos fueron procesados por el UKPAC (UK Multi-Mission Processing and Archiving Centre), y distribuidos en formato FR-2P. Este formato, con resolución espacial de 300 metros, se compone de 12 de las 15 bandas originales de MERIS, como datos de reflectividad y ocho bandas adicionales de información (dos índices de vegetación, concentración de algas, concentración de materia orgánica e inorgánica en suspensión, albedo de las nubes, espesor óptico de las nubes y concentración de vapor de agua). La imagen entregada está corregida atmosférica y radiométricamente, y se presenta en la proyección UTM y datum WGS 84, por lo que hubo que reproyectarla a la proyección UTM 30 T, datum europeo medio de 1950. Al observarse sucesivamente un ligero desplazamiento respecto a las imágenes Landsat y SPOT, se realizó una corrección geométrica tomando como referencia un mosaico de imágenes Landsat-7 ETM+ del año 2000 (fuente CORINE, 2000). Se utilizaron funciones polinómicas de segundo grado obteniéndose residuales medios inferiores a 0,6 píxeles. Finalmente, se utilizó una imagen MODIS (a bordo de la plataforma TERRA) del 12 de agosto del 2005. Se trató del producto MOD 09 (MODIS Surface-Reflectance Product, http://modis.gsfc.nasa.gov/) que se calcula a partir del nivel 1B de MODIS, y corresponde a la reflectividad estimada al suelo para cada banda, sin absorción o dispersión de la atmósfera. La imagen ha sido reproyectada a UTM 30 T, datum europeo medio de 1950.

5.4.2.4. Modelos de simulación

Entre los modelos de simulación de reflectividad de la vegetación que se vienen utilizando en los últimos años, los más comunes se basan en la ecuación de transferencia radiativa (RTM), que permite simular físicamente la reflectividad de una cubierta a partir de los factores que influyen en la absorción y dispersión de la radiación solar incidente.

Para este trabajo, la simulación de los niveles de severidad se ha centrado en la especie Pinus pinaster (especie dominante en la zona de estudio), y se ha llevado a cabo utilizando dos modelos (como en De Santis et al., 2009): El PROSPECT a nivel de hoja y el GeoSail a nivel de dosel. El modelo PROSPECT simula la reflectividad y la transmisividad de la hoja a partir de cinco parámetros de entrada (parámetro estructural N, contenido de clorofila a+b, espesor equivalente de agua, materia seca y contenido de pigmentos marrones), siendo utilizado ampliamente en teledetección. Sucesivamente, a nivel de dosel se ha empleado el modelo GeoSail, que permite simular distintos estratos de vegetación, más un sustrato y que considera condiciones de observación e iluminación, parámetros geométricos de la copa y el efecto de las sombras. Los espectros simulados con PROSPECT+GeoSail, cada uno correspondiente a un determinado valor de GeoCBI, se utilizaron para formar una librería espectral de referencia (De Santis y Chuvieco, 2009). Para extraer qué espectro incluido en esta librería resultaba más similar a cada píxel de la imagen, se utilizó el clasificador angular (Spectral Angle Mapper, SAM), disponible en ENVI. El algoritmo SAM minimiza el ángulo espectral entre el espectro observado (extraído de la imagen) y el simulado (de la librería espectral), y es insensible a las condiciones de iluminación y efectos de albedo.

5.4.2.5. Validación

En primer lugar, para identificar las bandas más significativas a la hora de estimar la severidad, se calculó, para cada sensor, la correlación de Pearson entre las firmas espectrales extraídas en correspondencia con las parcelas de campo y su correspondiente valor de severidad observado. Debido a que la imagen SPOT no cubre todo el incendio, y para evitar el solape entre parcelas en el caso de las imágenes con píxel de 300 y 500 m, se seleccionó una submuestra de 81 parcelas de las 103 marcadas en campo. Sucesivamente, el ajuste de las estimaciones fue cuantificado en términos de error cuadrático medio (Root Mean Square Error, RMSE) entre GeoCBI simulado y observado en campo, en la misma submuestra. Es importante tener en cuenta que, debido a la alta intensidad del incendio de Guadalajara, el rango de GeoCBI observado en campo está comprendido entre 2,35 y 3, lo que dificulta extrapolar las conclusiones de este estudio a zonas que presentan valores inferiores a estos.

5.4.3. Resultados

La figura 99 muestra el coeficiente de correlación r de Pearson entre todas las bandas de los sensores utilizados en este estudio y los valores de severidad observados en campo. Destaca la alta correlación negativa de las bandas correspondientes al infrarrojo cercano (IRC) (r >-0,45), siendo la banda 4 de Landsat la que registra el valor más alto (r = -0,65), seguida por la banda 3 de SPOT (r = -0,57), las bandas de MERIS de 10 a 13 (r = -0,55) y, finalmente, la banda 3 de AWIFS (r = -0,54). En el IRC, la reflectividad depende especialmente de la cantidad de biomasa vegetal y de su estado de vigor. Esto confirma que el LAI y la FCOV son los factores predominantes en la determinación de los niveles de severidad. Por otro lado, la banda 7 de Landsat, correspondiente al infrarrojo de onda corta (SWIR 2), muestra una alta correlación positiva (r = 0,51), superior a la que se observa para la banda 5 del mismo sensor y a las bandas 4 de SPOT y AWIFS centradas en el SWIR 1. Esta capacidad del SWIR 2 debería relacionarse con su sensibilidad para distinguir distintos tipos de substratos y contenido de humedad.

5.4.3.1. Validación de resultados

Para analizar mejor la precisión de las estimaciones, el RMSE ha sido dividido en tres grupos, además de considerar su valor total: GeoCBI entre 2,35-2,5; 2,5-2,7; 2,7-3,0 (tabla 37). El primer intervalo considera valores de severidad intermedios, que corresponden normalmente a zonas con alta heterogeneidad en los efectos del fuego, en los distintos estratos de la vegetación. Para este rango, el error más bajo se registra para Landsat-5 TM (RMSE=0,21 tabla 37). MERIS y MODIS muestran una precisión parecida (RMSE = 0,39 y RMSE = 0,33; respectivamente), mientras que SPOT (RMSE = 0,77) y ,sobre todo, AWIFS (RMSE = 1,51), presentan errores muy elevados y no aceptables, ya que corresponden a una incertidumbre mayor que 25% del rango total del GeoCBI. En el segundo intervalo, que corresponde a valores de severidad medio-altos (menor grado de heterogeneidad en la distribución del daño en la parcela), SPOT presenta el menor error (RMSE = 0,12), seguido por MODIS y Landsat-5 TM (RMSE = 0,23 y RMSE = 0,26; respectivamente). MERIS muestra un error más elevado respecto al intervalo anterior (RMSE = 0,59), mientras que AWIFS, aunque mejore ligeramente, sigue presentando un error no aceptable (RMSE = 0,75). Finalmente, la figura 100 muestra los mapas de severidad obtenidos con todos los sensores.

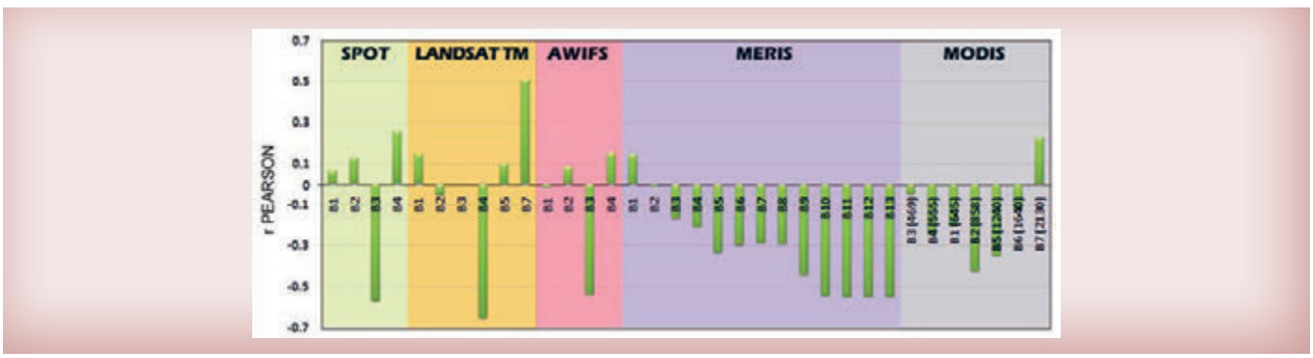


Figura 99: Correlación entre las bandas de los sensores y la severidad observada. *Fuente: De Santis y Chuvieco (2008).*

Tabla 37: Error cuadrático medio (RMSE) y ajuste lineal entre GeoCBI observado y simulado, calculados para cada sensor. *Fuente: Elaboración propia.*

Sensores	Rangos de GeoCBI			RMSE total	Ajuste lineal entre geocbi observado y simulado	R^2
	2,35-2,5	2,5-2,7	2,7-3			
SPOT	0,77	0,12	0,14	0,23	y = 1,466x - 1,341	0,522
LANDSAT	0,21	0,26	0,18	0,20	y = 0,981x - 0,020	0,426
AWIFS	1,51	0,75	0,28	0,51	y = 2,250x - 3,639	0,368
MERIS	0,39	0,59	0,08	0,22	y = 0,556x + 1,296	0,152
MODIS	0,33	0,23	0,12	0,16	y = 0,229x + 2,209	0,117

5.4.3.2. Discusión

La correcta estimación de la severidad se basa en la correcta caracterización espectral y espacial del área quemada. Desde el punto de vista espectral, Landsat-5 TM y MODIS son los únicos sensores que presentan bandas en las dos regiones del espectro más importantes para discriminar los niveles de severidad: el IRC (750-1000 nm) y el SWIR2 (2000-2500 nm). El IRC es especialmente sensible a los cambios en el LAI, en la FCOV y en el estado de vigor de la vegetación; mientras que el SWIR 2 es más sensible al contenido de humedad y a las variaciones en el tipo de substrato. Como cabe esperar, la mejor resolución espacial del Landsat-5 TM (30 m frente a los 500 m de MODIS), mejora ampliamente los resultados. En el caso de SPOT y AWIFS se nota claramente la pérdida de precisión en la estimación de valores de severidad entre 2,35 y 2,5 debido a la falta de información en el SWIR 2 y al escaso número de bandas. En el caso de MERIS, la falta de datos en el SWIR se ve ligeramente compensada por una alta resolución espectral en el visible-NIR. Como se nota claramente en los mapas (figura 100), SPOT y AWIFS tienden a subestimar los valores medios y bajo de GeoCBI, aunque conservan una buena descripción de la variabilidad espacial de la severidad. Por el contrario, dado que las zonas menos afectadas del incendio están localizadas en dos franjas relativamente estrechas y rodeadas por áreas con severidad máxima, los dos sensores de más baja resolución espacial (MERIS y MODIS) sobreestiman los valores de GeoCBI<2,5. En conclusión, el mejor compromiso entre resolución espectral y espacial para la estimación de la severidad resulta ser el sensor Landsat-5 TM, que además asegura un comportamiento homogéneo en todos los rangos de GeoCBI. El resto de los sensores podría ser empleado en áreas muy afectadas por el fuego (más homogéneas) y en las que se quiere distinguir la severidad en rangos más generales (severidad baja, media, alta).

5.4.4. Conclusiones

En este trabajo se comparan estimaciones de niveles de severidad del fuego obtenidas con cinco sensores sobre el mismo incendio. En todos los casos se ha seguido la misma metodología basada en la inversión de un modelo de simulación, ya que en trabajos anteriores se ha de-

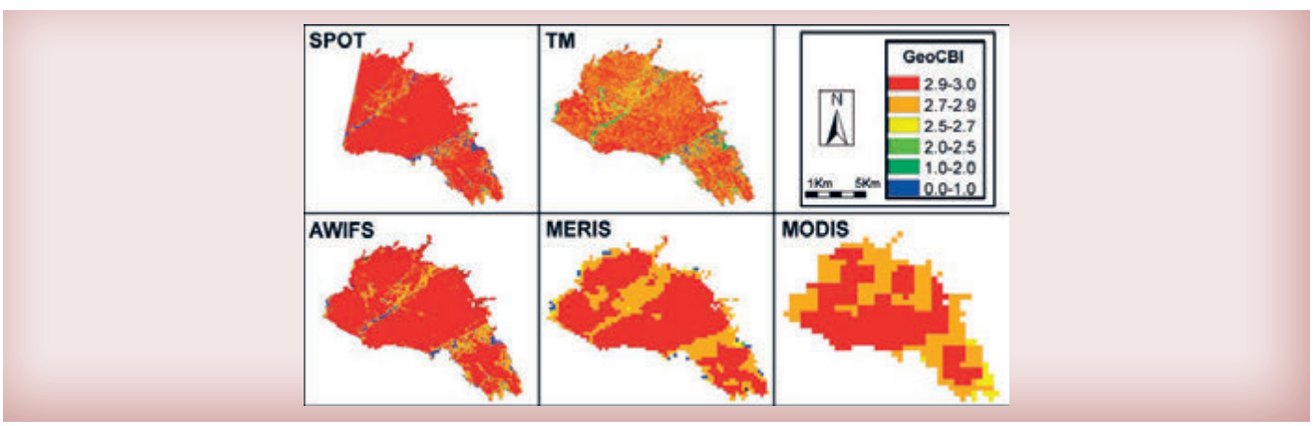


Figura 100: Mapas de severidad obtenidos con todos los sensores. *Fuente: De Santis y Chuvieco (2008).*

mostrado que permite una discriminación mejor respecto a los modelos empíricos tradicionales. Los resultados obtenidos señalan el Landsat-5 TM como el sensor más adecuado, porque tiene una resolución espacial idónea y bandas en los rangos espectrales más significativos en este tipo de estudios. Su precisión es homogénea en todo el rango de GeoCBI analizado y no presenta tendencias marcadas a sobre o subestimación. El resto de los sensores presenta niveles de precisión desiguales, con mayores errores en correspondencia de los valores medios y bajos de GeoCBI. Debido a que los datos de campo cubren un rango de GeoCBI comprendido entre 2,35 y 3, los resultados obtenidos no se pueden extrapolar directamente a valores inferiores a estos.

5.5 Percepción remota hiperespectral y de radar para evaluación de sabanas brasileñas

João Roberto dos Santos, Lênio Soares Galvão, João Arthur Pompeu Pavanelli, Aline Daniele Jacon, Alana Carla Toniol

Divisão de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

5.5.1. Introducción

Las sabanas brasileñas, conocidas comúnmente como Cerrado, corresponden a uno de los epicentros mundiales de biodiversidad, siendo el segundo bioma más grande de Sudamérica. El Cerrado está compuesto de tres tipos principales de fisonomías: pastizales, matorrales y zonas boscosas (Sarmiento, 1983). El Cerrado está mucho más afectado por la deforestación y los incendios que el Amazonas. Desde el 2001 hasta 2013, más de 20 millones de hectáreas de la vegetación nativa fue convertida en pastizales y cultivos (Graesser et al., 2015). Los cambios en el uso del suelo y cubierta terrestre (Land Use and Land Cover, LULC) son, por lo tanto, las principales fuentes de emisiones antropogénicas de CO2, con gran parte de dichas emisiones originadas en el Amazonas y otras partes en el Cerrado.

El mapeo de las fisonomías del Cerrado y la caracterización de LULC, son importantes para apoyar la selección de áreas nuevas para la conservación, evaluar las condiciones y los riesgos de las áreas protegidas, y mejorar el entendimiento de las dinámicas de la vegetación a través del tiempo (Ratana et al., 2005; Jacon et al., 2017). La percepción remota es adecuada para este propósito, pero el uso de radar y datos ópticos aún es un desafío en las sabanas. Las razones principales son: la gradiente de la vegetación desde pastizales y zonas boscosas; las variaciones estructurales de follaje de fisonomías seleccionadas; la respuesta fenológica de la vegetación a los patrones estacionales de las precipitaciones; los efectos de los incendios y la deforestación en la fragmentación del hábitat; y las dificultades de mapeo en áreas de contacto con otros biomas.

Para sobrellevar estos problemas, los sensores orbitales SAR (radar de apertura sintética) han sido cada vez más utilizados en el mapeo de vegetación en el Cerrado, debido a que no son afectados por las condiciones meteorológicas adversas. Además, estos son sensibles a la geometría de superficie. En el rango óptico, los instrumentos hiperespectrales otorgan una mayor cantidad de métricas para la clasificación de la vegetación que los sensores multiespectrales. Así, el SAR y los instrumentos hiperespectrales son relevantes para mejorar los estudios de LULC y modelar la estructura leñosa de las sabanas (Laurin et al., 2013; Mitchard et al., 2011; Naidoo et al., 2015; Souza et al., 2010).

Dos sensores orbitales que representan la vanguardia del SAR y la percepción remota orbital hiperespectral son el PALSAR-2/ALOS-2 (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar 2/Advanced Land Observing Satellite 2) y el EO-1 (Hyperion/Earth Observing 1). Comparado al PALSAR-1, el PALSAR-2 tiene mejor NESZ (Noise-Equivalent Sigma Zero), relación S/A (Signal-to-Ambiguity Ratio) y mayor resolución espacial. Desde el punto de vista espectral, la disponibilidad actual de imágenes Hyperion adquiridas para los sitios seleccionados en el Cerrado, aún ofrecen una oportunidad para anticipar el potencial de los sensores hiperespectrales venideros para el mapeo de vegetación. Por ejemplo, la misión EnMAP (Environmental Mapping and Analysis) está planeada para el 2019, y ha sido propuesta para adquirir imágenes con mucho mejor relación señal-ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio) y mayor ancho de franja que Hyperion.

En este capítulo, se presentan dos casos de estudio desde las actividades de investigación de la División de Percepción Remota del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil, con la finalidad de demostrar los últimos avances en estudios de SAR y sensoramiento

hiperespectral, para el mapeo de vegetación y caracterización de LULC en las sabanas. El primero incluye el uso de los datos de Hyperion/EO-1 para discriminar las fisonomías de sabana en dos áreas protegidas del centro de Brasil. El otro caso involucra el uso de PALSAR-2/ALOS-2, combinado con datos ópticos del sensor OLI (Operational Land Imager) de Landsat-8, para mapear LULC en la zona de transición entre sabanas y selvas tropicales del norte de Brasil.

5.5.2. Caso 1: contribución de los datos hiperespectrales al mapeo de la sabana en el centro de Brasil

Los instrumentos hiperespectrales adquieren imágenes de cientos de bandas espectrales contiguas, para obtener datos de alta resolución espectral para cada píxel de la escena. Según lo discutido por Galvão et al. (2012), este concepto en realidad, está mucho más relacionado con la habilidad de los sensores de medir bandas de absorción estrechas que con la cantidad de las bandas en sí mismas. Por ejemplo, a pesar de la gran diferencia en el número de bandas, el sensor AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer; 224 bandas en el rango 400-2500 nm) y el sensor CHRIS/PROBA (Compact High Resolution Imaging Spectrometer; 62 bandas en el rango 400-1.000 nm), son ambos sensores hiperespectrales debido a que tienen bandas contiguas en cada rango espectral, con anchos de banda (bandwidth) de aproximadamente 10 nm. Este ancho de banda permite una medida adecuada de las características espectrales más estrechas que aparecen en el espectro de píxel de las cubiertas terrestres.

Hyperion/EO-1 fue lanzado en el año 2000 y ha sido operado hasta fecha reciente en 196 bandas calibradas radiométricamente (426-2395 nm), con resolución espacial de 30 m y 7,7 km de ancho de barrido. A pesar de la tecnología antigua expresada en un pobre SNR, Hyperion generó conocimiento necesario en aplicaciones, para apoyar las misiones hiperespectrales planificadas, como EnMAP y HyspIRI (Hyperspectral Infrared Imager). En la práctica, el SNR pobre produce espectro de píxel ruidoso y crea dificultades para medir las principales bandas de absorción de la vegetación. Además, la corrección atmosférica de las imágenes usadas en modelos de transferencia radiativa (RTM) como MODTRAN4 (MODerate resolution atmospheric TRANsmission), también es afectada por la calidad de los datos ingresados.

Debido al número restringido de set de datos disponibles, adquiridos a pedido sobre las sabanas brasileñas, la cantidad de estudios que utilizan datos de Hyperion son limitados. Por ejemplo, Souza et al. (2010) reportaron correlaciones estadísticamente significativas entre 18 índices de vegetación de banda estrecha (VIs) y atributos biofísicos (por ejemplo, cobertura de vegetación) de las fisonomías de la sabana. Datos multitemporales de Hyperion fueron utilizados por Ferreira et al. (2011) para estimar el contenido de agua del follaje sobre determinadas fisonomías. En un estudio reciente de Jacon et al. (2017), la combinación de métricas hiperespectrales derivadas de Hyperion, mejoraron la precisión de clasificación en el centro de Brasil. Diferentes clasificadores y métricas también fueron evaluados por Toniol et al. (2017), para mapear fisonomías de Cerrado en estaciones lluviosas y secas del Parque Nacional de Brasilia (BNP).

Los instrumentos hiperespectrales entregan una mayor cantidad de métricas para la clasificación de la vegetación que los sensores multiespectrales. Las métricas incluyen: a) reflectancia de banda para evaluar diferencias en brillo entre las fisonomías de la vegetación; b) datos derivados de primer orden para detectar la tasa de cambio de la reflectancia asociada con características espectrales (por ejemplo, el borde rojo de la clorofila); c) índices de vegetación de banda estrecha (VIs) para detectar los cambios en la estructura del follaje, bioquímica y estrés/fisiología de las plantas; y d) parámetros de absorción de banda para cuantificar indirectamente la cantidad de sustancias absorbentes en un píxel (Toniol et al., 2017).

Para las estaciones lluviosas y secas, los cambios de la reflectancia generalmente ocurren en las bandas de rojo y borde rojo, debido a la reducción en el contenido de clorofila. En el infrarrojo de onda corta (SWIR), la reflectancia aumenta debido al descenso del contenido de agua de la hoja/follaje. Muchos de los cambios espectrales resultan de las modificaciones del índice de área foliar (LAI) y de una mayor contribución espectral en temporadas secas de vegetación no-fotosintética (NPV), sobre el estrato herbáceo y dentro de los follajes. Los

efectos espectrales de la NPV detectada por Hyperion son más fuertes con el incremento de la apertura del follaje, desde las zonas boscosas de la sabana a los pastizales de sabana (Souza et al., 2010; Jacon et al., 2017; Toniol et al., 2017).

El VIs generalmente muestra un comportamiento estacional bien definido, como es ilustrado por el índice infrarrojo de diferencia normalizada (NDII) y el índice de resistencia atmosféricamente visible (VARI), calculados a partir de seis fechas de adquisición de imágenes Hyperion en 2014 sobre la estación ecológica Águas Emendadas (figura 101). En este senido, las variaciones del NDII y el VARI resultan más fuertes en las estaciones lluviosas (marzo y abril) que en las secas (mayo a agosto), y en las zonas boscosas de la sabana (DWS) que en las arbustivas/pastizales (SS y SG). En la figura 101 se indica la desviación estándar y las precipitaciones acumuladas mensualmente para el periodo de adquisición de imágenes. Las abreviaciones corresponden a: GF = bosque de galería; DWS = sabana boscosa densa; WIS = sabana boscosa; OWS = sabana boscosa abierta; WeS = sabana cerrada; SS = sabana abierta; y SG = sabana pastizal. Para la mayoría de las fisonomías de Cerrado, los VIs disminuyeron de la estación lluviosa (marzo y abril) a la estación seca (mayo a agosto), con un aumento del déficit de agua. Las reducciones más fuertes en el VIs Hyperion fueron observadas en el descenso de la cubierta de follaje, desde las fisonomías de sabana árbol/cerrado (DWS y WIS) a las fisonomías de sabana abierta/pastizal (SS y SG). El bosque de galería (GF) no presentó variaciones significativas de VI a través del tiempo, debido a que se encuentra a lo largo los cauces y es menos sensible al déficit hídrico que otras fisonomías. Utilizando datos hiperespectrales también se puede calcular, en una base por píxel, la profundidad, área, ancho y asimetría de la banda de absorción de clorofila 680 nm; las características de agua del follaje 980 y 1.200 nm; y las bandas de absorción de celulosa-lignina 1.700, 2.100 y 2.300 nm (Jacon et al., 2017; Toniol et al., 2017). Estos parámetros cambian estacionalmente.

Por otra parte, se evaluó el potencial de cuatro clasificadores y cinco sets de métricas Hyperion/EO-1 (reflectancia, derivada de primer orden de la reflectancia; VIs de banda-estrecha; parámetros de banda de absorción; y la combinación de estos atributos), para discriminar ocho fisonomías de sabanas en las estaciones lluviosas y secas, sobre el BNP. Los clasificadores fueron: árbol de decisión (DT), Random Forest (RF), mapeador de ángulo espectral (SAM) y máquina de soporte vectorial (SVM). Los mejores resultados de clasificación, utilizando la combinación de estas métricas, fueron observados para SVM y RF, que tuvo la más alta precisión de clasificación (OA) y valores Kappa. La figura 102 muestra las imágenes de clasificación en las estaciones lluviosas y secas, generadas por las diferentes técnicas, utilizando todas las métricas (reflectancia, índices de vegetación, derivada de primer orden y parámetros de banda de absorción). El mapa de referencia fue publicado por Ferreira et al. (2007). Las abreviaciones son SG = sabana pastizal; SGm = sabana pastizal con murundus (campo de montículos); SS = sabana abierta; SSa = sabana abierta con Lychnophora ericoides (Arnica) y Vellozia squamata

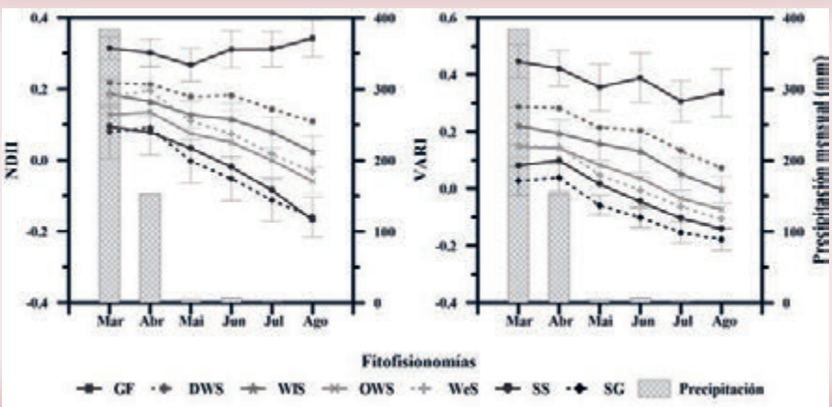


Figura 101: Variaciones estacionales en índices de vegetación Hyperion (VIs) para distintas fisonomías de sabana.
Fuente: Adaptada de Jacon et al. (2017).

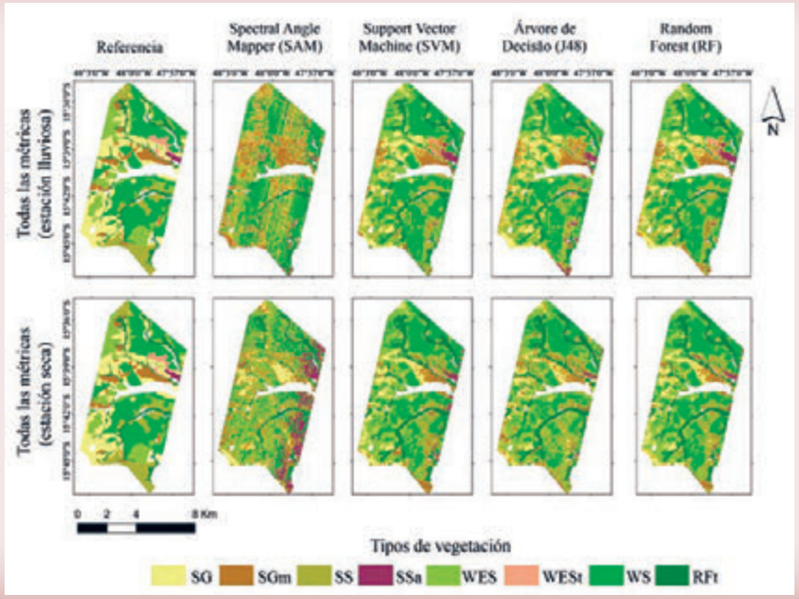


Figura 102: Evaluación de las diferentes técnicas para la clasificación de sabana combinada con métricas hiperespectrales sobre el Parque Nacional de Brasilia (BNP). *Fuente: Toniol et al. (2017).*

(canela de ema); WES = sabana cerrada; WESt = sabana cerrada con Trembleya parviflora; WS = sabana boscosa; y RFt = bosque ribereño. SAM, que compara la similitud entre el espectro de píxel y los espectros de referencia representativos de cada fisonomía, no fue una técnica adecuada para la clasificación de la sabana. El desempeño de reflectancia y VIs fue comparativamente mejor que el rendimiento de parámetros de banda de absorción y derivada de primer orden. Cuando todas las métricas fueron consideradas en el análisis, ganancias de 6% y 8% en OA se obtuvieron sobre los clasificadores y métricas rankeados primero (SVM con reflectancia, en estación lluviosa; RF con VIs, en estación seca). Las clasificaciones fueron precedidas por la elección de características que determinaron una gran cantidad de métricas en estación lluviosa para sobrellevar la mayor confusión espectral observada entre las fisonomías.

Estudios hiperespectrales realizados recientemente en la estación ecológica de Águas Emendadas (Jacon et al., 2017) y en el BNP (Toniol et al., 2017), anticipan el potencial de la generación venidera de sensores hiperespectrales. Por ejemplo, debido al mayor SNR planeado para EnMAP, el desempeño de las métricas para mapear las sabanas y estimar sus atributos biofísicos/bioquímicos será probablemente mejor que el observado en los estudios con Hyperion.

5.5.3. Caso 2: combinación de SAR y datos ópticos para mapeo de sabana en el norte de Brasil

En bibliología, los datos SAR han sido utilizados para el mapeo de la sabana, la evaluación de la degradación/deforestación, caracterización de LULC, y la estimación de biomasa de superficie (Mitchard et al., 2011; Naidoo et al., 2015; Martins et al., 2016). En contacto con otros biomas, donde la discriminación de la sabana de otras clases de LULC es más dificultosa, estudios iniciales en Brasil fueron realizados por Santos et al. (2002). Ellos mostraron las relaciones entre las señales de restrodispersión de JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite 1) y los atributos biofísicos, en una zona de transición de sabanas con selvas tropicales amazónicas.

Investigaciones recientes de radar incluyen la combinación de SAR y datos ópticos para mejorar la precisión en la clasificación de los datos de percepción remota, especialmente en áreas de cobertura nubosa frecuente (Laurin et al., 2013). Siguiendo esta tendencia, se llevó a cabo un estudio donde datos de PALSAR-2/ALOS-2 con datos de OLI/Landsat-8 fueron combinados para mejorar la clasificación LULC mediante Random Forest, en un área de tensión ecológica (sabanas y selvas tropicales) ubicada al norte de Brasil (estado de Roraima).

En este enfoque, descrito en detalle por Pavanelli et al. (2017), los datos SAR utilizados en el análisis fueron stripmap PALSAR-2/ALOS-2 nivel 1.5 modo fino, con imagen de polarización dual (HH y HV), en formato CEOS (resolución espacial de 10 m). La imagen fue tomada el 23 de febrero de 2015, y fue procesada con el software open source Sentinel-1 Toolbox 1.1.1 (STB1), desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA). Un filtro speckle (tamaño de ventana de 3 x 3 píxeles) fue aplicado sobre la imagen. Después de filtrar los datos, se generó la matriz de co-ocurrencia en nivel de gris (GLCM), con el fin de obtener 10 métricas de texturas desde las imágenes HH y HV (tamaño de ventana de 5x5 píxeles), que fueron: media, varianza, contraste, entropía, energía, disimilitud, correlación, homogeneidad, momento segundo angular y coeficiente de correlación máxima. Además, se generaron las bandas sintéticas usadas por Lu et al. (2011) desde polarizaciones PALSAR-2 (HH+HV, HH-HV, HH/HV, HV/HH), y el Índice SAR = (HH*HV)/(HH+HV).

Los datos ópticos fueron derivados desde una imagen OLI/Landsat-8, adquirida el 6 de febrero de 2015. El producto de reflectancia de superficie CDR (Landsat Climate Data Record) de la base de datos del USGS (United States Geological Survey) fue usada con una resolución espacial de 30 m. Las siguientes bandas OLI se utilizaron en el análisis: 2 (0,450-0,515 µm), 3 (0,525-0,600 µm), 4 (0,630-0,680 µm), 5 (0,845-0,885 µm), 6 (1,560-1,660 µm) y 7 (2.110-2.290 µm). Con el uso de estas bandas, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Rouse et l., 1973) y el índice de vegetación mejorado (EVI) (Huete et al., 2002).

Tras corregistrar ambos sets de datos (PALSAR-2 y OLI), el paso siguiente fue aplicar RF para generar distintos modelos de clasificación desde las métricas PALSAR-2 (dos imágenes de polarización SAR; cinco bandas SAR sintéticas; 20 atributos de textura GLCM), métricas OLI (reflectancia de superficie de seis bandas OLI; NDVI y EVI), y desde la combinación de ellos (modelos híbridos). Para validar los resultados de la clasificación RF, se seleccionaron píxeles sobre distintas áreas visitadas en terreno de cada clase, para evitar los efectos de autocorrelación espacial. Se dividieron los píxeles aleatoriamente en datos de entrenamiento (70%) y de validación (30%).

17 clases de LULC se probaron para la clasificación del norte de Brasil. Las clases fueron descritas en detalle por Pavanelli et al. (2017), y corresponden a: 1) agricultura, 2) cuerpos de agua, 3) campinarana, 4) sabana cerrada, 5) sabana pastizal, 6) sabana abierta, 7) sucesión secundaria inicial (SS1), 8) sucesión secundaria intermedia (SS2), 9) sabana quemada, 10) sabana boscosa, 11) bosque maduro, 12) pasto limpio, 13) pasto cubierto (seco), 14) silvicultura, 15) tala silvicultural, 16) suelo desnudo y 17) vereda. La figura 103 muestra el aumento de cobertura de vegetación desde sabana pastizal (sin árboles) hasta la sabana boscosa (50% de cobertura).

Aun considerando esta relativa gran cantidad de clases (17), el uso sinérgico de los datos de PALSAR-2 y OLI para conformar modelos híbridos, en una zona fitoecológica compleja en clases de LULC, demostró el potencial del enfoque actual para alcanzar niveles notables de precisión de clasificación. Pavanelli et al. (2017) reportaron

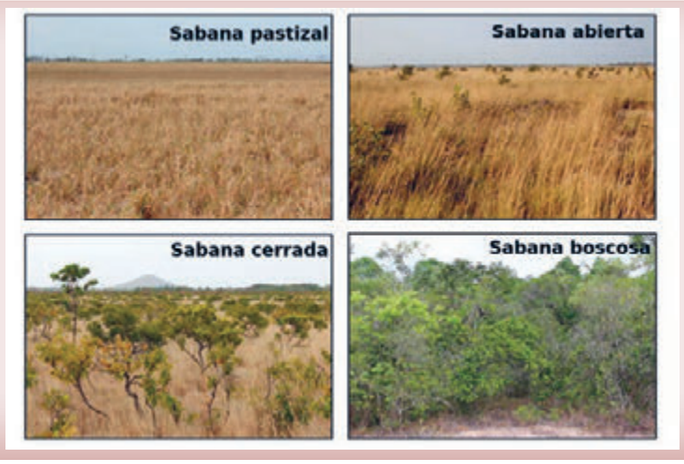


Figura 103: Gradiente de vegetación en sabanas. *Fuente: Elaboración propia.*

una precisión total de 82% y un Kappa de 0,81 para la combinación de ambos sets de datos, lo que representó un aumento de 6% con relación a la clasificación RF derivada únicamente de datos OLI.

La figura 104 muestra un modelo de clasificación RF híbrido, compuesto de la amplitud HH y HV de PALSAR-2/ALOS-2, y la reflectancia de superficie de las bandas 2 a 7 de OLI/Landsat-8, para el norte de Brasil. La combinación de las imágenes de amplidud HH y HV de PALSAR-2 con la reflectancia de superficie de las seis bandas OLI, entregaron la más alta precisión de clasificación. En la clasificación RF, los parámetros ntree y mtry fueron 600 árboles y tres variables, respectivamente. El tiempo de procesamiento de datos fue aproximadamente de cuatro horas debido al tamaño y complejidad del área de estudio. Es importante enfatizar que el uso de las métricas de textura SAR no contribuye a mejorar significativamente la precisión de la clasificación, si se considera el mayor tiempo de procesamiento de datos, comparado con el utilizado en modelo de clasificación RF previo. Los resultados mostraron que la principal contribución de los datos PALSAR-2 en el análisis fue discriminar clases de biomasa baja, tales como la sabana pastizal y sabana boscosa.

5.5.4. Conclusiones

El actual enfoque hiperespectral que utiliza diferentes clasificadores y métricas, puede ser aplicado en futuras misiones hiperespectrales (como EnMAP y HyspIRI). Esto debido a que sus instrumentos han sido diseñados para tener un mayor SNR que Hyperion, con lo que el poder discriminatorio de las métricas para el mapeo de vegetación será probablemente mayor que lo observado en los actuales estudios con Hyperion. La reflectancia y VIs fueron las mejores métricas, mientras que RF y SVM fueron los mejores clasificadores en los estudios de discriminación de sabanas. Incluso teniendo un mucho menor poder de discriminación, dado al bajo SNR de Hyperion, el potencial de los parámetros de banda de absorción, asociados con pigmentos, agua de hoja/follaje y lignina/celulosa, no pueden ser ignorados, de acuerdo a los resultados obtenidos. Utilizando los próximos sensores hiperespectrales con mejores especificaciones técnicas que las de Hyperion, la información química de follaje puede ser obtenida e incorporada en los procedimientos de mapeo.

Desde los estudios SAR/óptico realizados en Brasil, se observó una mayor eficiencia de los datos ópticos OLI/Landsat-8 para discriminar fisonomías de sabana con grandes cantidades de biomasa, comparadas también con otras fisonomías que son fuertemente afectadas por la degradación del fuego y la deforestación. Por otro lado, el PALSAR-2/ALOS-2 fue importante en los análisis para discriminar sabanas de biomasa baja. El ejemplo presentado en este capítulo se derivó de la información polarimétrica de la banda L. Sin embargo, otros estudios han sido realizados sobre los trópicos, usando instrumentos SAR en bandas X y C para obtener mayor información sobre los atributos de coherencia e interferometría para el mapeo de LULC.

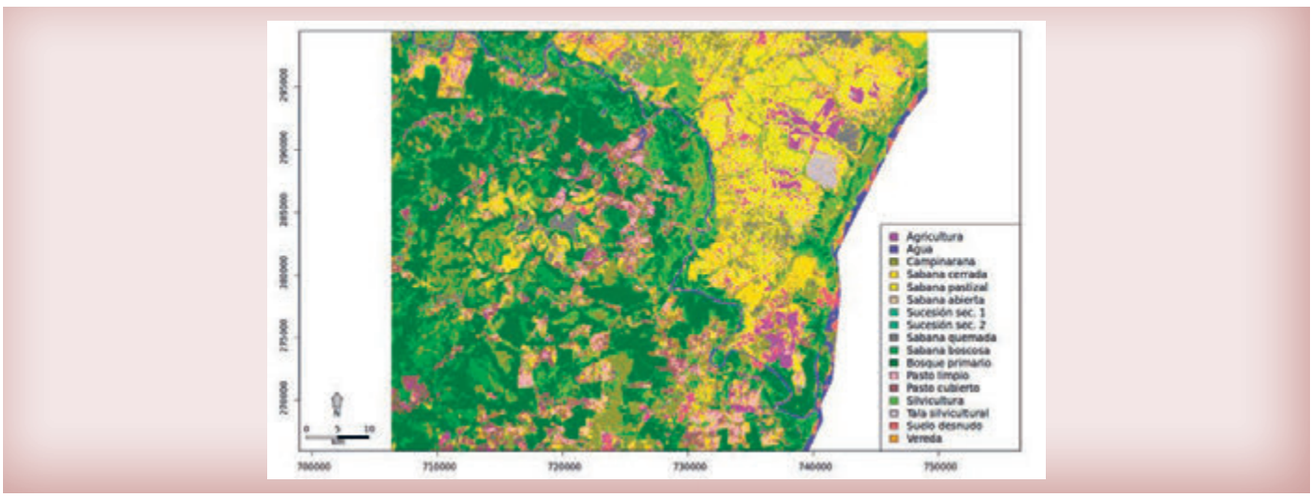


Figura 104: Clasificación de uso del suelo y cubierta terrestre (LULC) utilizando un modelo híbrido de Random Forest.
Fuente: Pavanelli et al. (2017).

Los resultados obtenidos mostraron que existe una necesidad urgente por una mayor actividad de inventario forestal para monitorear las causas y efectos de la degradación del ecosistema de sabana, incluyendo también temáticas asociadas con el cambio climático. Con este propósito, nuevos enfoques siguen siendo necesarios para integrar los datos de fuentes multisensoriales. En el campo de la percepción remota hiperespectral y de radar, futuras innovaciones tecnológicas, con la disponibilidad de nuevos productos y métodos, mejorarán la comprensión de las interacciones entre las actividades humanas y el funcionamiento ecosistémico, así como los impactos resultantes sobre la sostenibilidad de las sabanas en el tiempo.

5.5.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Instituto Brasília Ambiental (IBRAM), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) y el Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).







SECCIÓN 6

POBLACIÓN Y TERRITORIO

“Cuando era pequeño, sentía pasión por los mapas. Podía mirar por horas Sudamérica, África o Australia, y perderme en todas las glorias de la exploración. En aquella época había en la Tierra muchos espacios en blanco, y cuando veía uno que me resultaba particularmente atractivo en un mapa (aunque todos lo eran), ponía un dedo encima y decía: ‘Cuando crezca iré allí’”.

Joseph Conrad (El corazón de las tinieblas)

SECCIÓN VI

Población y territorio

Esta sección trata de temas relacionados con población y territorio. En el capítulo 1 se describen los componentes de la epidemiología geoespacial y su aplicación en enfermedades transmisibles y crónicas. La geomática es una disciplina que reúne e integra a un conjunto de geociencias, que se configuran para la gestión de la información geográfica y se implementan a través de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). La utilización de técnicas geoespaciales en salud pública ha permitido revalorar la importancia del entorno como determinante de salud y enfermedad. De esta forma, la aplicación de la geomática permite una adecuada ubicación, aislamiento y tratamiento de enfermedades, que se encuentran relacionadas directamente con las condiciones ambientales y geoespaciales de un territorio.

El capítulo 2 muestra el proceso metodológico del uso de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG) en el ordenamiento local de Ixtlahuacán del Río, en sus diferentes etapas (caracterización, diagnóstico, pronóstico y propuesta), a través de la generación de datos y el análisis espacial de los mismos. Se describe tambien cómo las 30 Unidades de Gestión Ambiental (UGA's) que conforman el modelo de ordenamiento del municipio, con sus lineamientos, estrategias ecológicas y criterios, serán un instrumento de planificación y gestión ambiental a corto, mediano y largo plazo.

En el capítulo 3 se presentan algunas de las aplicaciones de la geomática en sus variados aspectos, para lo cual se describen dos experiencias realizadas en los ámbitos forestal y minero, por ser las actividades productivas de mayor relevancia en Chile. En este contexto, se presenta un trabajo realizado a nivel de pregrado en la carrera de Ingeniería Ambiental y, por otra parte, un trabajo de consultoría académica y profesional aplicado en el sector minero e inserto en la tarea de acercamiento al medio externo, ambas experiencias desarrolladas como parte de las labores académicas del área de geomática perteneciente al Departamento de Ingeniería Geográfica de la Universidad de Santiago de Chile.

El capítulo 4 se aboca a la localización espacial de aquellos asentamientos populares que han ido surgiendo desde 1960 hasta 2016 en el área metropolitana de Guadalajara. Los asentamientos populares en el territorio mexicano requieren de su identificación y monitoreo, dada su característica intrínseca de constante transformación territorial. A pesar de ello las autoridades locales han destinado pocos recursos y personal para su localización territorial. Los datos de los asentamientos que se desarrollaron entre 1960 y 2000 se retomaron de un trabajo previo, y los de aquellos que surgieron entre 2000 y 2016 se obtuvieron a través de diferentes tecnologías de la información. Esto último consideró un detallado reconocimiento visual de verificación de los resultados que se obtuvieron a través de los campos de entrenamiento, en el análisis digital de la imagen del satélite Landsat 8 de 2016. Adicionalmente, se obtuvo la extensión de siete diferentes tipos de ocupación del suelo en la metrópoli, entre ellos los asentamientos populares y del área urbana de la metrópoli en 2016.

El capítulo 5 trata de la creación y estado actual del Atlas Nacional de España. Los atlas nacionales son obras clásicas que dan a conocer las características geográficas del país objeto de estudio. Gozan de una fecunda tradición y están abiertos, en la actualidad, a la incorporación de las nuevas tecnologías de la comunicación (TIC). Su plurifuncionalidad en el uso las hacen obras de referencia y su multidisciplinariedad en su ejecución otorga a los mismos un gran valor científico y técnico. El Instituto Geográfico Nacional de España ha sido el responsable institucional de su elaboración en este país. Desde hace ya más de un siglo se han sucedido diversos proyectos que han dado como resultado productos bien conocidos. El capítulo da cuenta del proyecto actual que aúna el saber acumulado y la aplicación de las TIC. Se destaca, en concreto, el proceso de ejecución del primer producto publicado (España en mapas. Una síntesis geográfica) de la serie Compendios del Atlas Nacional de España y la construcción de un Sistema de Información del Atlas Nacional de España (SIANE).

“Now when I was a little chap I had a passion for maps. I would look for hours at South America, or Africa, or Australia, and lose myself in all the glories of exploration. At that time there were many blank spaces on the earth, and when I saw one that looked particularly inviting on a map (but they all look that) I would put my finger on it and say, ‘When I grow up I will go there’”.

Joseph Conrad (Heart of Darkness)

SECTION VI

Population and territory

This section deals with issues related to population and territory. Chapter 1 describes the components of geospatial epidemiology, and their application in communicable and chronic diseases. Geomatic is a discipline that brings together and integrates a set of geosciences, which is configured for the management of geographic information and implemented through Information and Communication Technologies (ICT). The use of geospatial techniques in public health has allowed to revalue the importance of the environment as determinant of health and disease. Thus, the application of geomatics allows an adequate location, isolation and treatment of diseases, which are directly related to the environmental and geospatial conditions of a territory.

The second chapter shows the methodological process of the use of Geographic Information Technologies (GIT) in the local planning of Ixtlahuacan del Rio, in its different stages (characterization, diagnostic, forecast and proposal), through the generation of data and the spatial analysis of them. It also describes how the 30 Environmental Management Units (EMU) that conform the municipal planning model, with its guidelines, ecology strategies and criteria, will be an instrument of environmental planning and management in the short, medium and long term.

Chapter 3 presents some of the applications of geomatics in its various aspects, for which two experiences in forestry and mining are described, as they are the most important productive activities in Chile. In this context, a work done at the undergraduate level in the career of Environmental Engineering is presented along with a work of academic and professional consultancy applied in the mining sector and inserted in the task of approaching the external environment, both experiences developed as part of the academic work of the area of geomatics belonging to the Department of Geographical Engineering of the University of Santiago de Chile.

The fourth chapter focuses on the spatial location of those low-income settlements that have been emerging from 1960 to 2016 in the metropolitan area of Guadalajara. The low-income settlements in the Mexican territory require their identification and monitoring, given their intrinsic characteristic of constant territorial transformation. Despite this, local authorities have allocated few resources and personnel for their territorial location. The data from the settlements that were developed between 1960 and 2000 was taken from previous work and those from 2000 to 2016 were obtained through different information technologies. The latter considered a detailed visual recognition of the results obtained were obtained through the training camps, in the digital analysis of the image of the Landsat 8 satellite of 2016. Additionally, the extension of seven different types of land occupation in the metropolis was obtained, among them the low-income settlements and the area urban metropolis in 2016.

Chapter 5 deals with the creation and current status of the National Atlas of Spain. The National Atlases are classic works that reveal the geographical characteristics of the country in study. They enjoy a strong tradition and are open to the incorporation of new communication technologies (ICT) at present. They are works of reference due to their multi-functionality and have a great scientific and technical value for their multidisciplinary in the execution. The National Geographic Institute of Spain has been the institutional responsible for its elaboration in this country. For more than a century, several projects have been developed which have produced important products. The chapter presents the current project which includes accumulated knowledge and the application of ICT. It is highlight the execution of the first published product (Spain in maps, a geographical synthesis) of the Compendium series of the National Atlas of Spain and the construction of an Information System of the National Atlas of Spain (SIANE).



6.1 Geomática y análisis geoespacial en el estudio de enfermedades y condiciones de salud

Carlos Mena,[a] César Sepúlveda,[b] Eduardo Fuentes,[b] Yony Ormazábal,[a] Iván Palomo[b]

[a]Centro de Geomática, Universidad de Talca, Talca, Chile
[b]Laboratorio de Investigación en Trombosis, Departamento de Bioquímica Clínica e Inmunohematología, Facultad de Ciencias de la Salud, Programa de Investigación de Excelencia Interdisciplinaria en Envejecimiento Saludable (PIEI-ES), Universidad de Talca, Talca, Chile

6.1.1. Introducción

La geomática y las técnicas de análisis geoespacial son una herramienta útil para la toma de decisiones de los sistemas de salud. Permiten el estudio del comportamiento de enfermedades, las condiciones que favorecen su presentación y diseminación, la eficacia de las medidas de control, hasta la prevención de eventos adversos desde un punto de vista espacial.

En el caso de enfermedades transmisibles, permiten estudiar la propagación de las enfermedades y las determinantes ambientales que favorecen esta o la presencia del vector.

En el caso de las enfermedades no transmisibles, permiten identificar factores ambientales que contribuyen al desarrollo de enfermedades prevenibles que significan un alto gasto en salud, permitiendo incluso diseñar ciudades que favorezcan conductas saludables.

En materia de políticas públicas o en la distribución de recursos de salud, aportan información para una implementación eficiente de estos.

6.1.2. Geomática y el análisis geoespacial

La geomática es una ciencia que se ocupa de la gestión de información destinada al estudio de diversos elementos, fenómenos y eventos geográficos, empleando disciplinas como el sistema global de navegación satelital (GNSS), la teledetección o percepción remota, y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esto ha permitido implementar una plataforma digital para la gestión de esta información, que además de generar una descripción geográfica detallada, permiten elaborar modelos de asociación entre variables territoriales e incluso la predicción de ciertos eventos, significando una revolución para el análisis geoespacial. Muchas disciplinas, tales como la agricultura, meteorología y planificación urbana, entre otras, se han beneficiado de estas técnicas. Durante los últimos años, el análisis geoespacial se ha constituido en una herramienta de alto interés en el campo de la epidemiología y la salud, puesto que ha mostrado ser de gran utilidad para el estudio y análisis de patrones de ocurrencia y distribución de enfermedades.

6.1.3. Componentes de la epidemiología geoespacial

La utilización de técnicas geoespaciales en salud pública ha permitido revalorar la importancia del entorno como determinante de salud y enfermedad. Como se observa en la figura 105, en un estudio geográfico-epidemiológico se deben precisar diferentes componentes.

