Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

Efecto del tipo de suelo y estacionalidad en el madereo terrestre mecanizado en el Centro – Sur de Chile

Patrocinante: Sr. Marco Contreras

Trabajo de tesina presentado como parte
de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero Forestal

SEBASTIÁN IGNACIO AGUILAR VÁSQUEZ

VALDIVIA
2025

Índice de materias Página

i	Calificación del Comité de Titulación	i
ii	Agradecimientos	ii
iii	Dedicatoria	iii
iv	Resumen	iv
1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESTADO DEL ARTE	2
2.1	Desarrollo forestal en Chile	2
2.2	Madereo con sistema terrestre	3
2.3	Efecto del tipo de suelo	4
2.4	Efecto de la estacionalidad	6
3	MÉTODOS	7
3.1	Área de estudio	7
3.2	Obtención de datos	8
3.2.1	GNSS	8
3.2.2	Cámaras, GPS y sensores de inclinación	9
3.3	Análisis de datos	10
3.3.1	Cálculo de la distancia de madereo y pendiente	12
3.4	Modelación estadística	13
3.4.1	Análisis de varianza y matriz de correlación	13
3.4.2	Análisis descriptivo	13
3.4.3	Modelación	14
3.4.4	Comparación de productividad entre tipo de suelo	14
4	RESULTADOS PRELIMINARES	15
4.1	Análisis de varianza y matriz de correlación	15
4.2	Análisis descriptivo	17
4.3	Modelos de tiempos de ciclos de madereo	19
5	CONCLUSIONES	26
6	REFERENCIAS	27
Anexos	1 Características generales de los 15 predios de acuerdo con cada estación.	
	2 Estadística descriptiva estación de invierno.	
	3 Estadística descriptiva estación de primavera.	
	4 Estadística descriptiva estación de verano.	

Calificación del Comité de Titulación

		Nota
Patrocinante:	Sr. Marco Contreras Salgado	__6,3____
Informante:	Sr. Rodrigo Labbé Peña	__6,3____
Informante:	Sr. Oscar Thiers Espinoza	__6,4____

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el Reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

_____

Sr. Marco Contreras S.

Agradecimientos

Quiero dar gracias a mi familia, por su apoyo incondicional en este proceso de universidad. A mis padres, por haberme formado con amor, paciencia y valores a través de su crianza. Gracias a ellos estoy cumpliendo cada meta propuesta, por sus palabras de aliento cada vez que me sentía abrumado. Sin duda han sido un pilar importante en todo este camino.

También quiero agradecer a Angie por su valiosa colaboración y apoyo como pareja en la elaboración de esta tesis, por sus consejos y guiarme muchas veces que lo requería, junto a todo el cariño entregado que hicieron que este proceso fuera mucho más llevadero.

Asimismo, deseo destacar la ayuda brindada por docentes y académicos de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. En especial al profesor Marco Contreras por su vocación como profesor e incentivarme a dar este paso, cada palabra y tiempo dedicados fueron fundamentales junto a mi comisión Rodrigo Labbé y Oscar Thiers. Agradezco su presencia, ya que sin su compromiso no hubiera logrado desarrollarme de la misma manera.

"A mis abuelos, un abrazo al cielo"

Resumen

El sector forestal en Chile es una de las principales actividades económicas del país, siendo la cosecha un proceso clave dentro de la cadena productiva. Dentro de este proceso el madereo terrestre mecanizado con skidders es una etapa fundamental ya que el mayor porcentaje del madereo en Chile se realiza bajo este sistema, cuyo rendimiento puede verse influenciado por factores como el tipo de suelo y estacionalidad. Por lo tanto, el objetivo general es evaluar el efecto del tipo de suelo y la estacionalidad en el madereo terrestre mecanizado. Con este propósito se llevaron a cabo mediciones en las regiones de Ñuble, Biobío, La Araucanía y Maule durante las estaciones de invierno, primavera y verano, considerando seis tipos de suelos. Se recolectaron datos de variables operacionales como distancia de madereo, pendiente en viaje cargado, tiempos de ciclos, velocidad y número de árboles. Se realizó un análisis estadístico, donde se utilizaron métodos de análisis descriptivo y modelos de regresión implementados con RStudio para evaluar la influencia del tipo de suelo y estacionalidad en la productividad del madereo. Los resultados preliminares indican que el tipo de suelo y estacionalidad afectan significativamente sobre las variables de distancias de madereo, pendiente en viaje cargado, tiempos de ciclos y velocidad, siendo la menor variable influyente el número de árboles. El análisis de varianza (ANOVA) identifica una variabilidad significativa en las principales variables operacionales, lo que evidencia que tanto el tipo de suelo como la estacionalidad influyen en el desempeño del madereo con skidders. Dentro de los modelos predictivos de los tiempos de ciclo se espera que este pueda incorporar estos factores dentro de una ecuación predictiva, con el fin de entregar mayor información al sector forestal para la toma de decisiones adecuadas según las condiciones de suelo y época del año.