En primer lugar, es necesario definir el lugar geográfico de estudio. Si se desea estudiar un territorio determinado, es conveniente seleccionar una unidad geográfica que permita dividir el territorio total en zonas más pequeñas no superpuestas. Generalmente, la selección del área de estudio está dada por criterios administrativos más que geográficos. De esta forma, el territorio global de análisis, para Chile, podrían ser comunas, ciudades, regiones, provincias, e incluso país. Por otra parte, las unidades de división pueden ser definidas por zonas censales, códigos postales, vecindarios y comunas, lo cual depende de la

magnitud del territorio total de estudio. Después de esto, la información de la población residente en el territorio de estudio es asignada a las unidades territoriales de división seleccionadas. Dicha información está relacionada directa o indirectamente con el estado de salud de los participantes, como la prevalencia de una enfermedad, de factores de riesgo o hábitos saludables. Es muy importante que esta información proceda de fuentes confiables. Para estudios epidemiológicos la información puede proceder de fuentes como el censo y registros de los servicios de salud, aunque no se limitan solo a estas. Por otro lado, también es posible realizar mediciones directas en la población de estudio, lo que puede incluir la realización de encuestas, determinaciones bioquímicas, de portación de microorganismos, u otras mediciones como medidas antropométricas o la medición de actividad física con instrumentos (podómetro o acelerómetro).

Para determinar los efectos del entorno en la salud, las zonas definidas son caracterizadas en cuanto a variables que pueden tener repercusión en el estado de salud de la población. Estas variables pueden ser ambientales (contaminación, temperatura, humedad), de variables sociales (grado de cohesión social, el nivel socioeconómico y educacional), nivel de urbanidad o ruralidad, nivel de salubridad, presencia de áreas verdes e incluso la existencia de recursos para la salud (centros asistenciales). El empleo del SIG permite relacionar espacialmente esta información, por lo que es posible asociar una variable del ambiente y su repercusión en el estado de salud de la población.

El manejo adecuado de las técnicas de análisis epidemiológico-espacial ha permitido la obtención de valiosa información para el estudio de enfermedades o en la efectividad de intervenciones en materia de salud pública. A continuación, se describen las principales herramientas de análisis geoespacial en epidemiología.

6.1.3.1. Mapeo como una técnica geoespacial de fácil interpretación

En su forma más simple, las herramientas de análisis geoespacial pueden aplicarse a la descripción de un fenómeno relacionado con el estado de salud de la población en un territorio determinado. Así, por ejemplo, la ubicación cartográfica de un evento de interés permite la visualización rápida de dicho evento en un momento y

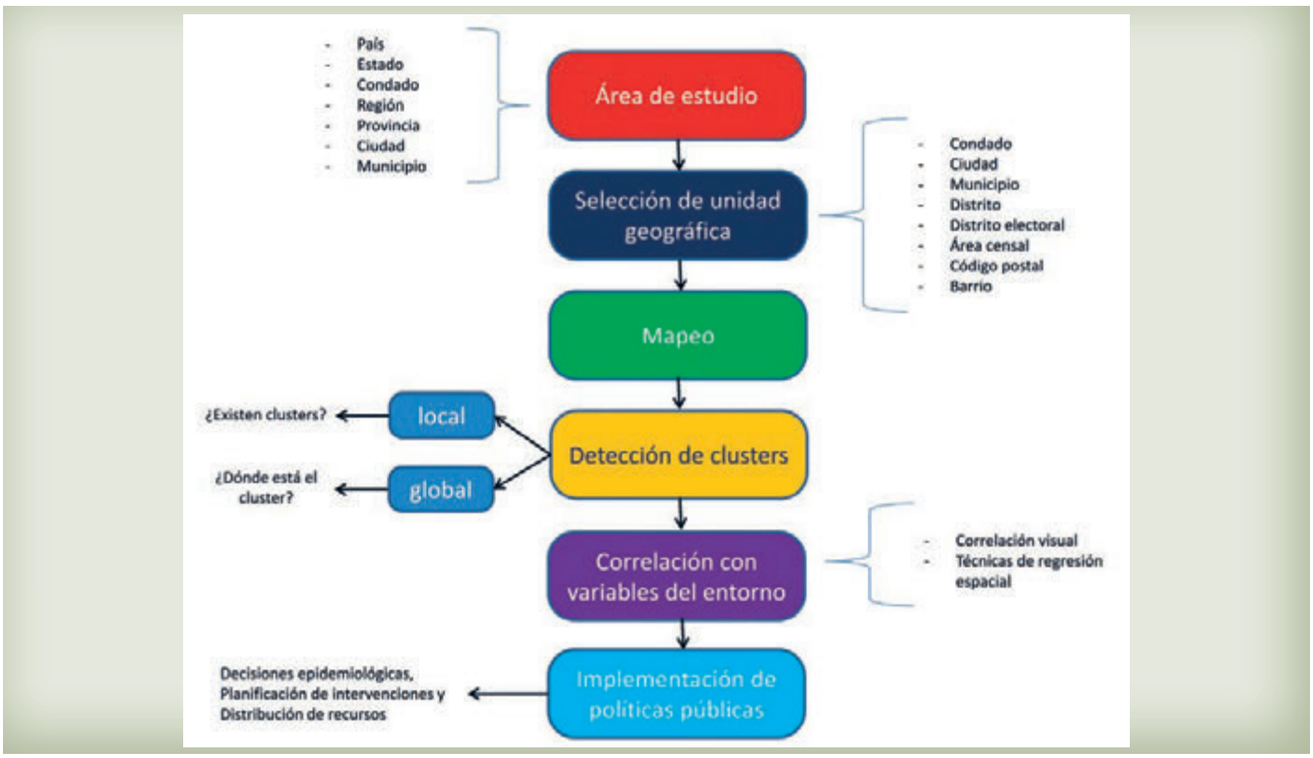


Figura 105: Componentes del análisis geoespacial para el estudio de enfermedades. *Fuente: Elaboración propia.*

espacio. Al poseer esta información una locación determinada, permite generar hipótesis acerca del comportamiento y posibles causas del evento, así como la implicancia del entorno en la ocurrencia de ese evento. De esta forma, es posible detectar posibles relaciones entre el entorno y el desarrollo de un fenómeno: se podría detectar, por ejemplo, que en las zonas del territorio donde existe una mayor contaminación acústica reside un mayor porcentaje de personas con estrés, o que en zonas con una mayor densidad de áreas verdes existe un mayor desarrollo de actividad física o menos obesidad en la población cercana (figura 106).

6.1.3.2. Autocorrelación geoespacial y clusters en la detección de determinantes ambientales de salud

Si bien la información cartográfica es útil para señalar dónde dirigir la atención, resulta débil como argumento para respaldar la implementación de intervenciones o nuevas políticas públicas. Por ejemplo, al desplegar un mapa que indique la prevalencia de diabetes o del desarrollo de enfermedades cardiovasculares (ECV) en un territorio determinado, se podrían probablemente identificar visualmente zonas donde esta prevalencia se concentre. Sin embargo, esta información no deja de ser subjetiva. Para sustentar la implementación de intervenciones o nuevas políticas públicas es necesario utilizar herramientas capaces de otorgar un sustento estadístico a la información pesquisada, como la detección de clusters.

a. Detección de clusters: la autocorrelación geoespacial es un concepto que indica en qué grado un fenómeno tiende a ser similar entre locaciones geográficas cercanas. Así, en un territorio de estudio cualquiera, una comuna, por ejemplo, puede estar dividida en unidades geográficas menores, como vecindarios.

La figura 107 muestra una representación simplificada de esta división. Para cada vecindario la tasa de un evento determinado, obesidad, por ejemplo, es representado con una intensidad de color. Así, en la figura los vecindarios ubicados en la zona superior derecha de la comuna tienden a tener una mayor tasa de obesidad, siendo muy probable que cualquier vecindario colindante también tenga mayor probabilidad que el promedio de la comuna de presentar obesidad.

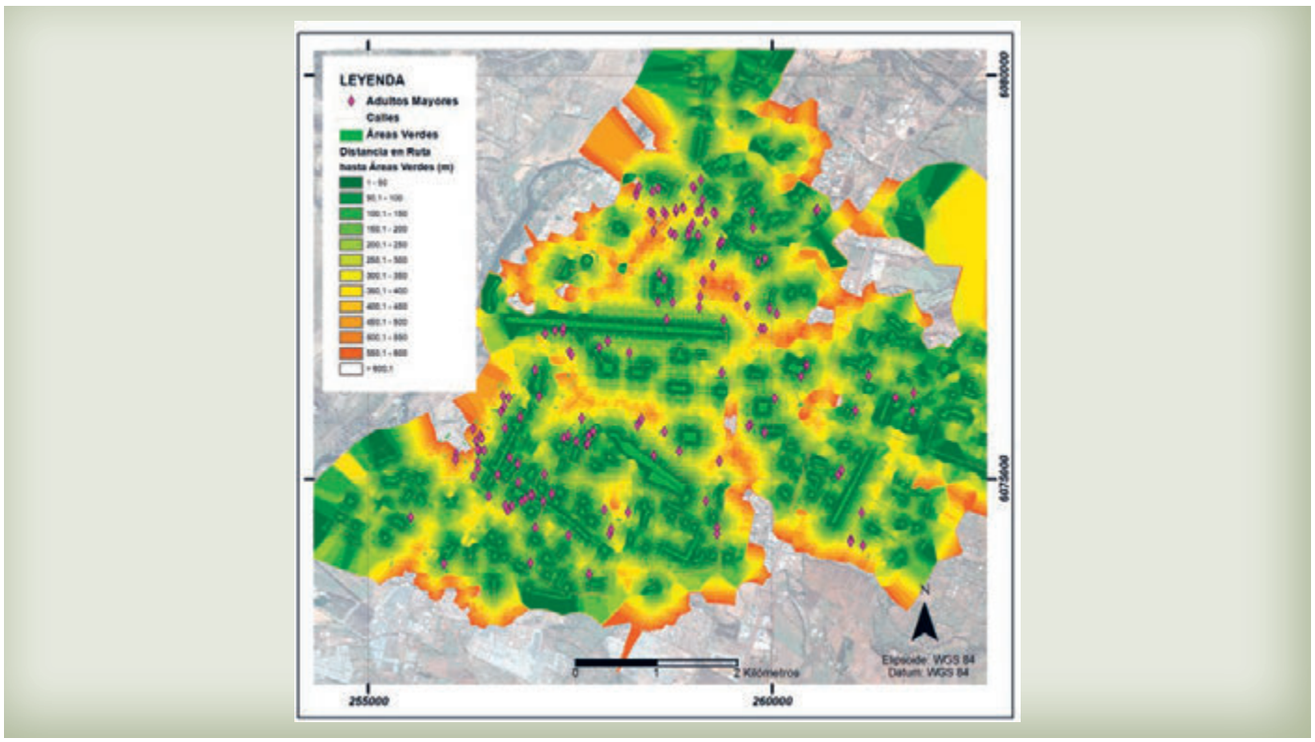


Figura 106: Análisis de distancia en ruta de pacientes adulto mayor hasta áreas verdes más cercanas en la ciudad de Talca.
Fuente: Elaboración propia.

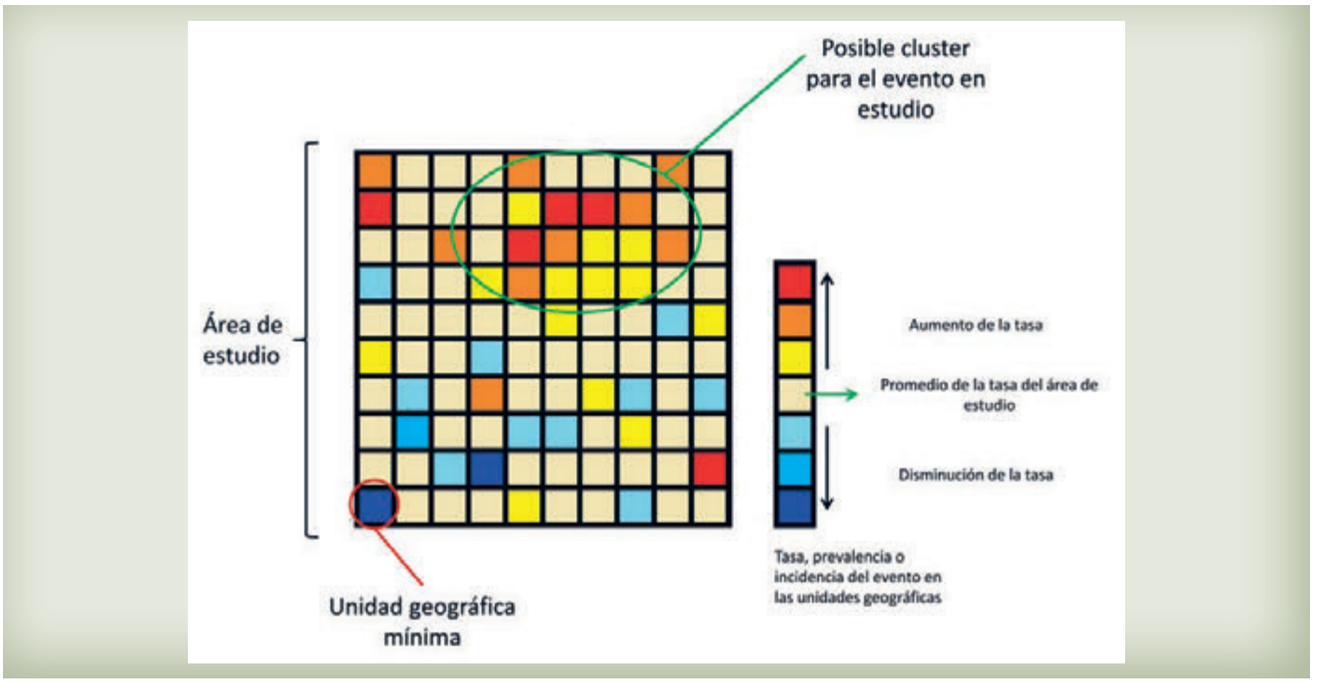


Figura 107: Esquema para la detección de clusters para un fenómeno determinado. *Fuente: Elaboración propia.*

Para establecer la existencia de correlación geoespacial positiva, se dispone de diversos modelos estadísticos capaces de detectar clusters (agrupaciones), los cuales además de establecer la existencia pueden indicar el lugar geográfico donde ocurre autocorrelación geoespacial, otorgando además un soporte estadístico a la información. El análisis de Moran I es la fórmula más frecuentemente empleada para detectar clusters de manera global, es decir, indica si hay o no presencia de clusters en el territorio de interés, aunque no dice dónde se encuentra. El cálculo del indicador global de asociación espacial (Local Indicators of Spatial Association, LISA), es una extensión del análisis de Moran I para detectar el o los lugares donde hay presencia de clusters. El análisis Getis-Ord Gi también detecta la ubicación de clusters, entregando esta información como la presencia en el mapa de puntos de calor (hotspots). Cuando variables relacionadas a la salud de la población tienden a formar clusters, es muy probable que causas subyacentes estén presentes en el entorno y sean compartidas por las zonas involucradas. Siguiendo con el ejemplo anterior, el alto índice de obesidad en los vecindarios podría estar relacionado con la presencia de expendios de comida rápida o con escasez de verdulerías en aquella zona.

b. Regresión geoespacial: se puede dar un sustento estadístico a las posibles variables del entorno involucradas en la presencia de clusters de un evento. Para esto, existen métodos de regresión que permiten asociar un evento en un lugar determinado (un cluster, por ejemplo), con un factor del entorno. Los métodos de regresión geoespacial más frecuentemente utilizados son: la técnica de los mínimos cuadrados ordinarios (Ordinary Least Squares, OLS); el modelo de latencia espacial (Spatial Lag Model, SLM), y la regresión geográficamente ponderada (Geographically Weighted Regression, GWR); siendo esta última la más apropiada para el análisis geoespacial. Así, la combinación de estos métodos ha sido de utilidad para establecer correlaciones, por ejemplo, entre clusters de lugares con alta contaminación de metales pesados y la actividad realizada en esas zonas (Wu et al., 2017); o entre clusters con alta mortalidad y altos niveles de polución en esas zonas (Lim et al., 2014).

La combinación de cartografía de las enfermedades, la detección de clusters y su correlación con variables del entorno, otorgan información muy valiosa que permite identificar posibles factores ambientales, que podrían ser modificados, como también la detección de la población en riesgo. De esta forma, es posible sustentar la planificación e implementación de intervenciones enfocadas a mejorar la salud de la población.

6.1.4. Técnicas geoespaciales y enfermedades transmisibles

Las mejoras en el control de enfermedades infecciosas logradas desde la segunda mitad del siglo pasado, son un gran triunfo en materia de salud pública. Esto ha ocurrido gracias a los avances de la medicina moderna y a progresos en materia de salubridad. De todas formas, este tipo de enfermedades sigue cobrando millones de muertes en el mundo, sobre todo en zonas de extrema pobreza, donde es difícil aplicar medidas se salubridad adecuadas. Además, la aparición de microorganismos multirresistentes le suma complejidad al problema. En este tipo de enfermedades, el medioambiente juega un papel relevante al poseer componentes que pueden contribuir a la aparición y propagación de una enfermedad infecciosa, por ejemplo, la presencia de vectores o de condiciones ambientales y socioculturales que favorezcan la propagación de un proceso infeccioso.

En los últimos años, han aparecido diferentes enfermedades infecciosas que han generado un estado de alarma a nivel mundial, como lo ocurrido con la gripe aviar, la gripe porcina o el ébola. Debido a que estas infecciones pueden diseminarse en un periodo muy breve, la actualización inmediata de la información es crucial para su contención.

Las técnicas de mapeo, la información más simple entregada por un sistema geoespacial, tienen una gran importancia para el control de epidemias y pandemias. La posibilidad de actualizar rápidamente la información y representar en un mapa el problema, es una potente herramienta que contribuye al control de la diseminación de una enfermedad infecciosa. Es posible también observar el comportamiento de la infección y detectar población en riesgo en niveles que van, desde una perspectiva global a nivel de continente o conjunto de países, hasta perspectivas locales dentro de una sola región o país (Boulos, 2004; Tran et al., 2014). Para llevar a cabo esto, los SIG permiten crear, analizar y archivar mapas, además de incorporar a estos, información relacionada con el comportamiento epidemiológico de las infecciones y, finalmente, combinar estos datos con información ambiental del lugar que está siendo analizado.

Las herramientas geoespaciales, en combinación con adecuadas fuentes de datos, pueden entregar valiosa información sobre el comportamiento de una enfermedad y las variables involucradas. La detección de clusters permite identificar la distribución de un evento, mientras que técnicas de correlación espacial, generan el nexo con variables que no se limitan al espacio físico, incluyendo factores socioeconómicos y culturales presentes en un lugar. En el caso de infecciones que necesiten un vector para transmitirse, el estudio del hábitat y las condiciones ambientales que fomenten su desarrollo, también debe ser considerado en este tipo de análisis. La tabla 38 muestra ejemplos de estudios donde se emplean este tipo de técnicas geoespaciales para estudiar la implicancia del ambiente sobre enfermedades infecciosas, tales como, tuberculosis, malaria y leishmaniasis (conjunto de enfermedades zoonóticas y antroponóticas causadas por protozoos del género Leishmania). A modo general, la detección de clusters permite identificar los lugares que necesitan una intervención; mientras que el estudio de las variables ambientales con técnicas de regresión permite, a su vez, identificar las variables a intervenir para así diseñar acciones adecuadas para el control de la enfermedad.

La posibilidad de utilizar herramientas como la tecnología GPS asociada a dispositivos móviles, por ejemplo, celulares inteligentes, ha permitido realizar estudios de seguimiento y con ello, relacionar patrones de recorrido con la dispersión o adquisición de una enfermedad. Esta estrategia ha mostrado funcionar bien a nivel de micro-escala, por ejemplo, en una universidad las personas que padecieron influenza tendían a concentrar la densidad de sus recorridos en lugares cerrados con gran concurrencia y pobre ventilación (Qi y Du, 2013). De esta forma, es posible idear medidas de acción y detectar lugares a intervenir. Si bien es posible llegar a estas conclusiones por medios de otras estrategias como encuestas de actividad diaria, la ventaja del seguimiento geoespacial es ser una medida objetiva y relativamente sencilla de aplicar; más que un reemplazo, sería un buen complemento para las estrategias tradicionales.

6.1.5. Técnicas geoespaciales y enfermedades no transmisibles

Las mejoras en las medidas de salubridad y el aumento en la esperanza de vida que ha ocurrido a partir de la última mitad del siglo XX, han generado un aumento en enfer-

Tabla 38: Estudios geoespaciales aplicados al estudio de enfermedades transmisibles. *Fuente: Elaboración propia.*

Estudio	Lugar	Análisis espacial	Territorio estudio	Unidad geográfica	Principales hallazgos
Factores socioeconómicos relacionados a la prevalencia de tuberculosis (Wubuli et al., 2015)	Xinjiang, China	Clusters: Análisis local de Moran, Getis-Ord Gi* Correlación espacial: OLS y GWR	Provincia (Xinjiang)	Distrito /provincia	Prevalencia de tuberculosis está relacionada con nivel socioeconómico y presencia de minorías
Factores climáticos relacionados a la prevalencia de tuberculosis (Rao et al., 2016)	Qinghai, China	Clusters: Análisis global y local Moran Relación con variables climáticas: Spatial panel data model	Provincia (Qinghai)	Condados	Incidencia de tuberculosis aumenta con bajas temperaturas, lluvias y alta velocidad del viento
Determinar patrones para incidencia y persistencia de malaria (Grillet et al., 2010)	Sucre, Venezuela	Clusters: Getis-Ord Gi* Correlación espacial: OLS y GWR	Estado (Sucre)	Villas	La incidencia y persistencia de malaria está relacionada positivamente a la cercanía al hábitat del vector y a la densidad poblacional
Estudiar efectos del uso del terreno en prevalencia de malaria (Townes et al., 2013)	Nsamala y Sitole, Malawi	Clusters: Getis-Ord Gi* Correlación espacial: regresión logística multivariada (MLR) regresión logística multivariada multinivel (MLLR)	Dos localidades tradicionales (Nsamala y Sitole)	Villas	Se detectó una relación entre la prevalencia de malaria en menores con actividad relacionada a la agricultura
Estudiar patrones espaciales asociados con incidencia de leishmaniasis (Sadeq, 2016)	Marruecos	Clusters: Análisis global y local de Moran Correlación espacial: OLS	País (Marruecos)	Provincias	Dentro de las variables estudiadas, la pobreza fue el único factor que se relacionó a la incidencia de leishmaniasis
Detectar factores ambientales relacionados a la incidencia de leishmaniasis (Ali-Akbarpour et al., 2012)	Fars, Irán	Clusters: Análisis local y global de Moran Correlación espacial: OLS y GWR	Provincia (Fars)	Condado	Condiciones de baja temperatura, velocidad del viento y alta humedad, así como una alta densidad poblacional, se relacionan incidencia de leishmaniasis

medades crónicas como ECV, cáncer, diabetes y enfermedades respiratorias. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), estas enfermedades, en conjunto, son responsables de más del 80% de las muertes a nivel mundial por enfermedades no transmisibles. En los últimos años, las técnicas geoespaciales han mostrado ser una herramienta de gran valor en epidemiología para afrontar el manejo de dichas enfermedades. En general, permiten visualizar el problema desde un punto de vista geográfico, permitiendo detectar en qué lugares el problema se presenta de una manera distintiva, y con ello, encontrar posibles factores del entorno que influyen en su ocurrencia.

6.1.5.1. Uso de técnicas geoespaciales en enfermedades cardiovasculares

Diferentes trabajos han mostrado que la distribución espacial de las ECV no es homogénea. Al estudiar un territorio determinado, existen zonas donde la incidencia, mortalidad y hospitalización debido a ECV, tienden a mostrar clusters. En particular condiciones como la enfermedad isquémica del corazón (EIC), el accidente cerebro vascular (ACV) e infarto agudo al miocardio (IAM), han mostrado esta tendencia (tabla 39). De la misma forma, clusters de factores de riesgo tales como

Tabla 39: Detección de clusters para ECV en diferentes escalas geográficas. *Fuente: Elaboración propia.*

Estudio	Lugar	Análisis espacial	Territorio estudio	Unidad geográfica	Principales hallazgos
De Andrade, 2013	Brasil, Paraná	Global: Moran's I Index local: LISA	Estado (Paraná)	Ciudades	Detección de clusters para alta tasa de mortalidad por EIC
Gómez-Barroso, 2015	España, Madrid	Global: Moran's I Index local: LISA	Municipalidad (Madrid)	Zonas censales	Detección de clusters de alta tasa de mortalidad para ECV
Van Rheenen, 2015	Canadá, Alberta	Local: Getis-Ord Gi* y Spatial Scan statistics	Provincia (Alberta)	Áreas de difusión	Detección de hotspots para incidencia de ACV, factores de riesgo y muerte por ACV a nivel hospitalario
Roberson, 2016	EE.UU., Florida	Global: Moran's I Index local: LISA	Estado (Florida)	Condados	Detección de clusters para hospitalización y mortalidad por ACV
Soares, 2010	Brasil, Vale do Paraiba	Global: Moran's I Index local: LISA	Región (Vale do Paraiba)	Municipios	Detección de clusters para hospitalizaciones por IAM y EIC
Gohari, 2015	Irán, Teherán	Local: Spatial Scan statistics	Ciudad (Tehran)	Condado	Detección de clusters de alto y bajo riesgo para EIC, ACV e hipertensión

obesidad, tabaquismo e hipertensión también han sido detectados.

a. Variables socioeconómicas: una de las variables que determina la propensión a ECV es la condición socioeconómica. Existen diferentes indicadores de esta variable, los cuales generalmente son integrados en índices que entregan información sobre el nivel socioeconómico. Las variables consideradas para componer estos índices generalmente incluyen: el ingreso, nivel educacional, desempleo, hacinamiento, familias uniparentales o la presencia de auto propio. En ocasiones es considerada tan solo una variable que representa el nivel socioeconómico. Zonas con alto índice de pobreza han sido relacionadas con clusters de mortalidad por ECV y mortalidad prematura por enfermedades del sistema circulatorio, como también a alto riesgo de desarrollar ECV. Clusters de obesidad e hipertensión también se han relacionado con niveles de pobreza. En este sentido, es muy posible que un bajo nivel socioeconómico esté relacionado a un menor acceso a medicamentos o acceso oportuno a servicios de salud. El nivel de educación también es un factor importante en la distribución espacial de ECV, mostrando que altos índices de mortalidad por IAM y ACV, se concentran espacialmente en áreas de bajo nivel educacional. También clusters de altas tasas de mortalidad después de enfermedad isquémica al corazón, han sido relacionadas a lugares con alto analfabetismo.

b. Variables ambientales: factores como la temperatura y humedad, pueden influir en la ocurrencia de enfermedades. Tanto las olas de calor y frío, predisponen la ocurrencia de ECV, especialmente en grupos susceptibles. Clusters de alta mortalidad general han sido detectados en adultos mayores, luego de olas de calor. Esto se debe, probablemente, al estrés producido por estas condiciones, generando, por ejemplo, estados de deshidratación en el caso de olas de calor, o hipotermia en el caso de olas de frío. Las temperaturas extremas, altas o bajas, pueden generar un estado de híper coagulabilidad, además de aumentar los niveles de colesterol. El análisis espacial permite observar los efectos de olas de calor o frío, comparar por mapeo tasas previas, durante y posteriores a la ocurrencia de estos fenómenos (Chen et al., 2015). Del mismo modo, mediante la detección de clusters de mortalidad o ingresos hospitalarios debido a ECV, es posible identificar las zonas más susceptibles a estos eventos tras olas de temperaturas extremas, que son, generalmente, los lugares más vulnerables socioeconómicamente (Chen et al., 2015). También ha sido posible establecer la presencia de clusters para ECV en lugares donde ocurren altas variaciones en las tem-

peraturas, es decir, mayores diferencias entre la mayor y menor temperatura, combinado con baja humedad (Rodrigues et al., 2015).

Es conocida la relación que existe entre la contaminación del aire y enfermedades respiratorias o cardiovasculares. La contaminación ambiental es un buen ejemplo de cómo las técnicas geoespaciales pueden utilizarse para medir fenómenos ambientales. Mediante análisis satelital es posible determinar no solo la distribución de la contaminación ambiental, sino que, además, medir los niveles de partículas en el ambiente, empleando técnicas como la profundidad óptica de partículas (Aerosol Optical Depth, AOD), que se basa en el grado en el que gases ambientales impiden el paso y detección de la luz por el sistema satelital. La presencia de partículas ambientales en determinadas zonas geográficas contribuye a la concentración de casos de ECV para dichos lugares (Lim et al., 2014; Rodrigues et al., 2015). Así, por ejemplo, la presencia de clusters de alta mortalidad para IAM ha sido detectada en zonas cercanas a industrias (Namayande et al., 2016), las cuales son una fuente importante de contaminación ambiental.

6.1.5.2. Uso de técnicas geoespaciales en diabetes

La diabetes mellitus tipo 2 (DMT2) es una enfermedad metabólica que en la actualidad significa un gran desafío para la salud mundial. Es una condición que predispone el desarrollo de múltiples enfermedades, como ECV, enfermedades neurodegenerativas y renales, por nombrar algunas. Como ya se ha comentado, los SIG son sistemas que combinan la informática con técnicas geoespaciales, permitiendo la gestión de información espacial por los usuarios. Utilizando estos sistemas ha sido posible estudiar la distribución espacial de la DMT2 y la implicancia de factores del entorno sobre la salud.

El uso de SIG permite visualizar mediante mapas la distribución de DMT2 en una zona determinada, para luego vincular registros hospitalarios, tal como diagnóstico clínico o parámetros objetivos como la glicemia o niveles de hemoglobina glicosilada, con la residencia de los pacientes (Geraghty et al., 2010). De esta forma, es posible obtener una distribución del problema y correlacionarlo con factores demográficos, como el nivel socioeconómico.

El sedentarismo y obesidad tienen un rol preponderante en esta enfermedad, siendo factores desencadenantes de esta condición, además de favorecer su progresión. Por el contrario, la realización de actividad física y la mantención de una dieta saludable son conductas que previenen el desarrollo de DMT2, siendo además de mucho beneficio en personas que ya padecen esta enfermedad. La utilización de técnicas espaciales ha permitido entender mejor la importancia que juega el entorno en la prevención de la diabetes. Valiéndose del análisis geoespacial mediante SIG es posible estudiar la transitabilidad, un componente del diseño urbano que indica en qué grado este fomenta el tránsito de las personas de un lugar. Depende de la conectividad y calidad de las rutas para transeúntes, la densidad poblacional de un vecindario y también la presencia de destinos interesantes en la cercanía de la población. Estas variables pueden ser integradas para calcular objetivamente el nivel de transitabilidad de un lugar. La transitabilidad está relacionada estrechamente con el nivel de actividad física de la población de un determinado lugar. En zonas con un buen nivel de transitabilidad se tiende a realizar más actividad física. Por esto, no es sorprendente que la transitabilidad repercuta en la prevalencia de DMT2. Estudios recientes han descrito que buenos niveles de esta variable, son un factor protector en la prevención de DMT2, además de tener también un impacto positivo en pacientes que ya tienen la enfermedad (De Greef et al., 2011; Glazier et al., 2014; Muller-Riemenschneider et al., 2013). El acceso a áreas verdes, también es un factor importante en la prevención de diabetes y sus factores de riesgos, existiendo una correlación inversa entre la actividad física y una disminución en el índice de masa corporal (Mena et al., 2015). Del mismo modo, empleando técnicas geoespaciales, un estudio longitudinal encontró relación entre el acceso a tiendas de comida saludable (supermercados, verdulerías) y la presencia de recintos recreacionales en las cercanías (gimnasios, recintos deportivos, danza, yoga, etc.), con una disminución en la prevalencia de diabetes (Christine et al., 2015). De esta forma, el empleo de herramientas geoespaciales ha contribuido a otorgar importancia al diseño urbano en la prevención de enfermedades metabólicas como la diabetes. Vecindarios, villas, comunas y ciudades, pueden ser pensados y modificados con el fin de proveer entornos adecuados para el desarrollo de conductas saludables.

6.1.5.3. Uso de técnicas geoespaciales en el estudio de cáncer

El cáncer generalmente involucra alteraciones en mecanismos que regulan procesos relacionados a la sobrevida y proliferación celular. Las células cancerígenas, además, poseen características que les permite tomar ventaja de su entorno y la inmunidad. Los mecanismos celulares alterados son diferentes entre los diversos tipos de cáncer. A su vez, las condiciones ambientales que favorecen el desarrollo de un proceso cancerígeno juegan un rol relevante. El análisis geoespacial ha facilitado ver el problema desde una perspectiva ambiental, detectando relaciones causa-efecto, que pueden ser comunes o específicas según el tipo de cáncer.

La determinación de autocorrelación espacial ha permitido detectar clusters para diferentes tipos de cáncer. El uso de técnicas de regresión espacial ha mostrado que algunos tipos de cáncer están relacionados espacialmente entre sí, por ejemplo, leucemias, linfomas no Hodgkin y linfomas de Hodgkin, lo que sugiere que en dichas zonas existen factores de riesgo comunes (Al-Ahmadi y Al-Zahrani, 2013b). Utilizando, por ejemplo, GWR, ha sido posible determinar una relación entre polución ambiental, particularmente los niveles de NO2, con la incidencia de diferentes cánceres, en orden decreciente: cáncer de pulmón y mama, seguidos por cáncer de próstata, vejiga, cervical y de ovarios (Al-Ahmadi y Al-Zahrani, 2013a). La utilidad del análisis geoespacial va más allá de la detección del área geográfica en donde se desarrollan una gran cantidad de casos de un cáncer determinado o los factores del entorno que contribuyen a ese fenómeno. Con una fuente adecuada de datos, los SIG pueden entregar información aún más sofisticada acerca del impacto de un factor. Por ejemplo, en el caso de la presencia de minas de carbón y su implicancia en el desarrollo de cánceres de pulmón, próstata, pecho y colon, además de determinar la correlación geoespacial de esta variable con dichas enfermedades, es posible estudiar el impacto de la cercanía a este factor ambiental en relación con tipos específicos de cáncer, siendo importante en la incidencia de cáncer de pulmón y mortalidad por todos los cánceres. Del mismo modo, es posible relacionar emisiones recientes de contaminación por estas fuentes, con mortalidad específica por cáncer de colon y de próstata (Mueller et al., 2015). Así, este tipo de análisis no solo correlaciona una variable del ambiente con el desarrollo de la enfermedad, sino que, además, se tiene el impacto específico de características particulares de dicha variable espacial.

Por mecanismos que involucran genotoxicidad (daño del material genético), citotoxicidad (daño celular), alteraciones hormonales e inmunes, la exposición a pesticidas ha sido relacionada al desarrollo de carcinoma hepato-celular (CHC). El análisis espacial ha permitido correlacionar la cantidad de pesticidas dispensado en una zona en el tiempo, con la incidencia de CHC. La utilización de SIG permite, además, relacionar unidades espaciales de diferentes tópicos, por ejemplo, la unidad agrícola que mide el territorio expuesto a pesticidas, solapándole con unidades geográficas poblacionales, como unidades postales (figura 108). En diferentes años, áreas con mayor exposición a pesticidas presentan un mayor número de casos de CHC (VoPham et al., 2015). De manera similar, aunque en menor grado, el estudio mediante SIG ha permitido relacionar la exposición a pesticidas en determinadas áreas con casos de cáncer de mama.

La detección de clusters, por otro lado, ha permitido distinguir la contribución de variables del entorno en el desarrollo de CHC. La infección por virus de hepatitis C (VHC) es un factor de riesgo para el desarrollo de CHC, existiendo clusters para CHC en zonas de alta prevalencia de infección. Por otra parte, la presencia de clusters de casos de CHC en zonas cuya prevalencia de la infección es baja, pero donde existe una alta utilización de pesticidas, sugiere la importancia de este factor (Sifaki-Pistolla et al., 2016). Al existir en diferentes zonas factores que de manera independiente favorecen el desarrollo CHC, el análisis geoespacial aporta información relevante en la decisión de qué intervenciones aplicar a un lugar determinado.

6.1.6. Técnicas espaciales y acceso a servicios de salud

Se ha discutido acerca de la utilidad de las herramientas geoespaciales en el estudio de enfermedades transmisibles y no transmisibles. Estas permiten un análisis adecuado del entorno y de su rol como determinante de salud y enfermedad. De esta forma, inicialmente es po-

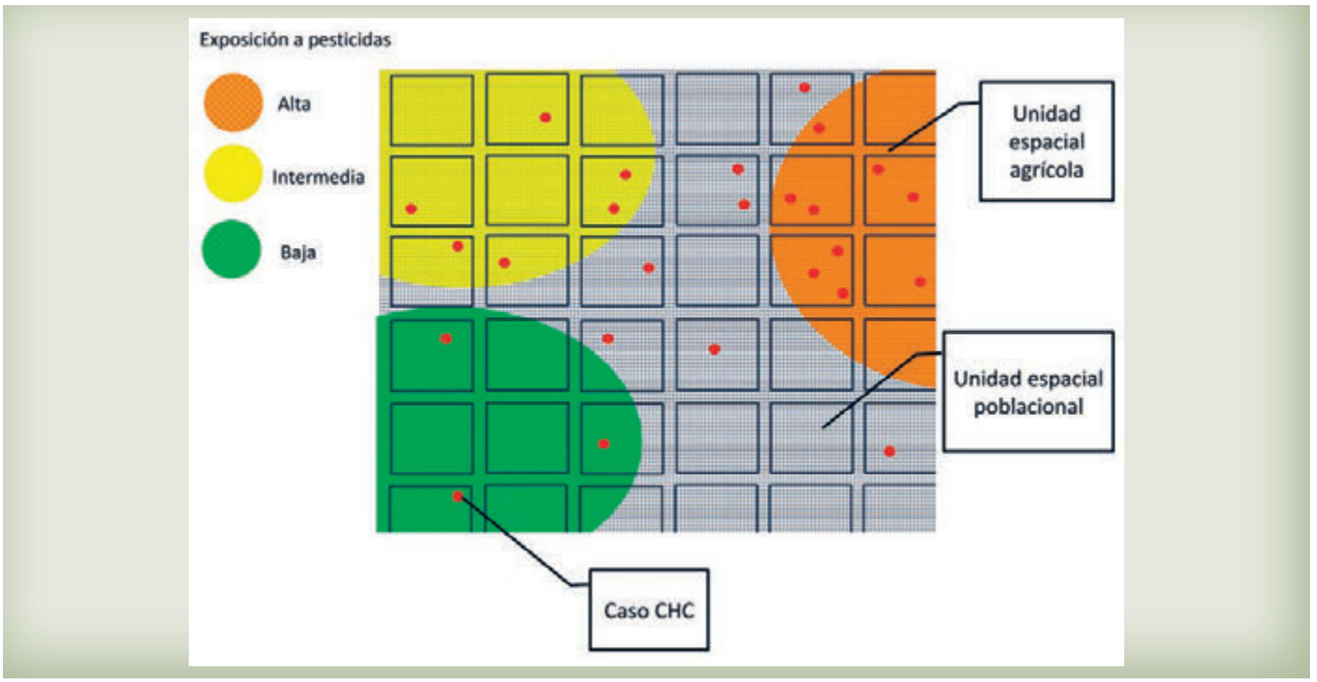


Figura 108: Utilidad de los SIG en la superposición de unidades espaciales. *Ejemplo a nivel poblacional con exposición a pesticidas. Fuente: Elaboración propia.*

sible detectar la ocurrencia de un evento de interés en la población de estudio, y luego, relacionar esa ocurrencia con algún componente del entorno que contribuya en dicho evento. En pocas palabras, las técnicas geoespaciales aplicadas en salud ayudan a responder dónde, a quiénes y qué intervenir en una enfermedad determinada. La capacidad de los servicios de salud para responder oportunamente, manejar e, idealmente, anticipar un evento que repercuta en la salud de la población, es un aspecto importante en epidemiología. Del mismo modo, la distribución de recursos en salud es un aspecto relevante, son decisiones que deben ser respaldadas con evidencia suficiente. En estos aspectos, las técnicas geomáticas pueden ser una herramienta que ayude en la evaluación de los sistemas de salud y en la toma de decisiones (figura 109).

En este contexto, el análisis espacial es de utilidad para encontrar barreras en la distribución de recursos y efectividad de intervenciones. El acceso a servicios de salud encuentra barreras físicas, socioculturales y económicas. Los SIG han permitido estudiar la implicancia de la distancia (como tiempo de viaje) hacia los servicios donde se realiza una prestación de salud, en la prevalencia de la enfermedad que se busca prevenir. Por ejemplo, esta situación ocurre con la realización de mamografías, donde las mujeres con estadios avanzados de cáncer de mama, viven más lejos del lugar de prestación (Huang et al., 2009). Del mismo modo, utilizando cartografía descriptiva, es posible caracterizar el tiempo de viaje y la cobertura de la población para los servicios de intervención cardiaca, permitiendo la detección visual de áreas (y población) con bajo acceso a los centros de atención (Clark et al., 2012; Graves, 2011), o lugares de difícil acceso para ambulancias (Earnest et al., 2012). En relación con esta información, clusters para complicaciones graves de ECV se han relacionado con la ausencia de centros asistenciales en las cercanías (Pandian et al., 2016). De esta forma, al utilizar SIG en combinación con métodos estadísticos, ha sido posible implementar algoritmos para la decisión de lugares donde distribuir recursos de salud, como desfibriladores y puntos de atención en salud (Ferguson et al., 2016; Kaffash-Charandabi et al., 2015).

La adherencia al tratamiento también se ve influida por la cercanía a los sistemas de salud, lo cual puede ser evidenciado por técnicas espaciales. Patrones para tratamientos tales como estatinas, antimaláricos o medicación cardiovascular, han mostrado clusters en patrones de baja y alta adherencia, siendo las principales barreras para lograr el seguimiento en una zona determinada el nivel socioeco-

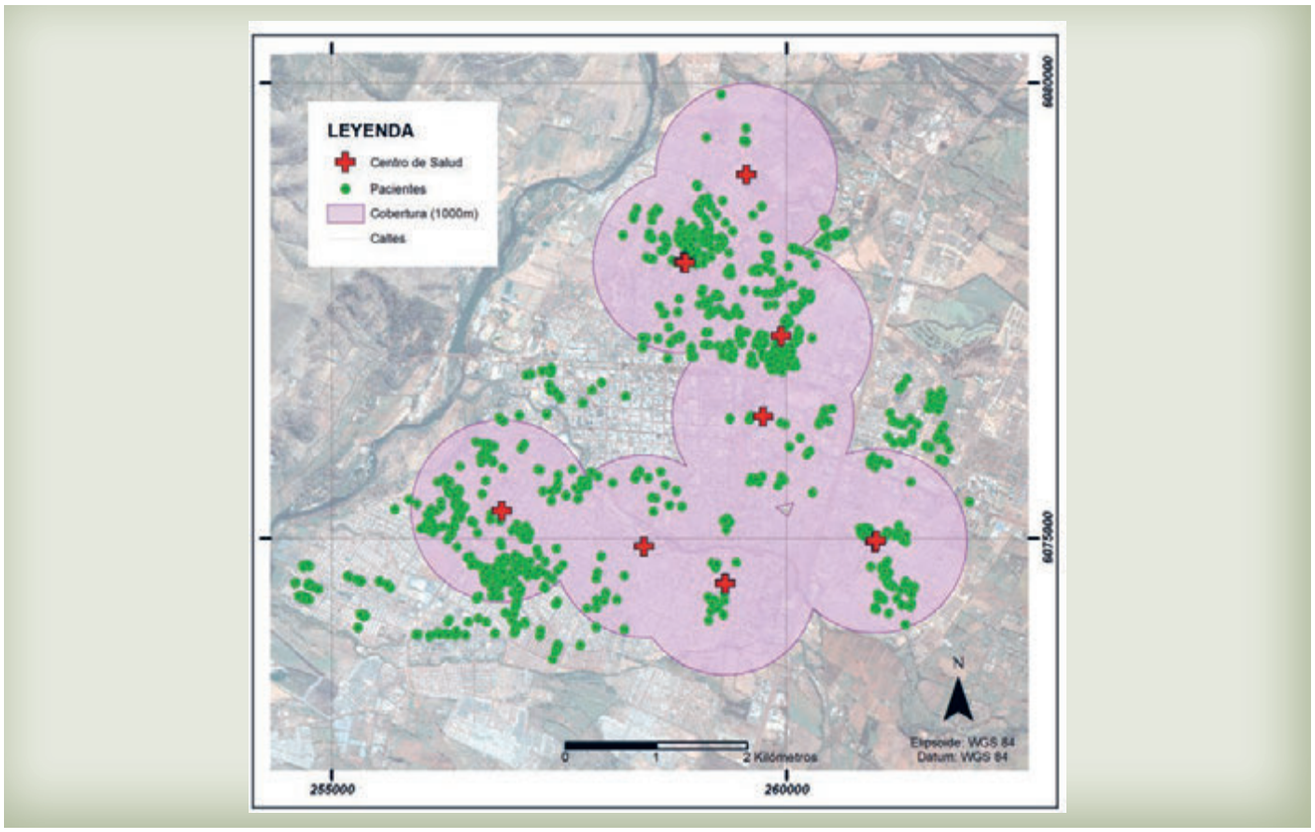


Figura 109: Zonas de cobertura de servicios de salud para pacientes en estudio en la ciudad de Talca. *Fuente: Elaboración propia.*

nómico y educacional, el nivel de ruralidad y la cercanía al centro de salud (Cheng et al., 2011; Erickson y Lin, 2014; Haque et al., 2012).

Los SIG además de permitir cartografiar los eventos de salud/enfermedad de un lugar en estudio, también permiten mapear a partir de una adecuada fuente de información, la capacidad de respuesta de los servicios de salud respecto de una determinada enfermedad. En el caso de la DMT2, por ejemplo, ha sido posible estudiar y cartografiar información relacionada a los recursos disponibles para la enfermedad en las diferentes unidades geográficas de un territorio (como la presencia de médicos endocrinólogos, pacientes diagnosticados a los que se realice control con examen de hemoglobina glicosilada, presencia de grupos de apoyo y educación en la comunidad, entre otros), y relacionar esto con la prevalencia de la diabetes (Curtis et al., 2013). Así también, clusters de baja prevalencia de hipertensión han sido relacionados a la presencia de médicos especialistas que otorgan una atención primaria adecuada.

Más allá de los recursos entregados por los servicios de salud, también es posible aplicar las técnicas geoespaciales al estudio de la efectividad de políticas públicas y educación en salud. El conocimiento en la población de temas asociados al control de enfermedades, higiene y manejo de eventos relacionados a la salud, es un objetivo importante en salud pública. El análisis espacial permite relacionar estas variables y su repercusión en el estado de salud. Al respecto, algunos estudios espaciales han definido el nivel de manejo en la población de técnicas de primeros auxilios como factor para definir la población de riesgo ante un paro cardiaco. Así, la población incluida en clusters de alta tasa de eventos cardiovasculares que presenten un bajo manejo de primeros auxilios, pueden considerarse en condición de mayor riesgo (Nassel et al., 2014).

6.1.7. Conclusiones

Las técnicas geoespaciales son una herramienta útil para entender la relación ambiente-enfermedad, otorgando

una revaloración al entorno como determinante de salud y enfermedad.

Gracias a que mucha de la información entregada por los SIG se fundamenta en técnicas estadísticas, tal como el análisis de relación espacial y detección de clusters, estos aportan sustento sólido a los hallazgos. Por otro lado, las técnicas cartográficas ofrecen plataforma para una fácil representación de los hallazgos, permitiendo así una adecuada comprensión e interpretación de información compleja. Además, es importante contar con una adecuada fuente de datos, solo de esta forma los SIG pueden entregar información confiable que ayudaría a disminuir la incidencia de enfermedades y costos en salud. Uno de los aspectos más prometedores de la aplicación de estas técnicas es que permiten también evaluar la eficacia de servicios de salud, identificar población vulnerable a un evento determinado, y facilitar la toma de decisiones y distribución de recursos en salud; posibilitando así una mejora en los sistemas de salud.

6.2 Las tecnologías de la información geográfica en el ordenamiento ecológico local: caso Ixtlahuacán del Río, Jalisco, México

Juan Pablo Corona Medina, Margarita Anaya Corona, Heriberto Cruz Solís, Ana Karina Ibarra Salinas

Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, Universidad de Guadalajara, México

6.2.1. Introducción

El ordenamiento territorial en México, como en otros países de América Latina, nace prácticamente en el contexto de la planificación urbana (Massiris, 2002). En 1976 se crea la Ley General de Asentamientos Humanos, con dicha ley se da inicio a la planificación en las ciudades mexicanas. Posteriormente, en 1982, se propuso la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), en cuya estructura está la Subsecretaría de Ecología que tiene responsabilidad sobre las áreas naturales protegidas, el ordenamiento ecológico y la evaluación de impacto ambiental.

Actualmente, en el marco legal, de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), confluyen principalmente tres leyes en materia de ordenamiento territorial: la Ley General de Asentamientos Humanos, la Ley de Planeación y la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Medioambiente (LEGEEPA) (Palacio et al., 2009).

De acuerdo con la LGEEPA (Diario Oficial de la Federación, 2017), el ordenamiento ecológico es el instrumento de política ambiental cuyo objetivo es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medioambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos. Además, señala las modalidades de ordenamiento existentes en México: general del territorio, regionales, locales y marinos. En el caso de Jalisco, se tienen dos ordenamientos ecológicos regionales y ocho de carácter local o municipal (Gobierno de Jalisco, 2012).

El objetivo del presente trabajo es revisar, de forma breve, la utilidad de las TIG en las diferentes etapas del ordenamiento ecológico local del municipio de Ixtlahuacán del Río. Es preciso mencionar que el documento completo de este ordenamiento ecológico local se encuentra disponible en las páginas web: http://ixtlahuacandelrio.jalisco.gob.mx y http://semadet.jalisco.gob.mx/content/ixtlahuacan-del-rio.

6.2.1.1 Participación de la universidad

La Universidad de Guadalajara para el desarrollo de sus actividades tiene como uno de sus objetivos la vinculación con los diferentes sectores sociales y de gobierno, tanto públicos como privados. El programa de ordenamiento ecológico local del municipio de Ixtlahuacán del Río, es un proyecto interinstitucional, el que se llevó a cabo durante 2015-2016, a través del apoyo económico de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) del estado de Jalisco, la participación del gobierno municipal de Ixtlahuacán del Río y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de nivel federal.

Para realizar el proyecto, la Universidad de Guadalajara, a través del Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, contó con la infraestructura necesaria, así como con el equipo de cómputo, programas especializados, GPS, cámaras y material digital (fotografías aéreas, cartografía e imágenes de satélite), necesarios para el desarrollo del mismo. Es importante mencionar que se conformó un equipo interdisciplinario integrado por geógrafos, agrónomos, biólogos, trabajadoras sociales, abogados, informáticos, economistas y topógrafos. Además, se incorporaron estudiantes que contribuyeron con diversas actividades de colaboración (tesis, servicio social y prácticas profesionales), como parte de su formación profesional.