Palabras clave: Operaciones forestales, aprovechamiento forestal, productividad, modelos predictivos, tiempo de ciclo.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento sostenible de los recursos forestales es un pilar clave en las estrategias de desarrollo económico y ambiental. Anualmente, este sector suministra varios millones de metros cúbicos de madera a diversas industrias, incluyendo la construcción, la fabricación de muebles y la producción de celulosa y papel. La mayor parte de esta madera proviene de terrenos planos con pendientes menores al 35%, donde se utiliza maquinaria moderna y especializada para optimizar las operaciones dentro del bosque.

En las actividades de cosecha, el transporte de trozas desde el bosque a los puntos de carguío es denominado madereo. Esta actividad es la que genera un mayor costo económico, debido a la necesidad de maquinaria forestal especializada, combustible y mano de obra calificada. A su vez, causa impactos ambientales negativos, como la compactación del suelo, debido al tránsito de maquinaria pesada, que altera la estructura del suelo y puede provocar erosión.

La mecanización de la cosecha forestal ha mejorado la productividad, reduciendo los costos operativos. En este contexto, los equipos como los skidders permiten realizar tareas complejas de manera eficiente, incluso en condiciones adversas. Estas máquinas no solo reducen el tiempo de cosecha, sino que también reducen la necesidad de mano de obra, lo que disminuye los costos operativos. Además, contribuyen a mejorar la seguridad de los trabajadores al minimizar su exposición a riesgos en terreno.

Por otro lado, existen avances en las maquinarias de madereo como la mayor flotación de equipos y mejoras en la estructura, que han permitido mejorar significativamente la productividad de las operaciones, sin embargo, estas operaciones no están exentas de desafíos, especialmente al considerar las características del suelo y las variaciones estacionales. Tales factores como el tipo de suelo y el contenido de humedad influyen en la productividad y sostenibilidad de la actividad de madereo.

La estacionalidad genera variaciones significativas en las condiciones del suelo, principalmente en la humedad, que afecta la tracción de los equipos y la estabilidad operativa. En el caso de las estaciones húmedas, como el invierno, el suelo suele estar saturado, lo que disminuye la tracción de la maquinaria y aumenta la compactación, reduciendo la capacidad productiva del suelo. En contraste, durante las estaciones secas, como el verano, las condiciones del suelo suelen ser más favorables para el tránsito de maquinaria pesada, aunque la productividad igual depende de la pendiente del terreno.

El presente estudio busca evaluar cómo los diferentes tipos de suelos en la región centro-sur de Chile influyen en la productividad de las operaciones terrestres mecanizadas, específicamente en los ciclos de madereo. Esta actividad es fundamental en la cosecha forestal y está vinculada a las características físicas del suelo, que determinan la capacidad de carga y la resistencia al tráfico de maquinaria pesada.

Además, se busca analizar el efecto de las estacionalidades (invierno, primavera y verano) sobre las operaciones en plantaciones de especies exóticas como *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp*., que representan una parte importante de la industria forestal en Chile. Las condiciones climáticas estacionales generan variaciones significativas en el contenido de humedad del suelo, afectando tanto la tracción de los equipos como los tiempos de ciclo y la eficiencia operativa.

En este contexto, el objetivo general de este estudio es evaluar el efecto del tipo de suelo y la estacionalidad en el madereo terrestre mecanizado. Para ello se plantea la siguiente hipótesis: "Las características del suelo, como tipo y contenido de humedad, afectan la productividad del madereo en operaciones terrestres mecanizadas de cosecha, en términos de tiempo de ciclo". Esta información permitirá aumentar la productividad de madereo y minimizaran los impactos ambientales asociados al tráfico de maquinaria. Se plantean los siguientes objetivos específicos:

i. Caracterizar los tiempos de ciclo promedio para madereo con skidder y evaluar diferencias en seis tipos de suelo en tres temporadas (invierno, primavera y verano).
ii. Desarrollar modelos predictivos de tiempos de ciclo para madereo con skidder en función de las características del tipo de suelo.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Desarrollo forestal en Chile