6.2.1.2. Área de estudio: municipio de Ixtlahuacán del Río

El municipio de Ixtlahuacán del Río se ubica en la región centro del estado de Jalisco. Limita al norte con el estado de Zacatecas, al sur con los municipios de Guadalajara y Zapotlanejo, al este con los municipios de Cuquío y Zapotlanejo, y al oeste con los municipios de San Cristóbal de la Barranca y Zapopan. Tiene como coordenadas extremas 20°42'40" a 21°05'23" de latitud norte y de 103°03'09" a 103°22'35" de longitud oeste (ver figura 110), y presenta una superficie de 850 km^2. El municipio cuenta con una población de 19.005 habitantes, distribuidos en 178 localidades (INEGI, 2010). Las actividades económicas están representadas principalmente por el sector primario, donde resaltan las actividades de agricultura y ganadería. El territorio ixtlahuacanense tiene dos áreas naturales protegidas, una de nivel federal correspondiente a la cuenca alimentadora del Distrito Nacional de Riego 043 en la zona norte (que data de 1949, con una recategorización en 2002), y otra de nivel estatal denominada Barrancas del río Verde y el Santiago (2016).

6.2.1.3. Las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG)

Los sorprendentes avances en las TIG a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y sistema de posicionamiento global (GPS), han provocado cambios en los procesos de obtención de datos y en la toma de decisiones espaciales. Particularmente la teledetección, donde los sensores activos y pasivos han tenido una gran evolución en su resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal, lo cual ha sido de gran ayuda para la generación de datos geoambientales a diferentes escalas de trabajo (Moreno Jiménez et al., 2012). Por su parte, los Sistemas de Información Geográfica son otra tecnología que ha repuntado de manera significativa por las grandes bases de datos disponibles en internet, la variedad de programas libres y, sobre todo, por la diversidad de aplicaciones que a través de esta tecnología se pueden llevar a cabo; un ejemplo es el tema que nos ocupa acerca del ordenamiento ecológico local de Ixtlahuacán del Río. A continuación, se describe cómo se utilizaron las TIG en cada una de las etapas.

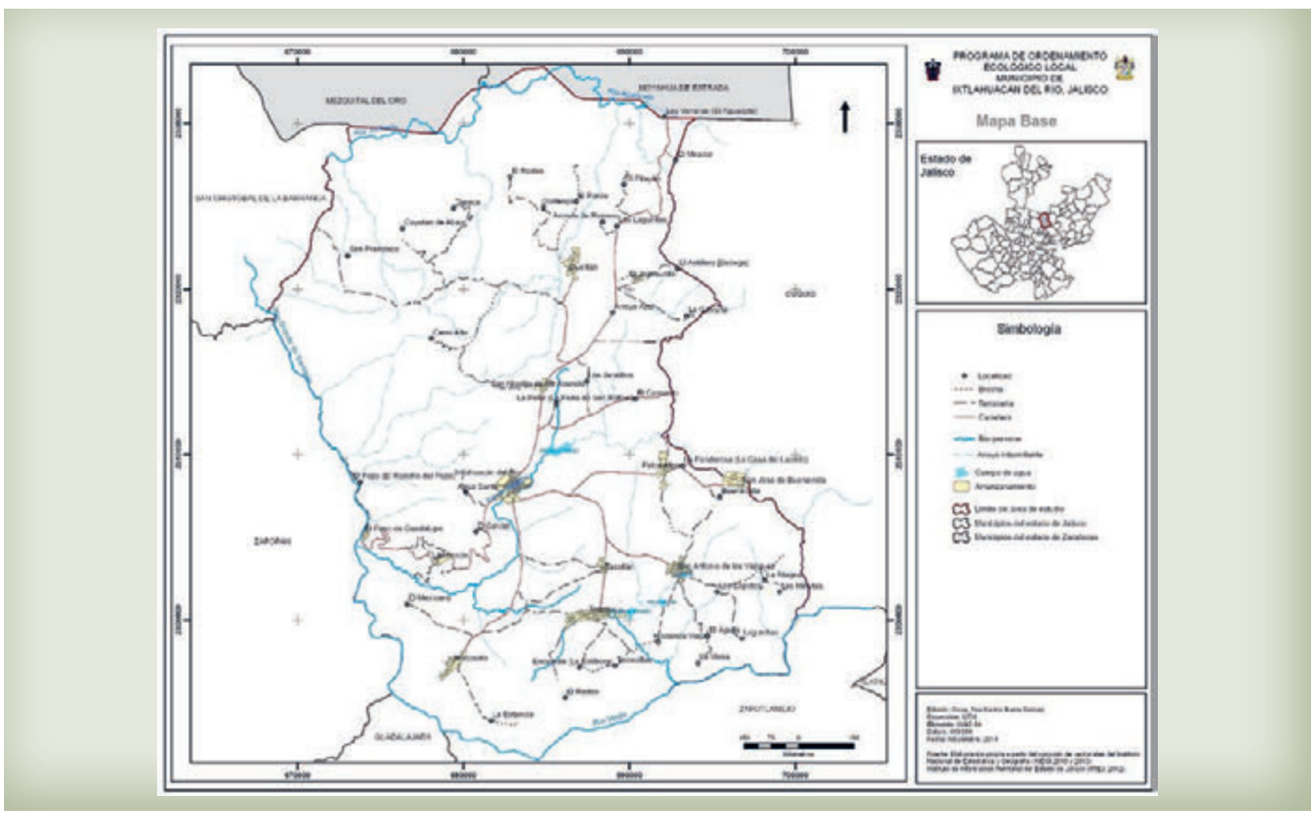


Figura 110: Ubicación del municipio de Ixtlahuacán del Río. *Fuente: Elaboración propia.*

Las metodologías para desarrollar los programas ecológicos locales en México, son establecidas y publicadas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. La última versión en la que se basó esta investigación, es la denominada *Guía para la elaboración del proyecto del programa de ordenamiento ecológico local (2015).* Dicha guía contiene los términos de referencias utilizados en el ordenamiento de Ixtlahuacán del Río. Estos términos de referencia están divididos en cuatro etapas: 1) caracterización, 2) diagnóstico, 3) pronóstico, y 4) propuesta.

6.2.2. Etapas del ordenamiento ecológico local: caracterización, diagnóstico, pronóstico y propuesta (SEMARNAT, 2015)

6.2.2.1. Etapa de caracterización

Esta etapa tiene por objeto la delimitación del área de estudio y su regionalización administrativa. Se inicia la construcción del Sistema de Información Geográfica (SIG) con los componentes naturales (geología, suelos, vegetación, fauna, entre otros), socioeconómicos y culturales (población, actividades productivas, tenencia de la tierra y equipamiento, entre otros).

a. Delimitación del área de estudio: en el estado de Jalisco existen diferentes versiones respecto de los límites municipales. Para el proyecto de Ixtlahuacán del Río, se consideró el mapa oficial de Jalisco (2012), que establece los límites territoriales del estado, publicado en el Periódico Oficial en marzo 2012. Con el límite municipal se incorporó información vectorial, correspondiente a las principales localidades, carreteras, ríos, arroyos y cuerpos de agua, para la elaboración del mapa base que sirvió como referencia para la generación de los diferentes mapas temáticos. Es importante subrayar que el sistema de coordenadas utilizado es el Universal Transversal de Mercator (UTM), Elipsoide WGS84, Datum WGS84 y Zona 13 norte. Con estas capas se inició la construcción del Sistema de Información Geográfica del proyecto.

b. Componente natural: este componente describe los elementos físicos y bióticos del medio natural. Es la base para el ordenamiento ecológico, porque es donde se abordan más temáticas, siendo alrededor de ochenta variables relacionadas con el medio físico. Entre estas, se pueden mencionar: el uso del suelo, la topografía, hidrología, erosión, climas, tipos de suelo, pendientes del terreno, geológico, microcuencas, riesgos, entre otras.

Para la elaboración de la cartografía temática digital de este componente, fue necesario recurrir a la información disponible en el portal web de diferentes instituciones de gobierno. La información que se recabó fue la siguiente: imágenes de satélite SPOT-5 (2009), Landsat-8 (2014), imágenes del Google Earth (2014), carta de uso del suelo (1974) 1:50000, carta geológica (1975) 1:50000, carta edafológica (1975) 1:50000, modelo digital de elevación (2012) 1:50000, y el conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica (2010) 1:50000. Las instituciones de donde se obtuvieron los datos son: Gobierno Municipal de Ixtlahuacán del Río, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto de Información Territorial del estado de Jalisco (IITJ), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (Ermex), Servicio Geológico de los Estados Unidos, Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), Comisión Nacional del Agua (CNA), Comisión Estatal del Agua (CEA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Plan Lerma, Asistencia Técnica, Meteorología, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

De igual modo, se llevaron a cabo recorridos de campo para registrar y verificar datos de vegetación, de fauna, zonas de erosión y riesgos, entre otros. Para esto se utilizó GPS y mapas temáticos. También se tomaron muestras de suelo y agua, con el apoyo de personal de la Dirección de Agropecuario y Ecología del gobierno municipal. Para el procesamiento de los datos obtenidos, tanto de las fuentes institucionales oficiales como las recabadas en campo, se utilizaron programas libres (QGIS) y comerciales (ArcGIS, Idrisi, ER Mapper, Excel, Word y SPSS).

c. Componente socioeconómico y cultural: en este componente se consideraron las características sociales, económicas y culturales de los habitantes en el área de estudio. Así como los bienes y servicios ambientales que ofrece el municipio.

Para esta actividad se utilizó una diversidad de materiales y documentos consultados en diferentes portales web, tales como: Ortofotos (1993) 1:20000, Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE, 2010), Censos Generales de Población y Vivienda (1990, 2000, 2010) y Conteos de población 1995 y 2005, Sistema de Integración Territorial (ITER, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010), Norma Ambiental Estatal (NAE-SEMADES-007/2008), Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), Ley General para Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR, 2007), NOM-052-SEMARNAT (2005), Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares; Programa de Acción Climática Municipal (PACMUN), Sistema Estatal de Información Jalisco (SEIJAL), Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco (SIEG).

Las instituciones que contribuyeron con información para esta etapa fueron las siguientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Industria y Comercio (1973), Comisión Nacional de Población (CONAPO, 2011), Consejo Estatal de Población (COEPO, 2010), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2009), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2012), Secretaría de Salud (SS), Secretaría de Educación Pública (SEP), Secretaría de Educación Jalisco (SEJ), Secretaría de la Reforma Agraria, Registro Agrario Nacional (RAN), Comisión de Regularización de Tenencia de la Tierra (CORETT) y el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL).

El trabajo de campo para este componente se realizó en los centros de población, el registro de equipamiento e infraetructura, con el apoyo de los comisariados ejidales (órgano encargado de ejecutar y hacer cumplir los acuerdos tomados por la asamblea, así como de la representación y gestión administrativa del ejido que corresponde a un campo común de un pueblo colindante que se usa para labrar la tierra y donde suelen reunirse los dueños de ganados o establecerse) y los representantes de los diferentes sectores.

d. Componente sectorial: se identificaron nueve sectores económicos que inciden en el municipio, a través de un taller con los miembros del comité técnico integrado por los representantes de los sectores económicos del municipio. Resultando los siguientes sectores: agricultura, pecuario, pesca y acuicultura, minería, industria, conservación, forestal, turismo y asentamientos humanos.

6.2.2.2. Etapa de diagnóstico

Esta se basa en la etapa anterior de caracterización y tiene por objetivo identificar y analizar las condiciones ambientales, las interacciones, que reflejan las actividades socioeconómicas en el municipio, a fin de conocer la manera en que los conflictos ambientales (concurrencia de actividades incompatibles en un área determinada) afectan el área de estudio, incluyendo la identificación de áreas que se deberán preservar, conservar, proteger o restaurar, el análisis de aptitud del territorio, y los elementos para la evaluación y manejo de los conflictos ambientales.

Para esta etapa fue relevante utilizar Evaluación Multicriterio (EMC), que constituye uno de los procedimientos de mayor importancia cuando la tecnología SIG se utiliza como herramienta para la toma de decisiones locacionales. En este sentido, cuenta con desarrollos continuos tendientes a su sistematización metodológica (Buzai, 2012).

Para la implementación de la Evaluación Multicriterio, se llevó a cabo un taller con expertos, con la finalidad identificar los atributos ambientales (variable cualitativa o cuantitativa que influye en el desarrollo de las actividades humanas y de los demás organismos vivos, LGEEPA Art. 30) y definir los atributos por sector. Es importante señalar que cada sector establece un objetivo en el que pretende señalar sus actividades productivas. El resultado obtenido fue una lista de atributos por sector, con su definición y escala de medición.

Posteriormente, se jerarquizaron los atributos por sector de acuerdo con la importancia que el grupo de expertos le asignó. En seguida, se le determinó un peso a cada atributo (del 1 al 100). Después se calculó el peso normalizado, para ello, se sumaron los pesos de cada uno de los criterios, el resultado de la suma equivale a 1. Cada peso del atributo se multiplicó por 1 y se dividió con la suma del peso total, para obtener el peso normatizado de cada uno de los criterios.

A partir de los resultados obtenidos de estos cálculos, se generaron los mapas de aptitud de cada uno de los sectores identificados (agricultura, pecuario, pesca y acuicultura, turismo, industria, minería, forestal, conservación y asentamientos humanos).

a. Conflictos ambientales: los conflictos ambientales se definen como la disputa intersectorial por la concurrencia de actividades incompatibles en un área determinada (SEMARNAT, 2006). Es decir, en el municipio existen sectores que están contendiendo por el mismo territorio.

Para definir los conflictos ambientales, se consideraron los nueve sectores económicos para construir una matriz de doble entrada. La finalidad de dicha matriz fue determinar qué sectores están en conflicto o bien son compatibles, de acuerdo con las actividades que realiza cada sector. Los resultados obtenidos de la matriz fueron que los sectores con conflicto (incompatibles) son: agricultura, ganadería, conservación, forestal y turismo. Por su parte, los compatibles son: asentamientos humanos, industria, pesca y acuicultura, y minería.

b. Análisis de aptitud sectorial de manejo: para este análisis se consideraron la aptitud sectorial para el desarrollo de actividades humanas, los conflictos entre los sectores y las áreas prioritarias. Estas últimas se clasifican de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (SEMADES, 2006) en cuatro tipos, que se definen de la siguiente forma:

- **Aprovechamiento:** son aquellas áreas con usos productivos actuales o potenciales, así como áreas con características adecuadas para el desarrollo urbano, donde se definirá una política de aprovechamiento de los recursos naturales, esto es establecer el uso sostenible de los recursos a gran escala.

- **Protección:** se aplica a todas las áreas naturales y que sean susceptibles de integrarse al Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP), de acuerdo con las modalidades que marca la ley general del equilibrio ecológico y protección al ambiente. Con ello, se pretende establecer una política de protección, mantenimiento de los elementos y procesos naturales, en sus diversas opciones de aprovechamiento sustentable.

- **Conservación:** esta política ambiental estará dirigida a aquellas áreas o elementos naturales, cuyos usos actuales o propuestas cumplen con una función ecológica relevante, pero no merecen ser preservadas en el SINAP. Estas pueden ser paisajes, pulmones verdes, áreas de amortiguamiento contra la contaminación o riesgos industriales, áreas de recarga de acuíferos, cuerpos de agua, intraurbanos, árboles o rocas singulares, entre otros. En este caso se pretende tener un uso condicionado del medio, junto con el mantenimiento de los servicios ambientales.

- **Restauración:** son áreas con procesos acelerados de deterioro ambiental, como contaminación, erosión y deforestación. Es necesario marcar una política de restauración. Esto implicará la realización de un conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. La restauración puede ser dirigida a la recuperación de tierras no productivas o al mejoramiento de ecosistemas con fines de aprovechamiento, protección o conservación. Esto es establecer la recuperación de terrenos degradados.

Para cada una de las áreas prioritarias (aprovechamiento, protección, conservación y restauración) se utilizó el método multicriterio, en el cual se definieron atributos. Para aprovechamiento, los atributos considerados fueron uso del suelo y vegetación, accesibilidad y pendiente. Para protección, los atributos fueron aptitud para la conservación, presencia de especies de la Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT-2001 (Protección Ambiental Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestre, Categorías de Riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio, Lista de especies en riesgo), e inaccesibilidad a zonas. En conservación o preservación, los criterios fueron vegetación natural, suelos y zonas de alta pendiente. Para restauración, se consideró la erosión (nula, ligera, moderada, moderada alta, alta, muy alta y extremadamente). Luego se elaboraron los mapas de aptitud por área prioritaria, en base a la ponderación de los atributos.

c. Etapa de pronóstico: esta etapa toma como base las etapas anteriores (caracterización y diagnóstico). Tiene como objetivo comprender las transformaciones futuras en el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales, así como la evolución de los conflictos ambientales, a partir de la modelación de las variables naturales, sociales y económicas (modelo conceptual), comparadas con una imagen objetivo. Esto a partir de plantear tres diferentes escenarios (tendencial, contextual y estratégico), que representarán distintas condiciones futuras de uso de suelo, aptitud y conflictos ambientales, con la finalidad de determinar un patrón óptimo de ocupación del territorio en los usos del suelo y de las actividades productivas en el área de ordenamiento.

- **Escenario tendencial:** con este escenario se buscó mostrar el comportamiento de los atributos ambientales que definen la aptitud del territorio para cada sector y que permitieran la identificación de conflictos ambientales futuros. Para el escenario tendencial se consideró la situación de cada uno de los sectores, actividades productivas, el crecimiento de la población y la expansión de los principales centros de población.

  La finalidad de este escenario, fue llevar a cabo un análisis tendencial de los cambios surgidos en los usos del suelo y vegetación en el municipio de Ixtlahuacán del Río. Para ello, se utilizó el uso de suelo y vegetación del municipio de Ixtlahuacán del Río con base en los años de 1974 y 2014. Ambas capas se convirtieron a formato ráster, con el programa QGIS, después se empleó el programa Idrisi Selva donde se utilizó el algoritmo Markov. Este algoritmo permite hacer una matriz de los cambios que se tienen entre los años de 1974 y 2014, de acuerdo con los tipos de usos de suelo que se ha tenido en los años de estudio. Para realizar la proyección al 2013, se introduce al modelo CA_Marcokov, como base la capa ráster del uso de suelo y vegetación de 2014 y la matriz que se obtuvo anteriormente. Al final, resulta una capa ráster con los usos proyectados para ese año.

d. Etapa de propuesta: esta cuarta etapa, toma como referencia las anteriores etapas (caracterización, diagnóstico y pronóstico). Tiene como propósito integrar el modelo de ordenamiento ecológico, que incluye las Unidades de Gestión Ambiental (UGA), los usos del suelo, lineamientos ecológicos (que corresponde a la meta o enunciado general que refleja el estado deseable de una unidad de gestión ambiental SEMARNAT, 2006), y la estrategia ecológica (integración de los objetivos específicos, las acciones, los proyectos, los programas y los responsables de su realización, dirigida al logro de los lineamientos ecológicos aplicables en el área de estudio SEMARNAT, 2006) (objetivos, programas, proyectos, acciones y responsables) y criterios de regulación ecológica (que corresponden a una serie de normas, reglas o recomendaciones, para realizar las diferentes actividades o usos compatibles, y tiene la finalidad de establecer las condiciones para ciertos usos que necesitan tener limitaciones y no generar conflictos ambientales).

La Unidad de Gestión Ambiental (UGA) es la unidad mínima del área de ordenamiento ecológico a la que se asignan lineamientos y estrategias ecológicas. Posee condiciones de homogeneidad de atributos físico-bióticos, socioeconómicos y de aptitud, sobre la base de un manejo administrativo común (SEMARNAT, 2006).

Para el municipio de Ixtlahuacán del Río, el área de estudio, se delimitaron 30 UGAS de acuerdo con las siguientes variables o capas (shp): Unidades de paisaje, áreas prioritarias, zonificación forestal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), erosión, topografía, escurrimientos, geomorfología, uso del suelo y plan de desarrollo urbano de centros de población. A partir de estas, se generó el mapa del modelo de ordenamiento ecológico. Este es un mapa que contiene áreas con usos y aprovechamientos permitidos y condicionados.

Es importante señalar que a cada una de las 30 UGAS se le asignó un nombre y una clave, por ejemplo: la primera UGA se llama Planicie semiondulada agrícola y tiene la clave Ag1 045-01 A. El nombre se le asignó en función de las características físicas o sociales representativas de la UGA y la clave está integrada de la siguiente forma: Ag es el uso predominante, en este caso agricultura; el subíndice 1, significa el nivel de fragilidad; 045 representa el número del municipio asignado por INEGI en el estado de Jalisco; el 01 corresponde al número consecutivo de la UGA y A es la política ambiental de

aprovechamiento propuesta para esa UGA (SEMADES, 2006) (ver figura 111).

El modelo de ordenamiento ecológico (ver figura 112) tiene como función, regular los usos del suelo y actividades económicas que impactan el medioambiente. Para ello se establecieron 30 lineamientos, uno por cada UGA. Asimismo, se definieron estrategias ecológicas y criterios de regulación ecológica, para cada uno de los nueve sectores, de acuerdo con las características de cada UGA. El mapa del modelo se decreta a nivel estatal y se inscribe en el registro público de la propiedad, con el fin de que su observancia sea obligatoria para todos los sectores o particulares que se asienten y pretendan explorar los recursos naturales.

6.2.3. Resultados previstos

El ordenamiento ecológico local del municipio de Ixtlahuacán del Río, sin duda, será una herramienta de planificación útil para el gobierno municipal, ya que al no contar con instrumentos de regulación ambiental, el ordenamiento viene a cubrir esa política ambiental, de regular y planificar los usos del suelo y las actividades productivas, con la finalidad de proteger el medioambiente.

Los diferentes procesos mostrados en cada una de las etapas que comprenden el ordenamiento ecológico local de Ixtlahuacán del Río, reflejan la importancia que tiene el empleo de las Tecnologías de la Información Geográfica, ya que por medio de estas se obtienen datos actualizados y con un nivel de detalle a escala municipal y de localidad. También se resalta que, a través de la sistematización de los datos obtenidos de diferentes fuentes, y la modelización de los mismos, se llevó a cabo el análisis espacial (localización, distribución, asociación, interacción y evolución), obteniendo las características del municipio (naturales, sociales y económicas).

De igual forma, en la etapa de diagnóstico, el uso del método multicriterio permitió tener un panorama de las aptitudes sectoriales en el territorio. Asimismo, en la etapa de pronóstico, fue fundamental la utilización del algoritmo Markov para determinar la proyección al año 2030 de los usos del suelo.

La modelización de las capas unidades de paisaje, áreas prioritarias, zonificación forestal de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), erosión, topografía, escurrimientos, geomorfología, uso del suelo y plan de desarrollo urbano de centros de población en un SIG, fue determinante para la definición de las 30 Unidades de Gestión Ambiental. Con ello, se generó el Modelo de Ordenamiento Ecológico del municipio de Ixtlahuacán del Río, mismo que contribuirá a la regulación y planificación municipal a corto, mediano y largo plazo.

6.2.4. Agradecimientos

Este proyecto de investigación no hubiera sido posible sin la iniciativa del Gobierno Municipal de Ixtlahuacán del Río, especialmente a la Mtra. Leticia Loza Ramírez. Además, se agradece a la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) por su apoyo económico, a la Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) por el acompañamiento brindado durante todo el proceso. Es importante mencionar la participación de los diferentes representantes de los sectores miembros del comité técnico que contribuyeron con su experiencia en el territorio para validar y actualizar la información generada. Asimismo, a los compañeros investigadores de la Universidad de Guadalajara que hicieron posible la realización de este ordenamiento municipal.



Figura 111: Ficha de la UGA planicie semiondulada agrícola (Ag1 045-01 A). *Fuente: SEMADET y Gobierno municipal de Ixtlahuacán del Río (2017).*



Figura 112: Modelo de ordenamiento ecológico. *Fuente: SEMADET y Gobierno municipal de Ixtlahuacán del Río (2017).*



6.3 Experiencias en geomática aplicada en la Universidad de Santiago de Chile

Víctor Herrera González,[a] Francisco Albornoz[b]

[a]Área de Geomática, Universidad de Santiago de Chile, Chile
[b]Tesista Ingeniería Ambiental, Universidad de Santiago de Chile, Chile

6.3.1. Introducción

La geomática es una disciplina que, si bien entrega competencias, no define ni otorga una especialidad en un área específica, siendo su verdadero potencial la transversalidad de sus aplicaciones. Estas determinarán, a su vez, distintos niveles de relevancia en el uso de las geotecnologías propias de la geomática, como el sistema de posicionamiento global (GPS), la teledetección o los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Bajo esta visión, surge en el año 1999 el área de geomática perteneciente al Departamento de Ingeniería Geográfica de la Universidad de Santiago de Chile (USACH), prestando apoyo en el ámbito docente y de investigación en las especialidades de: geodesia, ambiente, cartografía del territorio, catastro y ordenamiento territorial, entre otras. Estos son elementos concordantes con la misión de la Facultad de Ingeniería de la USACH en términos de innovación y del mejoramiento de la calidad formativa de los futuros ingenieros, aportando a la fecha infraestructura y programas de educación continua y posgrados, destinados al perfeccionamiento de diversos profesionales del medio nacional y extranjero.

En este contexto, donde el principio de asociación de geotecnologías aparece como prometedor para el desarrollo del país, se presentarán dos trabajos, a modo de ejemplo de lo ya señalado, e insertos en la actividad académica correspondientes a: 1) Caso1, la utilización de imágenes Landsat 8 para evaluar zonas quemadas en reservas forestales administradas por CONAF, esto desde el punto de vista académico; y por otro lado, 2) caso 2, un proyecto de apoyo geodésico prestado a una investigación donde se usaron imágenes satelitales para detectar filtraciones en tuberías o pitting en el sector minero, lo cual fue un trabajo desarrollado como parte de una consultoría académico-profesional realizada en conjunto con el Centro de Teledetección Aplicada y Estudio del Territorio (CETAET), especializado en la línea de sensores activos (Zavala, 2005).

De esta manera, y siguiendo el protocolo preestablecido, se procederá a describir primero y en forma resumida la manera en que fueron desarrolladas ambas experiencias al interior del área de geomática de la USACH y, posteriormente, se detallarán aspectos de las respectivas metodologías aplicadas para cada caso, las cuales dan énfasis al desarrollo y aplicación integrada de geotecnologías, consolidando así el principio de la geomática aplicada a nivel nacional. Finalmente, se procede a destacar los resultados obtenidos con el respectivo análisis de los mismos.

6.3.2. Desarrollo

6.3.2.1. Caso 1

Corresponde al trabajo de titulación desarrollado por Albornoz (2016). En Chile, gran parte de los incendios forestales registrados en los últimos 20 años han sido resultado de actividades antropogénicas, siendo los incendios de origen natural muy escasos en los expedientes oficiales (Montenegro et al., 2003). Los registros de incendios muestran un aumento significativo en el número de incendios forestales en la zona centro y sur de Chile, como el ocurrido recientemente en el verano de 2017. Así, el enfoque de este estudio fue la recopilación de información de vegetación quemada mediante el uso de imágenes de satélites, de manera tal de apoyar las labores de restauración y reforestación, mediante una metodología científica y de bajo costo, aplicable al levantamiento de información de los recursos ya mencionados. Esto incluye la identificación de especies de la flora quemada, en su condición previa y posincendio, lo cual ayuda a formular

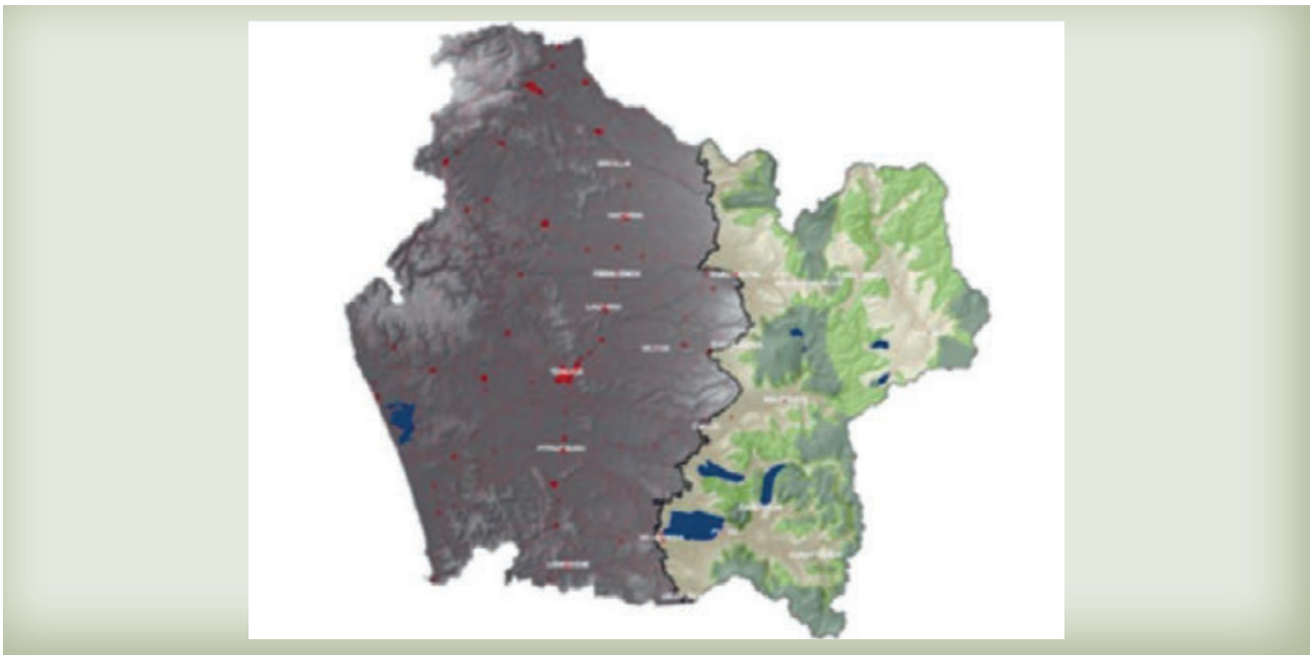


Figura 113: Ubicación Reserva Nacional China Muerta en la Reserva de Biosfera Araucarias. *Fuente: Plan de Manejo Reserva Nacional China Muerta.*

un plan de recuperación ecológica y forestal de manera eficiente y eficaz, dando respuesta a la problemática encontrada en el estudio de Fernández (2010), en el sentido de generar y mejorar el conocimiento de la composición y estructura de ecosistemas amenazados por incendios forestales.

El presente estudio tomó como ejemplo el incendio de la Reserva Nacional China Muerta (2015), la cual presenta una superficie de 12.825 ha y se ubica en la comuna de Melipeuco, provincia de Cautín, y en parte de la comuna de Lonquimay, provincia de Malleco; ambas en la Región de La Araucanía, Chile. Su ubicación geográfica es 71°25′ a 71°50′ longitud oeste y 30°40′ a 38°50′ latitud sur, aproximadamente (figura 113).

Para este trabajo se utilizaron imágenes satelitales procedentes del sensor multiespectral Landsat-8 OLI/TIRS, para el reconocimiento, evaluación y restauración de áreas afectadas por grandes incendios forestales.

La cartografía de la vegetación preexistente del área de estudio se realizó mediante una clasificación supervisada de la imagen Landsat, utilizando datos obtenidos en terreno y basándose en la leyenda de la cartografía de usos del suelo elaborada por la CONAF. En dicha cartografía, se generaron categorías distintas para las especies forestales del área de estudio, en función del grado de cobertura, de la edad de la masa y del porte de las especies dominantes. Para la realización de este trabajo se programó una salida a terreno, de aproximadamente diez días, para el levantamiento de información con la finalidad de identificar especies afectadas por el incendio y poder compararlas posteriormente con la clasificación digital de las imágenes satelitales. La metodología para la generación de cartografía final se describe más adelante.

6.3.2.2. Caso 2

Corresponde al trabajo referido a la identificación de fugas internas en tuberías o pitting, propiedad de la empresa Minera Escondida Ltda. (MEL), en el tramo comprendido entre caleta Coloso (0,00 km al sur de Antofagasta, II Región, Chile) y la estación La Negra (figura 114).

El criterio que ha prevalecido durante las últimas décadas, ha sido el uso de tecnologías destinadas a realizar mediciones preferentemente de manera directa en terreno, para abordar un problema en particular. Estas mediciones suelen ser prolongadas en su ejecución y de elevados costos. Sin embargo, la tendencia ha cambiado, dejando espacio para la innovación. Tal es el caso de los sensores activos

situados a bordo de plataformas satelitales, cuya órbita permite registrar información que cubre toda la superficie terrestre. Como es bien sabido, las imágenes de satélite son generadas por sensores que captan los patrones espectrales que poseen los objetos terrestres, los cuales tienen la capacidad de emitir o reflejar energía electromagnética. Así, sus diferencias espectrales se producen a partir de los aspectos fenotípicos identificadores de una clase, pudiéndose aseverar que una roca presenta un patrón espectral propio, que lo diferencia tanto de otros cuerpos físicos, como por ejemplo el agua, y de otras rocas que tienen una distinta composición mineral. Por ello, el tipo de algoritmo, así como el criterio de clasificación en que se sustente la investigación, es vital para extraer la información de interés, presente en el área de monitoreo. A este principio se suma la capacidad de penetración que posee la señal emitida por los sensores activos. Este rasgo característico de dichos sensores no ha sido explorado y menos explotado en toda su potencialidad, si bien la tecnología está disponible y entrega imágenes satelitales para su comercialización, no se han logrado resultados importantes y sustancialmente significativos en materia de innovar en diversas áreas haciendo uso de teledetección espacial. Un contexto apropiado para la innovación es ofrecido por la geomática, donde la integración o asociación tecnológica que une los principios de georreferenciación mediante el uso de equipos GPS, el uso de la teledetección espacial para el procesamiento digital de imágenes de satélite y el producto final que entrega los SIG. En el caso de este estudio, este producto final puede ser una base de datos que indica la posición de puntos críticos que presentan el problema de pitting, o bien, una cartografía digital que muestre la misma situación, pero en forma gráfica.

Para detectar y localizar el problema de pitting, se utilizó la información proporcionada por las imágenes satelitales del sensor activo TerraSAR-X. En este estudio debía ser compatible la ubicación dada por la imagen de satélite georreferenciado que identificó el pitting, con la ubicación indicada por el equipo GPS según el replanteo realizado en terreno, con precisiones submétricas. Para ello se debe poner atención en trabajar con el mismo sistema de referencia cartográfico, tanto en lo que respecta a la georreferenciación de imágenes de satélite como al replanteo, siendo en este caso el datum WGS-84 y zona 19.

6.3.3. Metodologías

6.3.3.1. Caso 1

Para el caso del estudio aplicado a la Reserva Nacional China Muerta (Albornoz, 2016), se implementó una me-



Figura 114: Tramo caleta Coloso - entrada MEL (Antofagasta - Chile). *Fuente: Elaboración propia.*

todología destinada a la identificación de la vegetación perdida, posincendio forestal, mediante imágenes de satélites. A partir de esto, se procedió a elaborar cartografías con información relevante para el desarrollo de planes y actividades de la restauración posincendio de la mencionada reserva nacional administrada por la CONAF. Los pasos metodológicos fueron los siguientes:

a. Recopilación de información preliminar.
b. Preprocesamiento de imágenes Landsat-8.
c. Obtención de datos de terreno.
d. Determinación del área recorrida por el incendio.
e. Generación de cartografía de vegetación previa al incendio.
f. Elaboración de cartografía de severidad de los daños producidos por el fuego.
g. Elaboración de cartografía de propuestas de restauración.

En este ámbito, se tiene que la combustión es un proceso fisicoquímico donde el fuego produce una serie de efectos que dependen de las interacciones de la energía liberada (intensidad), duración, cantidad de combustible, tipo de vegetación, clima, topografía, suelo y área quemada. La variabilidad del daño de los recursos y la respuesta entre sitios y diferentes tipos de ecosistemas, es altamente dependiente de la severidad del incendio. A su vez, la severidad del incendio es una medida cualitativa de los efectos del fuego sobre los recursos en el sitio. De esta manera, los incendios con un alto nivel de severidad, destruyen la vegetación, consumen la cubierta vegetal orgánica y exponen el suelo mineral a la erosión, particularmente durante la temporada de lluvias (Hartford y Frandsen, 1992). Además, el fuego puede incrementar la hidrofobicidad (impermeabilidad) de los suelos, reduciendo la infiltración e incrementando la escorrentía superficial, provocando así erosión y traslado de sedimentos que contaminan los cursos de agua.

Para estos casos, la teledetección espacial permite realizar numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo. Sin embargo, más que sustituirlos, los complementa adecuadamente. Entre las ventajas (Chuvieco, 2008) destacan:

- Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre.
- Perspectiva y panorámica.
- Observación multiescala.
- Información sobre regiones no visibles del espectro.
- Cobertura repetitiva (para análisis multitemporales).
- Transmisión inmediata y en formato digital.

La aplicación en este trabajo se desarrolló en el área ambiental de la CONAF, específicamente, en la evaluación

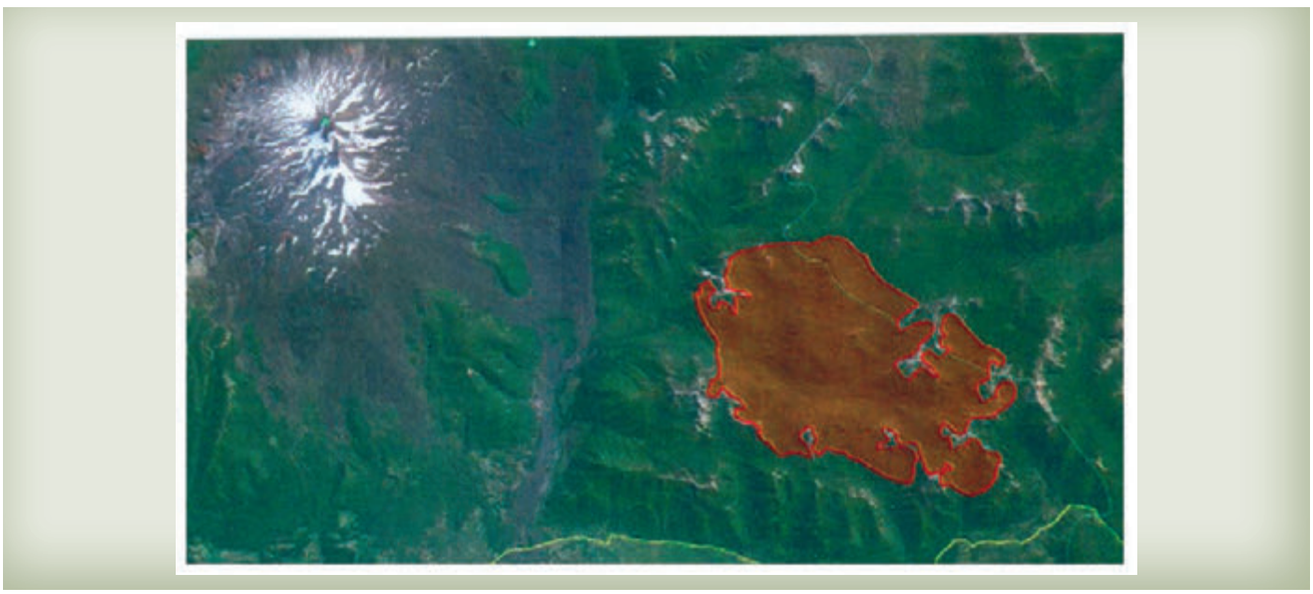


Figura 115: Zona quemada estimada por la CONAF. *Fuente: CISCO - CONAF.*

de recursos forestales, como también en la interpretación y obtención de información relevante de zonas quemadas. CONAF estimó que en el incendio forestal de 2015 se quemaron 6.599,3 ha afectando a la Reserva Nacional China Muerta y, en menor medida, al Parque Nacional Conguillío. La zona quemada colinda con el volcán Llaima al oeste, al sur con Melipeuco y al norte con el Parque Nacional Conguillío (ver figura 115).

En este estudio se aplicaron clasificaciones supervisadas y el índice delta NBR (Normalized Burnt Ratio). Los resultados del estudio determinaron la severidad de los daños usando una clasificación según la distribución de los valores de píxel resultante del proceso ΔNBR, cuyos sectores de severidad cartografiados se muestran en la figura 116 y la tabla 40.

Gracias a las especies que se identificaron en la visita a terreno se pudo contar con cuatro categorías distintas, a diferencia de la elaborada por la CONAF. Esto debido a que se consideraron solo las especies afectadas por el incendio y no las especies pertenecientes a la reserva. Así, la leyenda seleccionada para la cartografía incluyó dos categorías para usos no forestales (suelo desnudo y nieve) y cuatro categorías forestales determinadas por el subtipo forestal dominante, siendo: araucaria, coigüe-raulí-tepa, lenga, roble-raulí-coigüe, lo que supone un total de seis categorías diferentes. La clasificación supervisada se generó a partir de la firma espectral característica de cada categoría determinada en las áreas de entrenamiento.

Finalmente, analizando los resultados obtenidos en este trabajo de titulación, se tiene que: la estimación del área

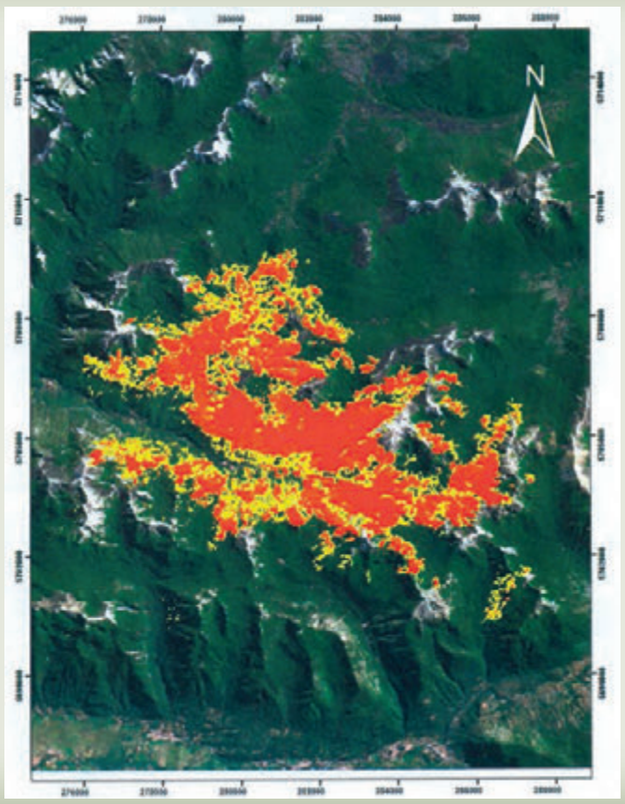


Figura 116: Mapa de severidad. *Fuente: Albornoz (2016).*

Tabla 40: Área y severidad de daños. *Fuente: Albornoz (2016).*

SEVERIDAD	ÁREA (HA)
Alta	1098
Media	1107
Baja	1293

afectada por el incendio realizada por CONAF fue de 6.599,3 ha, mientras que la estimación obtenida con la metodología presentada es de 3.098 ha. Esta diferencia se debe a que CONAF elaboró un perímetro digitalizado basado en puntos muestrales de GPS, en un sobrevuelo de la zona y por datos visuales, generando una sobreestimación del recorrido del fuego. Por otra parte, el procesamiento de datos permitió elaborar una representación cartográfica de la vegetación previa al incendio (coeficiente Kappa 0,77), la superficie recorrida por el fuego (3.098 ha) y la severidad de los daños producidos por el incendio. Estos resultados permitieron elaborar una propuesta de restauración ecológica de la zona afectada por el fuego para la Reserva Nacional China Muerta.

6.3.3.2. Caso 2

El segundo caso de estudio considera una aplicación minera donde resulta de vital importancia el conocer la geometría del elemento o fenómeno a identificar por parte del algoritmo a utilizar. En este contexto, inserto en un proyecto de consultoría académico-profesional, se realizó un apoyo geodésico para la detección de filtraciones en tuberías destinadas a la actividad minera. Las etapas de la metodología aplicada fueron las siguientes:

a. Recopilación de antecedentes.
b. Adquisición de las imágenes TerraSAR X de la zona de estudio.
c. Visita a terreno para determinación de geometría de los elementos de interés y medición radiométrica de ellos.
d. Procesamiento de la imagen de satélite.
e. Elaboración del listado de puntos de interés.
f. Campaña de terreno para replanteo y estacado de puntos de interés.
g. Elaboración de cartografía e informe final.

Para ello, en forma preliminar, se procesaron imágenes del sensor TerraSAR X con un algoritmo de redes neuronales (Zavala, 2005) bajo el principio de la retropropagación (backpropagation), para realizar una clasificación digital y poder identificar y discriminar los elementos de interés (zonas con pitting).

Luego, se procedió a generar una tabla de puntos críticos con la respectiva referencia cartográfica, previa corrección geométrica de la imagen satelital, en el sistema de referencia cartográfica WGS-84 y zona UTM 19. Terminada esta última operación, se procedió a replantear los puntos en terreno con coordenadas UTM, en el tramo comprendido entre caleta Coloso y la entrada a la empresa MEL.

La campaña de terreno comenzó con el encendido y chequeo de los equipos GPS, utilizando vértices SIRGAS conocidos, obteniendo exactitudes inferiores a 1 cm. Esto garantizó cumplir con la tolerancia exigida de 1 m y además aseguró que, en caso de obtener errores, propios del método a aplicar o de las condiciones del medio, estos se incrementaran en el orden de centímetros y no de metros. Otro aspecto que puede influenciar las mediciones realizadas para el estacado corresponde a la influencia de la humedad del suelo (constante dieléctrica), no solo de la tubería por filtración, sino también por la cercanía de algunos metros de la zona de humedales en el cruce de caminos en estación La Negra. Esto puede incluso afectar el procesamiento digital de la imagen y su posterior extracción de coordenadas.

Posteriormente, la campaña continuó en terreno con la finalidad de realizar el replanteo de puntos críticos con problemas de pitting. Para esto, a partir del listado de 103 puntos con coordenadas UTM comprendidas en el primer tramo de 17 km entre caleta Coloso y la entrada a MEL y que identificaban dicho problema, se debía controlar y verificar el trabajo inicialmente realizado. Esto consistió en materializar en terreno, con estacas, la ubicación de dichos puntos críticos; luego, las coordenadas controladas son aquellas obtenidas de la imagen de satélite procesada para tal efecto, procediendo en terreno a verificar su exactitud, definida dentro de un metro de tolerancia. Esto coincidió con las especificaciones técnicas del mandante, con el tamaño del píxel y el método de replanteo.

Para el replanteo se usó el método RTK (Real Time Kinematic o medición en tiempo real), para lo cual se instaló un equipo GPS base en un punto inicial de coordenadas conocidas (vértice IGM - GLN1 situado en estación La Negra) y seleccionando en el equipo móvil el punto archivado a controlar. Luego se procedió a desplazar el equipo según las indicaciones en pantalla para los deltas en el Este y el

Norte, hasta situarse en la coordenada buscada (ver figura 117). De esta forma, se concretó el replanteo de los puntos en terreno, debiendo mantener siempre la comunicación entre la base y el móvil, pudiendo abarcar líneas base entre los equipos de hasta 10 km de manera de asegurar una mayor confiabilidad en el método aplicado.

Por último, y como parte de los resultados obtenidos, se pudo constatar que para los objetivos en los que se centró el presente estudio, algunas ventajas en el uso de esta tecnología respecto de los métodos tradicionales son las siguientes:

- El carácter digital de los datos (las imágenes son matrices numéricas).
- La homogeneidad de la toma de datos (el mismo sensor monitorea toda el área).
- Capacidad de penetración de las imágenes obtenidas de sensores activos.
- La precisión de los resultados, generalmente submétrica, sobre todo al momento de replantear la información en terreno.
- Realización del estudio y búsqueda de datos en forma no invasiva y en lugares remotos.
- Tecnología y resultados validados y validables.
- Posibilidad de multitemporalidad y seguimiento.
- Bajo costo relativo.

6.3.4. Conclusiones

El conjunto de resultados obtenidos en todos los procesos desarrollados para la generación de un producto, que puede ser de carácter numérico o de documento cartográfico, representa la confluencia e integración de varias disciplinas asociadas. Estas disciplinas, y sus respectivas tecnologías, están en el ámbito de las ciencias vinculadas al estudio de fenómenos ocurridos sobre la superficie terrestre, también llamadas geociencias. Así, se incluye el GPS, la teledetección y los SIG, los cuales en su integración se denomina geomática.

El primer caso mostrado está en un contexto donde el aumento de la población y la disminución de las extensiones de los bosques endémicos de Chile, hace que los recursos naturales sean cada vez más escasos, siendo imperativo que estos tengan un uso adecuado para asegurar su disponibilidad en el futuro. Para esto es necesario contar con estudios y desarrollo científico que puedan dar respuestas a estas problemáticas. Por lo mismo, gracias al desarrollo de la tecnología, ya sea en el mejoramiento tecnológico de sensores, el desarrollo de softwares y la integración de disciplinas, es posible la obtención de mapas y cartografía con información especializada de incendios forestales, que sea más confiable y accesible, transformándose en una herramienta de gran relevancia para quienes requieren trabajar profesionalmente en el área del medioambiente y en su sustentabilidad.

Se destaca el concepto de restauración ecológica, que tiene como objetivo principal la restauración del medioambiente ante efectos negativos. Este concepto en Chile es relativamente nuevo, por lo cual se necesita de mayor investigación y recursos para el desarrollo de esta discipli-



Figura 117: Replanteo y localización de pitting con equipos GPS. *Fuente: Elaboración propia.*

na. Desafíos futuros a afrontar en esta área son: la elaboración de una estrategia a nivel país para la restauración ecológica, el fortalecimiento de las agencias públicas para la gestión ambiental, el mejoramiento de la infraestructura ambiental (laboratorios y centros de información), el fortalecimiento de la investigación sobre el estado del medioambiente, el desarrollo del sistema nacional de información ambiental, la educación, concientización y capacitación ambiental, y el desarrollo y puesta en marcha de instrumentos económicos para la gestión ambiental.

En relación con el problema de pitting, se puede indicar que para la zona de estudio se presentaron diversos puntos críticos, que fueron claramente identificados por la señal del sistema SAR, con 90% de asertividad. Esto es el resultado de una adecuada metodología, la cual, si bien resulta ser innovadora, también es rigurosa en su aplicación. Además, es necesario destacar que los equipos GPS geodésicos con el método RTK, utilizados para las mediciones de replanteo y control de desplazamiento de estacas, fueron apropiados, arrojando siempre errores del orden centimétrico. Esto fue cuidadosamente mantenido durante toda la labor realizada, confiriéndole confiabilidad al trabajo realizado. A esto se debe sumar la experticia del equipo investigador en materia de información obtenida de las imágenes satelitales y su integración con otras tecnologías propias de la geomática, lo cual permitió potenciar la propuesta metodológica y reducir los costos de implementación, ejecución y control del trabajo realizado. En el estudio se pudo establecer que, si bien el sector anterior a la estación La Negra, situado en el km 17, presentó un mayor error de desplazamiento, este fue debido a la presencia de calicatas y por la presencia de inducción eléctrica generada por la existencia de líneas de alta tensión. Esto puede interferir con la señal de GPS y provocar distorsiones en la medición realizada para el replanteo y estacado, aunque no constituyó un problema para su posterior ubicación. El resto de los puntos, en forma generalizada, se registraron dentro del error tolerable, definido en 1 metro de acuerdo al tamaño del píxel de la imagen de satélite utilizada para la identificación de pitting. En óptimas condiciones de medición los errores no superaron el centímetro.