Con el fin de aumentar el desarrollo forestal en Chile es que nace el decreto de ley 701 en 1974, el cual consistía en bonificación para forestación en suelos de aptitud preferentemente forestal. Este incentivo tuvo una duración de 38 años llegando a su expiración en el año 2012 (CONAF 2025). Como resultado el sector forestal en Chile ha experimentado un desarrollo significativo, consolidándose como una de las principales actividades económicas del país. Este crecimiento se ha basado en la expansión de plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata* (54.62%) y *Eucalyptus spp*. (37.42%). La

superficie plantada se ha ampliado de 300.000 hectáreas en 1970 a más de 2,2 millones de ha en 2024 (INFOR 2024). El consumo actual de trozas de la industria es de 39.948.347 m^3ssc.

Siendo las principales regiones con actividad forestal el Maule, Ñuble, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, donde las condiciones climáticas y edáficas favorecen el crecimiento de especies forestales. La industria se compone tanto de grandes empresas como Arauco y CMPC, como de pequeños y medianos productores, que en conjunto conforman una estructura productiva diversificada y competitiva a nivel internacional (CONAF 2025).

2.2 Madereo con sistema terrestre

Los sistemas de cosecha se clasifican de acuerdo con el tipo de maquinaria usada para el madereo, principalmente porque es la actividad de mayor costo de la cosecha y la que genera mayor impacto en el suelo. Tradicionalmente, en terrenos con pendientes menores a 35%, se utilizan sistemas terrestres como animales, tractores agrícolas y tractores forestales (skidders y forwarders). (Carey *et al.* 2007). Sin embargo, los sistemas de madereo con animales y tractores acondicionados son muy poco comunes, y la mayoría de las empresas utilizan tractores forestales (González 2021).

Los sistemas de madereo terrestre se pueden clasificar en manuales, animales y mecanizados. El uso del madereo manual y animal, posee bajos costos y genera menores daños ambientales en comparación con el mecanizado. En el madereo con animales, el más común es la yunta de bueyes en operaciones de pequeña escala y de madera delgada, pudiendo arrastrar generalmente árboles trozados en terrenos con pendientes hasta 40% a favor. Este sistema se suele utilizar en lugares poco accesibles o en unidades de corta pequeñas (Carey *et al*. 2018).

El madereo terrestre mecanizado posee mayores costos que el madereo manual y animal, pero a la vez es el que genera una mayor productividad, sin embargo, los impactos ambientales también se ven aumentados (Weaver *et al*. 2014). En la actualidad este tipo de madereo es el más empleado en operaciones a gran escala.

Generalmente los equipos utilizados para el sistema terrestre mecanizado son los tractores forestales que están específicamente diseñados para el trabajo en el bosque y que poseen accesorios que facilitan la cosecha como la garra, huinche, arco, catargo (sulky), carro y el chasis articulado (Gayoso y

Gayoso 2009). Algunas de las partes más relevantes de un tractor forestal son el chasis y los brazos, estos últimos pueden ser de arco simple (movimiento arriba y abajo), arco doble (movimiento arriba, abajo, adelante y atrás) y brazo oscilante (Neuenschwander 2001). Por su parte, el chasis puede estar montado sobre ruedas u orugas, en donde la diferencia en términos de impactos al suelo es que aquellos que poseen un tren de rodado de oruga ejercen una menor presión en el suelo, reduciendo la formación de huellas profundas, pero a su vez tienen un costo más elevado (Neuenschwander 2001).

Adicionalmente, los tipos de tractores forestales corresponden a los de arrastre (skidder winche o garra), arrastrador articulado con soporte y grúa (clambunk skidder), y tractor autocargable con carro o transportador con grúa (forwarder). Siendo el skidder el equipo terrestre de uso más común con un peso de 11 a 21 toneladas, que arrastra los trozos detrás de el mientras sostiene un extremo de la troza levantado del suelo. (Gayoso y Gayoso 2009).

En menor medida son utilizados los tractores agrícolas modificados para el madereo, dado que poseen una capacidad de carga limitada, con poca maniobrabilidad e inestables en terrenos con pendientes, aunque son una buena opción para pequeños y medianos productores por su relativa baja inversión (Gayoso y Gayoso 2009). Por otra parte, los tractores de la construcción no están diseñados para arrastrar trozas, pero ocasionalmente son utilizados con este fin, aunque son lentos, de baja productividad y altos costos de madereo (Pinard *et al.* 1995).

2.3 Efecto de tipos de suelo

El tipo de suelo es un factor determinante en las operaciones de madereo terrestre debido a su influencia en la tracción de la maquinaria, la compactación del terreno y la productividad de las labores forestales. Dependiendo de sus propiedades físicas y químicas, los suelos presentan diferentes niveles de resistencia al tráfico de maquinaria, lo que afecta tanto los tiempos de ciclo como el volumen transportado.

La susceptibilidad de los suelos a la erosión varía en función de su textura y estructura. Por ejemplo, los suelos arenosos son más susceptibles a la erosión que los suelos arcillosos y los que contienen mucha materia orgánica. Esto se explica porque los dos últimos suelen formar grumos que tienen mayor grado de cohesión y resisten mejor la fuerza del impacto de las gotas de la lluvia. (Gaete y Carrasco S.f)

El suelo se compacta cuando la presión ejercida por la maquinaria excede su capacidad de soporte, lo cual puede suceder cuando una maquinaria pesada transita varias veces sobre la misma vía (Ellies *et al.* 1993), es decir, cada pasada causa una deformación adicional del suelo. El tipo de deformación (elástica o plástica) va a depender del peso de la máquina y la carga, la acumulación de pasadas sucesivas y el tipo de suelo, ya que esto último determina que tan resistente es el suelo**.**

El ahuellamiento es la consecuencia de que las maquinarias exceden la capacidad de soporte del suelo, por lo que su profundidad y extensión está ligada al peso de la maquinaria, la pendiente, el dispositivo de contacto con el suelo (presión y ancho de neumáticos u orugas), la humedad y las propiedades físicas del suelo, como la porosidad y la densidad (Bygdén *et al*. 2004).

En el estudio realizado por Gayoso (2003) los suelos rojos arcillosos derivados de materiales volcánicos se caracterizan por su alta porosidad y capacidad de retención de agua. Estas propiedades, aunque beneficiosas para el crecimiento forestal, pueden presentar desafíos durante el madereo terrestre. La alta porosidad puede conducir a una mayor deformación bajo cargas pesadas, especialmente en condiciones húmedas, afectando la tracción de la maquinaria y aumentando los tiempos de operación. En estaciones secas, la firmeza del suelo mejora, facilitando operaciones más eficientes.

Por otra parte, los suelos de sedimentos marinos suelen ser más compactos y contener mayor proporción de arcilla, lo que les confiere una menor capacidad de carga en comparación con otros tipos de suelo. Durante periodos húmedos, su alta plasticidad dificulta el movimiento de la maquinaria, incrementando los tiempos de ciclo y el riesgo de atascos. En condiciones secas, la estabilidad mejora, permitiendo operaciones más fluidas. Sin embargo, la compactación excesiva puede reducir la infiltración de agua y la aireación del suelo, afectando negativamente su recuperación post-madereo. (Gayoso e Iroumé 1995)

La cosecha forestal genera impactos permanentes en el suelo que pueden causar una merma de la productividad del sitio, y la consecuente reducción del crecimiento de las plantas con implicancias biológicas, económicas y sociales. Las alteraciones producidas por la maquinaria de madereo terrestre no se pueden eliminar, solo se pueden reducir a través de medidas preventivas y mitigatorias (Gayoso 2003).

2.4 Efectos de la estacionalidad

La estación se relaciona con el contenido de humedad y el grado de unión de las partículas del suelo, donde es más complejo realizar las cosechas en estaciones húmedas, dado que las partículas del suelo se encuentran más disgregadas (Gayoso 2003). Además, en condiciones de saturación el suelo es más propenso a la erosión, la remoción, y la compactación, producto del madereo terrestre.

El suelo se ve alterado por las presiones o cargas a las cuales haya sido sometido, por lo que cuando aumenta la intensidad de la carga histórica de un suelo, mayor es el daño acumulado, reduciéndose su volumen y afectando a distintas profundidades (Ellies *et al*. 1993). Las primeras pasadas de las maquinarias es lo que genera el mayor impacto en el suelo y aumentan la densidad aparente, sobre todo en el estrato superficial producto de la compactación y la reducción de humedad del suelo (Williamson y Nielsen 2000).