Finalmente, el éxito de los resultados obtenidos no solo valida el objetivo inicialmente propuesto, sino que motiva y proyecta su implementación en esta y en otras áreas donde se requiera de la identificación de fenómenos y eventos ocurridos sobre la Tierra, particularmente en situaciones de defensa del patrimonio y recursos naturales, al ser métodos no invasivos basados en el uso integrado de tecnologías innovadoras y confiables.

6.4 Identificación de asentamientos populares en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco 2016, a través de las Tecnologías de la Información Geográfica

Heriberto Cruz Solís,[a] Juan Pablo Corona Medina,[a] José Luis Argueta Mayorga,[b] Edith R. Jiménez Huerta[b]

[a]Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, Universidad de Guadalajara, México
[b]Departamento de Estudios Regionales- INESER, Universidad de Guadalajara, México

6.4.1. Introducción

Ubicar los asentamientos populares en el territorio que ocupan en las ciudades de América Latina, Asia y África, no ha sido una tarea fácil y, mucho menos, monitorear su dinámica territorial a lo largo de más de medio siglo de su existencia. Estos asentamientos hacen referencia a la forma en que los pobres construyen ciudad, y se caracterizan por presentar irregularidades en la tenencia de la tierra al momento de su ocupación. Su falta de documentación oficial y su sistemático ocultamiento son ampliamente conocidos. La dificutad estriba, por un lado, en la acelerada velocidad con la que surgen y en el más de medio siglo que llevan conformándose y, por otro lado, a la falta de recursos económicos y de personal para controlar su proliferación por parte de los gobiernos locales. En gran medida, la falta de información sobre los asentamientos populares está vinculada a que su identificación y documentación se ha realizado, primordialmente, a partir de inventarios que se realizan in situ. Sin embargo, los extraordinarios avances de las Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), en particular la teledetección espacial, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), a través de la disponibilidad de imágenes de satélite y el análisis espacial de las mismas, han sido una alternativa para la localización y caracterización de los asentamientos populares. A lo largo de los tres primeros lustros del siglo XXI, se han venido desarrollando varios procedimientos para su localización, tales como el análisis de imágenes basado en objetos, llamado machine learning, píxeles, textura y morfología, e interpretación visual (Kuffer et al., 2016). Estos autores resaltan la importancia de una mayor exploración de las características físicas, para el desarrollo de una base confiable de imágenes. Su trabajo es uno de los más completos en el uso de la teledetección espacial para detectar la diversidad de asentamientos populares y sus características físicas. Los mismos autores han utilizado imágenes de satélite de alta resolución y profundizan en el reconocimiento de objetos a través de algoritmos de los programas informáticos utilizados en el análisis digital de las imágenes de satélite.

En gran medida, la diversidad de métodos empleados en el análisis espacial está relacionada directamente con la disponibilidad de sensores comerciales de alta resolución espacial instalados en las plataformas de Ikonos y Quickbird, que surgieron a partir de 1999 y 2001, respectivamente. Además, otra condición que ha facilitado el análisis espacial de los asentamientos populares es el acceso gratuito que se tiene actualmente a imágenes de satélite a través de algunas universidades, de Google Earth y a las versiones gratuitas de mediana resolución espacial que ofrecen sensores instalados en los satélites Landsat 7 y 8, las cuales se pueden obtener, actualmente, a través del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS). En el 2008 se anunció la liberalización de todo el archivo histórico de Landsat, por lo que con imágenes desde 1972 hasta fechas recientes, ofrece una información valiosa para el análisis de cambios en el territorio y la detección de los asentamientos populares.

Para el caso de las imágenes de satélite de muy alta resolución (Very High Resolution, VHR), normalmente se proponen métodos de reconocimiento de objetos (análisis visual), que consideran colores, texturas, formas y contextos, para la identificación de los asentamientos populares (Hoffman, 2001; Hoffman et al., 2008). Sin embargo,

también existe el método de análisis digital de píxeles, a través de la clasificación supervisada y no supervisada de imágenes espaciales, que toman en cuenta el tipo de ocupación del suelo (densidades urbanas, agua, vegetación o vacíos) para detectar dichos asentamientos (St. Amand, 2014).

En el caso del presente trabajo, se parte del método de píxeles combinado con la interpretación visual y la recuperación de información histórica sistematizada en 2000 y 2003 de los asentamientos populares, obtenida a través de la clasificación supervisada de la imagen del satélite Quickbird de alta resolución espacial (0,60 m).

6.4.2. Metodología para la detección remota de los asentamientos populares en el área metropolitana de Guadalajara

El modelo de detección para la clasificación de los asentamientos populares en el área metropolitana de Guadalajara (AMG), parte de la observación directa in situ, es decir, antes de realizar el trabajo de gabinete se hizo un amplio reconocimiento en campo de los asentamientos populares, fraccionamientos, industria, y otros, en 2016. Además, se integró a este estudio la base de datos de los asentamientos populares que se habían identificado previamente en 2000 y 2003 (Jiménez y Cruz, 2015). Esto permitió definir las clases de las categorías para la detección de la ocupación del suelo. A partir de esta clasificación inicial se definieron los tipos básicos de poblamiento en el AMG, uno de ellos es el de asentamientos populares.

Para este trabajo se utilizó la imagen del satélite Landsat-8, con una resolución espacial de 30 metros, tomada el 30 de marzo de 2016, que cubre la superficie de los diez municipios metropolitanos mencionados a continuación: Guadalajara, como el municipio central; Zapopan, Tlaquepaque y Tonalá, que conforman el primer contorno de crecimiento; Tlajomulco de Zúñiga y El Salto, el segundo contorno, y por último, los municipios de Tala, El Arenal, Ixtlahuacán del Río y Juanacatlán, situados en el tercer contorno de crecimiento. La clasificación supervisada de la ocupación del suelo del área metropolitana de Guadalajara, parte de ocho categorías: vegetación (Ve, Id = 1) que incluye bosques, áreas con algas marinas, árboles; agua (Ag, Id = 2) que cubre los cuerpos de lagos, lagunas y ríos; industria (In, Id = 3) que se refiere a aquellas áreas destinadas a manufactura, factorías o cobertizos; recreación (Re, Id = 4) que abarcan los parques, plazas y áreas de esparcimiento; vacíos (Va, Id = 5) que corresponde a los terrenos que no cuentan con algún uso u ocupación de suelo específico; agricultura (Ar, Id = 6) que incluyen las áreas destinadas al cultivo; otros asentamientos (OAs, Id = 7) que abarcan todos los asentamientos excepto los asentamientos populares que conforman la siguiente categoría; (Apo, Id = 8) en las que se incluyen las áreas urbanas actuales con y sin pavimentación, y asentamientos populares previamente identificados con otros métodos que muestran su localización y el año en que surgieron. Por cada una de las ocho categorías anteriores se definieron 20 campos de entrenamiento, delimitados por polígonos, que reunieran las características anteriores. Se procedió a la clasificación supervisada usando maximum likelihood classification, correspondiente a una de las herramientas de análisis espacial del software ArcMap. En la figura 118, se puede observar la delimitación de los diez municipios del área metropolitana (1), la imagen de satélite Landsat-8 (2), y el mapa ráster que muestra el resultado de la clasificación supervisada de las ocho categorías de ocupación de suelo.

La superficie sobre la que se extiende el AMG se delimitó siguiendo el contorno del área compacta que conforma la aglomeración urbana y las áreas urbanas dispersas que forman los fraccionamientos que se encuentran ubicados en la periferia. Con el propósito de ir afinando el análisis de los tipos de ocupación del suelo, profundizar en la identificación de los asentamientos populares y definir la extensión del AMG, se hizo el análisis de la clasificación de ocupación de suelo para cada uno de los diez municipios del AMG.

6.4.3. Clasificación de la ocupación de suelo del área metropolitana de Guadalajara, por municipio

En la actualidad, el municipio de Zapopan es el que cuenta con una superficie urbanizada mayor, con 16.925,57 hectáreas, seguido por el municipio central de Guadalajara, con 12.998,57 hectáreas (figura 119). Los municipios que conforman el primer contorno de crecimiento de Guada-

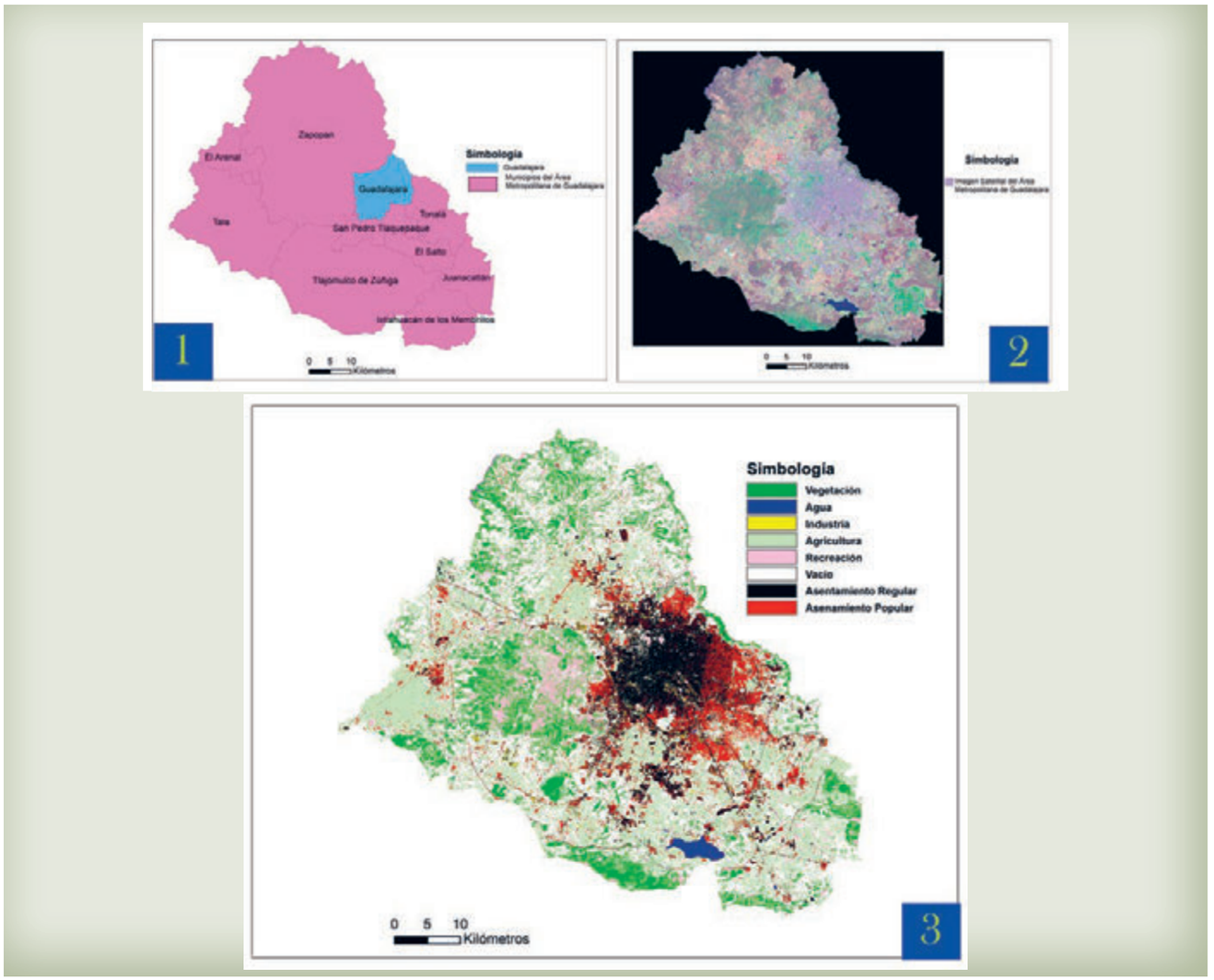


Figura 118: Clasificación supervisada del área metropolitana de Guadalajara. *Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo que se realizó en 2000, imagen de Google Earth, 2 mayo de 2017, imagen satelital de Landsat-8, 30 marzo de 2016 y Marco Geoestadístico Municipal 2010.*

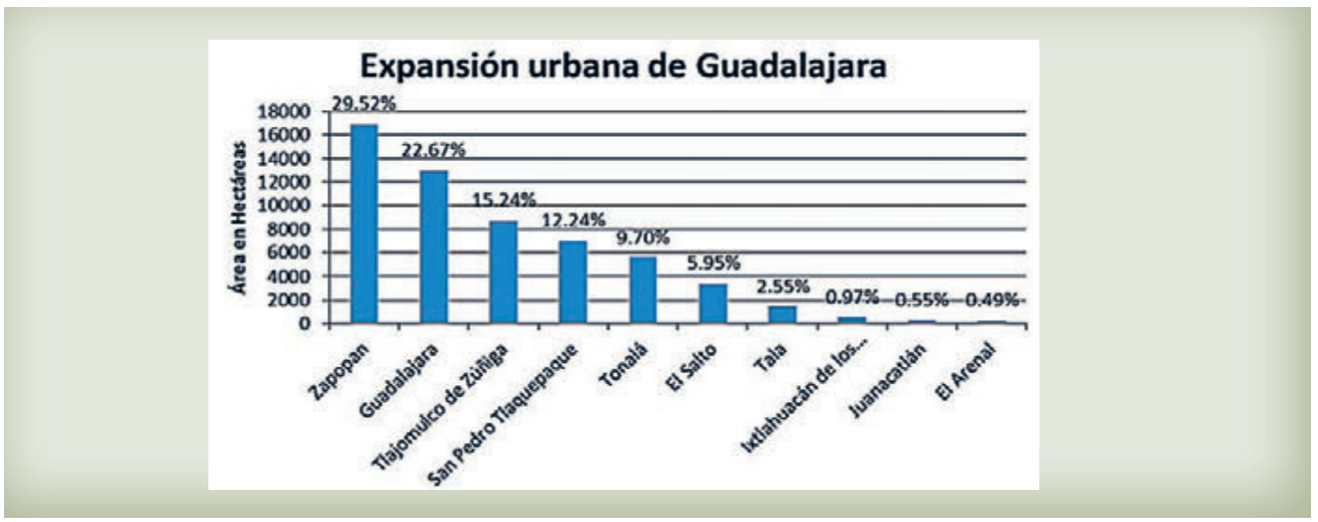


Figura 119: Área metropolitana de Guadalajara, por municipio, 2016. *Fuente: Elaboración propia.*

lajara (Zapopan, Tonalá y Tlaquepaque) cubren una superficie urbana de 29.504,13 hectáreas, es decir, tiene una superfice 2,27 veces mayor que el término municipal de Guadalajara. Los municipios del segundo contorno (El Salto y Tlajomulco de Zúñiga) abarcan una superficie muy cercana a la del municipio central, con 12.147,97 hectáreas. Los municipios del tercer contorno (Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos, Tala y El Arenal) abarcan una superficie considerablemente menor, con 2.610,31 hectáreas.

En la figura 120 se observa el crecimiento urbano que ha tenido el área metropolitana de Guadalajara, donde prevalece la fragmentación y dispersión periférica. La construcción masiva de fraccionamientos que se ha dado a partir de 2000 en la periferia del AMG dio la pauta para delimitar sus bordes.

En 2016, los fraccionamientos de nueva creación en la periferia del AMG, abarcaron una superficie de 10.273,48 hectáreas, es decir, un poco más del 52% del área consolidada de la metrópoli (19.601,00 hectáreas) como se detalla en tabla 41. El municipio metropolitano en donde los fraccionamientos abarcan una mayor superficie es Tlajomulco de Zúñiga (5.025,56 hectáreas). Este municipio concentró el 48,92% de los terrenos en donde se construyeron nuevos fraccionamientos en el AMG. Le sigue en segundo lugar el término municipal de Zapopan, con mayor superficie de recientes fraccionamientos (2.934,69 hectáreas). En relación con la superficie consolidada del AMG, la clasificación supervisada registra que Guadalajara abarcó el 49,59% (9.720,63 hectáreas), seguida por Zapopan con 43,75% (8.574,66 hectáreas).

Respecto de los asentamientos populares, interés primordial de este estudio, en la figura 121 se puede observar que tienden a localizarse principalmente en la porción este del AMG (ver las áreas marcadas con rojo). Para identificar los asentamientos populares, como ya se ha mencionado antes, se recurrió a la cartografía elaborada, en donde se localizó una gran cantidad de asentamientos populares en un estudio previo que utilizó imágenes de satélite de 2000 y 2003. Este punto de partida fue vital para la detección de los asentamientos populares, ya que compensó exitosamente el bajo nivel de detalle de la imagen de satélite disponible. A partir de esa base de datos previa, se delimitaron los campos de entrenamiento para hacer la clasificación supervisada. Asimismo, esta primera clasificación permitió distinguir la superficie que correspondía a los asentamientos populares y las áreas urbanas consolidadas y sin consolidar del AMG.

En la tabla 42, se puede observar que los asentamientos populares se concentran en el primer contorno de expansión del AMG. Mientras tanto, Zapopan agrupa una cuarta parte de ellos, le sigue Tlajomulco (18,49%), después Tonalá (13,49) y, finalmente, los términos municipales de

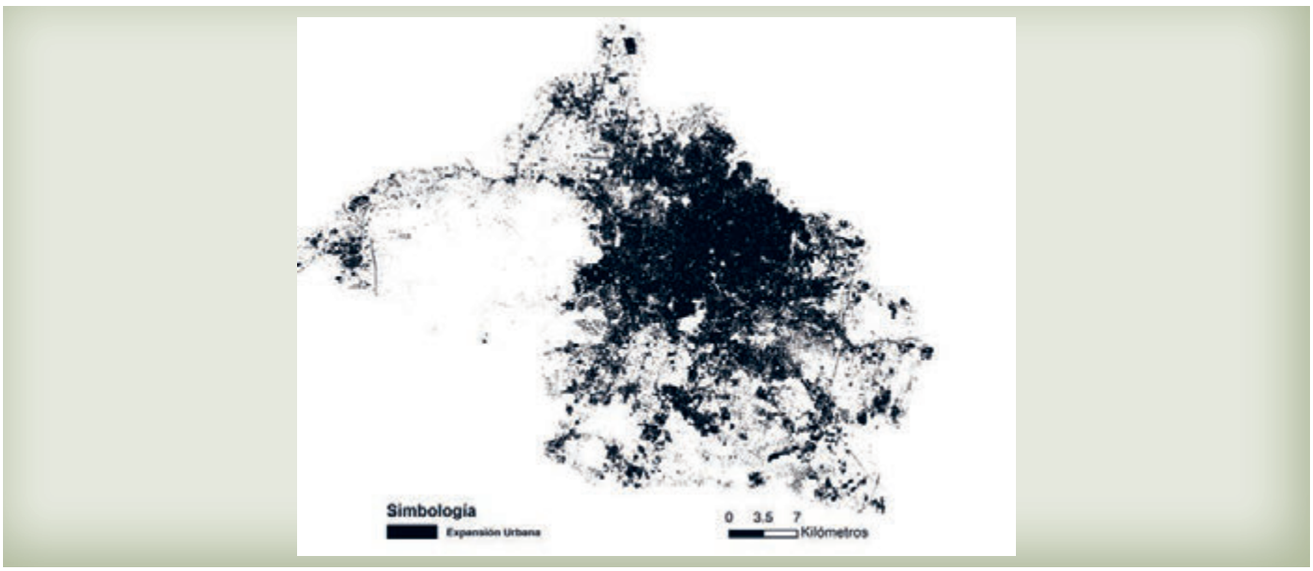


Figura 120: Expansión urbana del área metropolitana de Guadalajara. *Fuente: Elaboración propia con base en la imagen de Google Earth, 2 mayo de 2017 e imagen satelital de Landsat-8, 30 marzo de 2016.*

Tabla 41: Área consolidada de otros asentamientos y los fraccionamientos del área metropolitana de Guadalajara, 2016. *Fuente: Elaboración propia.*

Municipio	Otros asentamientos			
	Área Consolidada (Ha)	Porcentaje	Fraccionamiento(Ha)	Porcentaje
Guadalajara	9.720,63	49,59%	0,00	0,00%
Tonalá	0,00	0,00%	717,66	6,99%
Zapopan	8.574,66	43,75%	2.934,69	28,57%
San Pedro Tlaquepaque	991,87	5,06%	701,46	6,83%
Tlajomulco de Zúñiga	313,83	1,60%	5.025,56	48,92%
El Salto	0,00	0,00%	335,28	3,26%
El Arenal	0,00	0,00%	0,00	0,00%
Ixtlahuacán de los Membrillos	0,00	0,00%	285,17	2,78%
Juanacatlán	0,00	0,00%	91,54	0,89%
Tala	0,00	0,00%	182,13	1,77%
Total	19.601,00	100,00%	10.273,48	100,00%

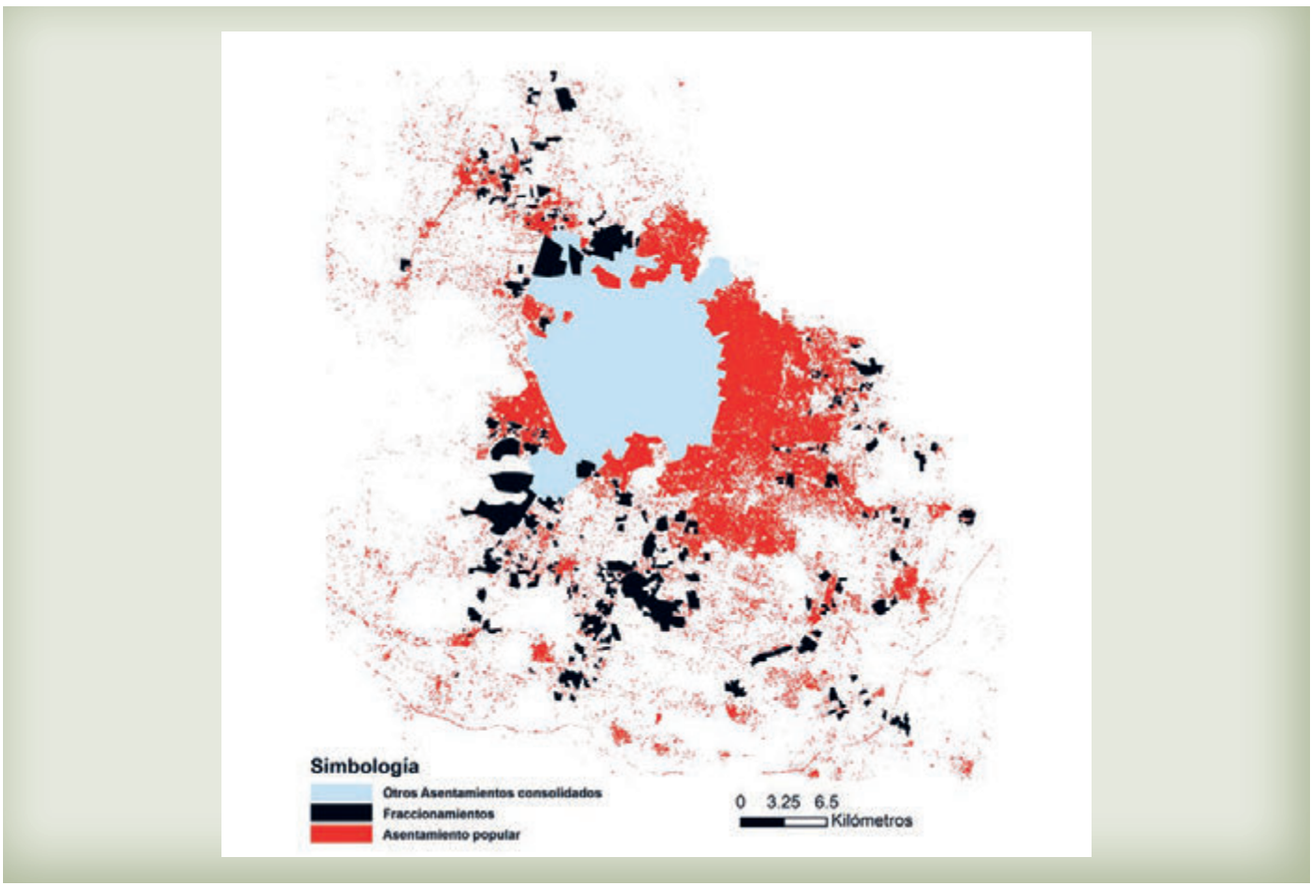


Figura 121: Delimitación de fraccionamientos y asentamientos populares. *Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo, 2000, imagen de Google Earth del 2 mayo de 2017, imagen satelital de Landsat-8, 30 marzo de 2016 y Marco Geoestadístico Municipal 2010.*

Tabla 42: Consolidación de asentamientos populares en el área metropolitana de Guadalajara, 2016. *Fuente: Elaboración propia.*

Asentamiento popular por municipio			
Identificación	**Municipio**	**Área (ha)**	**Porcentaje**
1	Zapopan	6.753,23	25,11%
2	Tlajomulco	4.972,74	18,49%
3	Tonalá	3.627,04	13,49%
4	Tlaquepaque	3.372,90	12,54%
5	El Salto	2.289,71	8,52%
6	Guadalajara	2.140,15	7,96%
7	Tala	1.986,08	7,39%
8	El Arenal	795,37	2,96%
9	Ixtlahuacán	654,23	2,43%
10	Juanacatlán	298,75	1,11%
Superficie total de asentamiento popular		26.890,19	100,00%

Tlaquepaque (12,54%) y El Salto (8,52%). El segundo y el tercer contorno registran un relativo bajo porcentaje de asentamientos populares, en el contexto del conjunto de municipios que conforman el AMG.

6.4.4. Conclusiones

Con este ejercicio inicial para delimitar los asentamientos populares en el AMG, se pudo obtener información importante acerca de su localización en los diferentes municipios metropolitanos. La contribución del presente estudio es que, a diferencia de muchos otros, toma en cuenta la dinámica de los asentamientos populares en una serie temporal, desde la aparición de los primeros asentamientos populares a finales de 1960, hasta su situación cinco décadas después en 2016. Esto fue posible debido a que se incluyó en este estudio uno previo realizado por los autores que abarca de 1970 a 2000. Una segunda contribución es que el estudio muestra la importancia de contar con conocimiento especializado sobre los asentamientos populares, pues resulta ser de gran valor para definir los campos de entrenamiento para cada tipo de ocupación del suelo, utilizados para elaborar la clasificación supervisada. Finalmente, la tercera contribución de este trabajo es que resalta la gran importancia de hacer un reconocimiento visual muy detallado de los resultados que arroja la supervisión clasificada de la imagen a través del tratamiento digital. Es decir, una vez que se obtuvo la cartografía que muestra la localización de los asentamientos populares, se verificó, con la ayuda de Google Earth, que efectivamente los puntos que se marcaban como fraccionamientos populares correspondieran con las superficies obtenidas a través de la clasificación realizada en el tratamiento digital. Aunque este es un procedimiento muy laborioso, dada la media resolución de la imagen Landsat, es indispensable hacerlo para obtener información más precisa y confiable.

Debido a que existe una gran variedad en cuanto a las características físicas de las viviendas y de los asentamientos en donde estas se encuentran, es de vital importancia caracterizar su grado de consolidación a lo largo del periodo de estudio y realizar verificaciones en campo en las áreas en donde existan dudas para definir su categoría en el proceso de clasificación, especialmente en las urbanizaciones localizadas en la periferia. Un trabajo que queda pendiente y es muy importante realizar, es caracterizar entre los diferentes tipos de asentamientos populares, especialmente para ubicar los pueblos indígenas que rodean al municipio de Guadalajara y que se formaron, muchos de ellos, desde la fundación de la ciudad en el siglo XVI. Uno de los problemas que se enfrentaron al hacer la primera detección remota de asentamientos populares en los municipios a través de la clasificación supervisada, es que se incluyeron en este proceso de análisis tanto los fraccionamientos habitados por población de altos recursos económicos como fraccionamientos que se encontraban en la fase inicial de urbanización.

6.5 El Atlas Nacional de España del siglo XXI: Una obra institucional, de ejecución multidisciplinar y de uso plurifuncional

José Sancho Comíns,[a] Alfredo del Campo García,[b] Noelia Pérez Mayoral[b]

[a]Unidad Docente de Geografía - Departamento de Geología, Geografía y Medioambiente, Universidad de Alcalá, España
[b]Área de Cartografía Temática y Atlas Nacional en Instituto Geográfico Nacional, España

6.5.1. Introducción

Los atlas nacionales son obras institucionales que cumplen una diversidad de funciones. Hace ya más de un siglo aparecieron los primeros y, paulatinamente, los distintos países se han dotado de este recurso que, en muchos casos, ha tenido sucesivas ediciones, obedeciendo a demandas específicas. Como es bien sabido, y basándose en la tradicional definición de Salitchev, se puede decir que un atlas es un conjunto de mapas y otros recursos visuales y literarios, en relación orgánica, que constituyen una obra coherente, destinada a cumplir unos objetivos determinados.

En efecto, lo peculiar de un atlas es su plurifuncionalidad en el uso y su multidisciplinariedad en la ejecución. Son obras muy complejas que requieren la participación de especialistas muy dispares en el campo del conocimiento, y se dirigen a un potencial usuario de muy diferente condición. Son propios a un atlas los intereses docentes. También lo son las motivaciones investigadoras que desde distintos campos del saber se acercan a estas obras para buscar explicaciones a problemas específicos. No cabe duda sobre su valor cultural al hacer posible la concienciación social de un determinado territorio como país propio. El cariz operativo es relevante, pues contribuye a desvelar la madeja de relaciones que sustentan la nación y posicionar con precisión potencialidades, fortalezas y debilidades. Por último, un atlas prestigia al país que representa, fortaleciendo su personalidad geográfica, mostrando su devenir histórico y situando su perfil socioeconómico en el contexto internacional.

España puede mostrar una rica tradición en la confección de su atlas nacional. Los más lejanos precedentes los encontramos en la Reseña Geográfica y Estadística de España de 1888, en la que se publica un mapa geográfico de la península Ibérica y Baleares (IGC, 1888). En la segunda edición de esta reseña (1912-1914), se incluyen algunas láminas temáticas. En el primer lustro de los años treinta del pasado siglo, se formulan distintos proyectos que por varias razones no llegaron a ejecutarse. Son reseñables la creación de la Comisión Permanente del Mapa Económico de España en 1930 y un año después, en tiempos de la II República, nace la Comisión Interministerial de Cartografía y Geografía Económica de España. Un proyecto que ya puede calibrarse de auténtico atlas nacional es el que se inicia en 1955 con la creación de la Comisión del Atlas Nacional, comenzando los trabajos en 1958 y publicándose en 1965, 28 láminas geográficas y 24 temáticas, llegando estas a 28 unos años después (Vázquez, 1965; Sanz, 1992). La cartografía general estuvo acompañada de una reseña geográfica, un índice toponímico, un prólogo y un índice de láminas. En 1986 por acuerdo del Consejo de Ministros, se encomienda al Instituto Geográfico Nacional (IGN) la elaboración de un nuevo atlas nacional que, entre 1991 y 1997, publicó los 45 cuadernillos temáticos que constituyen los seis tomos del mismo (IGN, 2017). Terminada esta primera fase, se continuó con actualizaciones, elaboración de productos digitales y producción de monografías, láminas exentas, murales y compendios. En el año 2004 se inicia el proyecto Sistema de Información del Atlas Nacional de España (SIANE), que abre la nueva etapa actualmente en curso.

Así pues, a mediados de la primera década del recién inaugurado tercer milenio, el IGN se propuso llevar a

cabo un nuevo proyecto de atlas nacional. De modo esquemático, se pueden resumir en tres tipos las motivaciones que impulsaron al IGN a abordar este nuevo desafío. En primer lugar, era necesario atender a nuevas demandas que como servicio público el IGN debía satisfacer; cabe citar a este respecto la aparición de nuevos contenidos temáticos que debían ser tratados, siendo relevante el reconocimiento de los valores naturales, culturales y paisajísticos, como patrimonio digno de ser conservado y mostrado. En segundo lugar, la aplicación de las nuevas tecnologías de la comunicación al propio atlas se hacía necesaria para atender una demanda creciente del producto digital. En tercer lugar, hacía falta una reflexión profunda sobre la estructura sintáctica del argumento temático del nuevo atlas nacional. En este caso, el IGN se planteó el atlas nacional como una obra versátil que hace posible un aprovechamiento pluridireccional, superando así la acostumbrada linealidad o secuencia de principio a fin, tan propia de los atlas impresos tradicionales. Por último, no se puede olvidar que la riqueza de fuentes de información y de nuevas técnicas de expresión es cada día mayor, abriendo enormemente el abanico de posibilidades de representar, o más bien recrear, una realidad geográfica compleja en extremo y de la que, por otra parte, tenemos plena conciencia de su inasibilidad completa.

6.5.2. Planteamientos previos a la ejecución del proyecto

Previamente se calificó al atlas nacional de obra compleja, y lo es por tener que compatibilizar cuatro aspectos que, en conjunto y cada uno de ellos en particular, deben ser tratados con extremo cuidado: En primer lugar, la formulación de objetivos; a continuación, la opción de estructura temática; después, la formación de un equipo científico y técnico adecuado como ejecutor del proyecto; y, por último, la elección de las herramientas idóneas para su elaboración. A continuación, se verá con cierto detenimiento cada uno de estos aspectos clave.

6.5.2.1. Objetivos

Parece obvio que la formulación de unos objetivos claros y factibles debe preceder a cualquier puesta en marcha de un proyecto y, más en concreto, de un atlas nacional. En este sentido, el propio gobierno de España explicitó de manera diáfana, hace ya 30 años, qué objetivos debían tener en cuenta los ejecutores del Atlas Nacional de España (ANE), más aún teniendo en cuenta que el propósito subyacente a todos, además, era la prestación de un servicio público: "El Atlas Nacional de España constituye una gran obra de carácter científico y cartográfico sobre la realidad de un país, al objeto de facilitar, de forma clara e inteligible, la información necesaria para el estudio, la protección y renovación de los recursos naturales, el uso racional de la riqueza y el desarrollo del ambiente cultural y educativo, sirviendo además de medio a la planificación de los sectores público y privado en actuaciones de contenido económico y medioambiental".

Esta declaración tiene hoy plena vigencia. El Atlas Nacional de España del siglo XXI (ANEXXI) sigue, por tanto, las directrices que emanan de la misma. Se trata, en primer lugar, de una obra de carácter científico; esto quiere decir que debe construirse a partir de fuentes de datos veraces y contrastados; el conocimiento científico acumulado sobre los hechos físicos, sociales y económicos es condición previa y necesaria para acometer con solvencia un proyecto de esta envergadura (Sancho et al., 2013). La ejecución de un atlas aprovecha lo realizado previamente por los diversos especialistas y lo acomoda a las exigencias particulares del atlas. Es, en suma, una obra científica por la veracidad de los datos, el rigor metodológico de su tratamiento y el aprovechamiento del bagaje científico acumulado previamente sobre el territorio y la sociedad objeto de estudio.

En segundo lugar, un atlas es una obra cartográfica. No porque esté constituida exclusivamente por mapas, sino porque estos son el recurso fundamental del discurso visual. En la actualidad, los atlas utilizan una diversidad de recursos visuales (mapas, gráficos, ilustraciones, imágenes aéreas y satelitales, fotografías oblicuas, representaciones tridimensionales, textos literarios, entre otros), todos ellos se congregan de manera coherente y complementaria alrededor de los mapas, que siguen siendo el armazón rector que sostiene el hilo conductor del argumento científico. Por eso, hablamos de los atlas como obras multimedia e incluso hipermedia, cuando se aplican las nuevas tecnologías, que hacen posible la incorporación de la voz, la música y la movilidad del usuario en su seno de manera ágil.

Dice la declaración gubernamental que la transmisión de contenidos del atlas debe ser clara e inteligible. La claridad de un atlas es condición ineludible. El lenguaje visual tiene unas normas sintácticas que la semiología estudia y los ejecutores de un atlas deben cuidar exquisitamente. A la vez, ese lenguaje tiene una potencialidad expresiva enorme que el buen cartógrafo sabe aprovechar, haciendo del atlas una obra no solo inteligible, sino atractiva, sugerente y con cierto valor estético.

Los contenidos temáticos, expresados en los mapas y otros recursos de comunicación, son reflejo preciso de la información científica. Quiere decir eso que los datos de entrada han sido tratados con rigor, transformando aquellos en información, la cual supone un proceso reflexivo profundo y una toma de decisiones pensada hasta dotarla de una capacidad propia de transmitir lo cierto y verdadero e incluso interpelar al futuro usuario del atlas. El objetivo del atlas es recrear en un soporte impreso o electrónico, la realidad geográfica completa del país. Ello contribuye indudablemente a conocerla con precisión y suficiente profundidad como para poder hacer un uso racional o sostenible de los recursos, respetarlos y conservarlos debidamente.

El usuario potencial de un atlas es de muy diversa condición, pero sobresalen, por un lado, el público general y, por otro, profesores y alumnos en sus diferentes niveles de enseñanza. Por eso se dice que los objetivos culturales y docentes son inseparables. Dar al gran público la posibilidad de ver en una obra cartográfica cómo es su tierra, sus gentes y el entramado económico e histórico del país, resulta decisivo para adquirir esos conocimientos necesarios que hacen de las personas auténticos ciudadanos. Más aún es decisivo el papel que puede jugar un atlas nacional en el campo docente como herramienta idónea para el aprendizaje. El conocimiento localizado, la ponderación del contexto territorial y el adiestramiento en la lectura de información geográfica visualizada cartográficamente, son elementos clave en la formación escolar en sus diferentes niveles.

Por último, tanto la planificación territorial desde la gestión pública como la toma de decisiones desde el ámbito privado, necesitan obras de conjunto que puedan servir de referencia. La perspectiva integrada como marco en el que se sitúan aquellas, puede matizar las opciones y hasta hacerlas más sensatas. De ahí que no sea ajeno como objetivo la elaboración de una herramienta como el atlas nacional, que ofrece precisamente ese punto de vista integrador y correlacionado de país.

A todo lo anterior se debe hacer constar que el ANE-XXI tiene el firme propósito de constituirse en el atlas de referencia en el ámbito gubernamental, profesional, académico-docente y social, tanto a nivel nacional como internacional, y cumplir así un objetivo estratégico: ser el geoportal en productos y servicios de cartografía temática de la administración general del Estado con dominio web propio e integrado como un Sistema de Información Geográfica multisectorial, a la vez que nodo de la Infraestructura de Datos Espaciales de España (ver figura 122).

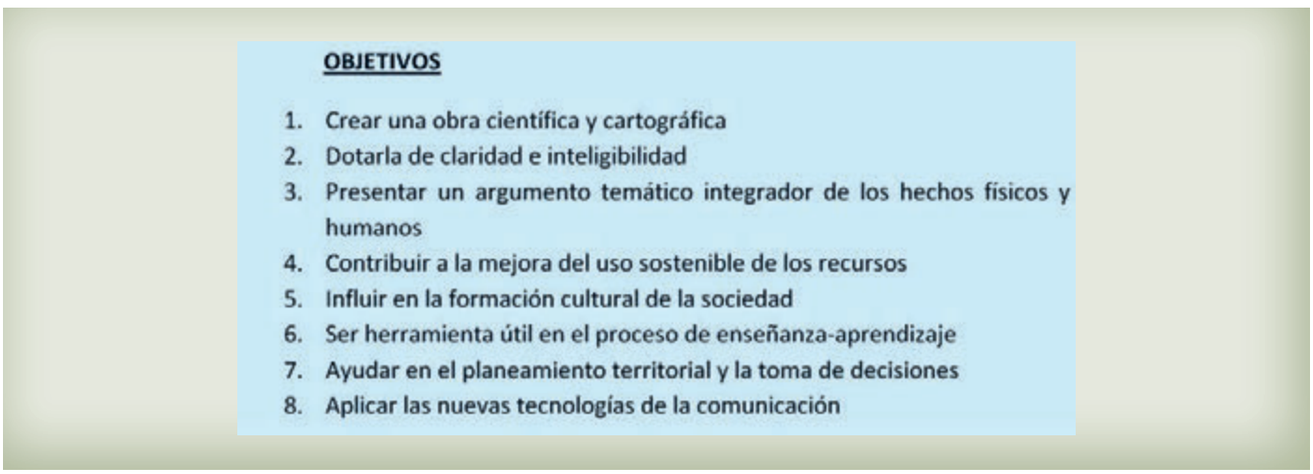


Figura 122: Objetivos del Atlas Nacional de España del siglo XXI. *Fuente: Elaboración propia.*

6.5.2.2. La estructura temática

Construir un argumento temático que sostenga acertadamente los objetivos reseñados en el punto anterior, tiene su desafío. No tanto por la dosis de innovación que requiere, sino por la diversidad de opciones que tiene a su alcance el ejecutor. No se debe olvidar que el proceso de representación cartográfica se enfrenta a un hecho de gran calado: Reflejar en un conjunto de imágenes la compleja realidad geográfica. El paso de la realidad a su representación cartográfica supone una artificiosidad, dado que aquella nunca podrá quedar encerrada en la segunda, ni esta ser fiel expresión de la primera en todos sus matices.

A la hora de hilvanar el discurso cartográfico en un atlas como el que aquí se presenta, los científicos responsables de su ejecución han tenido en cuenta tres supuestos. En primer lugar, el hábito de lectura de los potenciales usuarios, es decir, qué discurso expositivo tienen por costumbre ver en la secuencia informativa de los atlas. A este respecto, parece que es muy común la presentación del medio físico o natural al comienzo para, después, dar a conocer los recursos humanos y, por último, las actividades que la comunidad humana realiza. Esta es una construcción tradicional que han seguido la mayor parte de los atlas nacionales. En segundo lugar, deben ponderar el peso de unos temas en relación con otros y puede que, como consecuencia, decidan romper aquella estructura clásica y un tanto rígida. En tercer lugar, está la disyuntiva de diseñar una secuencia dominantemente analítica o bien enfatizar las presentaciones sintéticas. Es evidente que, por un lado, la descomposición de una realidad unitaria en facetas facilita su lectura, al mismo tiempo que descontextualiza cada una de ellas y, por tanto, se desdibuja aquel anhelo, nunca alcanzado, de asir toda la realidad con todos sus matices y darla a conocer de modo más global y sintético.

Los responsables de la ejecución del ANEXXI, conocidos los supuestos anteriores y después de una sosegada reflexión, han tomado la decisión de dotar de una estructura clásica al nuevo atlas, no sin dejar de introducir algunos matices. Las razones que sostienen la opción por este tipo de discurso son las siguientes:

- El ANEXXI debe ser contemplado como continuidad de las anteriores ediciones, introduciendo donde fuera pertinente, aquellos nuevos contenidos que por su importancia en sí o la relevancia social adquirida, deben ser atendidos.

- Un estudio pormenorizado de los atlas nacionales en el mundo da como resultado una clara dominancia de la estructura temática tradicional, aunque son igualmente significativos aquellos otros que han optado por discursos temáticos más rupturistas.

- Una tercera razón estriba en la tradicional familiaridad entre las estructuras temáticas clásicas y la perspectiva analítica. Un recorrido analítico, salpicado de paradas sintéticas, puede ser bien ilustrativo, como ocurre en tantos procesos de la ciencia experimental.

- Un atlas debe acomodarse a los hábitos de los usuarios y no requerir más esfuerzo del necesario para que estos lo lean gustosamente. De alguna manera, se puede decir que un atlas debe ser ergonómico. Se debe reconocer que el hábito de lectura general está hecho sobre la construcción temática tradicional.

- Por otro lado, no se puede olvidar que la realidad académica (universidades y centros superiores de investigación) sigue siendo seccional más que transversal, cosa que condiciona de manera importante la participación de especialistas.

- Por último, la aplicación de las nuevas tecnologías de la comunicación puede mitigar esta estructura tradicional, aparentemente tan segmentada, al hacer posible la navegación rápida en el seno del atlas, la consulta sinóptica de elementos analíticos y, en último extremo, la recreación de una nueva estructura temática a demanda del usuario.

6.5.2.3. La Red ANEXXI

La elaboración de un atlas requiere de un cuerpo de científicos de prestigio que detecten aquellos aspectos temáticos apropiados para la más ajustada representación de territorio y la sociedad que lo habita. Un atlas exige no solo bastante información de partida, ni es suficiente la destreza técnica de especialistas que aseguren el mejor tratamiento de los datos y su simbolización,

sino que precisa de un capital humano de excelencia, que posea el conocimiento científico de toda la diversidad de temas que aborda. Esa fue la razón que impulsó al IGN a contactarse con la Asociación de Geógrafos Españoles (AGE) y a constituir, más tarde, la Red ANEXXI, dentro de la cual se agruparían universidades y centros superiores de investigación que pondrían a disposición del ANEXXI los científicos más cualificados (Sancho et al., 2014).

El proyecto del nuevo Atlas Nacional de España se puso en marcha con el establecimiento de un primer convenio entre el IGN y la AGE en 2011. A su amparo se hizo una profunda reflexión por parte de los miembros nombrados por la AGE a tal efecto, como Comité Científico Asesor, y el personal del área de Cartografía Temática y Atlas Nacional del IGN, sobre las opciones a tomar en la ejecución del nuevo proyecto, la metodología a seguir, el perfil conceptual del ANEXXI y la estructura temática que lo iba a sostener. En un segundo convenio (2012) se estipuló el plan de formación para el manejo de la herramienta informática que iba a ser empleada en la creación de la base de datos donde se alojarían en el futuro los recursos elegidos por los científicos respectivos en cada tema.

Una vez cumplida esta primera fase, se contactó con los especialistas radicados en las universidades y centros superiores de investigación, y otros organismos científicos y académicos para procurar su colaboración. A tal efecto, se creó una red, denominada Red ANEXXI, que daba cobertura formal al trabajo que iban a realizar los científicos al contar con el debido reconocimiento académico y la aceptación explícita por parte del representante legal de la institución. La Red ANEXXI se conformó con la adhesión de 34 universidades, y cinco centros de investigación, academias y asociaciones profesionales relacionadas con las ciencias geográficas, aportando el inconmensurable valor de más de 150 especialistas y teniendo como organización líder a la Universidad de Alcalá. El Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), organismo autónomo del Ministerio de Fomento a través del IGN, desde el primer momento formó parte de la red como ente que tiene atribuida legalmente la edición del ANE, y como representante del IGN, que tiene la responsabilidad de su elaboración (autor corporativo).

Los objetivos comprometidos por parte de la Red ANEXXI fueron los siguientes:

- Nombrar un Comité Científico Asesor (CCA) que marque las directrices científicas en el desarrollo de los trabajos y transmita las orientaciones técnicas emanadas desde el IGN a los miembros de la red. En él están representadas las grandes áreas temáticas del ANEXXI (ver figura 123).

- Nombrar por parte del CCA un Comité Ejecutivo de tres miembros que asuma la máxima responsabilidad en la gestión operativa de los trabajos de la red (ver figura 124).

- Los miembros de la Red ANEXXI y sus especialistas se comprometen, en concreto, a suministrar la información científica pertinente para crear una base de datos en la que quedan definidos los recursos a representar en el ANEXXI y redactar, posteriormente, los textos explicativos de esos mismos recursos una vez expresados gráficamente.

6.5.2.4. El Sistema de Información del Atlas Nacional de España (SIANE)

Desde un punto de vista amplio, el SIANE comprende las personas, los procesos, el software, el hardware y la documentación, para elaborar el ANE. En este artículo solo se describirá al software. Este consta de tres subsistemas: el de entrada, el de proceso, y el de publicación, que se apoyan sobre bases de datos relacionales (principalmente Oracle y PostgreSQL).

El subsistema de entrada consta de cuatro aplicaciones fundamentales, todas de desarrollo propio:

- Una macro de Excel para preparar los datos.

- Un módulo, perteneciente al gestor de contenidos general, para validar y corregir los datos e incluirlos en la base de datos de variables a representar.

- Una aplicación web (DefineANE) que permite al Comité Científico Asesor y sus grupos de trabajo temá-

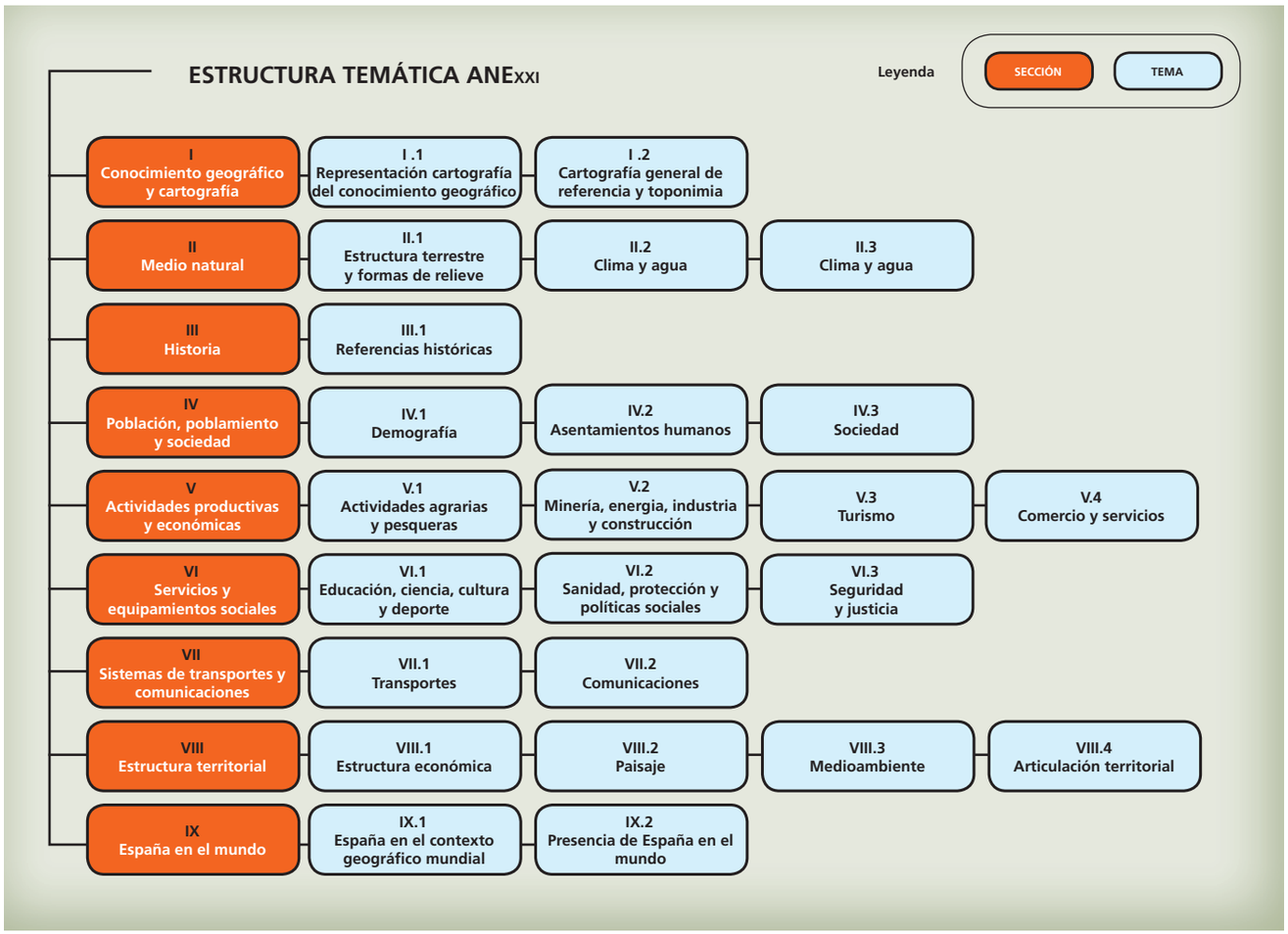


Figura 123: Estructura temática del Atlas Nacional de España del siglo XXI. *Fuente: Elaboración propia.*

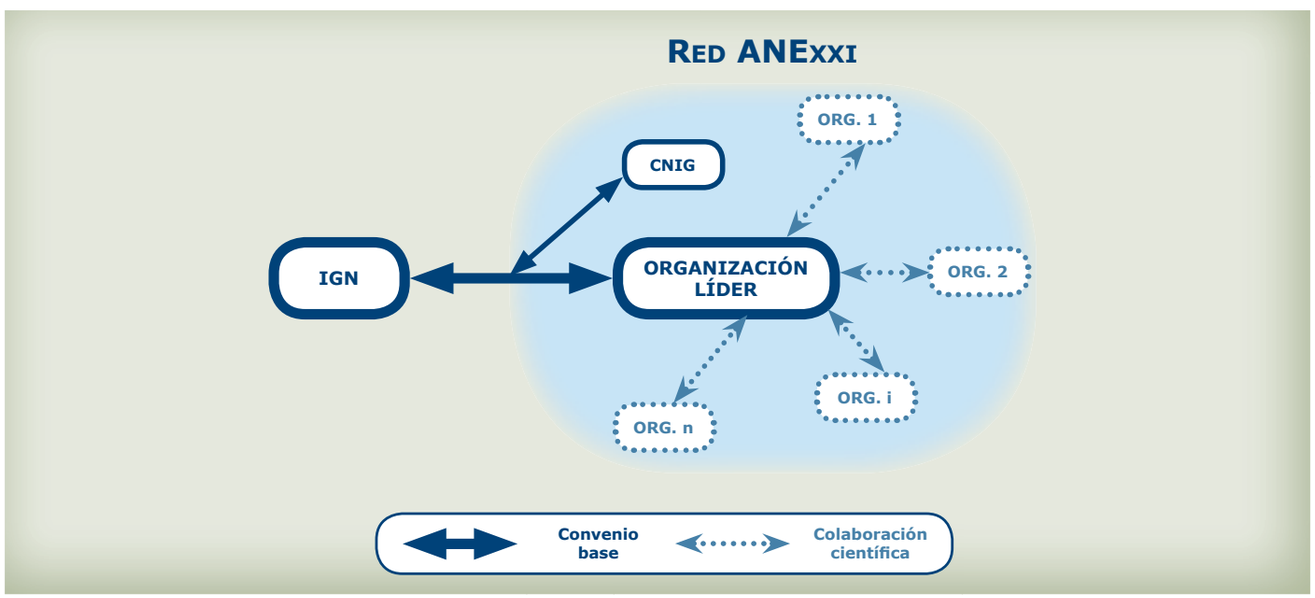


Figura 124: Estructura de la Red ANEXXI. *Fuente: Elaboración propia.*

tico definir los recursos más significativos de cada tema y subtema y priorizarlos.