Los altos contenidos de humedad también favorecen el ahuellamiento, provocando un mayor impacto con menor tráfico (Williamson y Nielsen 2000, Naghdi *et al.* 2009). Naghdi *et al.* (2009) señalan que en un bosque de asociación *Fagus-Carpinetum* sobre un suelo franco al norte de Irán, bajo las mismas condiciones, pero con un contenido de humedad de 21%, la profundidad del surco es de 22 cm, mientras que con un contenido de humedad del 40%, el ahuellamiento alcanza una profundidad de 37 cm.

Por otra parte, la erosión que se produce en el sitio se verá agravada por la intensidad y duración de las precipitaciones especialmente en la temporada de invierno. Importancia tiene también el tipo de precipitación, el largo de la pendiente, lo escarpado que sea, la erodabilidad del suelo y la cobertura (Gayoso 2003).

De acuerdo con Ellies (1999) la magnitud del cambio es atribuible a la condición de humedad del suelo al momento de la cosecha, en suelos húmedos se espera mayores cambios que en condiciones secas. Este incremento implica un cambio en la distribución y continuidad del sistema poroso, lo cual se puede traducir en una disminución de la productividad del sitio (Ellies 1999).

Además, operaciones cada vez más intensas y el desarrollo de los grandes proyectos forestales, se han extendido hacia zonas climáticamente más lluviosas y hacia suelos de baja capacidad de soporte (Gayoso e Iroumé 1993). Es por eso, que la intensificación de las operaciones forestales, el desarrollo de éstas en épocas de mayor humedad, el aumento de la mecanización ha producido un aumento en la carga del suelo modificando sus propiedades y funciones productivas.

3. MÉTODOS

3.1 Área de estudio

Este estudio considero mediciones en 15 sitios con seis tipos de suelo y tres estaciones. Los sitios están ubicados desde la región del Maule hasta la región de la Araucanía (figura 1). Los sitios correspondieron a operaciones de cosecha terrestre mecanizada realizadas en predios pertenecientes a las empresas forestales CMPC y Arauco.

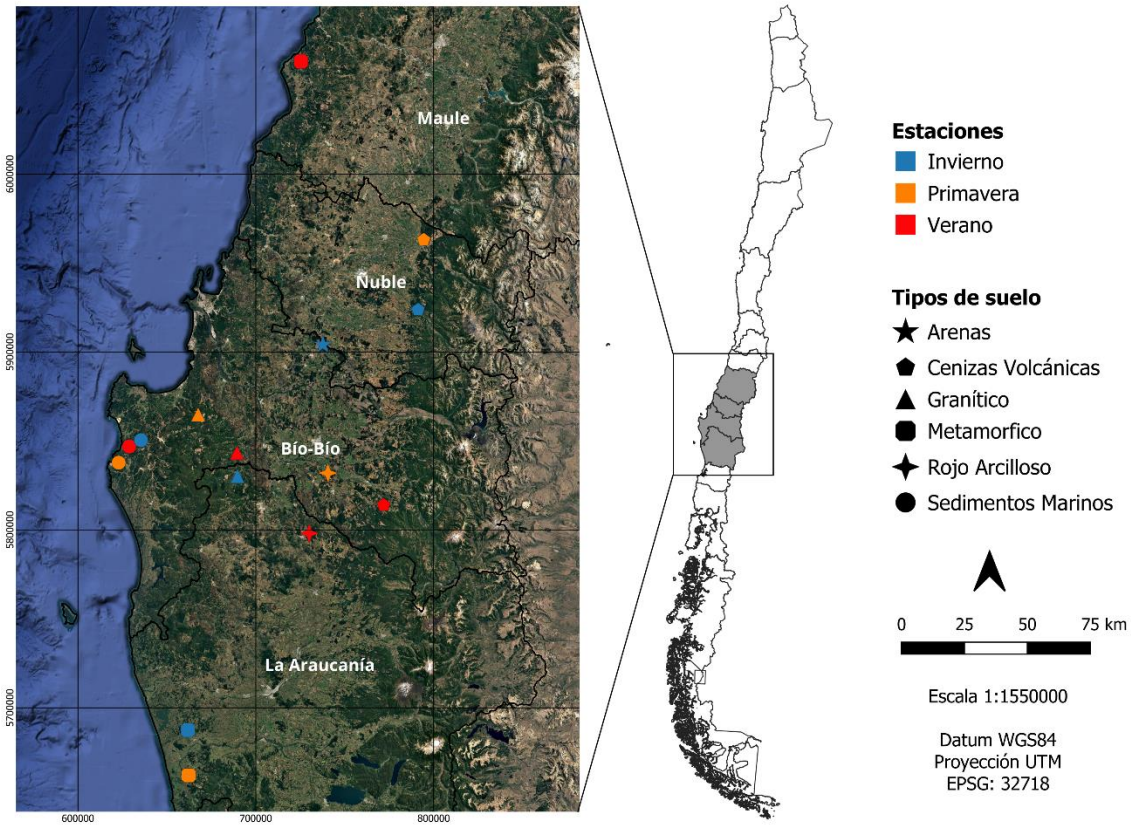

Figura 1. Ubicación de los 15 sitios de estudio (Elaboración propia).