El subsistema de proceso consta principalmente de tres componentes:

- Gestor de contenidos de desarrollo propio, en el que destacan:
  - El módulo para crear y mantener los metadatos de los recursos producidos.
  - El editor de mapas temáticos cuantitativos de desarrollo propio, combinado con tecnología ArcGIS Server para proporcionar las bases cartográficas de referencia y para proporcionar determinadas técnicas cartográficas cuantitativas.
  - El módulo que permite conectar, a través de las palabras clave almacenadas en los metadatos, los recursos con su publicación a través del Buscón del ANE.
- ArcGIS Desktop para elaborar mapas temáticos cualitativos o mapas cuantitativos cuya técnica no haya sido desarrollada en el editor de mapas.

El subsistema de publicación SIANEweb consta de los siguientes módulos de desarrollo propio:

- Una aplicación, denominada Buscón del ANE (BANE), para buscar y visualizar todos los recursos del ANE producidos a lo largo de su historia. Constituye el actual interfaz de entrada al ANE en la web: http://www.ign.es/ane/bane/.
- Un módulo de visualización web de SIANE que permite consulta de mapas interactivos con acceso y consultas a los datos estadísticos, posibilidad de descargar los mapas y los datos, suscripciones, entre otros. A este módulo se accede desde BANE si los recursos recuperados y seleccionados en esa aplicación, han sido elaborados con el editor de mapas de SIANE.
- ArcGIS Server.

Finalmente, mencionar que el desarrollo de determinadas funcionalidades en DefineANE, permite que esta aplicación sirva también como herramienta para supervisar el progreso de los trabajos a partir de los recursos definidos.

6.5.3. El desarrollo del proyecto

Asentadas las condiciones previas que se acaban de exponer, se desencadenó en 2013 el trabajo de elaboración del ANEXXI propiamente dicho. Cuatro aspectos cabía dilucidar en los primeros momentos: Hacer operativa la Red ANEXXI, definir los recursos visuales que iban a sostener el argumento científico, elegir el tipo de producto a elaborar y sopesar el alcance real que SIANE tiene en estos momentos y a medio plazo. A continuación se verá cada uno de estos aspectos.

6.5.3.1. Constitución de los grupos de trabajo temático (GTT)

Se partió de la existencia de la Red ANEXXI y de una estructura temática determinada por el CCA. Por lo tanto, se contaba con un capital humano de excelencia que iba a desarrollar el trabajo científico, y un marco que trazaba las grandes líneas de contenidos a representar. A esto se unió el cuerpo técnico del Área de Cartografía Temática y Atlas Nacional de la Subdirección General de Geodesia y Cartografía del IGN, que iba a dirigir el proceso metodológico y técnico de cara a la edición del producto. Se formaron 24 GTT, tantos como son los temas que integra el ANEXXI (ver figura 125).

El primer paso a dar por parte de los GTT era una sosegada reflexión sobre cómo desgranar el contenido genérico que venía expresado en el título del tema. Esto significaba adentrarse en un proceso analítico minucioso, a la vez que buscar también aspectos integradores de una síntesis más o menos avanzada. Todas aquellas facetas detectadas deberían ostentar la condición de representables gráficamente, rigurosas por su contenido científico y actualizadas si fuera el caso.

Con ello, el GTT conseguiría crear un argumento expositivo eminentemente visual, bien integrado, diverso en los medios de expresión (mapas, gráficos, imágenes, tablas, croquis, entre otros), y complementario para la comprensión global del tema tratado. Estos grupos de trabajo estaban radicados en instituciones diversas (universidades,

institutos de investigación, el propio IGN, entre otros), siendo partícipes de los mismos especialistas procedentes, a su vez, de entes diferentes. Esto haría fácil cumplir esa multidisciplinariedad del trabajo científico anunciada como valor del ANEXXI.

6.5.3.2. Definición de los recursos

Se entiende por recurso cualquier aspecto o faceta natural, histórica, social, económica o cultural, que ostente suficiente peso específico para caracterizar parcial o en su totalidad a un territorio o país y tenga la posibilidad de ser representada mediante una imagen cartográfica o de otro tipo. Así pues, los GTT, una vez detectados los recursos, realizaron un doble trabajo: En primer lugar, procedieron a definir cada uno de los recursos según las normas establecidas por el equipo técnico del IGN; posteriormente, jerarquizarlos según la importancia y significatividad, estableciendo un orden de prioridad.

De modo esquemático, se resumen esos requerimientos técnicos para una definición clara y completa de los recursos, de la siguiente forma: los tres primeros hacen referencia al título del recurso, el tipo de expresión (mapa, gráfico, croquis, imagen fotográfica, entre otros), y la fuente a la que debe acudir el redactor para la obtención de los datos; los tres siguientes a la escala espacial (en caso de tratarse de un mapa), el sistema de representación (cualitativa o cuantitativa), y la unidad espacial de análisis (estado, comunidad autónoma, provincia, municipio u otra posible); el tipo de tratamiento de los datos de partida (índices, ratios, umbrales para segmentación de series continuas de datos absolutos, proceso de generalización de leyendas cualitativas y de cambios de escala de representación cartográfica, entre otros); por último, propuesta de simbolización gráfica y puesto que ocupa en el orden jerárquico de prioridad (muy alta, alta, media, baja). A tal efecto, se diseñó una plataforma informática en la que cada GTT, una vez registrado y con la utilización de las claves de acceso, insertó sus recursos desde su lugar de trabajo. La plataforma, llamada defineANE, albergó los 3.600 recursos definidos por los GTT. Con ello se consiguió para el país, una base de datos de extraordinario valor por las exigencias a las que había sido sometido cada recurso y, sobre todo, la potencia reflexiva que acumulaba después de su evaluación científica y técnica por los GTT y el propio IGN.

6.5.3.3. Primer producto del ANEXXI: Publicación impresa *España en mapas. Una síntesis geográfica* de la serie *Compendios del ANE*

Un compendio equivale a un buen resumen o síntesis sustancial de una obra mayor. En este caso, la decisión de hacer un compendio del ANEXXI sin que este estuviera en su totalidad elaborado, puede parecer paradójica y atre-



Figura 125: Organización funcional del CCA, el GTT y el IGN. *Fuente: Elaboración propia.*

vida. Varias razones, sin embargo, hicieron pensar que se debía intentar. La reflexión por parte del CCA y el personal del Área de Cartografía Temática y Atlas Nacional del IGN, hizo pensar que tal posibilidad no solo era factible, sino conveniente.

En primer lugar, la extensa y rica base de datos no podía abordarse en su totalidad en una misma fase; los costes financieros generales, de tiempo y de personal, lo hacían imposible. Se contaba, en segundo lugar, con una priorización de los recursos, establecida por los GTT, y que facilitaba la selección de los mismos para llevar a cabo su tratamiento y la construcción de un argumento científico y expositivo sólido. En tercer lugar, el compendio podía contemplarse como un avance o anticipo de un desarrollo posterior más extenso, lo cual permitía acrecentar la experiencia y probar la bondad de las herramientas de trabajo, desde la perspectiva productiva y difusiva. Por último, en el plan estratégico aprobado por el IGN estaba prevista la elaboración de un compendio junto a otros productos al margen de la serie general, lo cual permitía encajar el propósito en el marco institucional.

El resultado es una obra impresa de aproximadamente 650 páginas, que reúne unos 1.100 recursos, de los cuales al menos 800 son mapas, y el resto gráficos, ilustraciones, imágenes fotográficas y satelitales, y textos explicativos que acompañan a la parte cartográfica (ver figura 126). Se pretende que esta publicación sea actualizada periódicamente (ideal cada dos años). También los recursos son accesibles a través del SIANE en la web (SIANEweb), como un catálogo de recursos que permite su búsqueda, visualización y descarga a demanda, de aquello que resulte de interés al usuario.

El compendio abre camino, en suma, al ANEXXI en el que se sigue trabajando para hacer de él una herramienta versátil, permanentemente actualizada en sus contenidos y abierta a la incorporación de las nuevas tecnologías de la comunicación.

6.5.3.4. Próximos desarrollos del ANEXXI

En este apartado se esbozan las metas que el IGN se ha propuesto alcanzar a corto y medio-largo plazo. En el horizonte de corto plazo se pretende:

- Publicar una versión actualizada y mejorada de la publicación que ahora se presenta *España en mapas. Una síntesis geográfica*, de forma periódica como mínimo cada tres años.

- Estudiar la viabilidad de generar en cada capítulo del compendio una infografía, adaptando para fines didácticos los recursos que lo requieran, en función del nivel del alumno (preferentemente ESO y Bachillerato), dentro de la serie *Murales didácticos* del ANE.

- Estudiar la viabilidad de realizar la publicación electrónica y con impresión bajo demanda, en versión inglesa.

- Continuar produciendo los recursos definidos por el CCA de prioridad alta, media y baja.

- Elaborar una publicación impresa *Evolución de la representación cartográfica de España*, de la serie *Monografías* del ANE, a partir de todas las imágenes y fichas generadas por el grupo temático de trabajo constituido por diferentes especialistas de la Biblioteca Nacional de España, la Real Academia de la Historia, el Museo Naval, el Centro Geográfico del Ejército de Tierra y el Instituto Geográfico Nacional.

- Desarrollar un proyecto piloto, plenamente operativo, con todos los recursos definidos del tema referencias históricas, con el objetivo de probar una nueva tecnología para el futuro SIANE, dado que estos recursos no requieren una actualización continua y comprenden gran variedad de mapas temáticos, tanto cualitativos como cuantitativos. Este trabajo se realizaría con la tecnología ArcGIS Online.

- Elaborar una base de cartografía de referencia para seguir produciendo los mapas políticos, físicos y físico-políticos de España, Europa y el mundo, de la serie *Láminas y murales* del ANE.

- Probar nuevas tecnologías y productos del mercado para sustituir el actual software de SIANE por una integración, débilmente acoplada, de diferentes productos con una mínima personalización o desarrollos complementarios, de manera que su mantenimiento sea más fácil, menos costoso y con menos riesgo.

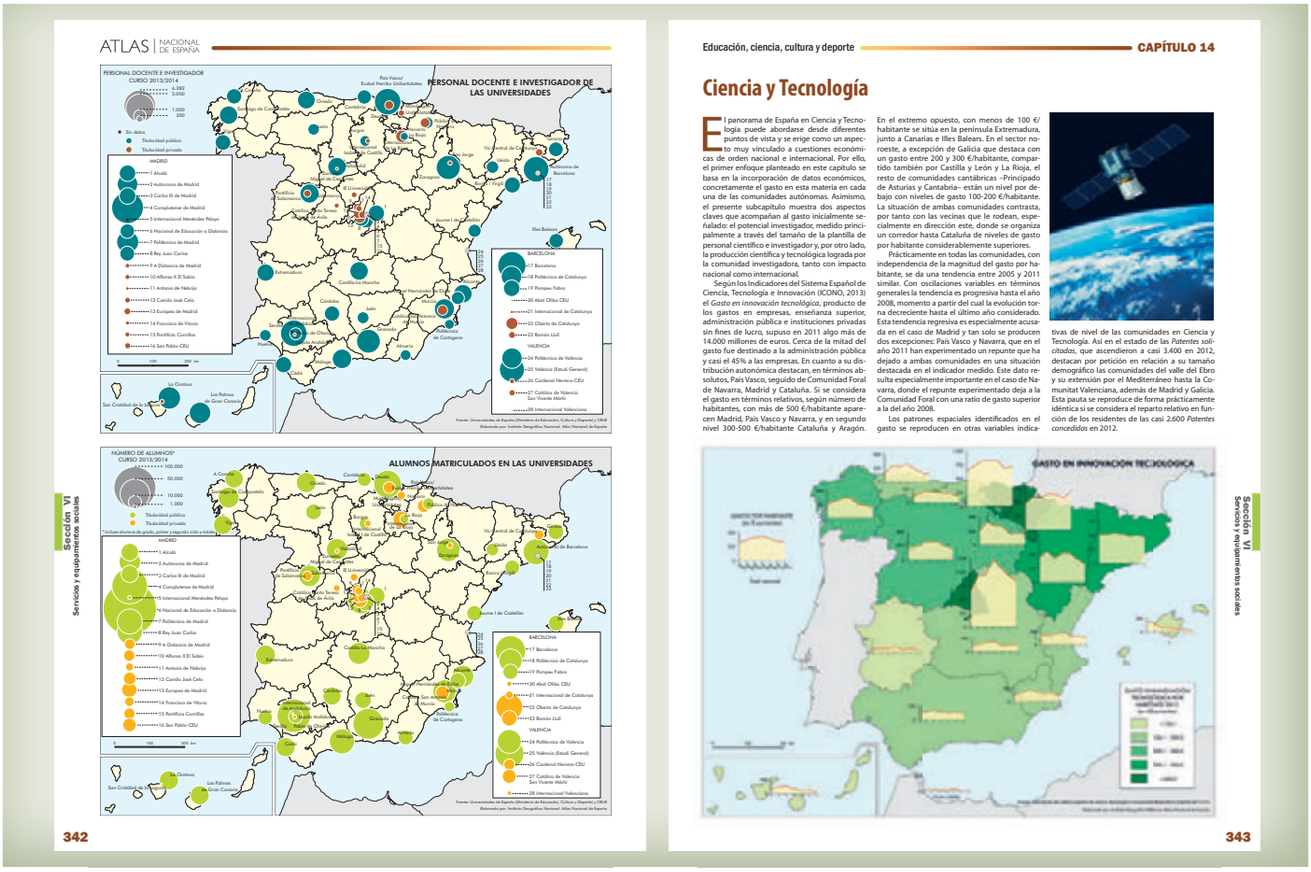


Figura 126: Ejemplo de maquetación de una doble página de la publicación *España en mapas. Una síntesis geográfica. Fuente: Elaboración propia.*

En el horizonte de medio-largo plazo, el principal objetivo es desarrollar un sistema de información del ANE completamente nuevo y migrar a él las bases de datos existentes. Este sistema se concibe básicamente desde las necesidades de cuatro tipos de usuarios y en este orden de preferencia:

- Necesidades de usuario final. En tres grupos (subcasos de uso):
  - Conocer/aprender (en terminología de difusión estadística es el turista).
  - Explorar (ídem es el granjero).
  - Analizar (ídem es el minero).
- Necesidades del redactor y editor de cartografía temática interactiva y animada (incluidas series de mapas):
  - De cartografía cualitativa.
  - De cartografía cuantitativa.
- Necesidades del administrador del sistema de información en sus tres subsistemas (entrada, proceso y publicación).
- Necesidades del suministrador de datos.

Se debe destacar el importante papel que, en el desarrollo del nuevo SIANE, debe darse a las necesidades del usuario final que emplea el ANE para conocer y aprender. En este sentido, la visión del interfaz del nuevo SIANE podría integrar textos muy breves (artículos) junto a los principales elementos (mapas y gráficos interactivos), de manera que cuenten historias y den razón de los temas representados en dichos recursos. Por ello, se han iniciado trabajos con el fin de integrar los mapas interactivos que exportaba SIANE (que se denominaba en formato FIS, formato de integración de SIANE en sistemas externos), en la aplicación MediaWiki, que es el motor de Wikipedia. Dicho formato FIS era independiente de la plataforma, permitía exportar los datos en Excel y CSV y el mapa en PDF.

En relación con el último aspecto citado, cabe destacar la importancia de que la colaboración de los suministradores de datos del ANE aporte valor a los mismos, de manera que se asegure un suministro de datos de oficio, continuo, coordinado, inmediato, homogéneo, coherente y de calidad. En este sentido resultó muy interesante la experiencia de desarrollo de la aplicación sumANE, que permitía a los suministradores actualizar los mapas del ANE cuando dispusieran de nuevos datos, exportarlos en formato FIS personalizado con su logotipo e incluso, poder representar mediante plantillas otros mapas estadísticos que les resultaran de interés.

Una vez que se disponga de ese nuevo SIANE, y a largo plazo, valdrá la pena intentar nuevamente reivindicar a nivel administrativo el papel del ANE como un puente entre el ámbito geoespacial y el ámbito estadístico. Esto significará su integración en una infraestructura conjunta de datos geoespaciales y estadísticos, que visualizará mapas y gráficos estadísticos, pero aunando el saber cartográfico y el geográfico en sus diferentes temáticas y enfoques de estudio.

6.5.4. Conclusión

Los atlas nacionales poseen valores permanentes que hacen de ellos obras en constante ejecución. Cabe destacar tres de esos valores: La imagen, y más en concreto el mapa, como recurso de comunicación fundamental; el ser obras de síntesis sobre un país, y, por último, la plurifuncionalidad de uso y el trabajo colaborativo y multidisciplinar que requiere su elaboración.

Desde los primeros momentos en que el hombre trató de reflejar en una imagen las características de un entorno, hasta las modernas técnicas de geovisualización, aquella ha sido protagonista invariable de la ciencia cartográfica. Por eso se puede decir que hoy, como ayer, la imagen cartográfica sigue siendo el recurso utilizado para transmitir información localizada. Los atlas nacionales, en segundo lugar, son obras en las que sobresale su interés por ofrecer una visión de síntesis sobre el territorio y la sociedad del país objeto de estudio. Al tener como propósito la representación de la realidad geográfica completa, bien sea mediante un itinerario analítico, bien con una argumentación más novedosa, el producto resultante permite al usuario alcanzar un conocimiento integrado, correlacionado y sintético de la nación estudiada. Por último, es incuestionable la función docente, cultural y operativa, que siempre desempeñó un atlas nacional, aparte del enriquecimiento que supone su ejecución por ese amplio abanico de científicos que congrega.

Una segunda cuestión que merece ser destacada es la decisiva influencia que están ejerciendo las nuevas tecnologías, aunque los atlas nacionales son obras que van más allá de la técnica. Es indudable que desde los primeros dibujos que representaron la posición y distribución espacial de algunos hechos, hasta los geoportales que en este momento son utilizados para transmitir información geográfica, el progreso ha sido enorme. La cartografía matemática aportó conocimientos decisivos para otorgar precisión y valor métrico a los mapas y las tecnologías de la edición, impresión y difusión cartográfica, que han hecho posible un producto con una calidad extraordinaria. Todo ello ha aportado una racionalidad explícita a una obra que habla con su usuario sin dificultad. Sin embargo, hay algo permanente que siempre desafía al cartógrafo: El ejercicio de su creatividad. Esta se precisa para hacer un argumento atractivo, que trabe con rigor y acierto, las múltiples facetas representadas en los mapas. También el ingenio del cartógrafo se manifiesta en el diseño gráfico y cartográfico, al aprovechar toda la potencialidad del lenguaje visual. En suma, un atlas nacional, y en concreto el de España, busca ser la mejor herramienta para conocer el país, a la vez que concite gran atractivo por su valor estético y se acerque lo más posible a la verdad de su territorio y sus gentes.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbas, S.; Ojo, A. "Towards a Linked Geospatial Data Infrastructure. Technology-Enabled Innovation for Democracy, Government and Governance". LNCS (8061): 196-210. 2013.

Abdullah, Q. A. "Mapping Matters". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 78(7): 664-665. 2012.

Abel, P. "Clouds as calibration targets for AVHRR reflected-solar channels: results from a two-year study at NOAA/NESDIS". Proc. SPIE 1493, Calibration of Passive Remote Observing Optical and Microwave Instrumentation, August 1; doi:10.1117/12.46697. 1991.

Abraham S.; Förstner, W. "Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59(5): 278-288. 2005.

Acker, J. G.; Leptoukh, G. "Online analysis enhances use of NASA Earth Science Data". EOS, Trans. AGU, Vol. 88, Nº. 2: 14-17. 2007.

Acosta, E. "Estudio geomorfológico y estimación de la susceptibilidad a flujos de derrubios y desprendimientos de rocas en el Valle de Benasqué (Pirineo Aragonés)". Memoria para optar al grado de doctor en Ciencias Geológicas. Instituto Geológico y Minero de España. Zaragoza. 336. 2006.

Addo, K.A.; Walkden, M.; Mills, J.P. "Detection, measurement and prediction of coastal recession in Accra, Ghana". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(5): 543-558. 2008.

Al-Ahmadi, K.; Al-Zahrani, A. "NO2 and cancer incidence in Saudi Arabia". Int. J Environ Res Public Health, 10(11): 5844-5862. 2013a.

Al-Ahmadi, K.; Al-Zahrani, A. "Spatial autocorrelation of cancer incidence in Saudi Arabia". Int. J Environ Res Public Health, 10(12): 7207-7228. 2013b.

Albergel, C.; de Rosnay, P.; Gruhier, C.; Muñoz-Sabater, J.; Hasenauer, S.; Isaksen, L.; Kerr, Y.; Wagner, W. "Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations". Remote Sensing of Environment, 118: 215-226. 2012.

Albergel, C.; Zakharova, E.; Calvet, J. C.; Zribi, M.; Pardé, M.; Wigneron, J. P.; Novello, N.; Kerr, Y.; Mialon, A.; Fritz, N. "A first assessment of the SMOS data in southwestern France using in situ and airborne soil moisture estimates: The CAROLS airborne campaign". Remote Sensing of Environment, 115(10): 2718-2728. 2011.

Albornoz, F. "Identificación de especies y tipos de vegetación quemada mediante imágenes satelitales para apoyar la elaboración de planes de reforestación y de restauración ecológica". Trabajo de titulación carrera de Ingeniería Ambiental. U. de Santiago de Chile. 2016.

Ali-Akbarpour, M.; Mohammadbeigi, A.; Tabatabaee, S. H.; Hatam, G. "Spatial analysis of eco-environmental risk factors of cutaneous leishmaniasis in Southern Iran". J Cutan Aesthet Surg, 5(1): 30-35. 2012.

Alizadeh Khameneh, M. A. "Tree detection and species identification using LiDAR data. School of Architecture and the Built Environment". Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 2013.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Howell, T. A.; Jensen, M. E. "Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy". Agricultural Water Management 98:899-920. doi: 10.1016/j.agwat.2010.12.015. 2011.

Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. "Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) model". Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133:380-394. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380). 2007.

Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. "Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements". Vol. 56. FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), Italy. 1998.

Allouis, T.; Bailly, J. S.; Pastol, Y.; Le Roux, C. "Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near infrared and green signals". Earth Surface Processes and Landforms, 35(6): 640- 650. 2010.

Altamirano, A.; Aplin, P.; Miranda, A.; Cayuela, L.; Algar, A. C.; Field, R. "High rates of forest loss and turnover obscured by classical landscape measures". Applied Geography, 40: 199-211. 2013.

Altan, O.; Backhaus, R.; Boccardo, P.; Zlatanova, S. "Best practices in disaster management". Geospatial TODAY (12): 36-40. 2012.

Al-Yaari, A.; Wigneron, J. P.; Kerr, Y.; De Jeu, R.; Rodríguez-Fernández, N.; Van Der Schalie, R.; Al Bitar, A.; Mialon, A.; Richaume, P.; Dolman, A.; Ducharne, A. "Testing regression equations to derive long-term global soil moisture datasets from passive microwave observations". Remote Sensing of Environment, 180: 453-464. 2016.

Andrienko, G.; Fabrikant, S.; Griffin, A.; Dykes, J.; Schiewe, J. "GeoViz: interactive maps that help people think". International Journal of Geographical Information Science, 28(10): 2009-2012. 2014.

Andrienko, N.; Andrienko, G. "Visual analytics of movement: An overview of methods, tools and procedures". Information Visualization, 12(1): 3-24. 2013.

Annandale, J. G.; Stockle, C. O. "Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis". Irrigation Science 15:1-7. doi: 10.1007/BF00187789. 1994.

Anselin, L. "Local Indicators of Spatial Association-LISA". Geogr. Anal. 27: 93-115. 1995.

Antoine, D.; Guevel, P.; Deste, J. F., Bécu, G.; Louis, F.; Scott, A. J.; Bardey, P. "The "BOUSSOLE" buoy-a new transparent-to-swell taut mooring dedicated to marine optics: design, tests, and performance at sea". J. Atmos. Oceanic Technol., 25: 968-989. 2008.

Araya, J. "Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho". Investigaciones geográficas. 32 31-44. 1985.

Araya, J. "Primeras experiencias con una clasificación dinámica de vertientes de montaña". En 1er Taller internacional de geoecología de montaña y desarrollo sustentable de los Andes del sur. Santiago: Universidad de Chile-Unicef-The United Nations University. 389 - 399. 1996.

Araya, J. "Toward a classification of slope systems". En 26th Congress International. Geogr. Union. Sydney. Vol.1. 1:19. 1988.

Arnold, R.; Podger, N.; Seidler, E. "GeoEye-1 Stellar Radiometric Calibration". JACIE 16 de abril, 2013.

Aschbacher, J.; Milagro-Pérez, M. "The European Earth Monitoring (GMES) programme: Status and perspectives". Remote Sensing of Environment, 120: 3-8. 2012.

Asner, G. P.; Knapp, D. E.; Kennedy-Bowdoin, T.; Jones, M. O.; Martin, R. E.; Boardman, J.; Field, C. B. "Carnegie airborne observatory: in-flight fusion of hyperspectral imaging and waveform light detection and ranging for three- dimensional studies of ecosystems". Journal of Applied Remote Sensing, 1:013536-013536-013521. 2007.

Attarchi, S.; Gloaguen, R. "Classifying complex mountainous forests with L-Band SAR and landsat data integration: A comparison among different machine learning methods in the Hyrcanian forest". Remote Sensing, 6(5): 3624-3647. 2014.

Avery, T. E.; Burkhart, H. E. "Forest measurement". 5th Edition. Waveland Press Inc., Long Grove, Il. 2002.

Ayala Carcedo, F. J.; Corominas, J. "Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG: fundamentos y aplicaciones en España". 2003.

Baddely, A.; Ruback, E.; Turner, R. "Spatial point patterns". Chapman & Hall/CRC. 810. 2016.

Balanis, C. "Antenna theory: Analysis and design", JohnWiley & Sons, Inc., 2005.

Bálsamo, G.; Albergel, C.; Beljaars, A.; Boussetta, S.; Brun, E.; Cloke, H.; Dee, D.; Dutra, E.; Muñoz-Sabater, J.; Pappenberger, F.; De Rosnay, P.; Stockdale, T.; Vitart, F. "ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set". Hydrol. Earth Syst. Sci., 19: 389-407. 2015.

Ban, Y. F.; Gong, P.; Giri C. "Global land cover mapping using Earth observation satellite data: recent progresses and challenges". Editorial, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 103: 1-6. 2015.

Barker, J. L. "Relative radiometric calibration of Landsat TM reflective bands". Landsat-4 Science Characterization Early Results, Part 2. NASA Conf. Pub. 2355(3): 1-219. 1985.

Barnes, R.A.; Eplee, R.E.; Schmidt, G.M.; Patt, F.S.; Mc Clain, C.R. "Calibration of SeaWiFS: Direct techniques". Appl. Opt. 40: 6682–6700. 2001.

Barredo, J.; Benavides, A.; Hervás, J.; Van Westen, C. J. "Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin". Gran Canaria Island. Spain. JAG, 2(1): 9-23. 2000.

Barrientos, C.; Mattar, C.; Nakos, T.; Perez, W. "Radiometric cross-calibration of the chilean satellite fasat-c using Rapideye and EO-1 Hyperion data and a simultaneous nadir overpass approach". Remote Sens., 8, 612. doi: 10.3390/rs8070612. 2016a.

Barrientos, C.; Mattar, C.; Nakos, T.; Perez, W. 2016. "Update of the absolute calibration parameters of FASat-Charlie using RapidEye". GSICS Quarterly: Fall Issue, Vol. 10, Nº 3. doi: 10.7289/V5PC30DM. 2016b.

Basso, B.; Cammarano, D.; De Vita, P. "Remotely sensed vegetation indices: theory and applications for crop management". Rivista Italiana di Agrometeolologia 1:36-53. 2004.

Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. "A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation". Journal of Hydrology 212-213:198-212. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00253-4. 1998.

Bay, H.; Ess, A.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. "SURF: Speeded Up Robust Features". Computer Vision and Image Understanding, 110(3): 346-359. 2008.

BCAL. "LiDAR BCAL Tools". Ver 1.5.2. Idaho State University, Department of Geosciences, Boise Center Aerospace Laboratory (BCAL), Boise, Idaho. 2013. http://bcal.boisestate.edu/tools/lidar/

Belgiu, M.; Dragut, L.; Strobl, J. "Quantitative evaluation of variations in rule-based classifications of land cover in urban neighbourhoods using WorldView-2 imagery". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87: 205-215. 2014.

Benedek, C.; Shadaydeh, M.; Kato, Z.; Szirányi, T.; Zerubia, J. "Multilayer Markov Random Field models for change detection in optical remote sensing images". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 107(9): 22-37. 2015.

Benz, S.; Weibel, R. "Road network selection for medium scales using an extended stroke-mesh combination algorithm". Cartography and Geographic Information Science, 41(4): 323-339. 2014.

Bereuter, P.; Weibel, R. "Real-time generalization of point data in mobile and web mapping using quadtrees". Cartography and Geographic Information Science, 40(4): 271-281. 2013.

Berg, A. A.; Famiglietti, J. S.; Rodell, M.; Reichle, R. H.; Jambor, U.; Holl, S. L.; Houser, P. R. "Development of a hydrometeorological forcing data set for global soil moisture estimation". International Journal of Climatology, 25(13): 1697-1714. 2005.

Berk, A.; Anderson, G. P.; Acharya, P. K.; Bernstein, L. S.; Muratov, L.; Lee, J.; Fox, M.; Adler-Golden, S. M.; Chetwynd, J. H.; Hoke, M. L.; Lockwood, R. B.; Gardner, J. A.; Cooley, T. W.; Borel, C.C.; Lewis, P. E.; Shettle, E. P. "MODTRAN5: 2006 Update". Proc. SPIE 2006, 6233. 2006.

Berkes, F.; Folke, C. "In linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience (eds Berkes, F. & Folke, C.)". Cambridge Univ. Press, 13-20. 1998.

Bernard, M. "Hacia un sistema mundial de producción automática de ortoimágenes". Spot Image-Dirección de Desarrollo. Toulouse, Francia. 2001.

Berni, J. A. J.; Zarco-Tejada, P. J.; Suárez, L.; González-Dugo, V.; Fereres, E. "Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors". Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2014, 38, 6. 2014.

Besl, P.; McKay, N. "A method for registration of 3-D shapes". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14 (2): 239-256. 1992.

Bey, A.; Sánchez-Paus Díaz, A.; Maniatis, D.; Marchi, G.; Mollicone, D.; Ricci, S.; Miceli, G. "Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation". Remote Sensing, 8(10): 807. 2016.

Bhatt, R.; Doelling, D.; Scarino, B.; Gopalan, A.; Haney, C.O.; Minnis, P.; Bedka, K. M. "A consistent AVHRR visible calibration record based on multiple methods applicable for the NOAA degrading orbits. Part I: Methodology". J. Atmos. Oceanic Technol. 33:2499-2515. doi: 10.1175/JTECH- D-16-0044.1. 2016.

Biggar, S. F.; Santer, R.; Slater, P. "Irradiance-based calibration of imaging sensors". Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1990". IGARSS '90. Remote Sensing Science for the Nineties. 10th Annual International. 1990.

Birky, A. K. "NDVI and a simple model of deciduous forest seasonal dynamics". Ecological Modelling, 143: 43-58. 2001.

Bizer, C.; Heath, T.; Berners-Lee, T. "Linked data - the story so far". International Journal on Semantic Web and Information Systems, 5(3): 1-22. 2009.

Bjørke, J. "Exploration of information theoretic arguments for the limited amount of information in a map, theories of map design in the digital era". Cartography and Geographic Information Science, 39(2): 88-97. 2012.

Blatt, A. J. "Data privacy and ethical uses of volunteered geographic information". Geotechnologies and the Environment, (12): 49-59. 2014.

Bleisch, S.; Duckham, M.; Galton, A.; Laube, P.; Lyon, J. "Mining candidate causal relationships in movement patterns". International Journal of Geographical Information Science, 28(2): 363-382. 2014.

Blondel, M.; Fernández, I. C. "Efectos de la fragmentación del paisaje en el tamaño y frecuencia de incendios forestales en la zona central de Chile". Revista Conservación Ambiental 2: 7-16. 2012.

Bo, Z.; Wei, G.; Shuo, S.; Shalei, S. "A multi-wavelength canopy LiDAR for vegetation monitoring: system implementation and laboratory-based tests". Procedia Environmental Sciences, (10): 2775-2782. 2011.

Bogodorosky, V.V.; Bentley CH. R; Gudmandsen P. E. "Radioglaciology". Dordrecht, Reidel Publishing Co. 1985.

Bonachea, J. "Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos". (Doctorado archivo digital). Universidad de Cantabria. Santander, España. 2002.

Börgel, R. "La estructura del relieve como patrón principal de los estudios de impacto ambiental". Revista de geografía Norte Grande. N° 31: 115-122. 2004.

Boudet, L.; Paparoditis, N.; Jung, F., Martinoty, G.; Pierrot-Deseilligny, M. "A supervised classification approach towards quality self-diagnosis of 3D building models using digital aerial imagery". The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-3: 136-141. 2006.

Boulos, M. N. "Descriptive review of geographic mapping of Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) on the Internet". Int. J Health Geogr, 3(1): 2. 2004.

Bowen, H. S. "Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radiometrically characterized stellar sources". Pecora 15, Land Satellite Information IV, ISPRS Commission I, FIEOS Conference Proceedings. 2002.

Bowen, H. S.; Cunningham, D. M. "Correction to method of establishing the absolute radiometric accuracy of remote sensing systems while on-orbit using characterized stellar sources". JACIE Proceedings. 2006.

Boyd, S. P.; Vandenberghe, L. "Convex optimization". Cambridge University Press. 2004.

Brédif, M. "Modélisation 3D de bâtiments: Reconstruction automatique de superstructures de toits et recalage cinétique de toits polyédriques prenant en compte la topologie". Thèse de doctorat de Télécom ParisTech. 2010.

Brédif, M.; Tournaire, O.; Vallet, B.; Champion, N. "Extracting polygonal building footprints from digital surface models: A fully-automatic global optimization framework". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 77: 57-65. 2013.

Breitenstein, M. D.; Reichlin, F.; Leibe, B.; Koller-Meier, E.; Van Gool, L. "Online multiperson tracking-by-detection from a single, uncalibrated camera". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 33(9): 1820-1833. 2011.

Bremer, J.; Baucom, J.; Vu, H.; Weinreb, M.; Pinkine, N. "Estimation of long-term throughput degradation of GOES 8 & 9 visible channels by statistical analysis of star measurements". Proc. SPIE, Earth Observing Systems III, 3439: 145-154. 1998.

Brenner, C.; Dold C.; Ripperda, N. "Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(1): 4-18. 2008.

Brenning, A. "Improved spatial analysis and prediction of landslide susceptibility: Practical recommendations". En: Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding. Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engineered Slopes, Banff, Canada, 3-8 June 2012, Eds. Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A. K., Leroueil, S., 1, 789-794. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema. 2012.

Brenning, A. "Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models, SAGA". Seconds Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie, 19: 23-32. 2008.

Brenning, A.; Schwinn, M.; Ruiz-Páez, A. P.; Muenchow, J. "Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja Province". Natural Hazards and Earth System Sciences, 15; 45-57. 2015.

Brewer, C. K.; Winne C. J, Redmond R. L., Opitz D. W., Mangrich M. V. "Classifying and mapping wildfire severity". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 71:1311-1320. 2005.

Brown, S. W.; Flora, S., Feinholz, M.; Yarbrough, M.; Houlihan, T.; Peters, D.; Kim, Y.; Mueller, J.; Johnson, C.; Clark, D. "The marine optical buoy (MOBY) radiometric calibration and uncertainty budget for ocean color satellite sensor vicarious calibration". Eds. Meynart, R., Neeck, S., Shimoda, H., Habib, S. Proc. SPIE 6744, Sensors, Systems and Next-Generation Satellites XI, 67441M. doi:10.1117/12.737400. 2007.

Brunsden, D.; Prior, D. B. "Slope instability". Chichester. John Willey and Sons. 1984.

Bryan, B. "High-performance computing tools for the integrated assessment and modelling of social ecological systems". Environmental Modeling & Software, 39: 295-303. 2013.

Buchin, K.; Van Goethem, A.; Hoffmann, M.; Van Kreveld, M.; Speckmann, B. "Travel-time maps: linear cartograms with fixed vertex locations". In: Duckham M., Pebesma E., Stewart K., Frank A. (eds.), GI Science (LNCS 8728), Springer, Berlin, 18-33. 2014.

Budimir, M. E. A.; Atkinson, P. M.; Lewis, H. G. "A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression". Landslides, 12(3): 419-436. 2015.

Bulatov, D.; Wernerus, P.; Heipke, C. "Multi view dense matching supported by triangular meses". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(6): 907-918. 2011.

Burgan, R.E.; Klaver, R. W.; Klaver, J. M. "Fuel models and fire potential from satellite and surface observations". International Journal of Wildland Fire, 8, 159-170. 1998.

Burges, C. J. C. "A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition". Data Mining and Knowledge Discovery, 2(2): 121-167. 1998.

Burschel, P.; Edens, J.; Morello, J. "Política de explotación del bosque nativo". Programa de Cooperación Técnica. FAO, Santiago. 115. 1991.

Buzai, G. D. "Evaluación multicriterio con sistemas de información geográfica. Síntesis teórica-metodológica". En Moreno, J. A., Buzai, G. D., Fuenzalida, D. M., (Coord.). Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales. España: Ra-Ma. 323-331. 2012.

Byron E. "Radar: Principles. Technology, applications". PTR Prentice Hall, Inc., 1995.

Caccamo, G.; Chisholm, L. A.; Bradstock, R. A.; Puotinen, M.L.; Pippen, B.G. "Monitoring live fuel moisture content of heathland, shrubland and sclerophyll forest in south-eastern Australia using MODIS data". International Journal of Wildland Fire 21: 257-269. 2012.

Calderón, R.; Montes-Borrego, M.; Landa, B. B.; Navas-Cortés, J. A.; Zarco- Tejada, P. J. "Detection of downy mildew of opium poppy using high-resolution multi-spectral and thermal imagery acquired with an unmanned aerial vehicle". Precision Agric. 15:639-661 DOI 10.1007/s11119-014-9360-y. 2014.

Camacho de Coca, F.; Gilabert, M. A.; Meliá, J. "Utilidad del PTFE como panel de referencia en medidas de radiometría". VIII Congreso Nacional de Teledetección.355-358. 1999.

Campbell, G.; Norman, J. "The description and measurement of plant canopy structure". Pages 1-19 in Russell G, M. B, and J. PG, editors. Plant Canopies: Their Growth, Form and Function. Cambridge University Press, Cambridge. 1989.

Campbell, M. "GloVis as a Resource for Teaching Geographic Content and Concepts". Journal of Geography 106: 239-251. 2008.

Campos, D. "Geomorfología de la cuenca. Procesos del Ciclo Hidrológico". Capítulo 2: Editado por D. Campos,. 29. Editorial Universitaria Potosina, Potosí. Campos, I.; Neale, C. M. U.; Calera, A.; Balbontin, C.; González-Piqueras, J. "Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitisvinifera L.)". Agricultural Water Management 98:45-54. doi: 10.1016/j.agwat.2010.07.011. 2010.

Cao, C.; Ciren, P.; Goldberg, M.; Weng, F.; Zou, C. "Simultaneous nadir overpasses for NOAA-6 691 to NOAA-17 satellites from 1980 to 2003 for the inter-satellite calibration of radiometers". NOAA 692 technical report NESDIS 118, 2005, 74 p. 2005.

Cao, C.; Sun, Y. "Automatic road centerline extraction from imagery using road GPS data". Remote Sensing, (6): 9014-9033. 2014.

Carmona-Moreno, C.; Belward, A.; Malingreau, J.-P.; Hartley, A.; Garcia-Alegre, M.; Antonovskiy, M.; Buchshtaber, V.; Pivovarov, V. "Characterizing interannual variations in global fire calendar using data from Earth observing satellites". Global Change Biology 11, 1537-1555. 2005.

Carpenter, S. B.; Rumsey, R. L. "Trees and shrubs of Robinson Forest Breathitt County, Kentucky". Castanea, 277-282. 1976.

Carrasco-Benavides, M.; Ortega-Farías, S.; Lagos, L. O.; Kleissl, J.; Morales, l.; Poblete-Echeverría, C.; Allen, R. G. "Crop coefficients and actual evapotranspiration of a drip-irrigated Merlot vineyard using multispectral satellite images". Irrigation Science 30:485-497. doi: 10.1007/s00271-012-0379-4. 2012.

Carrasco-Benavides, M.; Ortega-Farías, S.; Lagos, L.O.; Kleissl, J.; Morales-Salinas, L.; Kilic, A. "Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard". Remote Sensing 6:11342-11371. doi: 10.3390/rs61111342. 2014.

Carreno, E.; Capote, R.; Yague, A.; Tordesillas, J. M.; López, M. M.; Ardizone, J.; Suárez, A.; Izquierdo, A.; Tsige, M.; Martínez, J.; Insua, J. M. "Observations of thermal anomalies associated to seismic activity from remote sensing", General Assembly of European Seismology Commission. 265-269, Portugal, 2001.

Casas, A.; Riaño, D.; Ustin, S.; Dennison, P.; Salas, J. "Estimation of water- related biochemical and biophysical vegetation properties using multitemporal airborne hyperspectral data and its comparison to MODIS spectral response". Remote Sensing of Environment, 148:28-41. 2014.

Castellanos, G.; Moreno, M.; Maldonado, F. D. "Obtención de imágenes índice de vegetación SAVI a partir de imágenes milirreflectancia TOA". XVII Simposio Internacional SELPER. Actas. Puerto Iguazú, 3281-3288. 2016.

Cavieres, A. "Informe tras incendios forestales". En: http://www.senado.cl/que- produjo-los-incendios-el-centro-sur-del-pais-alcaldes-apuntan-a-cercania-de-bosques-a-casas-y-tendidos-electricos-de-alta-tension-en-zonas- forestales/prontus_senado/2017-03-13/163125.html. Visitado el 27/07/2017.

CCRS. "Fundamentals of Remote Sensing", Disponible en URL (http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air- photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9363). 2017.

Cerda, I.; Olavarria, J.; Ávalos, M. I. "El sector forestal en Chile: Logros y desafíos". Instituto Forestal, Santiago, Chile. 1993.

Chafer, C. J.; Noonan, M.; Macnaught, E. "The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney wildfires". International Journal of Wildland Fire. Vol.13: 227-240. 2004.

Chan, J.; Paelinckx, D. "Evaluation of random forest and adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery". Remote Sensing of Environment 112(6): 2999-3011. 2008.

Chan, S. K.; Bindlish, R.; O'Neill; P. E., Njoku, E.; Jackson, T.; Colliander, A. "Assessment of the SMAP passive soil moisture product". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(8): 4994-5007. 2016.

Chander, G.; Hewison, T. J.; Fox, N. P.; Wu, X. Q.; Xiong, X. X.; Blackwell, W. J. "Overview of intercalibration of satellite instruments". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 51: 1056-1080. 2013.

Chander, G.; Markham, B. "Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41(11): 2674-2677. 2003.

Chander, G.; Markham, B. L.; Helder, D. "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors". Remote Sens. Environ., Vol. 113, Nº 5: 893-903. 2009.

Chander, G.; Mishra, N.; Helder, D.; Aaron, D.; Angal, A.; Choi, T.; Xiong, X.; Doelling, D. "Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for cross- calibration". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 51, Issue 3: 1267-1281. 2013.

Chang I.; Dean, C.; Weinreb, M.; Wu, X.; Han, D.; Mitchell, K.; Li, Z.; Yu, F.; Sindic-Rancic, G. "Using raw star signals in the monitoring of GOES imager visible-channel responsivities". Proc. SPIE 7081, Earth Observing Systems XIII, 70810G, August 28, 2008. doi:10.1117/12.795751. 2008.

Chang, I.; Dean, C.; Li, Z.; Weinreb, M.; Wu, X.; Swamy, P. "Refined algorithms for star-based monitoring of GOES imager visible channel responsivities". SPIE, 8510, 85100R-85101R. http://dx.doi.org/10.1117/12. 2012.

Chaparro, D.; Piles, M.; Vall-llossera, M.; Camps, A. "Surface moisture and temperature trends anticipate drought conditions linked to wildfire activity in the Iberian Peninsula". European Journal of Remote Sensing, 49: 955-971. 2016.

Chaparro, D.; Vayreda, J.; Martínez-Vilalta, J.; Vall-llossera, M.; Banqué, M.; Camps, A.; Piles, M. "SMOS and climate data applicability for analyzing forest decline and forest fires". In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. 1069-1072). IEEE. 2014.

Chávez, P. S. J. "Image-based atmospheric corrections - revisited and improved". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62(9): 1025-1036. 1996.

Chen, J. M. "Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifer forests". Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 34:1353-1368. 1996.

Chen, J. M.; Black, T. A. "Defining leaf area index for non-flat leaves". Plant, Cell & Environment 15:421-429. 1992.

Chen, J. M.; Cihlar, J. "Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images". Remote Sensing of Environment, 55: 153-162. 1996.

Chen, J.; Ban, Y.; Li, S. "China: Open access to Earth land-cover map". Nature, 514(434): 23. 2014a.

Chen, J.; Cao, X.; Liao, A; Chen, L.; Chen, X.; He, C.; Han, G.; Peng, S.; Lu, M.; Zhang, W.; Tong, X.; Mills, J. "Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 103: 7-27. 2015.

Chen, J.; Lu, M.; Chen, X; Chen, L. "A spectral gradient difference based approach for land cover change detection". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 85: 1-12. 2013a.

Chen, J.; Wang, D.; Zhao, R.; Zhang, H.; Liao, A.; Liu, J. "Fast updating of national geo-spatial databases with high resolution imagery: China's methodology and experiences". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-4: 41- 50. 2014b.

Chen, J.; Wu, H.; Li, S.; Liao, A.; He, C.; Cheng, D. "Temporal logic and operation relations based knowledge representation for land cover change web service". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 83: 140-150. 2013b.

Chen, K.; Huang, L.; Zhou, L.; Ma, Z.; Bi, J.; Li, T. "Spatial analysis of the effect of the 2010 heat wave on stroke mortality in Nanjing, China". Research Support, Non-U S Gov't. Sci Rep, 5(10816). 2015.

Chen, Q.; Baldocchi, D.; Gong, P.; Kelly, M. "Isolating individual trees in a savanna woodland using small-footprint LiDAR data". Photogramm. Eng. Remote Sens. 72: 923-932. 2006.

Chen, X.; Chen, J.; Shi, Y.; Yamaguchi, Y. "An automated approach for updating land cover maps based on integrated change detection and classification methods". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 71: 86-95. 2012.

Chen, X.; Li, Y.; Su, Y.; Han, L.; Liao, J.; Yang, S. "Mapping global surface roughness using AMSR-E passive microwave remote sensing". Geoderma 235-236: 308-315. 2014c.

Chen, Z.; Zhang, B.; Zhang, H.; Zhang, W. "Vicarious calibration of Beijing-1 multispectral imagers". Remote Sens. 6: 1432-1450. 2014.

Cheng, C. L.; Chen, Y. C.; Liu, T. M.; Yang, Y. H. "Using spatial analysis to demonstrate the heterogeneity of the cardiovascular drug-prescribing pattern in Taiwan". BMC Public Health, 11:1471-2458. 2011.

Choi, T. J.; Xiong, X.; Angal, A.; Chander, G.; Qu, J. J. "Assessment of the spectral stability of Libya 4, Libya 1, and Mauritania 2 sites using Earth observing one Hyperion". J. Appl. Remote Sens., Vol. 8, Nº 1: 1-14. 2014.

Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. "Hidrología aplicada". McGraw-Hill. Santa Fe de Bogotá, Colombia. 598. 1994.

Christine, P. J.; Auchincloss, A. H.; Bertoni, A.G.; Carnethon, M.R.; Sánchez, B. N.; Moore, K.; Adar, S. D.; Horwich, T. B.; Watson, K. E.; Diez Roux, A. V. "Longitudinal Associations Between Neighborhood Physical and Social Environments and Incident Type 2 Diabetes Mellitus: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA)". JAMA Intern Med, 175:1311-20. 2015.

Chuvieco, E. "Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio". Editorial Ariel Ciencia. 3ª edición actualizada. Barcelona, España. 301-321. 2008.

Chuvieco, E. "Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio". Editorial Ariel (Planeta S.A.), España. 2010.

Chuvieco, E.; Cocero, D.; Riano, D.; Martin, P.; Martínez-Vega, J.; De la Riva, J.; Pérez, F. "Combining NDVI and surface temperature for the estimation of livefuel moisture content in forest fire danger rating". Remote Sensing of Environment 92:322-331. doi: 10.1016/j.rse.2004.01.019. 2004.

Chuvieco, E.; D. Riaño, D.; Danson, F. M.; Martín, P. "Use of a radiative transfer model to simulate the post-fire spectral response to burn severity". Journal of Geophysical Research - Biosciences, Vol. 111(G04S09): doi: 10.1029/2005JG000143. 2006.

Chuvieco, E.; De Santis, A.; Riaño, D.; Halligan, K. "Simulation approaches for burn severity estimation using remotely sensed images". Fire Ecology, Vol. 3(1): 129- 150. 2007.

Chuvieco, E.; Martin, M. P.; Palacios, A. "Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination". Remote Sensing of Environment 112: 2381-2396. 2002.

Chuvieco, E.; Riaño, D.; Danson, F.; Martín P. "Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity". Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 111. 2006.

Civco, D. L. "Topographic normalization of landsat thematic mapper digital imagery". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55(9): 1303- 1309. 1989.

Clark, R. A.; Coffee, N.; Turner, D.; Eckert, K. A.; Van Gaans, D.; Wilkinson, D.; Tonkin, A. M. "Application of geographic modeling techniques to quantify spatial access to health services before and after an acute cardiac event: The Cardiac Accessibility and Remoteness Index for Australia (ARIA) Project". [Research Support, Non-U S Gov't]. Circulation, 125(16): 2006-2014. 2012.

Clementini, E. "Directional relations and frames of reference". GeoInformatica, 17(2): 235-255. 2013.

Cohen, W. B.; Maiersperger, T. K.; Gower, S. T.; Turner, D. P. "An improved strategy for regression of biophysical variables and Landsat ETM+data". Remote Sensing of Environment, 84: 561-571. 2003.

Colaizzi, P. D.; Evett, S. R.; Howell, T. A.; Tolk, J. A. "Comparison of five models to scale daily evapotranspiration from one-time-of-day measurements". Transactions of the ASABE 49:1409-1417. doi: 10.13031/2013.22056. 2006.

Colombo, R.; Meroni, M.; Marchesi, A.; Busetto, L.; Rossini, M.; Giardino, C.; Panigada, C. "Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling". Remote Sensing of Environment 112: 1820-1834. 2008.

Colomina, I.; Molina, P. "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92: 79-97. 2014.

Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Cal/Val Portal. Disponible online: http://calvalportal.ceos.org/

CONAF. "Estadísticas de incendios forestales temporada 2013-2016". http://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en- chile/estadisticas-historicas/. Visitado el 26/07/2017.

CONAF. "Informe: Análisis de severidad de los incendios forestales desde el 01 enero al 10 febrero 2017". Departamento Monitoreo de Ecosistemas Forestales Gerencia Fiscalización y Evaluación Ambiental, CONAF.

CONAF. "Plan estratégico para la restauración ecológica post incendios de la Reserva Nacional Los Ruiles y su zona aledaña". 2017.

CONAF; UACh. "Informe final: Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualizacióndel catastro de los recursos vegetacionales nativos de la región de Los Ríos. Valdivia". 2014.

CONAF; UACh; UFRO. "Informe final: Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales nativos de la región de La Araucanía. Valdivia". 2013.

Congalton, R. G. "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data". Remote Sensing of Environment 37:35-46. 1991.

Conrad, O.; Bechtel, B.; Bock, M.; Dietrich, H.; Fischer, E.; Gerlitz, L.; Wehberg, J.; Wichmann, V.; Böhner, J. "System for Automated Geoscientific Analysis (SAGA) v. 1.2.4". Geoscientific Model Development. 8. 1991-2007. 2015.

Conti, M.; Das, S.; Bisdikian, C.; Kumar, M.; Ni, L.; Passarella, A.; Roussos, G.; Troster, G.; Tsudik, G.; Zambonelli, F. "Looking ahead in pervasive computing: Challenges and opportunities in the era of cyber-physical convergence". Pervasive and Mobile Computing 8: 2-21. 2012.

Coren, F.; Sterzai, P. "Radiometric correction in laser scanning". International Journal of Remote Sensing 27:3097-3104. 2006.

CORINE Land Cover (2000). https://www.eea.europa.eu/data-and- maps/data/clc-2000-raster-4 (último acceso el 06/06/2017).

Cosnefroy, H.; Briottet, X.; Leroy, M. "Characterization of desert areas with Meteosat 4 data for the calibration of optical satellite sensors". Proc. of International Symposium on Optical Engineering and Photonics (SPIE), Orlando. 1993.

Cosnefroy, H.; Briottet, X.; Leroy, M. "Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors". Remote Sens. Environ., Vol. 58, Nº 1: 101-114. 1996.

Cosnefroy, H.; Briottet, X.; Leroy, M.; Lecomte, P.; Santer, R. "A field experiment in Saharian Algeria for the calibration of optical satellite sensors". Int J Remote Sens., 18 (16): 3337-3359. 1997.

Courault, D.; Seguin, B.; Olioso, A. "Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches". Irrigation and Drainage Systems 19: 223-249. doi: 10.1007/s10795-005-5186-0. 2005.

Crabtree, R.; Halligan, K.; Saatchi, S.; Aspinall, R.; Despain, D. "Mapping horizontal and vertical distribution of fuel by fusing high-resolution hyperspectral and polarimetric data". JFSP Project Nº 01-1-4-15. 2006.

Craglia, M.; De Bie, K.; Jackson, D.; Pesaresi, M.; Remetey-Fülöpp, G.; Wang, C.; Annoni, A.; Bian, L.; Campbell, F.; Ehlers, M.; Van Genderen, J.; Goodchild, M.; Guo, H.; Lewis, A.; Simpson, R.; Skidmore, A.; Woodgate, P. "Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade". International Journal of Digital Earth, 5(1): 4-21. 2012.

Cramer, M. "Digital camera calibration". EuroSDR, Publication Nº 55, 262 pages. 2011.

Cramer, M. "The UAV@LGL BW Project-A NMCA case study". In: Fritsch D. (ed.), Photogrammetric Week. Wichmann, Heidelberg: 151-163. 2013.

Cura, R.; Perret, J.; Paparoditis, N. "Streetgen: in-base procedural-based street generation". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5: 409-416. 2015.

Curtis, A. B.; Kothari, C.; Paul, R.; Connors, E. "Using GIS and secondary data to target diabetes-related public health efforts". Public Health Rep, 128 (3): 212- 220. 2013.

Cusimano, M.; Marshall, S.; Rinner, C.; Jiang, D.; Chipman, M. "Patterns of urban violent injury: a spatio-temporal analysis". PLoS ONE, 5 (1): e8669. 2010.

Czapla-Myers, J.; McCorkel, J.; Anderson, N.; Thome, K.; Biggar, S.; Helder, D.; Aaron, D.; Leigh, L.; Mishra, N. "The ground-based absolute radiometric calibration of Landsat 8 OLI". Remote Sens. 7: 600-626. 2015.

Dahlin, K. M.; Asner, G. P.; C. B. Field. "Environmental filtering and land-use history drive patterns in biomass accumulation in a mediterranean-type landscape". Ecological Applications 22:104-118. 2011.

Danahy, J.; Mitchell, J.; Feick, R.; Wrigh, R. "Multi-Scale 3D geovisualization of urban heat island data for planning dialogue in Toronto". In: Nunes Silva C. (ed.), Emerging Issues, Challenges and Opportunities in Urban E-Planning, University of Lisbon, Portugal: 166-187. 2015.

Danson, F. M.; Hetherington, D.; Morsdorf, F.; Koetz, B.; Allgower, B. "Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning". IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 4:157-160. 2007.

Dash, P.; Gottsche, F.; Olesen, F.; Fischer, H. "Retrieval of land surface temperature and emissivity from satellite data: physics, theoretical limitations and current methods". Journal of the Indian Society of Remote Sensing 29: 23-30. 2001.

Datla, R. U.; Rice, J. P.; Lykke, K. R.; Johnson, B. C.; Butler, J. J.; Xiong, X. "Best practice guidelines for pre-launch characterization and calibration of instruments for passive optical remote sensing". Journal of Research of NIST. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 2011 Apr; 116(2): 621-646. doi: 10.6028/jres.116.009. 2011.

Davis, L. S.; Johnson, K. N.; Bettinger, P.; Howard, T. E. "Forest management: To sustain ecological, economic, and social values". 4th Edition. Waveland Press Inc., Long Grove, Il. 2005.

De Andrade, L.; Zanini, V.; Batilana, A.; de Carvalho, E.; Pietrobon, R.; Nihei, O.; de Barros Carvalho, M. D. "Regional disparities in mortality after ischemic heart disease in a Brazilian state from 2006 to 2010". PLoS One, 8(3):e59363. 2013.

De Greef, K.; Van Dyck, D.; Deforche, B.; De Bourdeaudhuij, I. "Physical environmental correlates of self-reported and objectively assessed physical activity in Belgian type 2 diabetes patients". Health Soc Care Community, 19:178-88. 2011.

De Santis, A.; Chuvieco, E. "Análisis comparativo de sensores espaciales para la cartografía de la severidad en el incendio de Riba de Saelices (Guadalajara)". Revista de Teledetección. ISSN: 1988-8740. Vol. 29, 25-37. 2008.

De Santis, A.; Chuvieco, E. "Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models". Remote Sensing of Environment 108:422-435. 2007.

De Santis, A.; Chuvieco, E. "GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data". Remote Sensing of Environment 113:554-562. 2009.

De Santis, A.; Chuvieco, E.; Vaughan, P. J. "Short-term assessment of burn severity using the inversion of the GeoSail model". Remote Sensing of Environment, Vol.113, 126-136. 2009.

De Wit, A. J.; Van Diepen, A. J. "Crop model data assimilation with the ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts". Agr. Forest Meteorol, 146: 38-56. 2007.

Dean, T. J.; Cao, Q. V.; Roberts, S. D.; Evans D. L. "Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand". Forest Ecology and Management, 257:126-133. 2009.

Defourny, P.; Kirches, G.; Brockmann, C.; Boettcher, M.; Peters, M.; Bontemps, S.; Lamarche, C.; Schlerf, M.; Santoro, M. "Land Cover CCI: Product user guide version 2". Université Catholique de Louvain: Louvain-la-Neuve, Belgium. 91 p. 2014.

Del Pozo, S.; Rodríguez-Gonzálvez, P.; Hernández-López, D.; Felipe-García, B. "Vicarious radiometric calibration of a multispectral camera on board an unmanned aerial system". Remote Sens. 6: 1918-1937. 2014.

DESE. "Actualización estudio de riesgos bahía de Coquimbo. Etapa 3: Modelación" (PUC Ed.). Dirección de Extensión y Servicios Externos - DESE de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos, Pontificia Universidad Católica de Chile. 2017.

Deng, X.; Zhao, C.; Yan, H. "Systematic Modeling of Impacts of Land Use and Land Cover Changes on Regional Climate: A Review". Advances in Meteorology. 2013.

Devaraju, A.; Kuhn, W.; Renschler, C. "A formal model to infer geographic events from sensor observations". International Journal of Geographical Information Science, 29(1): 1-27. 2015.

DGA. "Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Maipo". 201 p. Noviembre 2016. Disponible en URL (http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Maipo.pdf). 2016.

DGA. "Glaciares de Chile". 110 p. Ministerio de Obras Públicas. Marzo 2017. Disponible en URL (http://documentos.dga.cl/GLA5483.pdf). 2017.

Di Castri, F.; Hajek, E. "Bioclimatología de Chile". Editorial de la Universidad Católica de Chile, Santiago. 163 p. 1976.

Diario Oficial de la Federación. "Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)". Recuperado de http:/www.diputados.gob.mx/LEYESBiblio/pdf/148_240117.pdf. 2017.

Díaz-Delgado, R.; Lloret, F.; Pons, X. "Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery". International Journal of Remote Sensing, Vol. 24(8): 1751-1763. 2003.

Díaz-Varela, E.; Álvarez-López, C. J.; Marey-Pérez, M. F. "Multiscale delineation of landscape planning units based on spatial variation of land-use patterns in Galicia, NW Spain". Landscape and Ecological Engineering, 5(1): 1-10. 2009.

Dinguirard, M.; Slater, P. "Calibration of space-multispectral imaging". Remote Sens. Environ., Vol. 68: 194-205. 1999.

Dirmeyer, P. A.; Dolman, A. J.; Sato, N. "The pilot phase of the global soil wetness project". Bulletin of the American Meteorological Society, 80(5): 851. 1999.

Disney, M. I.; Kalogirou, V.; Lewis, P.; Prieto-Blanco, A.; Hancock, S.; Pfeifer, M. "Simulating the impact of discrete-return LiDAR system and survey characteristics over young conifer and broadleaf forests". Remote Sensing of Environment 114: 1546-1560. 2010.

Doelling, D. R.; Morstad, D.; Scarino, B. R.; Bhatt, R.; Gopalan, A. "The characterization of deep convective clouds as an invariant calibration target and as a visible calibration technique". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol. 51, Issue 3: 1147-1159. 2013.

Doelling, D. R.; Nguyen, L.; Minnis, P. "On the use of deep convective clouds to calibrate AVHRR data". Proc. SPIE 49th Ann. Mtg., Earth Observing Systems IX Conf., Denver, CO, August 2-6, 5542: 281-289. 2004.

Doelling, D.; Bhatt, R.; Scarino, B.; Gopalan, A.; Haney, C. O.; Minnis, P.; Bedka, K. M. "A consistent AVHRR visible calibration record based on multiple methods applicable for the NOAA degrading orbits". Part II: Validation. J. Atmos. Oceanic Technol, 33:2516-2534. doi: 10.1175/JTECH-D-16-0042.1. 2016.

Donoghue, D. N.; Watt, P. J.; Cox, N. J.; Wilson. J. "Remote sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data". Remote Sensing of Environment, 110:509-522. 2007.

Donoso, C.; Landaeta, E. "Ruil (Nothofagus alessandrii), a threatened Chilean tree species". Environmental Conservation 10:159-162. 1983.

Doorenbos, J.; Puitt, L. "Guidelines for predicting crop water requirements". FAO Irrigation and Drainage Paper N° 24. 1977.

Douville, H.; Chauvin, F. "Relevance of soil moisture for seasonal climate predictions: A preliminary study". Climate Dynamics, 16(10): 719-736. 2000.

Dowman, I.; Jacobsen, K.; Konecny, G.; Sandau, R. "High resolution optical satellite imagery". Whittles Publishing, 230 p. 2012.

Dramis, F.; Guida, D.; Cestari. A. "Nature and aims of geomorphological mapping". In Smith MJ, Paron P, Griffiths JS (eds) "Geomorphological Mapping: Methods and applications". Developments in Earth Surface Process, Vol. 15. Elsevier, Amsterdam. 39-79. ISSN: 0928-2025. doi:10.1016/B978-0- 444-53446-0.00003-3. 2011.

Drusch, M. "Initializing numerical weather prediction models with satellite-derived surface soil moisture: Data assimilation experiments with ECMWF's integrated forecast system and the TMI soil moisture data set". Journal of Geophysical Research, 112(3): 1-14. 2007.

Duckham, M. "Decentralized spatial computing: foundations of geosensor networks". Springer, Berlin. 2012.

Duncanson, L.; Cook, B.; Hurtt, G.; Dubayah, R. "An efficient, multi-layered crown delineation algorithm for mapping individual tree structure across multiple ecosystems". Remote Sens. Environ, 154: 378-386. 2014.

Earnest, A.; Hock Ong, M. E.; Shahidah, N.; Min Ng, W.; Foo, C.; Nott, D. J. "Spatial analysis of ambulance response times related to prehospital cardiac arrests in the city-state of Singapore". Prehosp Emerg Care, 16: 256-265. 2012.

Eineder, M.; Adam, N.; Bamler, R.; Yague-Martínez, N.; Breit, H. "Spaceborne spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(5): 1524-1535. 2009.

Eissmann, C.; Flores, P. "Generación de modelos digitales de elevación utilizando imágenes HRS del satélite SPOT5 para uso cartográfico escalas 1:25.000-1:50.000". Tesis de grado programa de Magíster en Geomática. U. de Santiago de Chile. 2012.

Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. "One billion points in the cloud-an octree for efficient processing of 3D laser scans". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 76(2): 76-88. 2013.

El-Sheimy, N.; Liang, S.; Toth, C. "Integrated imaging and sensor fusion for rapid response and monitoring applications". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104:174. 2015.

Endler, J. A. "The color of light in forests and its implications". Ecological Monographs: 2-27. 1993.

Entekhabi, D.; Reichle, R.; Koster, R.; Crow, W. "Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements". Journal of Hydrometeorology, 11(3): 832-840. 2010.

Erickson, S. R.; Lin, Y. N. "Geospatial analysis of statin adherence using pharmacy claims data in the state of Michigan". J Manag Care Spec Pharm, 20: 1208-1215. 2014.

Erisoglu, M.; Calis, N.; Sakallioglu, S. "A new algorithn for initial cluster centers in k-means algorithm". Pattern Recognition Letters, 32(14): 1701-1705. Dic. 2011.

Escobar, I. "Detección de hielo marino a través de imagen satelital de radar de alta resolución". Tesis de grado para optar al grado de Magíster en Ciencias Antárticas, mención glaciología, Universidad de Magallanes. 2014.

ESRI. "¿Qué es la geocodificación?" Obtenido de http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/guide-books/geocoding/what-is- geocoding.htm. 2016.

Evangelidis, K.; Ntouros, K.; Makridis, S.; Papatheodorou, C. "Geospatial services in the Cloud". Computers & Geosciences, 63: 116-122. 2014.

Falkowski, M. J.; Smith, A. M.; Hudak, A. T.; Gessler, P. E.; Vierling, L. A.; Crookston, N. L. "Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of LiDAR data". Can. J. Remote Sens., 32, 153-161. 2006.

Famiglietti, J.; Rudnicki, J.; Rodell, M. "Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas". Journal of Hyrology, 120: 259-281. 1998.

Fang, Z.; Li Q.; Zhang, X.; Shaw, S. "A GIS data model for landmark-based pedestrian navigation". International Journal of Geographical Information Science, 26(5): 817-838. 2012.

Fassnacht, K. S.; Gower, S. T.; MacKenzie, M. D.; Nordheim, E. V.; Lillesand, T. M. "Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper". Remote Sensing of Environment, 61: 229-245. 1997.

Ferguson, W. J.; Kemp, K.; Kost, G. "Using a geographic information system to enhance patient access to point-of-care diagnostics in a limited-resource setting". Int J Health Geogr,15: 016-037. 2016.

Fernández, I. "Restauración ecológica para ecosistemas nativos afectados por incendios forestales". Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Santiago, Chile. 2010.

Felzenszwalb, P. F.; Girshick, R. B.; McAllester, D.; Ramanan, D. "Object detection with discriminatively trained part based models". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32(9): 1627-1645. 2010.

Ferrando, F. "Clasificación hidrodinámica de Chile". Cuadernos I. Geográfica. 1993.

Ferrando, F. "Geomorfología, grado de riesgo actual y riesgo de erosión potencial de reservas forestales y parques nacionales de la región de Aysén, Chile". SERPLAC XI Región. Ing. COSERREN Ltda. 1981.

Ferreira, L. G.; Asner, G. P.; Knapp, D. E.; Davidson, E. A.; Coe, M.; Bustamante, M. M. C.; Oliveira, E. L. "Equivalent water thickness in savanna ecosystems: MODIS estimates based on ground and EO-1 Hyperion data". International Journal of Remote Sensing, 32: 7423-7440. 2011.

Ferreira, M. E.; Ferreira, L. G.; Sano, E. E.; Shimabukuro, Y. E. "Spectral linear mixture modelling approaches for land cover mapping of tropical savanna areas in Brazil". International Journal of Remote Sensing, 28: 413-429. 2007.

Fischler, M.; Bolles, R. "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography". Communications of the ACM, 24(6): 381-395. 1981.

Foley, J. A.; Defries, R.; Asner, G. P.; Barford, C.; Bonan, G.; Carpenter, S. R.; Snyder, P. K. "Global consequences of land use". Science (New York, N.Y.), 309(5734): 570-574. 2005.

Foody, G. M.; Mathur, A.; Sánchez-Hernández, C.; Boyd, D. S. "Training set size requirements for the classification of a specific class". Remote Sensing of Environment, 104(1): 1-14. 2006.

Foody, G. M. "Harshness in image classification accuracy assessment". International Journal of Remote Sensing, 29(11): 3137-3158. 2008.

Förstner, W. "Computer vision and remote sensing - lessons learned". In: Fritsch D. (ed.), Photogrammetric Week 2009. Heidelberg, 241-249. 2009.

Förstner, W.; Gülch, E. "A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features". In: Proc., ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data, 281-305. 1987.

Fougnie, B.; Henry, P.; Morel, A.; Antoine, D.; Montagner, F. "Identification and characterization of stable homogeneous oceanic zones: climatology and impact on in-flight calibration of space sensors over Rayleigh scattering". Proc. Ocean Optics XVI, Santa Fe, New Mexico, 18-22 November, 2002.

Fougnie, B.; Llido, F.; Gross-Colzy, J. L.; Henry P.; Blumstein, D. "Climatology of oceanic zones for in-flight calibration". Proc. SPIE 7807, Earth Observing Systems XV, 78070S. 2010.

Fougnie, B.; Nieke, J.; Bouvet, M.; Bruniquel, V.; Bourg, L.; Smith, D. "Sentinel-3 OLCI/SLSTR-Validation of the radiometric calibration for optical sensors". 24th CALCON Technical Meeting. 24 - 27 Aug. 2015, Logan, United States. 2015.

Fourest, S.; Kubik, P.; Lebègue, L.; Déchoz, C.; Lacherade, S.; Blanchet, G. "Star-based methods for Pleiades-HR commissioning". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B1, XXII ISPRS Congress, 25 August-1 September 2012, Melbourne, Australia. 2012.

Fournier, R. A.; Rich, P. M.; Landry. R. "Hierarchical characterization of canopy architecture for boreal forest". Journal of Geophysical Research-Atmospheres 102: 29445-29454. 1997.

Frahm, J. M.; Gallup, D.; Johnson, T.; Raguram, R.; Wu, C.; Jen, Y. H.; Dunn, E.; Clipp, B.; Lazebnik, S.; Pollefeys, M. "Building Rome on a cloudless day". European Conference on Computer Vision: 368-381. 2010.

Fraser, R. S.; Kaufman, Y.J. "Calibration of satellite sensors after lunch". Appl Opt., Vol. 25: 1177-1185. 1987.

Frazer, G. W.; Canham, C.; Lertzman, K. "Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, user's manual and program documentation". Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. http://www.caryinstitute.org/science-program/our-scientists/dr-charles-d- canham/gap-light-analyzer-gla. 1999.

Frazer, G. W.; Fournier, R. A.; Trofymow, J.; Hall. R. J. "A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission". Agricultural and Forest Meteorology 109: 249-263. 2001.

Frénay, B.; Verleysen, M. "Classification in the presence of label noise: a survey". IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 25(5): 845-869. 2014.

French, A. N.; Inamdar, A. "Land cover characterization for hydrological modelling using thermal infrared emissivities". Int. J. Remote Sens., 31 (14): 3867-3883. 2010.

French, A. N.; Schmugge, T. J.; Ritchie, J. C.; Hsu, A.; Jacob, F.; Ogawa, K. "Detecting land cover change at the Jornada Experimental Range, New Mexico with ASTER emissivities". Remote Sens. Environ., 112 (4): 1730-1748. 2008.

Friedl, M. A.; Michaelsen, J.; Davis, F. W.; Walker, H.; Schimel, D. S. "Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data". International Journal of Remote Sensing, 15: 1401-1420. 1994.

Fritz, S.; McCallum, I.; Schill, C.; Perger, C.; See, L.; Schepaschenko, D.; Van der Velde, M.; Kraxner, F.; Obersteiner, M. "Geo-Wiki: an online platform for improving global land cover". Environmental Modeling & Software, 31: 110-123. 2012.

Furukawa, Y.; Ponce, J. "Accurate, dense and robust multi-view stereoopsis". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 32(8): 1362-1376. 2010.

Gaillard J.; Monteil C.; Perrillat-Collomb A.; Chaudhari S.; Chaudhari M.; Chaudhari O.; Giazzi F. y Cadag J. 2013 Participatory 3-dimension mapping: A tool for encour-aging multi-caste collaboration to climate change adaptation and disaster risk reduction. Applied Geography, 45: 158-166. 1992.

Gallant, A. L. "The challenges of remote monitoring of wetlands". Remote Sensing, 7(8): 10938-10950. 2015.

Galleguillos, M.; Jacob, F.; Prévot, L.; Lagacherie, P.; Liang, S. "Mapping daily evapotranspiration over a mediterranean vineyard watershed". IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8: 168-172. doi: 10.1109/LGRS.2010.2055230. 2011.

Galvão, L. S.; Epiphanio, J. C. N.; Breunig, F. M.; Formaggio, A. R. "Crop type discrimination using hyperspectral data". In: P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. Hyperspectral remote sensing of vegetation, 2012. New York: Taylor and Francis, 397-421. 2012.

Gao, J.; Burt, J.; Zhu, A. X. "Neighborhood size and spatial scale in raster-based slope calculations". International Journal of Geographical Information Science, 26(10): 1959-1978. 2012.

García, M.; Chuvieco, E.; Nieto, H.; Aguado, I. "Combining AVHRR and meteorological data for estimating live fuel moisture content in forest fire danger rating". Remote Sensing of Environment, 112: 3618-3627. 2008.

García, M.; Gajardo, J.; Riaño, D.; Zhao, K.; Martín, P.; Ustin, S. "Canopy clumping appraisal using terrestrial and airborne laser scanning". Remote Sensing of Environment, 161: 78-88. 2015.

García, M.; Prado, E.; Riaño, D.; Chuvieco, E.; Danson, F. M. "Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo". Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica: 184-208. 2009.

García, M.; Riaño, D.; Chuvieco, E.; Danson, F. M. "Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data". Remote Sensing of Environment, 114: 816-830. 2010.

García, M.; S. Popescu, Riaño, vD.; Zhao, K.; Neuenschwander, A.; Agca, M.; Chuvieco, E. "Characterization of canopy fuels using ICESat/GLAS data". Remote Sensing of Environment, 123: 81-89. 2012.

García, M.; Ustin. L. "Detection of interannual vegetation responses to climatic variability using AVIRIS data in a coastal savanna in California". Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, 39:1480-1490. 2001.

Garrido, F.; Landaeta, E. "Algunos antecedentes sobre el Ruil (Nothofagus alessandri Espinosa)". Ciencias Forestales, 3 (1): 3-19. 1983.

Garrigues, S.; Lacaze, R.; Baret, F.; Morisette, J. T.; Weiss, M.; Nickeson, J. E.; Fernandes, R.; Plummer, S.; Shabanov, N. V.; Myneni, R. B.; Knyazikhin, Y.; Yang, W. "Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data". Journal of Geophysical Research, 133: 1-20. 2008.

Gehrig; S.; Eberli, F.; Meyer, T. "A real-time low-power stereo vision engine using semi-global matching". In: International Conference on Computer Vision Systems (LNCS 5815), 134-143. 2009.

Georgakakos, K. P.; Carpenter, M. "Potential value of operationally available and spatially distributed ensemble soil water estimates for agricultura". J. Hydrol. 328: 177-191. 2006.

Geraghty, E. M.; Balsbaugh, T.; Nuovo, J.; Tandon, S. "Using Geographic Information Systems (GIS) to assess outcome disparities in patients with type 2 diabetes and hyperlipidemia". J Am Board Fam Med, 23: 88-96. 2010.

Gerke, M.; Heipke, C. "Image based quality assessment of road databases". International Journal of Geoinformation Science, 22 (8), 871-894. 2008.

Getis, A.; Ord, J. K. "The analysis of spatial association by use of distance statistics". Geogr. Anal., 24, 189-206. 1992.

Giglio, L.; Chris Justice, C. "MOD14A1 MODIS/Thermal Anomalies/Fire Daily L3 Global 1km SIN Grid". NASA LP DAAC. 2015.

Giglio, L.; Descloitres, J.; Justice, C. O.; Kaufman, Y. J. "An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS". Remote Sensing of Environment, 87, 273-282. 2003.

Gilabert, M. A.; González-Piqueras, J.; García-Haro, F. J.; Meliá, J. "A generalized soil adjusted vegetation index". Remote Sensing of Environment, 82: 303-310. Jun. 2002.

Gillespie, A.; Rokugawa, S.; Matsunaga, T.; Cothern, J. S.; Hook, S. and Kahle, A. B. "A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(4): 1113-1126. 1998.

Giri, C.; Pengra, B.; Long, J.; Loveland, T. "Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 25: 30-37. 2013.

Gislason, P. O.; Benediktsson, J. A.; Sveinsson, J. R. "Random forests for land cover classification". Pattern Recognition Letters, 27(4): 294-300. 2006.

Glazier, R. H.; Creatore, M. I.; Weyman, J. T.; Fazli, G.; Matheson, F.I.; Gozdyra, P.; Moineddin, R.; Shriqui, V. K.; Booth, G. L. "Density, destinations or both? A comparison of measures of walkability in relation to transportation behaviors, obesity and diabetes in Toronto, Canada". PLoS One 9. 2014.

Global Space-Based Inter-Calibration System (GSICS) Portal. Disponible online http://gsics.wmo.int/

Gobierno de Jalisco. "El estado de Jalisco. Periódico oficial de Jalisco". 1-8, 2017. Recuperado en URL (http://periodicooficial.jalisco.gob.mx/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/03-27-12-ii.pdf). 2012.

Gobierno municipal de Ixtlahuacán del Río. "Plan Municipal de Desarrollo de Ixtlahuacán del Río". 2012.

Goerndt, M. E. "Comparison and analysis of small area estimation methods for improving estimates of selected forest attributes". Ph.D. in Forest Resources Dissertation, Oregon State University, USA, 149 p. 2010.

Goetz, J. N.; Guthrie, R. H.; Brenning, A. "Forest harvesting is associated with increased landslide activity during an extreme rainstorm on Vancouver Island, Canada". Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(6): 1311-1330. 2015.

Goetz, J. N.; Guthrie, R. H.; Brenning, A. "Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models". Geomorphology, 129: 376-386. 2011.

Gohari, K.; Parsaeian, M.; Sheidaei, A.; Rahimzadeh, S.; Baghestani, A.; Pourhoseingholi, M.; Pazhuheian, F.; Saeedi Moghaddam, S.; Mansouri, A.; Naderimagham, S.; Kavousi, A.; Farzadfar, F. "Equity Chasm in Megacities: Five Leading Causes of Death in Tehran". Archives of Iranian Medicine, 18(10): 622-628. 2015.

Goldberg, M.; Ohring, G.; Butler, J.; Cao, C.; Datla, R.; Doelling, D.; Gärtner, V.; Hewison, T.; Iacovazzi, B.; Yu, D.; Kim, T.; Kurino, J.; Lafeuille, P.; Minnis, D.; Renaut, J.; Schmetz, D.; Tobin, L.; Wang, F.; Weng, X.; Wu, F.; Zhang, P.; Zhu, T. "The Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS)". Bulletin of the American Meterological Society, April 2011. 468-475. doi:10.1175/2010BAMS2967.1. 2011.

Gómez, C.; White, J. C.; Wulder, M. A. "Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 116: 55-72. 2016.

Gómez, P.; Bustamante, R.; San Martín, J.; Hahn, S. "Estructura poblacional de Pinus radiata D. Don en fragmentos de bosque maulino en Chile central". Gayana Bot. 68(1): 97-101. 2011.

Gómez-Barroso, D.; Prieto-Flores, M.; Mellado San Gabino, A.; Moreno Jiménez, A. "Spatial analysis of mortality from cardiovascular diseases in Madrid City, Spain". Revista Española de Salud Pública, 89(1): 27-37. 2015.

Gonsamo, A.; Pellikka. P. "Methodology comparison for slope correction in canopy leaf area index estimation using hemispherical photography". Forest Ecology and Management, 256: 749-759. 2008.

Gonsamo, A.; Pellikka. P. "The computation of foliage clumping index using hemispherical photography". Agricultural and Forest Meteorology, 149: 1781-1787. 2009.

Gonsamo, A.; Walter, J. M. N.; Pellikka, P. "Sampling gap fraction and size for estimating leaf area and clumping indices from hemispherical photographs". Canadian Journal of Forest Research, 40: 1588-1603. 2010.

González-Dugo, M. P.; González-Piqueras, J.; Campos, I.; Andreu, A.; Balbontin, C.; Calera, A. "Evapotranspiration monitoring in a vineyard using satellite-based thermal remote sensing". In: Neale CMU, Maltese A (eds) Proc. SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV, 85310N (October 23, 2012). Edinburgh, United Kingdom, doi:10.1117/12.974731. 2012.

Goodchild, M.; Glennon, J. "Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier". International Journal of Digital Earth, 3(3): 231-241. 2010.

Gorsevski, P. V.; Jankowski, P. "An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter". Computers & Geosciences, 36: 1005-1020. 2010.

Goryl, P.; Huot, J. P. "Overview of the ENVISAT MERIS and AATSR data quality, calibration and validation program". International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03. doi: 10.1109/IGARSS.2003.1294184. 2003.

Göttlicher, D.; Obregón, A.; Homeier, J.; Rollenbeck, R.; Nauss, T.; Bendix, J. "Land- cover classification in the Andes of southern Ecuador using Landsat ETM+ data as a basis for SVAT modelling". International Journal of Remote Sensing, 30(8): 1867-1886. 2009.

Gould, S.; Rodgers, J.; Cohen, D.; Elidan, G.; Koller, D. "Multi-class segmentation with relative location prior". International Journal of Computer Vision, 80(3): 300-316. 2008.

Gowda, P. H.; Chávez, J. L.; Colaizzi, P. D.; Evett, S. R.; Howell, T. A.; Tolk, J. A. "ET mapping for agricultural water management: present status and challenges". Irrigation Science, 26: 223-237. doi: 10.1007/s00271-007-0088-6. 2008.

Gowda, P. H.; Chávez, J. L.; Colaizzi, P. D.; Evett, S. R.; Howell, T. A.; Tolk, J. A. "Remote sensing based energy balance algorithms for mapping ET: Current status and future challenges". Transactions of the ASABE 50:1639-1644. doi: 10.13031/2013.23964. 2007.

Graesser, J.; Aide, T. M.; Grau, H. R.; Ramankutty, N. "Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America". Environmental Research Letters 10, article 034017. 2015.

Grant, I.; Kieffer, H. H.; Stone, T.; Anderson, J. M. "Lunar calibration of the GMS-5 visible band". Proceedings of IGRSS 2001, Vol. VI, 2769-2771, Piscataway, NJ. IEEE Publications. 2001.

Graves, B. A. "Geographic analysis of cardiac interventional services in Alabama". Journal of Cardiovascular Nursing, 26: E1-E11. 2011.

Gravelius, H. "Grundrifi der Gesamten Gewcisserkunde. Band I: Flufikunde". Compendium of Hydrology, vol. I. Rivers, in German. Goschen, Berlin. 1914.

Grillet, M. E.; Barrera, R.; Martinez, J. E.; Berti, J.; Fortin, M. J. "Disentangling the effect of local and global spatial variation on a mosquito-borne infection in a neotropical heterogeneous environment". Am J Trop Med Hyg, 82: 194-201. 2010.

Gröger, G.; Plümer, L. "CityGML-Interoperable semantic 3D city models". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 71: 12-33. 2012.

Grossberg, M.D.; Nayar, K.S. "A general imaging model and a method for finding its parameters". International Conference on Computer Vision, 108-115. 2001.

Gruber, M.; Walcher, W. "Calibrating the new ultracam osprey oblique aerial sensor". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-3/W1, 47-52. 2014.

Grün, A. "Scientific-technological development in photogrammetry and remote sensing between 2004 and 2008". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Taylor & Francis, London, 21-25. 2008.

Guenther, B. "VIIRS on-orbit spectral throughput degradation: a physical model with specific guidance on handling sensor characteristics for EDR development". Proc. 21st Annual Conference on Characterization and Radiometric Calibration for Remote Sensing, (CALCON), Logan, UT. 2012.

Guerif, M.; Duke, C. I. "Adjustment procedures of a crop model to the site-specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation". Agr. Ecosyst. Environ., 85: 57-69. 2000.

Gueymard, C. A. "SMARTS2, a Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment". Professional Paper FSEC-PF-270-95. Florida Solar Energy Center, 1679 Clearlake Road, Cocoa, FL 32922. 1995.

Gunn, J. E.; Stryker, L. L. "Stellar spectrophotometric atlas, wavelengths from 3130 to 10800 Å". ApJS, 52, 121-153. http://dx.doi.org/10.1086/190861. 1983.

Gupta, S. "Single tree detection and modeling using airborne laser scanner data". Ph.D. in Natural Resources Dissertation, Albert-Ludwings Universität, Germany, 172 p. 2010.

Guzzetti, F.; Carrara, A.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. "Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy". Geomorphology, 31(1-4). 181-216. 1999.

Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F. "Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale". Geomorphology, 72(1-4). 272- 299. 2005.

Haala N. "Multiray photogrammetry and dense image matching". In: Fritsch D. (ed.), Photogrammetric Week 2011, Wichmann, Heidelberg, 185-195. 2011.

Hadley, R. F.; Schumm, S. A. "Sediment sources and drainage basin characteristics in Upper Cheyenne River Basin". U.S. Geological Survey Water- Supply Paper, 1531-B: 198. 1961.

Hagenauer, J.; Helbich, M. "Mining urban land-use patterns from volunteered geographic information by means of genetic algorithms and artificial neural networks". International Journal of Geographical Information Science, 26(6): 963- 982. 2012.

Hagolle, O.; Nicolas, J. M.; Fougnie, B.; Cabot, F.; Henry, P. "Absolute calibration of vegetation derived from an interband method based on the sun Glint over ocean". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 42 (7): 1472-1481. 2004.

Hahmann, S.; Burghardt, D. "How much information is geospatially referenced? Networks and cognition". International Journal of Geographical Information Science, 27(6): 1171-1189. 2013.

Hale, S. E.; Edwards, C. "Comparison of film and digital hemispherical photography across a wide range of canopy densities". Agricultural and Forest Meteorology, 112: 51-56. 2002.

Hall, S. A.; Burke, I. C.; Box, D. O.; Kaufmann, M. R.; Stoker. J. M. "Estimating stand structure using discrete-return LiDAR: an example from low density, fire prone ponderosa pine forests". Forest Ecology and Management, 208: 189-209. 2005.

Hamraz, H.; Contreras, M.; Zhang, J. "A robust approach for tree segmentation in deciduous forests using small-footprint airborne LiDAR data". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 52: 532-541. 2016.

Hamraz, H.; Contreras, M.; Zhang, J. "A scalable approach for tree segmentation within small-footprint airborne". Computers and Geosciences, 102: 139-174. 2017.

Han, G.; Chen, J.; He, C.; Li, S.; Wu, H.; Liao, A.; Peng, S. "A web-based system for supporting global land cover data production". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 103: 66-80. 2015.

Hansen, M. C.; Loveland, T. "A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data". Remote Sensing of Environment, 122: 66-74. 2012.

Hansen, M.; Potapov, P.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.; Goet, S.; Loveland, T.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.; Townshend, J. "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change". Science, 342: 850-853. 2013.

Hantson, S.; Chuvieco, E. "Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(5), 691-700. 2011.

Haque, U.; Scott, L. M.; Hashizume, M.; Fisher, E.; Haque, R.; Yamamoto, T.; Glass, G. E. "Modelling malaria treatment practices in Bangladesh using spatial statistics". Malaria J., 11: 1475-2875. 2012.

Harris, C.; Stephens, M. "A combined corner and edge detector". In: Alvey Conference, 147-152. 1988.

Harris, R.; Baumann, I. "Open data policies and satellite Earth observation". Space Policy (32): 44-53. 2015.

Hartford, R.; Frandsen, W. "When it's hot, it's hot- or maybe it's not (surface flaming may not portend extensive soil heating)". Internatinal Journal of Wildland Fire. 139-144. 1992.

Hartley, R.; Zisserman, A. "Multiple view geometry in computer vision". 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge. 2003.

Hasan, S.; Montzka, C.; Rüdiger, C.; Ali, M.; Bogena, H. R. y Vereecken, H. "Soil moisture retrieval from airborne L-band passive microwave using high resolution multispectral data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 91: 59-71. 2014.

Hastie, T.; Tibshirani, R. "Generalized additive models". Boca Raton, Florida: CRC Press. 1999.

Hauser, A. B. "Remociones en masa en Chile". (Vol. 59). Boletín Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). 2000.

Hecht, A. D.; Fiksel, J.; Fulton, S.; Yosie, T.; Hawkins, N.; Leuenberger, H.; Golden, J.; Lovejoy, T. "Creating the future we want". Sustainability: Science, Practice & Policy, 8(2): 62-75. 2012.

Heidinger, A. K.; Cao, C.; Sullivan, J. T. "Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate Advance Very High-Resolution Radiometer reflectance channels". J. Geophys. Res Atmospheres, Vol. 107: 4702-4704. 2002.

Heipke, C. "Crowdsourcing geospatial data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6): 550-557. 2010.

Heipke, C.; Oberst, J.; Albertz, J.; Attwenger, M.; Dorninger, P.; Dorrer, E.; Ewe, M.; Gehrke, S.; Gwinner, K.; Hirschmüller, H.; Kim, J. R.; Kirk, R. L.; Mayer, H.; Muller, J. P.; Rengarajan, R.; Rentsch, M.; Schmidt, R.; Scholten, F.; Shan, J.; Spiegel, M.; Wählisch, M.; Neukum, G. and the HRSC Co-Investigator Team. "Evaluating planetary digital terrain models-the HRSC DTM test". Planetary and Space Science, 55(14): 2173-2191. 2007.

Heipke, C.; Woodsford P. A.; Gerke, M. "Updating geospatial databases from images". In: Li Z.; Chen J.; Baltsavias M. (eds.), Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Taylor & Francis, London, 355-362. 2008.

Helmholz, P.; Becker, C.; Breitkopf, U.; Büschenfeld, T.; Busch, A.; Braun, C.; Grünreich, D.; Müller, S.; Ostermann, J.; Pahl, M.; Rottensteiner, F.; Vogt, K.; Ziems, M.; Heipke, C. "Semi-automatic Quality Control of Topographic Data Sets". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 78 (9): 959-972. 2012.

Hely, C.; Alleaume, S.; Swap, R. J.; Shugart, H. H.; Justice, C. O. "SAFARI-2000 characterization of fuels, fire behavior, combustion completeness and emissions from experimental burns in infertile grass savannas in western Zambia". Journal of Arid Environments, 54: 381-394. 2003.

Hémera. Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Dirección de Innovación y Transferencia Tecnológica, Vicerrectoría de Investigación, Universidad Mayor, Chile. 2017.

Henning, J. G.; Radtke, P. J. "Ground-based laser imaging for assessing three- dimensional forest canopy structure". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72: 1349-1358. 2006.

Herbert, T. J. "Calibration of fisheye lenses by inversion of area projections". Applied Optics 25: 1875-1876. 1986.

Hernández, J.; Acuña, P.; Cortés, L.; Corvalán, P. "Análisis de la ocurrencia de incendios forestales en la última década en Chile central y su correlación espacial con la infraestructura humana y la cobertura de suelo". Primera Reunión IALE- Chile, Valparaíso 25 y 26 de mayo. 2017.

Herrera, V. "Elementos de Cartografía y Teledetección para ambiente". Editorial universitaria USACH. 1ª edición. Santiago, Chile. 63-87. 2005.

Heurich, M. "Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forests of the Bavarian Forest National Park". For. Ecol. Manag., 255: 2416-2433. 2008.

Hewison, T. J.; Wu, X.; Yu, F.; Tahara, Y.; Hu, X.; Kim, D.; Koenig, M. "GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 51 (3): 1160-1170. 2013.

Hey T.; Trefethen A. "Cyberinfrastructure for e-Science". Science, (308): 817-821. 2005.

Hirschmüller, H. "Stereo processing by semi-global matching and mutual information". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 30(2): 328-341. 2008.

Hoberg, T.; Rottensteiner, F.; Feitosa, R. Q.; Heipke, C. "Conditional random fields for multitemporal and multiscale classification of optical satellite imagery". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(2): 659-673. 2015.

Hofmann, O.; Nave, P.; Ebner, H. "DPS: A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery". The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXIV-B3: 216-227. 1982.

Hofmann, P. "Detecting Informal Settlements from IKONOS Image Data Using Methods of Object Oriented Image Analysis-an Example from Cape Town (South Africa)". En Jürgens, C.(Ed.): Remote Sensing of Urban Areas/Fernerkundung in Urbanen Räumen. 41-42. 2001.

Hofmann, P.; Strobl, J.; Blaschke, T.; Kux, H. "Detecting Informal Settlements from Quickbird Data in Rio de Janeiro Using an Object Based Approach". En Blaschke, T., Lang, S. y Hay, G. J. Object-based Image Analysis. Spatian Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. 531-553. 2008.

Holden, Z. A.; Smith, A. M. S.; Morgan, P.; Rollins, M. G.; Gessler, P. E. "Evaluation of novel thermally enhanced spectral indices for mapping fire perimeters and comparisons with fire atlas data". International Journal of Remote Sensing, 26: 4801-4808. 2005.

Holmgren, J.; Barth, A.; Larsson, H.; Olsson, H. "Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters". Silva Fenn, 46 (2), 227-239. 2012.

Honkavaara, E.; Arbiol, R.; Markelin, L.; Martinez, L.; Cramer, M.; Bovet, S.; Veje, N. "Digital airborne photogrammetry: A new tool for quantitative remote sensing? A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images". Remote Sensing, 1(3): 577-605. 2009.

Hopkinson, C. "The influence of flying altitude, beam divergence, and pulse repetition frequency on laser pulse return intensity and canopy frequency distribution". Canadian Journal of Remote Sensing, 33: 312-324. 2007.

Hopkinson, C.; Chasmer, L. "Modelling canopy gap fraction from LiDAR intensity". Pages 190-194 in ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007. 2007.

Hopkinson, C.; Chasmer, L. "Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones". Remote Sensing of Environment, 113: 275-288. 2009.

Horton, R. E. "Drainage basin characteristics". Transactions of the American Geophysical Union, 13: 350-361. 1932.

Horton, R. E. "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology". Geological Society of America Bulletin, 56: 275-370. 1945

Hovis, W.; Knoll, J.; Smith, G. "Aircraft measurements for calibration of an orbiting spacecraft sensor". Appl Opt., 24 (3): 407-410. 1985. http://doi.org/10.5067/MODIS/MOD14A1.006. 2015.

Hu, B.; Li, J.; Jing, L.; Judah, A. "Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data". Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 26: 145-155. 2014.

Huang, B.; Dignan, M.; Han, D.; Johnson, O. "Does distance matter? Distance to mammography facilities and stage at diagnosis of breast cancer in Kentucky". J Rural Health, 25: 366-371. 2009.

Huang, C.; Davis, L. A.; J. R. G. T. "An assessment of support vector machines for land cover classification". International Journal of Remote Sensing, 23.4 (December 2012), 725-749. 2002.

Huang, H.; Mayer, H. "Extraction of the 3D branching structure of unfoliaged deciduous trees from image sequences". Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, (6): 429-436. 2007.

Huang, W.; Li, S.; Liu, X.; Ban, Y. "Predicting human mobility with activity changes". International Journal of Geographical Information Science, 29(9): 1569-1587. 2015.

Huete, A. R. "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)". Remote Sensing of Environment, 25:295-309. doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X. 1988.

Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodríguez, E. P.; Gao, X. D; Ferreira, L. G. "Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation índices". Remote Sensing of Environment, 83: 195-213. 2002.

Huete, A. R.; Glenn, E. P. "Remote sensing of ecosystem and function". En: Weng, Q. "Advances in Environmental Remote Sensing". CRC Press. London, England. 291-320. 2011.

Hughes, C.; Sengupta, R.; Naik, V.; Saxena, D. "Geovisualization for cluster detection of Hepatitis A & E outbreaks in Ahmedabad, Gujarat, India". Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on the use of GIS in Public Health, Dallas, TX. 2014.

Hughes, G. F. "On the mean accuracy of statistical pattern recognizers". IEEE Transactions on Information Theory, 14(1): 55-63. 1968.

Huising, E. J.; L. M. Gomes Pereira. "Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53: 245-261. 1998.

Hulley, G. C.; Hook, S. J. "Generating consistent land surface temperature and emissivity products between ASTER and MODIS data for earth science research". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(4): 1304-1315. 2011.

Hussain, M.; Chen, D.; Cheng, A.; Wei, H.; Stanley, D. "Change detection from remotely sensed images: from pixel-based to object-based approaches". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 80: 91-106. 2013.

Hyde, P.; Dubayah, R.; Walker, W.; Blair, J. B.; Hofton, M.; Hunsaker, C. "Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (Lidar, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy". Remote Sensing of Environment, 102(1): 63-73. 2006.

Hyyppä, J.; Jaakola, A.; Chen, Y.; Kukko, A.; Kaartinen, H.; Zhu, L.; Alho, P.; Hyyppä, H. "Unconventional LiDAR mapping from air, terrestrial and mobile". In: Fritsch D. (ed.), Photogrammetric Week 2013, Wichmann, Heidelberg, 205-214. 2013.

Hyyppä, J.; Schardt, M.; Haggrén, H.; Koch, B.; Lohr, U.; Paananen, R.; Scherrer, H.; Luukkonen, H.; Ziegler, M.; Hyyppä, H. "HIGH-SCAN: the first European-wide attempt to derive single-tree information from laser scanner data". Photogramm. J. Finl., 17, 58-68. 2001.

IDE Chile. "Disponible nueva versión de terminología ISO de información geográfica en Español". Obtenido de IDE Chile: http://www.ide.cl/noticias-2/2015/item/disponible-nueva-version-de-terminologia-iso-de-informacion-geografica-en-espanol.html. Visitado el 27 de agosto de 2015. 2015.

IGC. Instituto Geográfico y Catastral. "Reseña geográfica y estadística de España", Madrid. Consultado en: http://www.ign.es/ign/resources/ane/1888/index.html. Último acceso: 21/03/2017. 1888.

IGN. Instituto Geográfico Nacional. "Atlas Nacional de España (ANE)". Consultado en: http://www.ign.es/ign/layout/ignane.do. 2017.

Ilustre Municipalidad de Coquimbo. "Memoria explicativa, actualización Plan Regulador Comunal de Coquimbo". Coquimbo. Ilustre Municipalidad de Coquimbo. 2015.

INFOR. Instituto Forestal. "El sector forestal chileno 2016". http://wef.infor.cl/sector_forestal/sectorforestal.php#/8. Visitado el 26/07/2017. 2016.

INFRACON. "Proyecto de ordenamiento territorial para la gestión de riesgos región de Coquimbo". Informe técnico 2007-2010. Proyecto Proteger Coquimbo. 2008.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. http://www.inegi.org.mx/. 2016.

Inoue, A.; Yamamoto, K.; Mizoue N.; Kawahara Y. "Effects of image quality, size and camera type on forest light environment estimates using digital hemispherical photography". Agricultural and Forest Meteorology, 126: 89-97. 2004.

Irigaray, C.; Chacón, J. "Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG". En F. J. Ayala Carcedo & J. Corominas (Eds.), "Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG". 21-36. Madrid: Ministerio de Ciencia y Tecnología - Instituto Geológico y Minero de España. 2003.

Irons, J. R.; Dwyer, J. L.; Barsi, J. A. "The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission". Remote Sensing of Environment, 122, 11-21. 2012.

Ito, K.; Xiong, K. "Gaussian filters for nonlinear filtering problems". IEEE Trans. Autom. Contrl, 45(5): 910-927. 2000.

J. Hydrol. "An examination of factors influencing soil moisture variability". 11(3): 288-300.

Jackson, T. J.; and Schmugge, T. J. "Surface soil moisture measurement with microwave radiometry". Acta Astronautica, 35(7): 477-482. 1995.

Jacobs, S.; Burkhard, B.; Van Daele, T.; Staes, J.; Schneiders, A. "The Matrix Reloaded: A review of expert knowledge use for mapping ecosystem services". Ecological Modelling, 295, 21-30. 2015.

Jacon, A. D.; Galvão, L. S.; Santos, J. R.; Sano, E. E. "Seasonal characterization and discrimination of savannah physiognomies in Brazil using hyperspectral metrics from Hyperion/EO-1". International Journal of Remote Sensing, 2017 (In Press). 2017.

Jacquemoud, S.; Bacour, C.; Poilve, H.; Frangi, J. P. "Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode". Remote Sensing of Environment, Vol. 74: 471-481. 2000.

Jacquemoud, S.; Baret, F. "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra". Remote Sensing of Environment, 34: 75-91. 1990.

Jagtap, S. S.; Jones, J. W. "Stability of crop coefficients under different climate and irrigation management practices". Irrigation Science, 10: 231-244. doi: 10.1007/BF00257955. 1989.

Jeffery, K.; Asserson, A.; Houssos, N.; Brasse, V.; Jörg, B. "From open data to data-intensive science through CERIF". Procedia Computer Science, (33): 191-198. 2014.

Jeong, M.; Duckham, M. "Decentralized querying of topological relations between regions monitored by a coordinate-free geosensor network". GeoInformatica, 17(4): 669-696. 2013.

Jiménez Huerta, E. R.; Cruz Solís, H. "Colonias populares consolidadas del área metropolitana de Guadalajara. Retos y oportunidades", Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México, 166 p. 2015.

Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A.; Mattar, C.; Hulley, G.; Göttsche, F. M. "Temperature and emissivity separation from MSG/SEVIRI data". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(9): 5937-5951. 2014.

Jing, L.; Hu, B.; Li, J.; Noland, T. "Automated delineation of individual tree crowns from LiDAR data by multi-scale analysis and segmentation". Photogramm. Eng. Remote Sens., 78: 1275-1284. 2012.

Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. "Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography". Agricultural and Forest Meteorology, 121: 19-35. 2004.

Jonckheere, I.; Macfarlane, C.; Walter, J. M. "Image analysis of hemispherical photographs. Algorithms and calculations". In R. F. a. R. Hall, editor. Hemispherical Photography in Forest Science: Theory, Methods, Applications. Kluwer, Sherbrook. 2012.

Jonckheere, I.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P. "Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography". Agricultural and Forest Meteorology, 132: 96-114. 2005.

Jones, M. O.; Jones, L. A.; Kimball, J. S.; McDonald, K. C. "Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology". Remote Sensing of Environment, 115(4): 1102-1114. 2011.

Jones, J. W. "Efficient wetland surface water detection and monitoring via landsat: Comparison with in situ data from the everglades depth estimation network". Remote Sensing, 7(9), 12503-12538. 2015.

Joseph, G. "Building Earth Observation Cameras". CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA. 350 p. 2015.

Joshi, A.; Josiane, M.; Sriram, I.; Robert, V.; Craig, J.; Jiajie, Z. "Usability evaluations of an interactive, internet enabled human centered SanaViz geovisualization application". HCI in Business, LNCS, (8527): 723-734. 2014.

Justus, C. G. "Calibration of satellite shortwave sensors using overcast cloudlayer targets". SPIE 0924, Recent Advances in Sensors, Radiometry, and Data Processing for Remote Sensing, 12 October 1988. doi: 10.1117/12.945679. 1988.

Kaartinen, H.; Hyyppä, J.; Yu, X.; Vastaranta, M.; Hyyppä, H.; Kukko, A.; Holopainen, M.; Heipke, C.; Hirschmugl, M.; Morsdorf, F. "An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning". Remote Sens., 4: 950-974. 2012.

Kada, M. "Progressive transmission of 3D building models based on string grammars and planar half-spaces". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-2: 9-14. 2014.

Kaffash-Charandabi, N.; Sadeghi-Niaraki, A.; Park, D. K. "Using a Combined Platform of Swarm Intelligence Algorithms and GIS to Provide Land Suitability Maps for Locating Cardiac Rehabilitation Defibrillators". Iran J Public Health, 44:1072-1083. 2015.

Kaplan, R.; Norton, D. "The execution premium". Boston: Harvard Business School. 2008.

Kauffman, J.; Arico, S. "New directions in sustainability science: promoting integration and cooperation". Sustainability Science, (9): 413-418. 2014.

Kaufman, Y. J.; Holben, B. N. "Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection". Int. J. Remote Sens., 14, 21-52. 1993.

Kaufman, Y. J.; Justice, C.; Flynn, L.; Kendall, J.; Prins, E.; Ward, D. E.; Menzel, P.; Setzer, A. "Monitoring global fires from EOS-MODIS". Journal of Geophysical Research., 103: 32215-32338. 1998.

Kelmelis, J.; DeMulder, M.; Ogrosky, C.; Van Driel, N.; Ryan, B. "The national map from geography to mapping and back again". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 69(10): 1109-1118. 2003.

Kerr Y. H.; Waldteufel, P.; Wigneron, J. P.; Cabot, F.; Boutin, J.; Escorihuela, M. J.; Font, J.; Reul, N.; Gruhier, C.; Juglea, S.; Delwart, S.; Drinkwater, M.; Hahne, A.; Martin-Neira, M.; Mecklenburg, S. "The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle". Proc. IEEE, 98(5): 666-687. 2010.

Kerr, Y. H. "Soil moisture from space: Where are we?". Hydrogeology Journal, 15(1): 117-120. 2007.

Kerr, Y. H.; Al-Yaari, A.; Rodríguez-Fernández, N.; Parrens, M.; Molero, B.; Leroux, D.; Bircher, S.; Mahmoodia, A.; Mialona, A.; Richaume, P.; Delwart, S.; AlBitara, A.; Pellarin, T.; Bindlish, R.; Jackson, T. J.; Rüdiger, C.; Waldteufel, P.; Mecklenburg, S.; Wigneron, J. P. "Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation". Remote Sensing of Environment, 180: 40-63. 2016.

Kerr, Y. H.; Waldteufel, P.; Richaume, P.; Wigneron, J. P; Ferrazzoli, P.; Mahmoodi, A.; Al Bitar, A.; Cabot, F.; Gruhier, C.; Enache Juglea, S.; Leroux, D.; Mialon, A.; Delwart, S. "The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm". Proc. IEEE, 50(5): 1384-1403. 2012.

Kerr, Y. H.; Waldteufel, P.; Wigneron, J. P.; Martinuzzi, J. M.; Font, J.; Berger, M. "Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) misión". Geoscience and Remote Sensing, 39(8): 1729-1735. 2001.

Key, C. H.; Benson, N. C. "Landscape assessment (LA). FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system". Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD, Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2006.

Key, C., Benson, N. "Landscape assessment: Remote sensing of severity, the normalized burn ratio; and ground measure of severity, the composite burn index." In FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, RMRS-GTR, Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 2005.

Key, C.H.; Benson, N. "landscape assessment: ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio". In: FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System (D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson and L.J. Gangi, Eds.), USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164, Ogden, UT. CD: LA1- LA51. 2005.

Khan, S. S.; Ahmad, A. "Cluster center inicialization for K-means clustering". Pattern Recognition Letters, 25(11): 1293-1302. Nov. 2004.

Kieffer, H. H.; Stone, T. "The spectral irradiance of the moon. 2005". The Astronomical Journal, 129: 2887-2901. 2005.

Kieffer, H. H.; Wildey, R. L. "Absolute calibration of landsat instruments using the Moon". Photogramm. Eng. Remote Sens., 51: 1391-1393. 1985.

Kieffer, H. H.; Wildey, R. L. "Establishing the Moon as a spectral radiance standard". J. Atmos. Oceanic Technol. Vol 13: 360-375. 1996.

Kiemle, C.; Ehret, G.; Kawa, S. R.; Browell, E. V. "The global distribution of cloud gaps in Calipso data". J Quant Spectrosc Radiat Transf, 153: 95-101. doi: 10.1016/j.jqsrt.2014.12.001. 2015.

Kim J. H. "Spatiotemporal scale dependency and other sensitivities in dynamic land-use change simulations". International Journal of Geographical Information Science, 27(9): 1782-1803. 2013.

Kim, S. "Individual tree species identification using LiDAR-derived crown structures and intensity data". Ph.D. in Forest Resources Dissertation, University of Washington, Seattle, USA, 137 p. 2007.

Kitt, B.; Ranft, B.; Lategahn, H. "Detection and tracking of independently moving objects in urban environments". Proceedings of the 13th IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems: 1396-1401. 2010.

Kleissl, J.; Hong, S-H.; Hendrickx, J. M. H. "New Mexico scintillometer network: supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models". Bulletin of the American Meteorological Society, 90: 207-218. doi: 10.1175/2008BAMS2480.1. 2009.

Klinger, T.; Rottensteiner, F.; Heipke, C. "Pedestrian recognition and localisation in image sequences as bayesian inference". In: Kukelová Z, Heller J. (eds.), Computer Vision Winter Workshop 2014, Czech Society for Cybernetics and Informatics, 51-58. 2014.

Klingner, B.; Martin, D.; Roseborough, J. "Street view motion-from-structure- from-motion". International Conference on Computer Vision, 953-960. 2013.

Klop, P.; Rodgers, J.; Vos, P.; Hansen, S. "Watering scarcity". Private investment opportunities in agricultural water use efficiency. 2008.

Knight, E. J.; Kvaran, G. "Landsat-8 Operational Land Imager Design, characterization and performance". Remote Sens. 2014, 6: 10286-10305.

Koch, B.; Heyder, U.; Weinacker, H. "Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data". Photogramm. Eng. Remote Sens., 72: 357-363. 2006.

Koepke, P. "Effective reflectance of oceanic white caps". Appl Opt., 20: 34. 1984.

Koepke, P. "Vicarious satellite calibration in the solar spectral range by means of calculated radiances and its application to Meteosat". Appl Opt. 1982 Aug 1; 21(15): 2845-2854. 1982.

Kogan, F. N. "Operational space technology for global vegetation assessment". Bulletin of the American Meteorological Society, 82: 1949-1964. 2001.

Kolbe T. "Representing and exchanging 3D city models with CityGML-2". In: Lee J., Zlatanova S. (eds.), 3D Geo-Information Sciences. Springer, Berlin, 15-31. 2009.

Konecny, G. "Survey of the current status of mapping and map updating in the world". UN-GGIM Conference, Cambridge, UK, 24-26 July 2013.

Konecny, G. "The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: 75 Years Old, or 75 Years Young". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 51(7): 919-933. 1985.

Korhonen, L.; Korpela, I.; Heiskanen, J.; Maltamo. M. "Airborne discrete-return LiDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index". Remote Sensing of Environment, 115: 1065-1080. 2011.

Korres, W.; Reichenau, T. G.; Fiener, P.; Koyama, C. N.; Bogena, H. R.; Cornelissen, T.; Baatz, R.; Herbst, M.; Diekkrüger, B.; Vereecken, H.; Schneider, K. "Spatio-temporal soil moisture patterns. A meta-analysis using plot to catchment scale data". Journal of hydrology, 520: 326-341. 2015.

Krieger, G.; Moreira, A.; Fiedler, H.; Hajnsek, I.; Werner, M.; Younis, M.; Zink, M. "TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(11): 3317-3341. 2007.

Kruger, F. J.; Breytenbach, G. J.; Macdonald, I. A. W.; Richardson, D. M. "The characteristics of invaded Mediterranean climate regions. Biological invasions". In: J.A. Drake, H.A. Mooney, F. di Castri, R.H. Groves, F.J. Krüger, M. Rejmanek & M. Williamson (eds.), Biological Invasions: A Global Perspective. 181-213. Wiley, Chichester, UK. 1989.

Kucharik, C.; Norman, J.; Murdock, L.; Gower. S. "Characterizing canopy nonrandomness with a multiband vegetation imager (MVI)". Journal of Geophysical Research, 102: 29429-29455, 29473. 1997.

Kuenzel, C.; Dech, S.; Wagner, W. "Remote sensing time series - revealing land surface dynamics". Springer, Berlin. 441 p. 2015.

Kuffer, M.; Pfeffer, K.; Sliuzas, R. "Slums from space-15 years of slum mapping using remote sensing." Remote Sensing, 8(6), 455. 2016.

Kuhn, W.; Kauppinen, T.; Janowicz, K. "Linked data - A paradigm shift for geographic information science". In: Duckham M., Pebesma E., Stewart K., Frank A. (eds.), GI Science (LNCS 8728), Springer, Berlin, 173-186. 2014.

Kunz, M.; King, M. A.; Mills, J. P.; Miller, P. E.; Fox, A. J.; Vaughan, D. G.; Marsh S. H. "Multi-decadal glacier surface lowering in the Antarctic Peninsula". Geophysical Research Letters, 39, L19502, doi:10.1029/2012GL052823.3. 2012.

Kwan, M.; Shen, Y.; Chai, Y. "Investigating commuting flexibility with GPS data and 3D geovisualization: a case study of Beijing, China". Journal of Transport Geography, (32): 1-11. 2013.

Lachérade, S.; Aznay, O.; Fougnie, B. "POLO: Pleiades Orbital Lunar Observations, Intensive Study of the Moon and Comparison to ROLO Model". 22nd CALCON Technical Conference, August 2013, Logan, UT, USA. 2013.

Lachérade, S.; Fougnie, B.; Henry, P.; Gamet, P. "Cross calibration over desert sites: description, methodology and operational implementation". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 51, Issue 3: 1098-1113. 2013.

Lachérade, S.; Fourest, S.; Gamet, P.; Lebègue, L. "Pleiades absolute calibration: inflight calibration sites and methodology". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1. XXII ISPRS Congress, 25 August-1 September 2012, Melbourne, Australia. 2012.

Ladický, L.; Sturgess, P.; Russell, C.; Sengupta, S.; Bastanlar, Y.; Clocksin, W.; Torr P.H. S. "Joint optimization for object class segmentation and dense stereo reconstruction". International Journal of Computer Vision, 100(2): 122-133. 2012.

Lafarge, F.; Descombes, X.; Zerubia, J.; Pierrot-Deseilligny, M. "Building reconstruction from a single DEM". IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1-8. 2008.

Lafarge, F.; Mallet, C. "Creating large-scale city models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation". International Journal of Computer Vision, 99 (1): 69-85. 2012.

Lang, A.; Xiang, Y. "Estimation of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies". Agricultural and Forest Meteorology, 37: 229-243. 1986.

Lara, A.; Donoso, C.; Aravena, J. C. "La conservación del bosque nativo en Chile: Problemas y desafíos". En: Armesto JJ, C Villagrán & MK Arroyo (eds) Ecología de los bosques nativos de Chile: 335-362. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 1996.

Laurin, G. V.; Liesenberg, V.; Chen, Q.; Guerriero, L.; Del Frate, F.; Bartolini A.; Valentini. R. "Optical and SAR sensor synergies for forest and land cover mapping in a tropical site in West Africa". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 21: 7-16, 2013.

Law, B. E.; Waring, R. H. "Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation". Ecological Applications, 4: 272-279. 1994.

Lawrence, H.; Wigneron, J. P.; Richaume, P.; Novello, N.; Grant, J.; Mialon, A.; Al Bitar, A.; Merlin, O.; Guyon, D.; Leroux, D.; Bircher, S.; Kerr, Y. "Comparison between SMOS Vegetation Optical Depth products and MODIS vegetation indices over crop zones of the USA". Remote Sens. Environ., 140: 396-406. 2014.

Le Roux, X.; Sinoquet, H.; Vandame. M. "Spatial distribution of leaf dry weight per area and leaf nitrogen concentration in relation to local radiation regime within an isolated tree Crown". Tree Physiology, 19: 181-188. 1999.

Leblanc, S. G.; Chen, J. M.; Fernandes, R.; Deering, D. W.; Conley. A. "Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests". Agricultural and Forest Meteorology, 129: 187-207. 2005.

Leblanc, S. G.; Chen, J. M.; Kwong, M. "Tracing Radiation and Architecture of Canopies TRAC Manual version 2.1. 3.". Natural Resources Canada, 2: 1-25. 2002.

Leckie, D.; Gougeon, F.; Hill, D.; Quinn, R.; Armstrong, L.; Shreenan, R. "Combined high-density LiDAR and multispectral imagery for individual treecrown analysis". Can. J. Remote Sens., 29, 633-649. 2003.

Lee, J. G.; Kang, M. "Geospatial big data: challenges and opportunities". Big Data Research, 2(2): 74-81. 2015.

Lee, J. S. "Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics". Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on PAMI-2: 165-168. 1980.

Lee, S. E.; Pottier, E. Polarimetric Radar Imaging: From Basic to Applications". CRC Press/Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

Lee, J.; Alnasrallah, M.; Wong, D.; Beaird, H.; Logue, E. "Impacts of scale on geographic analysis of health data: an example of obesity prevalence". ISPRS International Journal of Geo-Information, 3(4): 1198-1210. 2014.

Lee, J.; Yu, K.; Kim, Y.; Habib. A. "Adjustment of discrepancies between LiDAR data strips using linear features". Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 4: 475-479. 2007.

Lefsky, M. A.; Cohen, W. B.; Acker, S. A.; Parker, G. G.; Spies, T. A.; Harding, D. "Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests". Remote Sensing of Environment, 70: 339-361. 1999.

Lefsky, M. A.; Cohen, W. B.; Parker, G. G.; D. J. Harding. "LiDAR remote sensing for ecosystem studies". BioScience, 52: 19-30. 2002.

Lentile, L.; Holden, Z.; Smith, A.; Falkowski, M.; Morgan, P.; Lewis, S.; Gessler, P.; Benson, N. "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects". International Journal of Wildland Fire, 15: 319-345. 2006.

Leroux, D. J.; Kerr, Y. H.; Richaume, P. y Fieuzal, R. "Spatial distribution and possible sources of SMOS errors at the global scale". Remote Sensing of Environment, 133: 240-250. 2013.

Li, G.; Fang, C. "Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green GDP' accounting". Ecological Indicators, 46: 293-314. 2014.

Li, M.; Chibber, P. "Overland flow time of concentration on very flat terrains". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2060: 133-140. 2008.

Li, S. "Web mapping/GIS services and applications". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Taylor & Francis, London, 335-354. 2008.

Li, S.; Dragi evi , S.; Veenendaal, B. "Advances in web-based GIS, mapping services and applications". CRC Press. 2011.

Li, S.; Yan, W. "Mashing up geospatial data services: implications of acceptable use policies". Geomatica, 64(1): 111-122. 2010.

Li, W.; Wu, C. "Phenology-based temporal mixture analysis for estimating large- scale impervious surface distributions". International Journal of Remote Sensing, 35(2): 779-795. 2014.

Li, Z. "Theories of map design in the digital era". Cartography and Geographic Information Science, 39(2): 71-75. 2012.

Li, Z. "Transformation of spatial representation in scale dimension: A new paradigm for digital generalization of spatial data". The International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, XXXI-B3, 453-458. 1996.

Li, Z.; Chen, J.; Baltsavias, M. (eds.). "Advances in photogrammmetry, remote sensing and spatial information sciences". Taylor & Francis, London. 2008.

Li, Z.; Huang, P. "Quantitative measures for spatial information of maps". International Journal of Geographical Information Science, 16(7): 699-709. 2002.

Li, Z.; Zhou, Q. "Integration of linear- and areal-hierarchies for continuous multi- scale representation of road networks". International Journal of Geographical Information Science, 46(5): 855-880. 2012.

Lichti, D. D.; Chow, J.; Lahamy, H. "Parameter decorrelation and model- identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66 (3): 317-332. 2011.

Lillesand, T.; Kiefer, R.; Chipman, J. "Remote sensing and image interpretation". JohnWiley & Sons, Inc., 2008.

Lim, K.; Treitz, P.; Wulder, M.; St-Onge, B.; Flood, M. "LiDAR remote sensing of forest structure". Progress in Physical Geography, 27: 88-106. 2003.

Lim, Y. R.; Bae, H. J.; Lim, Y. H.; Yu, S.; Kim, G. B.; Cho, Y. S. "Spatial analysis of PM10 and cardiovascular mortality in the Seoul metropolitan area". Environ Health Toxicol, 31. 2014.

Liu, L.; Qiao, S.; Zhang, Y.; Hu, J. "An efficient outlying trajectories mining approach based on relative distance". International Journal of Geographical Information Science, 26(10): 1789-1810. 2012.

Liu, X.; Li, S.; Huang, W.; Gong, J. "Designing sea ice web APIs for Ice Information Services". Earth Science Informatics, 8(3): 483-497. 2015.

Liu, Z.; Shi, X.; Warner, E.; Ge, Y.; Yu, D.; Ni, S.; Wang, H. "Relationship between oriental migratory locust plague and soil moisture extracted from MODIS data". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 10(1): 84-91. 2008.

Long, Z.; Li, S. "A complete classification of spatial relations using the Voronoi- based nine-intersection model". International Journal of Geographical Information Science, 15(3): 201-220. 2013.

López-García, M.; Caselles, V. "Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper Data". Geocarto International, 6(1991): 31-37. 1991.

Lovell, J. L.; Jupp, D. L. B.; Culvenor, D. S.; Coops. N. C. "Using airborne and ground-based ranging LiDAR to measure canopy structure in Australian forests". Canadian Journal of Remote Sensing, 29: 607-622. 2003.

Lowe, D. "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". International Journal of Computer Vision, 60(2): 91-110. 2004.

Lu, D.; Li, G.; Moran, E. "Current situation and needs of change detection techniques". International Journal of Image and Data Fusion, 5(1): 13-38. 2014.

Lu, D.; Li, G.; Moran, E.; Dutra, L.; Batistella. M. "A comparison of multisensor integration methods for land cover classification in the Brazilian Amazon". GIScience and Remote Sensing, 48: 345-370. 2011.

Lu, D.; Weng, Q. "A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance". International Journal of Remote Sensing, 8(5): 823-870. 2007.

Lucas, R.; Blonda, P.; Bunting, P.; Jones, G.; Inglada, J.; Arias, M.; Kosmidou, V.; Petrou, Z.; Manakos, I.; Adamo, M.; Charnock, R.; Tarantino, C.; Mücher, C.; Jongman, R.; Kramer, H.; Arvor, D.; Pradinho-Honrado, J.; Mairota, P. "The Earth Observation Data for Habitat Monitoring (EODHaM) system". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, (37): 17-28. 2015.

Maas, H. G. "Methods for measuring height and planimetry discrepancies in airborne laserscanner data". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 68: 933-940. 2002.

MacArthur, R. H.; Horn, H. S. "Foliage profile by vertical measurements". Ecology: 802-804. 1969.

Mailly, D.; Turbis, S.; Chazdon. R. L. "Solarcalc 7.0: An enhanced version of a program for the analysis of hemispherical canopy photographs". Computers and Electronics in Agriculture, 97: 15-20. 2013.

Majid, A.; Chen, L.; Chen, G.; Mirza, H.T.; Hussain, I.; Woodward, J. "A context- aware personalized travel recommendation system based on geotagged social media data mining". International Journal of Geographical Information Science, 27(4): 662-684. 2013.

Maldonado, F. D.; Rodríguez, E. E.; Aceñolaza, P. G.; Sione, W. F. "Monitoreo histórico de los desmontes en áreas de bosque nativo de la Provincia de Entre Ríos, Argentina". XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 3175-3182. Año de consulta 2016. Disponible en URL (http://urlib.net/rep/dpi.inpe.br/marte2/ 2013/05.28.22.25). 2013.

Maldonado, F. D.; Sione, W. F.; Aceñolaza, P. G. "Mapeo de desmontes en áreas de bosque nativo de la provincia de Entre Ríos, Argentina". Ambiência, 8: 523- 532. Junio 2012.

Maldonado, F. D.; Sione, W. F.; Tentor, F. R.; Viva, F. M. "Evaluación multitemporal de variables derivadas de datos OLI para la caracterización de la actividad económica en distritos del norte de Entre Ríos". XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, 2016. Año de consulta 2016. Disponible en URL (http://159.203.122.145/index.php/selper16/trabajos_ completos). 2016.

Mallet, C.; Bretar, F. "Full-waveform topographic LiDAR: State-of-the-art". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(1): 1-16. 2009.

Mallick, K.; Bhattacharya, B. K.; Patel, N. K. "Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI". Agricultural and Forest Meteorology, 149(8): 1327-1342. 2009.

Maltamo, M.; Eerikäinen, K.; Packalén, P.; Hyyppä, J. "Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics". Forestry, 79(2): 217-229. 2006.

Maltamo, M.; Mustonen, K.; Hyyppä, J.; Pitkänen, J.; Yu, X. "The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve". Canadian Journal of Forest Research, 34: 1791-1801. 2004.

Mardones, M.; Vidal, C. "La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: Un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción". Eure - Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales, 27(81): 97-122. 2001.

Markham, B.; Helder, D. "Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: a review". Remote Sens. Environ., Vol.122: 30-40. 2012.

Martín, M. "Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR". Doctoral thesis, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares. 1998.

Martins, F. D. S. R. V.; Santos, J. R.; Galvão, L. S.; Xaud, H. A. M. "Sensitivity of ALOS/PALSAR imagery to forest degradation by fire in northern Amazon". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 49: 163-174. 2016.

Masek, J. G.; Vermote, E. F.; Saleous, N. E.; Wolfe, R.; Hall, F. G.; Huemmrich, K. F.; Gao, F.; Kutler, J.; Lim, T. K. "A Landsat surface reflectance data set for North America, 1990-2000". IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 3: 68-72. 2006.

Masek, J.; Claverie, M.; Ju, J.; Dungan, J. "Harmonizing Landsat and Sentinel- 2". 36th EARSeL Symposium, 20-24 June 2016, Bonn, Germany.

Maselli, F. "Monitoring forest conditions in a protected Mediterranean coastal area by the analysis of multiyear NDVI data". Remote Sensing of Environment, 89: 423-433.doi: 10.1016/j.rse.2003.10.020. 2004.

Massiris, C. A. "Ordenación del territorio en América Latina". Scripta Nova.35. Disponible en (http://revistes.ub.edu/index.php/ScriptaNova/article/view/457). 2017.

Masson, V.; Champeaux, J.L.; Chauvin, F.; Mariguet, C.; Lacaze, R. "A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models". Journal of Climate, 16(9): 1261-1282. 2003.

Mattar, C.; Hernández, J.; Santamaría-Artigas, A.; Durán-Alarcón, C.; Olivera, L.; Inzunza, M.; Tapia, D.; Escobar-Lavín, E. "A first in-flight absolute calibration of the Chilean Earth Observation Satellite". ISPRS J Photogramm Remote Sens, 92: 16-25. 2014.

Mattar, C.; Santamaría-Artigas, A.; Durán-Alarcón, C.; Olivera-Guerra, L.; Fuster, R.; Borvarán, D. "The LAB-Net soil moisture network: application to thermal remote sensing and surface energy balance". Data, 1(1): 6. 2016b.

Mattar, C.; Santamaría-Artigas, A.; Sobrino. J. A. "Soil moisture retrieved from a combined optical and passive microwave approach: Theory and applications". (cap. 7,135-158). En: Srivastava, P. K.; Petropoulos, G. y Kerr, Y. H. Satellite Soil Moisture Retrieval. Elsiever. 411 p. 2016a.

Mattar, C.; Wigneron, J. P; Sobrino, J. A; Novello, N.; Calvet, J. C.; Albergel, C.; Richaume, P.; Mialon, A.; Guyon, D.; Jiménez-Muñoz, J. C.; Kerr, Y. "A combined optical-microwave method to retrieve soil moisture over vegetated areas". IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 1404-1413. 2012.

Mayer, H. "Efficient hierarchical triplet merging for camera pose estimation". In: German Conference on Pattern Recognition-GCPR 2014, Springer, Berlin, 399-409. 2014.

Mayer, H. "Object extraction in photogrammetric computer vision". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (63) 2: 213-222. 2008.

McBean, G. A. "The grand challenges of integrated research on disaster risk". Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications, (1): 15. 2014.

McDowell, N.; Coops, N.; Beck, P.; Chamers, J.; Gangodagamage, C.; Hicke, J.; Huang, C.; Kennedy, R.; Krofcheck, D.; Litvak, M.; Medens, A.; Muss, J.; Negron- Juarez, R.; Peng, C.; Schwantes, A.; Swenson, J.; Vernon, L.; Williams, A.; Xu, C.; Zhao, M.; Running, S.; Allen, C. "Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances". Trends in Plant Science, 20 (2): 114-123. 2015.

McInerney, D.; Bastin, L.; Díaz, L.; Figueiredo, C.; Barredo, J.; San-Miguel Ayanz, J. "Developing a forest data portal to support multi-scale decision making". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(6): 1692-1699. 2012.

McNaughton, S. J.; Stronach, N. R. H.; Georgiadis, N. J. "Combustion in natural fires and global emissions budgets". Ecological Applications 8: 464-468. 1998.

Meckler, Y.; Kauffman, Y. "Possible causes of calibration degradation of the Advanced Very High Resolution Radiometer visible and near-infrared channels". Appl Opt, Vol. 34, Issue 6: 1059-1062. 1995.

Mena, C.; Fuentes, E.; Ormazábal, Y.; Palomo-Vélez, G.; Palomo, I. "Role of access to parks and markets with anthropometric measurements, biological markers, and a healthy lifestyle". Int J Environ Health Res, 25: 373-83. 2015.

Menze, M.; Geiger, A. "Object scene flow for autonomous vehicles". IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 3061-3070. 2015.

Menze, M.; Heipke, C.; Geiger, A. "Joint 3D estimation of vehicles and scene flow". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5: 427-434. 2015.

Miernecki, M.; Wigneron, J. P.; López-Baeza, E.; Kerr, Y.; De Jeu, R.; De Lannoy, G.; Jackson, T.; O'Neill, P.; Schwank, M.; Fernandez Moran, R.; Bircher, S.; Lawrence, H.; Mialon, A.; Al Bitar, A.; Richaume, P. "Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field". Remote Sensing of Environment, 154: 89-101. 2014.

Miller, H. J. "Tobler's first law and spatial analysis". Annals of the Association of American Geographers, 94(2): 284-289. 2004.

Miller, H. J.; Han, J. (eds.). "Geographic data mining and knowledge Discovery". CRC Press. 2009.

Miller, J. "A formula for average foliage density". Australian Journal of Botany, 15: 141-144. 1967.

Miller, J. D.; Thode, A. E. "Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)". Remote Sensing of Environment, 109: 66-80. 2007.

Milne, J. "Earthquakes and other movements". 213, London. 1913.

Ministerio de Agricultura-Chile (MINAGRI) (2017) "Observatorio Agroclimático" (visitado en enero 2017). Disponible en: http://www.climatedatalibrary.cl/maproom/ENSO/index.html

Ministerio de Bienes Nacionales. "Decreto Supremo N° 28/2006". Santiago de Chile. 2006.

Miranda, A.; Altamirano, A.; Cayuela, L.; Lara, A.; González, M. "Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence". Regional Environmental Change: 1-13. 2016.

Mitchard, E. T. A.; Saatchi, S.; Lewis, S. L.; Feldpausch, T. R.; Woodhouse, I. H.; Sonke, B.; Rowland, C.; Meir. P. "Measuring biomass changes due to woody encroachment and deforestation/degradation in a forest-savanna boundary region of central Africa using multi-temporal L-band radar backscatter". Remote Sensing of Environment, 115: 2861-2873. 2011.

Mittelbach, H.; Casini, F.; Lehner, I.; Teuling, A. J. and Seneviratne, S. I. "Soil moisture monitoring for climate research: Evaluation of a low-cost sensor in the framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) campaign". Journal of Geophysical Research, 116 (D5): 111. 2011.

Montenegro, G.; Díaz, F.; Gómez, M.; Ginocchio, R. "Regeneration potential of Chilean matorral after fire: an updated view". In: Veblen T.; Baker W.; Montenegro G.; Swetnam T. (eds.). Fire and climate change in temperate ecosystems of the western Americas. New York, USA, Springer-Verlag. 375-403. 2003.

Morales, P.; Tapia, C. "Recomendación técnica: Aplicación de la norma 19131-Especificación de Producto de Datos". Obtenido de IDE Chile: http://www.ide.cl/images/Publicaciones/Documentos/Recomendacion- Tecnica_Especificaciones-de-Producto-ISO-19131.pdf. Visitado en 5 de noviembre de 2015.

Moreno Jiménez, A.; Buzai, G. D.; Fuenzalida Díaz, M. "Sistemas de Información Geográfica: aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales". España: Ra-Ma. 2012.

Moritz, M.; Batllori, E.; Bradstock, R.; Gill, A.; Handmer, J.; Hessburg, P.; Leonard J.; McCaffrey, S.; Odion, D.; Schoennagel, T.; Syphard A. "Learning to coexist with wildfire". 2014. Nature, 515, 58-66. 2014.

Morsdorf, F.; Kötz, B.; Meier, E.; Itten, K. I.; Allgöwer. B. "Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction". Remote Sensing of Environment, 104: 50-61. 2006.

Morsdorf, F.; Meier, E.; Kötz, B.; Itten, K.I.; Dobbertin, M.; Allgöwer, B. "LiDAR- based geometric reconstruction of boreal type forest stands at singletree level for forest and wildland fire management". Remote Sens. Environ., 92: 353-362. 2004.

Moudrý, V.; Šímová, P. "Influence of positional accuracy, sample size and scale on modelling species distributions: a review". International Journal of Geographical Information Science, 26(11): 2083-2095. 2012.

Mouillot, F.; Schultz, M.; Yue, C.; Cadule, P.; Tansey, K.; Ciais, P.; Chuvieco, E. "Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26: 64-79. 2014.

Mountrakis, G.; Im, J.; Ogole, C. "Support vector machines in remote sensing: A review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3): 247-259. 2011.

Mu, Q.; Wu, A.; Xiong, X.; Doelling, D. R.; Angal, A.; Chang, T.; Bhatt, R. "Optimization of a deep convective cloud technique in evaluating the long-term radiometric stability of MODIS reflective solar bands". Remote Sens., 9: 535. 2017.

Mueller, G. S.; Clayton, A. L.; Zahnd, W.E.; Hollenbeck, K. M.; Barrow, M. E.; Jenkins, W. D.; Ruez, D. R. "Manuscript title: Geospatial analysis of Cancer risk and residential proximity to coal mines in Illinois". Ecotoxicol Environ Saf, 120: 155-62. 2015.

Muller-Riemenschneider, F.; Pereira, G.; Villanueva, K.; Christian, H.; Knuiman, M.; Giles-Corti, B.; Bull, F. C. "Neighborhood walkability and cardiometabolic risk factors in Australian adults: an observational study". BMC Public Health, 13: 1471-2458. 2013.

Muñoz, C.; Acevedo, P.; Salvo, S.; Fagalde, G.; Vargas, F. "Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la región de La Araucanía, Chile". Bosque (Valdivia), 28, 119-128. 2007.

Myneni, R. B.; Hall, F. G.; Sellers, P. J.; Marshak, A. L. "The interpretation of spectral vegetation indexes". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 33: 481-486. 1995.

Myneni, R. B.; Hoffman, S.; Knyazikhin, Y.; Privette, J. L.; Glassy, J.; Tian, Y.; Wang, Y.; Song, X.; Zhang, Y.; Smith, G. R.; Lotsch, A.; Friedl, M.; Morisette, J. T.; Votava, P.; Nemani, R. R.; Running, S. W. "Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data". Remote sensing of environment, 83(1): 214-231. 2002.

Nagai, M.; Chen, T.; Shibasaki, R.; Kumagai, H.; Ahmed, A. "UAV-borne 3-D mapping system by multisensor integration". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(3): 701-708. 2009.

Nahuelhual, L.; Carmona, A.; Lara, A.; Echeverría, C.; González, M. E. "Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile". Landscape and Urban Planning, 107(1), 12-20. 2012.

Naidoo, L.; Mathieu, R.; Main, R.; Kleynhans, W.; Wessels, K.; Asner, G.; Leblon, B. "Savannah woody structure modelling and mapping using multi-frequency (X-, C- and L-band) Synthetic Aperture Radar data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 105: 234-250. 2015.

Namayande, M. S.; Nejadkoorki, F.; Dehghan, H. "Spatial Hotspot Analysis of Acute Myocardial Infarction Events in an Urban Population: A Correlation Study of Health Problems and Industrial Installation". Iran J Public Health, 45: 94-101. 2016.

NASA-GSFC Earth Observations (NEO) Portal. Disponible online https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/

Nassel, A. F.; Root, E. D.; Haukoos, J. S.; McVaney, K.; Colwell, C.; Robinson, J.; Eigel, B.; Magid, D. J.; Sasson, C. "Multiple cluster analysis for the identification of high-risk census tracts for out-of-hospital cardiac arrest (OHCA) in Denver, Colorado". Resuscitation, 85:1667-1673. 2014.

National Institute of Standards and Technology (NIST) Portal. Disponible online https://www.nist.gov

National Physical Laboratory (NPL) Portal. Disponible online http://www.npl.co.uk

Nativi, S.; Mazzetti, P.; Santoro, M.; Papeschi, F.; Craglia, M.; Ochiai, O. "Big Data challenges in building the Global Earth Observation System of Systems". Environmental Modelling & Software, 68: 1-26. 2015.

Nativi, S.; Mazzettia, P.; Gellerb, G. N. "Environmental model access and interoperability: The GEO Model Web initiative". Environmental Modelling & Software, 39: 214-228. 2013.

Nelson, R.; Valenti, M. A.; Short, A.; Keller, C. "a multiple resource inventory of delaware using airborne laser data". BioScience, 53: 981-992. 2003.

Nex, F.; Gerke, M.; Remondino, F.; Przybilla, H.J.; Bäumker, M.; Zurhorst, A. "ISPRS Benchmark for multi-platform photogrammetry". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W4, 135-142. 2015.

Niemeyer, J.; Kogut, T.; Heipke, C. "Airborne Laser bathymetry for monitoring the German Baltic Sea Coast". In: Seyfert E., Gülch E., Heipke C., Schiewe J., Sester (eds.): DGPF Annual Meeting Nr. 23, München, 10 p. 2014b.

Niemeyer, J.; Rottensteiner, F.; Soergel, U. "Contextual classification of LiDAR data and building object detection in urban áreas". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87(1): 152-165. 2014a.

Nilson, T. "A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands". Agricultural Meteorology, 8: 25-38. 1971.

Nistér, D. "An efficient solution to the five-point relative pose problem". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(6): 756-770. 2004.

Niu, Z.; Li, S.; Pousaeid N. "Road extraction using smart phones GPS". In: 2nd ACM International Conference on Computing for Geospatial Research & Applications, 1-6. 2011.

Obi Reddy, G. P.; Amal, K.; Maji, A. K. "Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India: A remote sensing and GIS approach". International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 6: 1-16. 2004.

Obradovic, Z.; Das, D.; Radosavljevic, V.; Ristovski, K.; Vucetic, S. "Spatio- temporal characterization of aerosols through active use of data from multiple sensors". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-7B, 424-429. 2010.

Ocean Color. URL (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov), 2017.

OGC. "Catalogue Service". Obtenido de Open Geospatial Consortium: http://www.opengeospatial.org/standards/cat. 2014.

Ohring, G.; Wielicki, B.; Spencer, R.; Emery, B.; Datla, R. "satellite instrument calibration for measuring global climate

change, report of a workshop". Bulletin of the American Meterological Society, September: 1303-1313. 2005.

Olivares, P.; San Martin, J.; Santelices, R. "Ruil (Nothofagus alessandrii): Estado del conocimiento y desafíos para su conservación". Talca, Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 48 p. 2005.

Olofsson, P.; Foody, G. M.; Herold, M.; Stehman, S. V.; Woodcock, C. E.; Wulder, M. A. "Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change". Remote Sensing of Environment, 148: 42-57. 2014.

Optech. "ALTM 3100 EA Product Specifications". http://www.optech.ca/pdf/Brochures/ALTM3100EAwspecsfnl.pdf. 2013.

O'Riordan, T. "Future Earth: A refreshed sustainability science". Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 55(3): 2. 2013.

Ortega-Farías, S.; Carrasco, M.; Olioso, A.; Acevedo, C.; Poblete, C. "Latent heat flux over Cabernet Sauvignon vineyard using the Shuttleworth and Wallace model". Irrigation Science, 25:161-170. doi: 10.1007/s00271-006-0047-7. 2007.

Otsu, N. "A threshold selection method from gray-level histograms". Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions, 9: 62-66. 1979.

Ouzounov, D.; Freund, F. "Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data". Advances in Space Research, vol. 33: 268-276, 2004.

Overstreet, J. "Robinson forest inventory department of forestry". University of Kentucky, Lexington, Kentucky. 1984.

Packalén, P.; Maltamo, M. "Predicting the plot volume by species using airborne laser scanning and aerial photographs". Forest Science, 52(6): 611-622. 2006.

Pajeres, G. "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81(4): 281-329. 2015.

Palacio, P. J. L.; Sánchez, S. M. T.; Hernández, S. J. R.; Ortiz, P. M. A.; Oropeza, O. O.; Velázquez, M. A.; Hernández, C. M. E. Perevoctchikova, M.; Casado, I. J. M. "Orientación metodológica, variables e indicadores físico geográficos en el ordenamiento territorial de México". En Massiris, C. A. (Coord.). Geografía y Territorio. Procesos territoriales y socioespaciales (141-178). Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2009.

Palm, S.; Pohl, N.; Stilla, U. "Challenges and potentials using multi aspect coverage of urban scenes by airborne SAR on circular trajectories". The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W2), 149-154. 2015.

Paltridge, G. W.; Barber, J. "Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA-AVHRR data". Remote Sensing of Environment, 25: 381-394. 1988.

Pan, S. J.; Yang, Q. "A survey on transfer learning". IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22(10): 1345-1359. 2010.

Pandian, J. D.; Singh, G.; Kaur, P.; Bansal, R.; Paul, B. S.; Singla, M.; Samuel, C. J.; Verma, S. J.; Moodbidri, P.; Mehmi, G.; Sharma, A.; Arora, O. P.; Dhanuka, A. K.; Sobti, M. K.; Sehgal, H.; Kaur, M.; Grewal, S. S.; Jhawar, S. S.; Shadangi, T. N.; Arora, T.; Saxena, A.; Sachdeva, G.; Gill, J. S.; Brar, R. S.; Gill, A.; Bakshi, S. S.; Pawar, S. S.; Singh, G.; Sikka, P.; Litoria, P. K.; Sharma, M. "Incidence, short-term outcome, and spatial distribution of stroke patients in Ludhiana, India". Neurology, 86: 425-433. 2016.

Paneque-Gálvez, J.; Mas, J. F.; Moré, G.; Cristóbal, J.; Orta-Martínez, M.; Luz, A. C.; Reyes-García, V. "Enhanced land use/cover classification of heterogeneous tropical landscapes using support vector machines and textural homogeneity". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23(1): 372-383. 2013.

Panferov, O.; Knyazikhin, Y.; Myneni, R. B.; Szarzynski, J.; Engwald, S.; Schnitzler, K. G.; Gravenhorst, G. "The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 241-253. 2001.

Paparoditis, N.; Boudet, L.; Tournaire, O. "Automatic man-made object extraction and scene reconstruction from geomatic images". URBAN, GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, Paris, France. 1-6. 2007.

Paparoditis, N.; Papelard, J. P.; Cannelle, B.; Devaux, A.; Soheilian, B.; David, N.; Houzay, E. "Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology". Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 200: 69-79. 2012.

Park, N. W.; Chi, K. H. "Quantitative assessment of landslide susceptibility using high-resolution remote sensing data and a generalized additive model". International Journal of Remote Sensing, 29: 247-264. 2008.

Parker, G. G. "Structure and microclimate of forest canopies". Academic Press, Inc.; Academic Press Ltd. 1995.

Parker, G. G.; Harding, D. J.; Berger, M. L. "A portable LiDAR system for rapid determination of forest canopy structure". Journal of Applied Ecology, 41: 755-767. 2004.

Parmentier, B.; Eastman, J.R. "Land transitions from multivariate time series: using seasonal trend analysis and segmentation to detect land-cover changes". International Journal of Remote Sensing, 35(2): 671-692. 2014.

Parrens, M.; Zakharova, E.; Lafont, S.; Calvet, J.-C.; Kerr, Y.; Wagner, W.; Wigneron, J.P. "Comparing soil moisture retrievals from SMOS and ASCAT over France". Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss, 8: 8565-8607. 2012.

Pasewaldt, S.; Semmo, A.; Trapp, M.; Döllner, J. "Multi-perspective 3D panoramas". International Journal of Geographical Information Science, 28(10): 2030-2051. 2014.

Pavanelli, J. A. P.; Santos, J. R.; Galvão, L. S.; Xaud, M. R.; Xaud, H. A. M. "PALSAR-2/ALOS-2 and OLI/Landsat-8 data integration for land use and land cover mapping in northern Brazilian Amazon". GIScience and Remote Sensing, 2017 (Submitted). 2017.

Pellikka, P.; Rees, W. "Remote Sensing of Glaciers". CRC Press/Bolkemais. 2010.

Peña-Cortés, F.; Pincheira-Ulbrich, J.; Bertrán, C.; Tapia, J.; Hauenstein, E.; Fernández, E.; Rozas, D. "A study of the geographic distribution of swamp forest in the coastal zone of the Araucanía Region, Chile". Applied Geography, 31(2): 545–555. 2011.

Peña-Cortés, F.; Rebolledo, G.; Hermosilla, K.; Hauenstein, E.; Bertrán, C.; Schlatter, R.; Tapia, J. "Dinámica del paisaje para el periodo 1980-2004 en la cuenca costera del Lago Budi, Chile. Consideraciones para la conservación de sus humedales". Ecología Austral, 16(1): 183-196. 2006.

Pereira, H. M. Ferrier, S.; Walters, M.; Geller, G.; Jongman, R.; Scholes, R.; Bruford, M.; Brummitt, N.; Butchart, S.; Cardoso, A.; Coops, N.; Dulloo, E.; Faith, D.; Freyhof, J.; Gregory, R.; Heip, C.; Höft, R.; Hurtt, G.; Jetz, W.; Karp, D.; McGeoch, M.; Obura, D.; Onoda, Y.; Pettorelli, N.; Reyers, B.; Sayre, R.; Scharlemann, J.; Stuart, S.; Turak.; Walpole, M.; Wegmann, M. "Essential biodiversity variables". Science Magazine, 339 (6117): 277-278. 2013.

Pereira, L. S.; Oweis, T.; Zairi, A. "Irrigation management under water scarcity". Agricultural Water Management, 57: 175-206. doi: 10.1016/S0378- 3774(02)00075-6. 2002.

Pérez-Hoyos, A.; García-Haro, F. J. y San-Miguel-Ayanz, J. "Conventional and fuzzy comparisons of large scale land cover products: Application to CORINE, GLC2000, MODIS and GlobCover in Europe". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 74: 185-201. 2012.

Pérez-Peña, J. V.; Azañón, J. M.; Azor, A. "CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain". Computers & Geosciences, 35(6), 1214-1223, June. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.06.006. 2009.

Persson, A.; Holmgren, J.; Söderman, U. "Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner". Photogramm. Eng. Remote Sens. 68: 925-932. 2002.

Petropoulos, G. "Remote sensing of surface turbulent energy fluxes". In: Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content. CRC Press. 49-84. 2013.

Petschko, H.; Brenning, A.; Bell, R.; Goetz, J.; Glade, T. "Assessing the quality of landslide susceptibility maps-case study Lower Austria". Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14: 95-118. 2014.

Pfeifer, N.; Elberink, S. O.; Filin. S. "Automatic tie elements detection for laser scanner strip adjustment". International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 36: 1682-1750. 2005.

Pielke, S. R.; Pitman, A.; Niyogi, D.; Mahmood, R.; McAlpine, C.; Hossain, F.; Goldewijk, K.; Nair, U.; Betts, R.; Fall, S.; Reichstein, M.; Kabat, P.; De Noblet, N. "Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence". Wires Climatic Change, 2(6): 828-850. 2011.

Pierrot-Deseilligny, M.; Paparoditis, N. "A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5- HRS stereo imagery". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-1/W41, 5 p. 2006.

Pinto, C. T.; Ponzoni, F. J.; Barrientos, C.; Mattar, C.; Santamaría-Artigas, A.; Castro, R. M. "Spectral and atmospheric characterization of a surface at Atacama Desert for earth observation sensors calibration". IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., 12: 2227-2231. 2015.

Pinto, C. T.; Ponzoni, F. J.; Castro, R.; Leigh, L.; Mishra, N.; Aaron, D.; Helder, D. "First In-Flight radiometric calibration of MUX and WFI on-Board CBERS-4". Remote Sens, 8: 405. 2016.

Pitkänen, J.; Maltamo, M.; Hyyppä, J.; Yu, X. "Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model". Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., 36: 187-191. 2004.

Plummer, S.; Olivier, A.; Muriel, S.; Will, S. "Establishing an earth observation product service for the terrestrial carbon community: the globcarbon initiative". Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change: 11: 97-111. 2006.

Pôças, I.; Paço, T. A.; Cunha, M.; Andrade, J. A.; Silvestre, J.; Sousa, A.; Santos, F. L.; Pereira, L.S.; Allen, R.G. "Satellite-based evapotranspiration of a super-intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms". Biosystems Engineering, 128:69-81. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019. 2014.

Pontius, R. G.; Millones, M.; Pontius, R.; Gilmore, J.; Millones, M.; Pontius, R. G.; Millones, M. "Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment". International Journal of Remote Sensing, 32(15): 4407-4429. 2011.

Ponzoni, F.; Zullo, J.; Lamparelli, R.; Pellegrino, G.; Arnaud, Y. "In-flight Absolute Calibration of the Landsat-5 TM on the Test Site Salar Uyuni". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 42. Nº 12: 2761-2766. 2004.

Popa, I. S.; Zeitouni, K.; Oria, V.; Kharrat, A. "Spatio-temporal compression of trajectories in road networks". GeoInformatica, 9(1): 117-145. 2015.

Popescu, S. C.; Wynne, R. H. "Seeing the trees in the forest". Photogramm. Eng. Remote Sens., 70: 589-604. 2004.

Popescu, S. C.; Wynne, R. H.; Nelson, R.F. "Estimating plot-level tree heights with LiDAR: local filtering with a canopy-height based variable window size". Comput. Electron. Agric., 37: 71-95. 2002.

Popescu, S. C.; Zhao; K. "A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine tres". Remote Sensing of Environment, 112: 767-781. 2008.

Pourghasemi, H. R.; Pradhan, B.; Gokceoglu, C.; Moezzi, K. D. Chapter 2. "Landslide susceptibility mapping using a spatial multi criteria evaluation model at Haraz watershed, Iran". In B. Pradhan & M. Buchroithner (Eds.), Terrigenous mass movements. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2012.

Prewitt, J. M. S.; Mendelsohn, M. L. "The analysis of cell images". Annals of the New York Academy of Sciences, 128: 1035-1053. 1966.

Pringle, R. M.; Webb, J. K.; Shine, R. "Canopy structure, microclimate, and habitat selection by a nocturnal snake, Hoplocephalus bungaroides". Ecology, 84: 2668-2679. 2003.

Qi, F.; Du, F. "Tracking and visualization of space-time activities for a micro-scale flu transmission study". Int J Health Geogr, 12: 12-16. 2013.

Qin, R.; Grün, A. "3D change detection at street level using mobile laser scanning point clouds and terrestrial images". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 90: 23-35. 2014.

Quartulli, M.; Olaizola, I. "A review of EO image information mining". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 75: 11-28. 2013.

Quintano, C.; Fernández-Manso, A.; Roberts, D. A. "Multiple Endemember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries". Remote Sensing of Environment, 136: 76- 68. Ago. 2013.

Rabe, C.; Müller, T.; Wedel, A.; Franke, U. "Dense, robust and accurate motion field estimation from stereo image sequences in real-time". European Conference on Computer Vision, 582-595. 2010.

Raguse, K.; Heipke, C. "Synchronization of image sequences - a photogrammetric method". In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 75(5): 535-546. 2009.

Ramonel, C. "Geomorfología de cauces aluviales". Guía didáctica. Universidad Nacional del Litoral Facultad de ingeniería y ciencias hídricas. 24 p.1997.

Rao, H. X.; Zhang, X.; Zhao, L.; Yu, J.; Ren, W.; Zhang, X. L.; Ma, Y. C.; Shi, Y.; Ma, B. Z.; Wang, X.; Wei, Z.; Wang, H. F.; Qiu, L. X. "Spatial transmission and meteorological determinants of tuberculosis incidence in Qinghai Province, China: a spatial clustering panel analysis". Infect Dis Poverty, 5: 16-139. 2016.

Ratana, P.; Huete, A. R.; Ferreira. L. "Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain". Earth Interactions paper Nº 9, 22 p., 2005.

Reca, J.; Medina, J. L.; Camacho, E. F. López, R.; Roldán, J. "Aplicación de las técnicas de Teledetección y SIG a la determinación y análisis de mapas de evapotranspiración". Ingeniería del agua. doi: 10.4995/ia.1999.2778. 1999.

Reid, W.; Chen, D.; Goldfarb, L.; Hackmann, H.; Lee, Y.; Mokhele, K.; Ostrom, E.; Raivio, K.; Rockström, J.; Schellnhuber, H.; Whyte, A. "Earth system science for global sustainability: grand challenges, environment and development". Science, 330 (6006): 916-917. 2010.

Remondino, F.; Fraser, C. "Digital camera calibration methods: considerations and comparisons". The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI-5, 266-272. 2006.

Ren, A. Z.; Shi, J. Y.; Shi, W. Z. "Integration of fire simulation and structural analysis for safety evaluation of gymnasiums-with a case study of gymnasium for Olympic Games in 2008". Automation in Construction, 16(3): 277-289. 2007.

Reynolds, S. G. "The gravimetric method of soil moisture determination Part III". 1970.

Riaño, D.; Chuvieco, E.; Salas, J.; Aguado, I. "Assessment of different topographic corrections in landsat-TM data for mapping vegetation types". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(5 PART 1): 1056-1061. 2003.

Riaño, D.; Meier, E.; Allgower, B.; Chuvieco, E.; Ustin. S. L. "Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling". Remote Sensing of Environment, 86: 177-186. 2003.

Riaño, D.; Valladares, F.; Condes, S.; Chuvieco, E. "Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests". Agricultural and Forest Meteorology, 124: 269-275. 2004.

Richardson, A. J.; Wiegand, C. L. "Distinguishing vegetation from soil background information". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 43: 1541-1552. Ene. 1977.

Richardson, D. M.; Brown, P. J. "Invasion of mesic mountain fynbos by Pinus radiata". South African Journal of Botany, 52: 529-536. 1986.

Richardson, D. M.; Higgins, S. I. "Pines as invaders in the southern hemisphere." In: D.M. Richardson (ed.), Ecology and Biogeography of Pinus. 450-473. Cambridge University Press, Cambridge. 1998.

Ricotta, C.; Carranza, M. "Measuring scale-dependent landscape structure with rao's quadratic diversity". ISPRS International Journal of Geo-Information, 2(2): 405-412. 2013.

Ridler, T.; Calvard, S. "Picture thresholding using an iterative selection method". IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, 8: 630-632. 1978.

Ripperda, N. "Grammar based facade reconstruction using RJMCMC". Photogrammetrie Fernerkundung. Geoinformation, (2): 83-92. 2008.

Ritter, D. F.; Kochel, R. C.; Miller; J. R. "Process geomorphology". 3rd ed., W. C. Brown, Dubuque, Iowa. 546 p. 1995.

Roberson, S.; Dutton, M.; Macdonald, M.; Odoi, A. "Does Place of Residence or Time of Year Affect the Risk of Stroke Hospitalization and Death? A Descriptive Spatial and Temporal Epidemiologic Study". PLoS One, 11(1): e0145224. 2016.

Robinson, J. M. "Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing". International Journal of Remote Sensing, 12: 3-24. 1991.

Robinson, N.; Regetz, J.; Guralnick, R. "EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void- free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87: 57-67. 2014.

Robotic Lunar Observatory (ROLO) USGS Portal. Disponible online https://www.moon-cal.org/

Rodrigues, P. C.; Santos, E. S.; Ignotti, E.; Hacon, S. S. "Space-Time Analysis to Identify Areas at Risk of Mortality from Cardiovascular Disease". Biomed Res Int 841645:4. 2015.

Rodríguez, R.; Matthei, O.; Quezada, M. "Flora Arbórea de Chile". Editorial de la Universidad de Concepción, Concepción-Chile. 1983.

Rodríguez-Galiano, V. F.; Chica-Rivas, M. "Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and Digital Terrain Models". International Journal of Digital Earth, (November 2015), 1-18. 2012.

Rohling, H. "Skriptum zur Vorlesung: Radartechnik und-Signalverarbeitung", TUHH, Disponible en URL (http://www.et2.tu- harburg.de/lehre/Radarsignalverarbeitung/skriptul9.pdf). 2014.

Roig, G.; Boix, X.; Ben Shitrit, H.; Fua, P. "Conditional random fields for multi- camera object detection". International Conference on Computer Vision, 563-570. 2011.

Rottensteiner, F.; Sohn, G.; Gerke, M.; Wegner, J.; Breitkopf, U. "Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 93(7): 256-271. 2014.

Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Shell, J. A.; Deering, D. W.; Harlan, J. C. "Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation". NASA/GSFC, Greenbelt, USA, Final Report. 1973.

Roy, D. P.; Boschetti, L.; Justice, C. O.; Ju, J. "The collection 5 MODIS burned area product-global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. Remote Sensing of Environment, 112: 3690-3707. 2008.

Roy, D.; Lewis, P. E.; Justice, C.O. "Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data-a bi-directional reflectance model-based expectation approach". Remote Sensing of Environment. Vol. 83(1-2): 263-286. 2002.

Royston, P. Remark AS R94: A remark on algorithm AS 181: The W-test for normality". Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 44: 547-551. 1995.

Ruiz, M.; López, F.; Páez, A. "Comparison of thematic maps using symbolic entropy". International Journal of Geographical Information Science, 26(3): 413-439. 2012.

Saaty, T. "The analytical hierarchy process". New York: Mc Graw Hill. 1980.

Sabattini, R. A. "Zonificación de los bosques nativos en el Departamento Feliciano (Entre Ríos) según las categorías de conservación. Informe 3". FCA UNER y Dirección General de Recursos Naturales. Oro Verde, Entre Ríos. 30 p. 2009.

Sadeq, M. "Spatial patterns and secular trends in human leishmaniasis incidence in Morocco between 2003 and 2013". Infect Dis Poverty, 5: 16-135. 2016.

San Martín, J.; Donoso, C. "Estructura florística e impacto antrópico en el bosque Maulino de Chile".153-168. En: Armesto, J.J.; Villagrán, C. & M.T.K. Arroyo (eds), Ecología de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria, Santiago. 1996.

Sancho, J.; Sanchez, M.; Del Campo, A. "La Red ANEXXI: una plataforma para el soporte científico del Atlas Nacional de España del siglo XXI que desarrolla el Instituto Geográfico Nacional". Boletín de la Real Sociedad Geográfica, Madrid, CXLIX. 83-108. 2013.

Sancho, J.; Zamora, M.; Sánchez, M.; Del Campo, A. "Tradición e innovación en el Atlas Nacional de España del siglo XXI", Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, Madrid, Nº 64, 1er Cuatrimestre. 2014.

Sandau, R. (ed.). "Digital airborne camera". Springer, Berlin. 2009.

Sandau, R.; Röser, H. P.; Valenzuela, A. (eds.). "Small satellite missions for Earth observation - New developments and trends". 2011, Springer, Berlin.

Santamaría-Artigas, A.; Mattar, C.; Wigneron, J. P. "Application of a combined optical-passive microwave method to retrieve soil moisture at regional scale over Chile". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(4): 1493-1504. 2016.

Santelices, R.; Drake, F.; Mena, C.; Órdenes, R.; Navarro Cerrillo, R. F. "Current and potencial distribution áreas for Nothofagus alessandrii, and endangered tree species from central Chile". Cienc. Inv. Agr., 39(3): 521-531. 2012.

Santer, R.; Gu, X. F.; Guyot, G.; Deuzé, J. L.; Devaux, C.; Vermote, E.; Verbrugghe, M. "SPOT calibration at the La Crau test site (France)". Remote Sens. Environ., 41: 227-237. 1992.

Santos, C.; Lorite, I. J.; Allen, R. G.; Tasumi, M. "Aerodynamic Parameterization of the Satellite-Based Energy Balance (METRIC) Model for ET Estimation in Rainfed Olive Orchards of Andalusia, Spain". Water Resources Management, 26: 3267-3283. doi: 10.1007/s11269-012-0071-8. 2012.

Santos, J. R.; LaCruz, M. S. P.; Araujo, L. S.; Keil, M. "Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data". International Journal of Remote Sensing, 23: 1217-1229. 2002.

Sánz, A. C. "El Atlas Nacional de España", Anales de Geografía de la Universidad Complutense, Nº 11: 225-230, Ed. Comp., Madrid. 1992.

Sarmiento, G. "The savannas of tropical America". In: F. Bourlière (Ed.), Tropical savannas. Elsevier, 1983, New York. 245-288. 1983.

Sasaki, T.; Imanishi, J.; Loki, K.; Morimoto, Y.; Kitada. K. "Estimation of leaf area index and canopy openness in broad-leaved forest using an airborne laser scanner in comparison with high-resolution near-infrared digital photography". Landscape and Ecological Engineering, 4: 47-55. 2008.

Schaepman-Strub, G.; Schaepman, M. E.; Painter, T. H.; Dangel, S.; Martonchik, J. V. "Reflectance quantities in optical remote sensing-Definitions and case studies". Remote Sens. Environ., 103: 27-42. doi: 10.1016/j.rse.2006.03.002. 2006.

Scheer, J. A.; Kurtz, J. L. "Coherent Radar Performance Estimation". Artech House, Norwood. MA, 1993.

Scheffer, M.; Carpenter, S.; Foley, J. A.; Folke, C.; Walker, B. "Catastrophic shifts in ecosystems". Nature, 413: 591-596. 2001.

Schiermeier M. "Outlook for earth - A special issue on the IPCC". Nature 19, (501/297): 304-305. 2013.

Schindler, K. "An overview and comparison of smooth labeling methods for land- cover classification". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(11): 4534-4545. 2012.

Schindler, K.; Ess, A.; Leibe, B.; Van Gool, L. "Automatic detection and tracking of pedestrians from a moving stereo rig". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6): 523-537. 2010.

Schmeller, D. S.; Julliard, R.; Bellingham, P.; Böhm, M.; Brummitt, N.; Chiarucci, A.; Couvet, D.; Elmendorf, S.; Forsyth, D.; Moreno, J.; Gregory, R.; Magnusson, W.; Martin, L.; McGeoch, M.; Mihoub, J.B.; Proenca, V.; Van Swaay, C.; Yahara, T.; Belnap, J. "Towards a global terrestrial species monitoring program". Journal for Nature Conservation, 25: 51-57. 2015.

Schubert, J.; Moradi, F.; Asadi, H.; Luotsinen, L.; Sjöberg, E.; Höfling, P.; Linderhed, A.; Oskarsson, D. "Simulation-based decision support for evaluating operational plans". Operations Research Perspectives, (2): 36-56. 2015.

Scott, K. P.; Thome, K. J.; Brownlee, M. R. "Evaluation of the Railroad Valley Playa for use in vicarious calibration". Proc. of SPIE Conference, 2818: 158-166. 1996.

Secretaría de Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable (SEMADES). "Documento Técnico Municipio de Ixtlahuacán del Río. Gobierno de Jalisco". Consultado en http://siga.jalisco.gob.mx/moet/. 2006.

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial y Gobierno municipal de Ixtlahuacán del Río. Ordenamiento ecológico local. Recuperado en http://ixtlahuacandelrio.jalisco.gob.mx/pdf/marco/ordenamientoEco.pdf. 2017.

See, L.; Schepaschenko, D.; Lesiv, M.; McCallum, I.; Fritz, S.; Comber, A.; Perger, C.; Schill, C.; Zhao, Y.; Maus, V.; Athar, M.; Albrecht, S.; Cipriani, A.; Vakolyuk, M.; García, A.; Rabia, A.; Singha, K.; Marcarini, A.; Kattenborn, T.; Hazarika, R.; Schepaschenko, M. "Building a hybrid land cover map with crowdsourcing and geographically weighted regression". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 103: 48-56. 2015.

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. "Manual del proceso de Ordenamiento Ecológico". México. Edit. 2006.

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. "Guía para la elaboración del proyecto del programa de Ordenamiento Ecológico Local". 2015.

SERNAGEOMIN. "Geología para el ordenamiento territorial de la región de Valparaíso". En SERNAGEOMIN (Ed.), (49). Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile). 2004.

Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). "Catastro vitivinícola nacional 2015". Available from: http://www.sag.gob.cl/ambitos-de-accion/catastro-viticola- nacional/1490/publicaciones. 2015.

Sester, M.; Arsanjani, J.; Klammer, R.; Burghardt, D.; Haunert, J. "Integrating and Generalizing Volunteered Geographic Information". In: Burghardt/Duchene/Mackaness (eds.): Abstracting Geographic Information in a Data Rich World - Methodologies and Applications of Map Generalisation, Springer, Berlin. 2014.

Sester, M.; Brenner, C. "A vocabulary for a multiscale process description for fast transmission and continuous visualization of spatial data". Computers & Geosciences, 35(11): 2177-2184. 2009.

Shao, G.: Reynolds, K. M. "Computer applications in sustainable forest management: Including perspectives on collaboration and integration". Springer Science & Business Media. 2006.

Shaoning, L. V.; Wen, J.; Zeng, Y.; Tian, H.; Su, Z. "An improved two-layer algorithm for estimating effective soil temperature in microwave radiometry using in situ temperature and soil moisture measurements". Remote Sensing of Environment, 152: 356-363. 2014.

Shin, D.; Bellow, J.; LaRow, T.; Cocke, S. and O'Brien, J. "The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application". J. Appl. Meteorol. Climatol, 45(5): 686-701. 2006.

Sieber, R.; Hollenstein, L.; Eichenberger, R. "Concepts and techniques of an online 3D atlas-challenges in cartographic 3d geovisualization". In: Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Applications and Case Studies, LNCS (7610), Springer, Berlin, 325-326. 2012.

Sifaki-Pistolla, D.; Karageorgos, S.A.; Koulentaki, M.; Samonakis, D.; Stratakou, S.; Digenakis, E.; Kouroumalis, E. "Geo-epidemiology of hepatocellular carcinoma in the island of Crete, Greece. A possible role of pesticides". Liver Int, 36: 588-94. 2016.

Simón, L.; Ramos, F.; Avilés, R.; Botezan, I.; Del Valle Gastaminza, F.; Cobo, Serrano S. "Open data as universal service, new perspectives in the information profession". Procedia - social and behavioral sciences, (147): 126-132. 2014.

Simon, M.; Plummer, S.; Fierens, F.; Hoelzemann, J.J.; Arino, O. "Burnt area detection at global scale using ATSR-2: the GLOBSCAR products and their qualification". Journal of Geophysical Research: Atmosphere 109 (D14), S02. 2004.

Singh, P. K.; Suyash, K.; Singh, U. C. "Groundwater resource evaluation in the gwalior area, india, using satellite data: An integrated geomorphological and geophysical approach". Hydrogeology Journal, 19(7): 1421-1429. doi:10.1007/s10040-011-0758-6. 2011.

Skirvin, D. J. "Modelling plant canopies for biocontrol and biodiversity". Pages 253-264 in J. Vos, L. F. M. Marcelis, P. H. B. DeVisser, P. C. Struik, and J. B. Evers, editors. Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production. 2007.

Skolnick M. I. "Introduction to radar systems". Mc Graw-Hill Book Company, 1980.

Slater, P. N.; Biggar, S. F.; Holm, R. G.; Jackson, R. D.; Mao, Y.; Moran, M. S.; Yuan, B. "Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors". Remote Sens. Environ., 22(1), 11-37. 1987.

Slater, P. N.; Biggar, S.F. "Suggestions for radiometric calibration coefficients generation". J. Atmos. Oceanic Technol. Vol. 13: 386-382. 1996.

Smith, A. M. S.; Wooster, M. J. "Remote classification of head and backfire types from Modis fire radiative power observations". International Journal of Wildland Fire 14: 249-254. 2005.

Smith, A. M. S.; Wooster, M. J.; Drake, N. A.; Dipotso, F. M.; Falkowski, M. J.; Hudak, A. T. "Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African savanna environments". Remote Sensing of Environment 97: 92-115. 2005.

Soares, P.; Nascimento, L. "Spatial analysis of hospitalization for heart diseases in Vale do Paraíba". Arquivos Brasileiros de Cardiologia, 94(6): 747-53. 2010.

Sobrino, J. A.; Franch, B.; Mattar, C.; Jiménez-Muñoz, J. C. and Corbari, C. "A method to estimate soil moisture from Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) and ASTER data: application to SEN2FLEX and SEN3EXP campaigns". Remote Sensing of Environment. 117: 415-428. 2012.

Sobrino, J. A.; Jiménez-Muñoz, J. C.; Soria, G.; Romaguera, M.; Guanter, L.; Moreno, J.; Plaza, A.; Martínez, P. "Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(2): 316-327. 2008.

Sohl, T. L.; Claggett, P. R. "Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool fordecision-makers". Journal of Environmental Management, 129: 235-243. 2013.

Solberg, S. "Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables". International Journal of Remote Sensing 31: 1227-1244. 2010.

Solberg, S.; Brunner, A.; Hanssen, K. H.; Lange, H.; Næsset, E.; Rautiainen, M.; Stenberg, P. "Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning". Remote Sensing of Environment, 113: 2317-2327. 2009.

Song, C.; Woodcock, C. E.; Seto, K. C.; Lenney, M. P.; Macomber, S. A. "Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?". Remote Sensing of Environment, 75(2): 230-244. 2001.

Souza, A. A.; Galvão, L. S.; Santos, J. R. "Relationships between Hyperion-derived vegetation indices, biophysical parameters, and elevation data in a Brazilian Savannah Environment". Remote Sensing Letters, 1: 55-64. 2010.

Spiegel, M. "Improvement of interior and exterior orientation of the three-line camera HRSC with a simultaneous adjustment". The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI- 3/W49B: 161-166. 2007.

St. Amand, A. "Identification of Slums in Mumbai, India: Unsupervised Classification Techniques". Thinking Matters. Paper 20. 2014.

Stancalie, G.; Nertan, A. "Possibilities of deriving crop evapotranspiration from satellite data with the integration with other sources of information, evapotranspiration - remote sensing and modeling". Dr. Ayse Irmak (Ed.), In Tech, DOI: 10.5772/23635. Available from: http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and- modeling/possibilities-of-deriving-crop-evapotranspiration-from-satellite-data- with-the-integration-with-othe. 2012.

Stange, H.; Bothe, S. "Reality monitoring". Crisis Prevention, 2(1): 25-27. 2013.

Starek, M.; Luzum, B.; Kumar, R.; Slatton, K. "Normalizing LiDAR intensities". Rep_2006-12-001, Geosensing Engineering and Mapping (GEM), Civil and Coastal Engineering Department, University of Florida. 2006.

Steege, H. T. "WinPhot 5: a programme to analyze vegetation indices, light and light quality from hemispherical photograps". In T. G. P. Tropenbos Guyana Reports 95-2, Georgetown Guyana, editor., http://testweb.science.uu.nl/Amazon/winphot/wp_index.htm. 1996.

Steiniger, S.; Hunter A. "The 2012 free and open source GIS software map-A guide to facilitate research, development, and adoption". Computers, Environment and Urban Systems, 39: 136-150. 2013.

Sterckx, S.; Benhadj, I.; Duhoux, G.; Livens, S.; Dierckx, W.; Goor, E.; Adriaensen, S.; Heyns, W.; Van Hoof, K.; Strackx, G.; Nackaerts, K.; Reusen, I.; Van Achteren, T.; Dries, J.; Van Roey, T.; Mellab, K.; Duca, R.; Zender, J. "The PROBA-V mission: image processing and calibration". Int. J. Remote Sens., 35: 7, 2565-2588, DOI: 10.1080/01431161.2014.883094. 2014.

Sterckx, S.; Livens, S.; Adriaensen, S. "Rayleigh, deep convective clouds, and cross-sensor desert vicarious calibration validation for the PROBA-V -mission". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 51, Issue 3: 1437-1452. Doi:10.1109/TGRS.2012.2236682. 2013.

Stettner, R. "Compact 3D flash LiDAR video cameras and applications". In: Turner M., Kamerman G. (eds.), Proc. SPIE 7684, Laser Radar Technology and Applications XV, 8 p. 2010.

Stocks, B. J.; Van Wilgen, B. W.; Trollope, W. S. W.; McRae, D. J.; Mason, J. A.; Weirich, F.; Potgeiter, A. L. F. "Fuels and fire behavior on large- scale savanna fires in Kruger National Park, South Africa". Journal of Geophysical Research, 101: 23 541-23 550. 1996.

Stone, T.; Kieffer, H.; Becker, K. "Modelling the radiance of moon for on-orbit calibration". Proc SPIE 5151: 463-470. 2003.

Stone, T.; Morfitt, R.; Stensaas, G. "USGS Agency Report to GSICS". GSICS GRWG/GDWG Meeting, Madison, March 20, 2017.

Stoter, J.; Post, M.; Van Altena, V.; Nijhuis, R.; Bruns, B. "Fully automated generalization of a 1: 50k map from 1: 10k data". Cartography and Geographic Information Science, 41(1): 1-13. 2014.

Stow, D. A.; Hope, A.; McGuire, D.; Verbyla, D.; Gamon, J.; Huemmrich, F.; Myneni, R. "Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems". Remote Sensing of Environment, 89(3): 281-308. 2004.

Strahler, A. N. "Quantitative analysis of watershed geomorphology". Transactions of the American Geophysical Union, 38: 913-920. 1957.

Strecha, C.; Pylvänäinen, T.; Fua, P. "Dynamic and scalable large-scale image reconstruction". IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 358-365. 2010.

Streutker, D. R.; Glenn, N. F. "LiDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights". Remote Sensing of Environment, 102:135-145. 2006.

Sui, D.; Elwood, S.; Goodchild, M. (eds.). "Crowdsourcing geographic knowledge, volunteered geographic knowledge in theory and practice". Springer, Berlin. 2013.

Suresh, S. "Global challenges need global solutions". Nature, (490) 8: 337-338. 2012.

Swain, N.; Latu, K.; Christensen, S.; Jones, N.; Nelson, J.; Ames D.; Williams G. "A review of open source software solutions for developing water resources web applications". Environmental Modelling & Software, 67: 108-117. 2015.

Swatantran, A.; Tang, H.; Barrett, T.; DeCola, P.; Dubayah, R. "Rapid, High resolution forest structure and terrain mapping over large areas using single photon LiDAR". Sci. Rep., 6. 2016.

Sweet, S. A.; Grace-Martin, K. "Data Analysis with SPSS: A First Course in Applied Statistics Pearson". 2011.

Tan, B.; Masek, J. G.; Wolfe, R.; Gao, F.; Huang, C.; Vermote, E. F.; Ederer, G. "Improved forest change detection with terrain illumination corrected Landsat images". Remote Sensing of Environment, 136: 469-483. 2013.

Tansey, K.; Beston, J.; Hoscilo, A.; Page, S. E.; Hernandez, C. U. P. "Relationship between MODIS fire hotspot count and burned area in a degraded tropical peat swamp forest in Central Kalimantan Indonesia". Journal of Geophysical Research: Atmosphere 113 (D23), D23112. 2008a.

Tansey, K.; Grégoire, J. M.; Stroppiana, D.; Sousa, A.; Silva, J.; Pereira, J. M. C.; Boschetti, L.; Maggi, M.; Brivio, P. A.; Fraser, R.; Flasse, S.; Ershov, D.; Binaghi, E.; Graetz, D.; Peduzzi, P. "Vegetation burning in the year 2000: global burned area estimates from SPOT VEGETATION data". Journal of Geophysical Research, 109, 22. 2004.

Tansey, K.; Jean-Marie, G.; Defourny, P.; Leigh, R.; Pekel, J. F.; Van Bogaert, E.; Bartholomé, E. "A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution". Geophysical Research Letters 35 (1), GL031567. 2008b.

Tansock, J.; Bancroft, D.; Butler, J.; Cao, C.; Datla, R.; Hansen, S.; Helder, D.; Kacker, R.; Latvakoski, H.; Mlynczak, M.; Murdock, T.; Peterson, J.; Pollock, D.; Russell, R.; Scott, D.; Seamons, J.; Stone, T.; Thurgood, A.; Williams, R.; Xiong, X.; Yoon, H. "Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing". National Institute of Standards and Technology y U.S. Department of Commerce. En: http://dx.doi.org/10.6028/NIST.HB.157. 2015.

Tasumi, M.; Allen, R. G.; Trezza, R.; Wright, J. L. "Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131:94-109. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(94). 2005.

Teillet, P.; Barker, J.; Markham, B.; Irish, R.; Fedosejevs, G.; Storey, J. "Radiometric cross calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets". Remote Sens. Environ., 2001: 78, 39-54.

Teillet, P.; Guindon, B.; Goodenough, D. G. "On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data". Canadian Journal of Remote Sensing, 8(2): 84-106. 1982.

Teillet, P.; Fedosejevs, G.; Thome, K.; Barker, J. "Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross calibration between satellite sensors in the solar- reflective spectral domain". Remote Sens. Environ., 110: 393-409. 2007.

Thiemann, F.; Werder, S.; Globig, T.; Sester, M. "Investigations into partitioning of generalization processes in a distributed processing framework". Dresden, Germany, (26th International Cartographic Conference). 2013.

Thomas, V.; Noland, T.; Treitz, P.; McCaughey, J. H. "Leaf area and clumping indices for a boreal mixed-wood forest: LiDAR, hyperspectral, and Landsat models". International Journal of Remote Sensing, 32: 8271-8297. 2011.

Thome, K. "Sampling and uncertainty issues in trending reflectance-based vicarious calibration results". Proc. SPIE 5882, Earth Observing Systems X, August 22, San Diego. 1-11. 2005.

Thome, K. J. "Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance- based method". Remote Sens. Environ., 78: 27-38. 2001.

Thome, K. J.; LaMarr, J. H.; Biggar, S. F.; Lopez, A. S. "Ground-reference calibration of Landsat-7 ETM+". Proc. of SPIE, Vol. 3870: 234-242. 1999.

Thome, K.; Markham, B.; Barker, J.; Slater, P.; Biggar, S. "Radiometric calibration of Landsat". Photogramm. Eng. Remote Sens., 63 (7): 853-858. 1997.

Thome, K.; McCorkel, J.; Czapla-Myers, J. "In-situ transfer standard and coincident-view intercomparisons for sensor cross-calibration". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol. 51, Issue 3: 1088-1097. doi: 10.1109/TGRS.2013.2243841. 2013.

Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D. "Probabilistic robotics". The MIT Press, Cambridge, MA. 2005.

Ti, P.; Li, Z. "Generation of schematic network maps with automated detection and enlargement of congested áreas". International Journal of Geographical Information Science, 28(3): 521-540. 2014.

Toniol, A. C.; Galvão, L. S.; Ponzoni, F. J.; Sano, E. E.; Amore, D. J. "Potential of hyperspectral metrics and classifiers for mapping Brazilian savannas in the rainy and dry seasons". Remote Sensing Applications: Society and Environment, 8: 20-29. 2017.

Tournaire, O.; Brédif, M.; Boldo, D.; Durupt, M. "An efficient stochastic approach for building footprint extraction from digital elevation models". ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing, 65(4): 317-327. 2010.

Townes, L. R.; Mwandama, D.; Mathanga, D. P.; Wilson, M. L. "Elevated dry-season malaria prevalence associated with fine-scale spatial patterns of environmental risk: a case-control study of children in rural Malawi". Malaria J, 12: 1475-2875. 2013.

Tran, A.; Sudre, B.; Paz, S.; Rossi, M.; Desbrosse, A.; Chevalier, V.; Semenza, J. C. "Environmental predictors of West Nile fever risk in Europe". Int J Health Geogr, 13: 13-26. 2014.

Tribble, A. C.; Gorney, D. J.; Blake, J. B.; Koons, H. C.; Schulz, M.; Vampola, A. L.; Walterscheid, R. L.; Wertz, J. R. "The Space Environment and Survivability. In Space Mission Analysis and Design". 3rd Ed.; Larson, W., Wertz, J., Eds.; Space Technology Library, Microcosm Press and Kluwer Academic Publishers: El Segundo, CA, USA; Dordrecht, The Netherlands. 203-240. 2005.

Trinder, J.; Fritz, L. "Historical development of ISPRS, in advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Taylor & Francis, London, 3-13. 2008.

Tronin, A.; Hayakawa, M.; Molchanov, O. "Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China", Journal of Geodynamics, Vol. Nº 33: 519-534. 2007.

Tucker, C. J. "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation". Remote sensing of Environment, 8(2): 127-150. 1979.

Ulaby, F. T.; Moore, R. K.; Fung, A. K. "Microwave remote sensing: Active, passive Vol III: From theory to applications". Dedham, MA: Artech House. 1100 p. 1986.

UN-GGIM. "United Nations Global Geospatial Information Management: Future trends in geospatial information management - the five to ten-year visión". New York, ISBN: 978-0-319-08792-3. 2013.

University of Kentucky Analytics & Technologies. "High performance computing hardware". University of Kentucky. 2017.

USGS, URL (http://www.usgs.gov). 2017.

USGS. Earth Explorer US Geological Service. Disponible en URL (https://landsat.usgs.gov/Landsat8_UsingProduct.php). 2016.

Vallet, B.; Brédif, M.; Serra, A.; Marcotegui, B.; Paparoditis, N. "TerraMobilita/iQmulus Urban Point Cloud Analysis Benchmark". Computers & Graphics, 49(6): 126-133. 2015.

Van de Weghe, N.; De Roo, B.; Qiang, Y.; Versichele, M.; Neutens, T.; De Maeyer, P. "The continuous spatio-temporal model (CSTM) as an exhaustive framework for multiscale spatio-temporal analysis". International Journal of Geographical Information Science, 28(5): 1047-1060. 2014.

Van der Zande, D.; Hoet, W.; Jonckheere, I.; Van Aardt, J.; Coppin, P. "Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure". Agricultural and Forest Meteorology, 141: 147-160. 2006.

Van Dijk, T.; Haunert, J. "Interactive focus maps using least-squares optimization". International Journal of Geographical Information Science, 28(10): 2052-2075. 2014.

Van Gasselt, S.; Nass A. "Planetary mapping - The data model's perspective and GIS framework". Planetary and Space Science, 59: 1231-1242. 2011.

Van Rheenen, S.; Watson, T.; Alexander, S.; Hill, M. "An Analysis of Spatial Clustering of Stroke Types, In-hospital Mortality, and Reported Risk Factors in Alberta, Canada, Using Geographic Information Systems". Canadian Journal of Neurological Sciences, 42(5): 299-309. 2015.

Van Wagtendonk, J. W.; Root, R. R.; Key, C. H. "Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity". Remote Sensing of Environment. Vol. 92(3), 397-408. 2004.

Vauhkonen, J.; Ene, L.; Gupta, S.; Heinzel, J.; Holmgren, J.; Pitkänen, J.; Solberg, S.; Wang, Y.; Weinacker, H.; Hauglin, K. M. "Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest". Forestry, cpr 051. 2011.

Vaz, E.; Aversa, J. "A Graph theory approach for geovisualization of land use change: An application to Lisbon". Journal of Spatial and Organizational Dynamics, 1(4): 254-264. 2013.

Vázquez, F. "Informe sobre el Atlas Nacional de España", presentado en el Coloquio de Geografía celebrado en Salamanca. 1965.

Veenendaal, B.; Li, S.; Dragi evi , S.; Brovelli, M. "Analytical geospatial Digital Earth". International Journal of Digital Earth, 7(4): 253-255. 2014.

Véga, C.; Durrieu, S. "Multi-level filtering segmentation to measure individual tree parameters based on Lidar data: application to a mountainous forest with heterogeneous stands". Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 13: 646-656. 2011.

Véga, C.; Hamrouni, A.; El Mokhtari, S.; Morel, J.; Bock, J.; Renaud, J. P.; Bouvier, M.; Durrieu, S. "PTrees: a point-based approach to forest tree extraction from LiDAR data". Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 33: 98-108. 2014.

Verhoef, W. "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model". Remote Sensing of Environment, 16: 125-141. 1984.

Verma, M.; Srivastava, N. "A comparative study of various clustering algorithms in data mining". International Journal of Engineering Research and Applications, 2(3): 1379-1384. Fev. 2012.

Vermote, E. F.; Kaufman, Y. J. "Absolute calibration of AVHRR visible and infrared channels using ocean and cloud views". Int. J. Remote Sens., 16: 2317-2340. 1995.

Vermote, E. F.; Saleous, N.Z. "Calibration of NOAA-16 AVHRR over a desert site using MODIS data". Remote Sens. Environ., 105: 214-220. 2006.

Vermote, E. F.; Tanré, D.; Deuzé J. L.; Herman, M.; Morcrette, J. J. "Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview". IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 35: 675-686. 1997.

Vidal, A.; Pinglo, F.; Durand, H.; Devaux-Ros, C.; Maillet, A. "Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forests from NOAA thermal IR". Remote Sensing of Environment, 49: 296-303. 1994.

Vogel, C.; Schindler, K.; Roth, S. "Piecewise rigid scene flow". International Conference on Computer Vision, 1377-1384. 2013.

VoPham, T.; Brooks, M. M.; Yuan, J. M.; Talbott, E. O.; Ruddell, D.; Hart, J. E. Chang, C. C.; Weissfeld, J. L. "Pesticide exposure and hepatocellular carcinoma risk: A case-control study using a geographic information system (GIS) to link SEER-Medicare and California pesticide data". Environ Res, 143: 68-82. 2015.

Vosselman, G. "Advanced point cloud processing". In: Fritsch (ed.), Photogrammetric Week 2009, Wichmann, Heidelberg, 137-146. 2009.

Vosselman, G. "On the estimation of planimetric offsets in laser altimetry data". International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34: 375-380. 2002.

Walter, J. M. "CIMES-FISHEYE. "Hemispherical photography of forest canopies. A package of programs for the determination of canopy geometry and solar radiation regimes through hemispherical photographs". Université de Strasbourg. France., http://jmnw.free.fr/. 2009.

Walter, J. M.; Fournier, N. R. A.; Soudani, K.; Meyer. E. "Integrating clumping effects in forest canopy structure: an assessment through hemispherical photographs". Canadian Journal of Remote Sensing, 29: 388-410. 2003.

Walker, W. S.; Stickler, C. M.; Kellndorfer, J. M.; Kirsch, K. M.; Nepstad, D. C. "Large-Area Classification and Mapping of Forest and Land Cover in the Brazilian Amazon: A Comparative Analysis of ALOS / PALSAR and Landsat Data Sources". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 3(4), 594-604. 2010.

Wang, D. D.; Morton, D.; Masek, J.; Wu, A. S.; Nagol, J.; Xiong, X. X.; Levy, R.; Vermote, E. F.; Wolfe, R. "Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series". Remote Sens. Environ., 119: 55-61. 2012.

Wang, J. R.; Schmugge, T. J. "An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content". IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 18: 288-295. 1980.

Wang, Q.; Adiku, S.; Tenhunen, J.; Granier, A. "On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site". Remote Sensing of Environment, 94: 244-255. 2005.

Wang, Y.; Weinacker, H.; Koch, B. "A LiDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest". Sensors, 8: 3938-3951. 2008.

Watson, R.; Zinyowera, M.; Moss, R.; Dokken, D. "Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad". Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Informe especial del grupo de trabajo II del IPCC. 1997.

Wei, W.; Li, X.; Zhao, C.; Qiu, G.; Zheng, X. "In-flight absolute radiometric calibration of MODIS using the irradiance-based method". Proc. SPIE 10156, Hyperspectral Remote Sensing Applications and Environmental Monitoring and Safety Testing Technology, 101561M. 2016.

Weinacker, H.; Koch, B.; Heyder, U.; Weinacker, R. "Development of filtering, segmentation and modelling modules for LiDAR and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system". ISPRS-Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., 36, W2. 2004.

Weiss, M.; Baret, F. CAN-EYE V6. 1 "User Manual". In F. N. I. of and A. R. (INRA), editors., http://www6.paca.inra.fr/can-eye/Download. 2010.

Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G. J.; Jonckheere, I.; Coppin, P. "Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling". Agricultural and Forest Meteorology 121: 37-53. 2004.

Welles, J. M.; Cohen, S. "Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation". Journal of Experimental Botany, 47: 1335-1342. 1996.

Weng, Q. "Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64: 335-344. 2009.

Whitcraft, A.; Becker-Reshef, I.; Justice, C. "A framework for defining spatially explicit earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative". Remote Sensing, 7: 1461-1481. 2015.

Wigneron, J. P.; Chanzy, A.; De Rosnay, P.; Rudiger, C. y Calvet, J. C. "Estimating the effective soil temperature at L-band as a function of soil properties". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 46(3): 797- 807. 2008.

Wigneron, J. P.; Kerr, Y.; Waldteufel, Saleh, K.; Escorihuela, M.; Richaume, P. "L- Band Microwave Emission of the Biosphere Model (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields". Remote Sensing of Environment, 107: 639-655. 2007.

Wigneron, J. P; Calvet, J. C.; de Rosnay, P.; Kerr, Y.; Waldteufel, P.; Saleh, K., Escorihuela, M.; Kruszewski, A. "Soil moisture retrievals from biangular l-band passive microwave observations". IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1(4): 277-281. 2004.

Wilson, J. W. "Analysis of the spatial distribution of foliage by two-dimensional point quadrats". New Phytologist, 58: 92-99. 1959.

Wise, S. "GIS data modelling-lessons from the analysis of DTMs". International Journal of Geographical Information Science, 14(4): 313-318. 2000.

Wojek, C.; Roth, S.; Schindler, K.; Schiele, B. "Monocular 3D scene modeling and inference: understanding multi-object traffic scenes". European Conference on Computer Vision, 467-481. 2010.

Wolf, B. M.; Heipke, C. "Automatic extraction and delineation of single trees from remote sensing data". Mach. Vis. Appl. 18, 317-330. 2007.

Wood, S. N. "Generalized additive models: an introduction with R". Boca Raton, Florida: CRC Press. 2006.

Woodcock, C. E.; Allen, R.; Anderson, M.; Belward, A. S.; Bindschadler, R.; Cohen, W. B.; Wynne, R. H. "Free access to Landsat imagery". Science (New York, N.Y.), 320(5879), 1011. 2008.

Woolliams, E.; Hunt, T.; Harrison, N.; Windsor, S.; Fox, N.; Mountford, J.; Rogers, L.; Pegrum, H. "Improved transfer standard sources for calibration of field spectrometers used for earth observation applications". Proc. 9th International Symposium on Remote Sensing, Sensors, Systems, and Next- Generation Satellites VI, Eds. Aghia Pelagia, SPIE. 386-394. Crete, Greece. 2002.

Wu, H.; Guan, X.; Gong, J. "ParaStream: a parallel streaming Delaunay triangulation algorithm for LiDAR points on multicore architectures". Comput. Geosci., 37: 1355-1363. 2011.

Wu, Q.; Lane, C.; Liu, H. "An effective method for detecting potential woodland vernal pools using high-resolution LiDAR data and aerial imagery". Remote Sensing, 6(11): 11444-11467. 2014.

Wu, S. S.; Yang, H.; Guo, F.; Han, R. M. "Spatial patterns and origins of heavy metals in Sheyang River catchment in Jiangsu, China based on geographically weighted regression". Sci Total Environ, 580: 1518-1529. 2017.

Wubuli, A.; Xue, F.; Jiang, D.; Yao, X.; Upur, H.; Wushouer, Q. "Socio-Demographic Predictors and Distribution of Pulmonary Tuberculosis (TB) in Xinjiang, China: A Spatial Analysis". PLoS One, 10. 2015.

Wyatt, C. L. "Electro-Optical System Design for Information Processing", Optical and Electro-Optical Engineering Series, McGraw-Hill, Inc., Segunda edición, 343 p. 1991.

Xiao, N.; Armstrong, M. "Towards a multiobjective view of cartographic design". Cartography and Geographic Information Science, 39(2): 76-87. 2012.

Xiao-rul, T.; Mcrae, D.; Li-fu, S.; Ming-yu, W.; Hong, L. "Satellite remote-sensing technologies used in forest fire management". Journal of Forestry Research 16, 73-78. 2005.

Xiong, B.; Jancosek, M.; Elberink, S. O.; Vosselman, G. "Flexible building primitives for 3D building modeling". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 101: 275-290. 2015.

Xiong, X.; Butler, J.; Chiang, K.; Efremova, B.; Fulbright, J.; Lei, N.; Mcintire. J.; Oudrari, H.; Sun, J.; Wang, Z.; Wu, A. "VIIRS on-orbit calibration methodology and performance". J. Geophys. Res. Atmos., 119: 5065-5078, doi: 10.1002/2013JD020423. 2014.

Xu, L.; Zhang. W. J. "Comparison of different methods for variable selection". Analytica Chimica Acta 446: 475-481. 2001.

Yamamoto, K. "LIA for Win 32 (LIA 32)". In L. o. F. E. a. Resources, G. S. o. B. Sciences, N. University, and Japan, editors., http://www.agr.nagoya-u.ac.jp/~shinkan/LIA32/index-e.html. 2004.

Yang, C.; Xu, Y.; Nebert, D. "Redefining the possibility of digital Earth and geosciences with spatial cloud computing". International Journal of Digital Earth: 6(4): 297-312. 2014.

Yang, M.; Förstner, W. "A hierarchical conditional random field model for labelling and classifying images of man-made scenes". International Conference on Computer Vision Workshops (WS04), 196-203. 2011.

Yebra, M.; Chuvieco, E. "Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: Solving the ill-posed inverse problema". Remote Sensing of Environment, 113: 2403-2411. 2009.

Yebra, M.; Dennison, P.; E., Chuvieco, E.; Riaño, D.; Zylstra, P.; Raymond Hunt Jr.; E.; Danson, F.M.; Qi, Y.; Jurdao, S. "A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products". Remote Sensing of Environment 136: 455-468. 2013.

Yeom, J. M.; Hwang, J.; Jung, J. H.; Lee, K. H.; Lee, C. S. "Initial radiometric characteristics of Kompsat-3a multispectral imagery using the 6s radiative transfer model, well-known radiometric tarps, and mfrsr measurements". Remote Sens. 9: 130. 2017.

Yokota, Y.; Matsunaga, T.; Ohtake, M.; Haruyama, J.; Nakamura, R.; Yamamoto, S.; Ogawa, Y.; Morota, T.; Honda, C.; Saiki, K.; Nagasawa, K.; Kitazato, K.; Sasaki, S.; Iwasaki, A.; Demura, H.; Hirata, N.; Hiroi, T.; Honda, R.; Iijima, Y.; Mizutani, H. "Lunar photometric properties at wavelengths 0.5-1.6 lm acquired by SELENE spectral profiler and their dependency on local albedo and latitudinal zones". Icarus, 215: 639-660. 2011.

Zarco-Tejada, P. J.; González-Dugo, V.; Berni, J. A. J. "Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera". Remote Sens. Environ., 117: 322-337. 2012.

Zavala, P. "Aplicaciones de Teledetección en el ámbito de radares (SAR)". Revista Geoexpo. Vol. III N° 7. Lima, Perú. 2005.

Zell, E.; Huff, A.; Carpenter, A.; Friedl, L. "A user-driven approach to determining critical earth observation priorities for societal benefit". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(6): 1594-1602. 2012.

Zevenbergen, L. W.; Thorne, C. R. "Quantitative analysis of land surface topography". Earth surface processes and landforms., 12: 47-56. 1978.

Zhang, L.; Thiemann, F.; Sester, M. "Integration of GPS traces with road map". Proceedings of the 2nd International Workshop on Computational Transportation Science, 17-22. 2010.

Zhang, Y.; Chen, J. M.; Miller. J. R. "Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation". Agricultural and Forest Meteorology, 133: 166-181. 2005.

Zhao, P.; Foerster, T.; Yue, P. "The geoprocessing web". Computers & Geosciences, 47: 3-12. 2012.

Zhao, Y.; Feng, D.; Yu, L.; Wang, X.; Chen, Y.; Bai, Y., Gong, P. "Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data". Remote Sensing of Environment, 183: 170-185. 2016.

Zheng, G.; Moskal, L. "Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors". Sensors, 9(4): 2719-2745. 2009.

Zhou, Q.; Li, Z. "Use of artificial neural networks for selective omission in updating road networks". The Cartographic Journal, 51(1): 38-51. 2014.

Zhou, X.; Chen, J.; Zhan, B.; Li, Z.; Madden, M.; Zhao, R.; Liu, W. "A Euler number-based topological computation model for land parcel database updating". International Journal of Geographical Information Science, 27(10): 1983-2005. 2013.

Zhu, X.; Bamler, R. "Super-resolution power and robustness of compressive sensing for spectral estimation with application to spaceborne tomographic SAR". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(1): 247-258. 2012.

Zhu, Z.; Wang, S.; Woodcock, C. E. "Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images". Remote Sensing of Environment, 144: 152-171. Nov. 2015.

Zia, M. Z.; Stark, M.; Schiele, B.; Schindler, K. "Detailed 3D representation for object recognition and modeling". IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence, 35(11): 2608-2623. 2013.

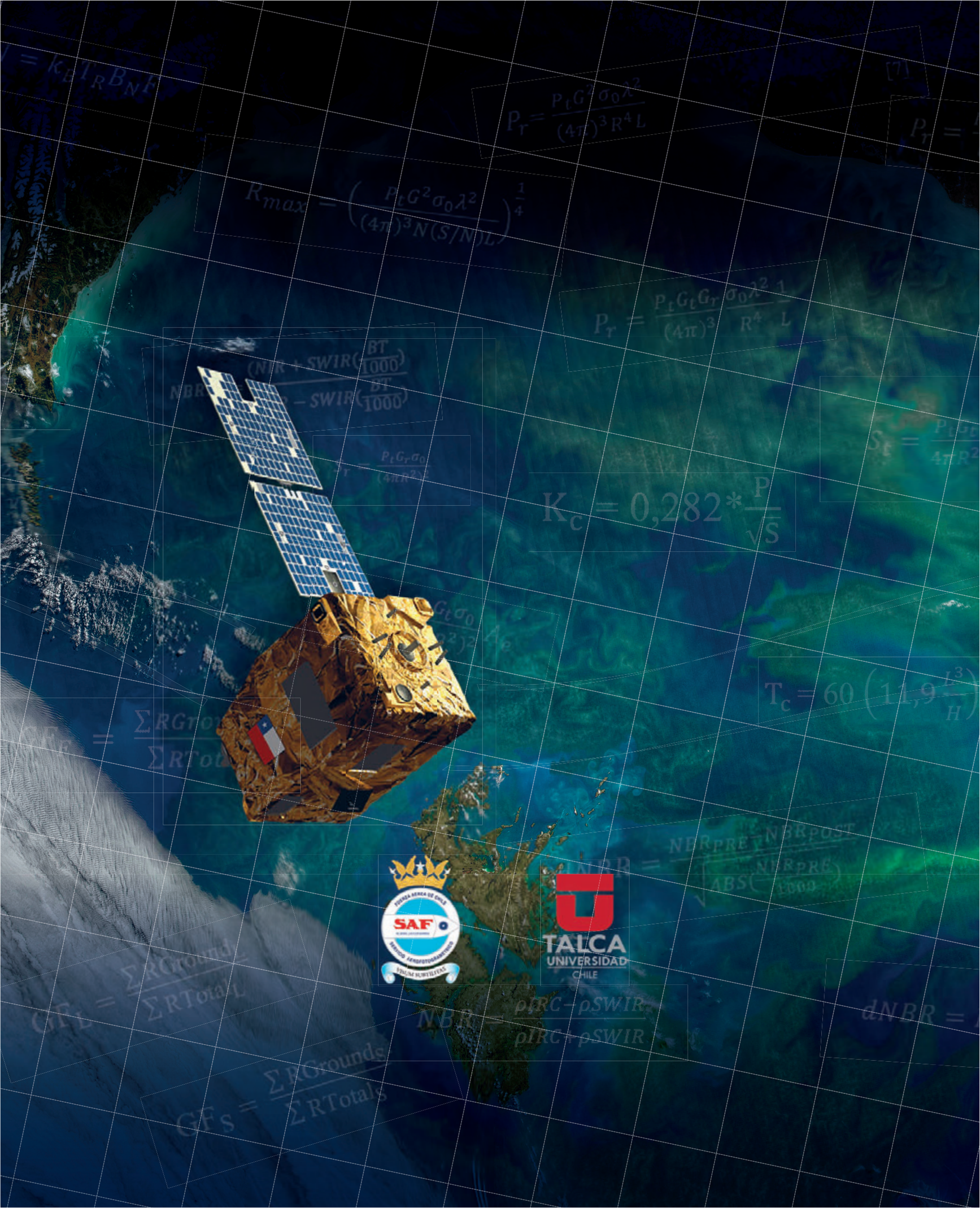
Zibordi, G.; Mélin, F. "An evaluation of marine regions relevant for ocean color system vicarious calibration". Remote Sens. Environ., 190: 122-136. 2017.

Zibordi, G.; Mélin, F.; Voss, K. J.; Johnson, B. C.; Franz, B. A.; Kwiatkowska, E.; Huot, J. P.; Wang, M.; Antoine, D. "System vicarious calibration for ocean color climate change applications: requirements for in situ data". Remote Sens. Environ. 159: 361-369. 2015.

Zink, M.; Bachmann, M.; Bräutigam, B.; Fritz, T.; Hajnsek, I.; Krieger, G.; Moreira, A.; Wessel, B. "TanDEM-X: The new global DEM takes shape". IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2(2): 8-23. 2014.






SAF
TALCA
UNIVERSIDAD
CHILE