En las estaciones de invierno, primavera y verano, se realizaron mediciones en las regiones de Ñuble, Biobío y La Araucanía, incluyendo la región del Maule en verano. La principal especie cosechada fue *Pinus radiata*, presente en diez sitios con una edad de cosecha promedio de 22 años, un volumen medio por árbol (VMA) promedio de 1.01 m^3 y la densidad promedio de plantación es de 504 arb ha^{-1}. También se encuentra *Eucalyptus spp* en cinco predios con una edad de cosecha promedio de 15 años, un VMA promedio de 0.47 m^3 y una densidad promedio de plantación de 1083 arb ha^{-1}. (anexo 1)

Entre las distintas características evaluadas, la temperatura (°C) corresponde al promedio registrado durante la ejecución del estudio, basado en el sistema hidrométrico en línea de la DGA (2023 y 2024) y en datos de Agrometeorología de INIA (2024), mientras que la precipitación (mm) representa la media anual (anexo 1). En promedio la temperatura fue de 9.2 °C en invierno, 12.8 °C en primavera y 16.2 °C en verano, mientras que la precipitación varía entre 421 mm y 1452 mm según la estación. La humedad del suelo promedio previo al madereo fue de 45.06% en invierno, 43.04% en primavera y 26.62% en verano.

3.2 Obtención de datos

El equipo utilizado para el madereo fue un skidder 6x6 equipados con garra en todos los sitios. Los modelos fueron Tigercat 625H, Tigercat 635G, John Deere 648 L-II y Caterpillar 555D con una capacidad de garra de 1.58 m^2 a 1.95 m^2.

En cuanto al volteo, este vario entre feller y shovel, la particularidad de estos equipos es que el feller posee una garra apiladora que le permite acumular árboles mientras voltea, en general 2-4 árboles de acuerdo con las características del volumen medio por árbol (VMA) de la plantación que es más provechoso en VMA menores de 1 m^3. En caso de la shovel este es un equipo que posee un brazo articulado de mayor extensión permitiendo alcanzar árboles sin la necesidad de llegar a ellos con el avance de la máquina completa y permite trabajar con árboles de mayor VMA superior a 1 m^3, ya que este no tiene la capacidad de acumular árboles, más bien es volteo de árbol individual.

3.2.1 GNSS

Para registrar el desplazamiento de la maquinaria de los equipos de volteo y madereo, se instaló un receptor GNNS submétrico marca EMLID Reach RS2. El GNSS consta de un dispositivo base – estacionario y rovers – móviles, incorporados sobre las cabinas de las máquinas (figura 2), para permitir el procesamiento PPK (Post-Processed Kinematic) que permitió obtener datos de ubicación con una precisión menor a 1 metro con una frecuencia de 1 segundo. Los datos de posiciones de las máquinas se usaron para obtener la ubicación de las pilas de árboles formadas por la maquinaria de volteo (feller, shovel) y las vías de saca seguidas por el equipo de madereo (skidder). Además, estos datos se utilizaron para recrear las vías de saca, estimar el número de pasadas del equipo de madereo en cada segmento de vía de saca, medir la distancia de madereo y pendiente de los viajes cargados y vacíos.

Figura 2. Sistema GPS GNSS sobre las cabinas de feller (izquierda) y skidder (derecha).

3.2.2 Cámaras, GPS y sensores de inclinación

En cada máquina también se instaló un sistema de monitoreo por video de cuatro cámaras para grabar las actividades que realizan las maquinarias. Estos sistemas se conectaron a la toma de corriente en la cabina de cada máquina para alimentarlos, de esta forma y mientras el tomacorriente estuvo energizado, se capturaron videos con un campo de visión que permitiera una clara visualización de la garra y de la parte trasera del skidder, además de la posición y ubicación de la máquina en el área de estudio (figura 3).

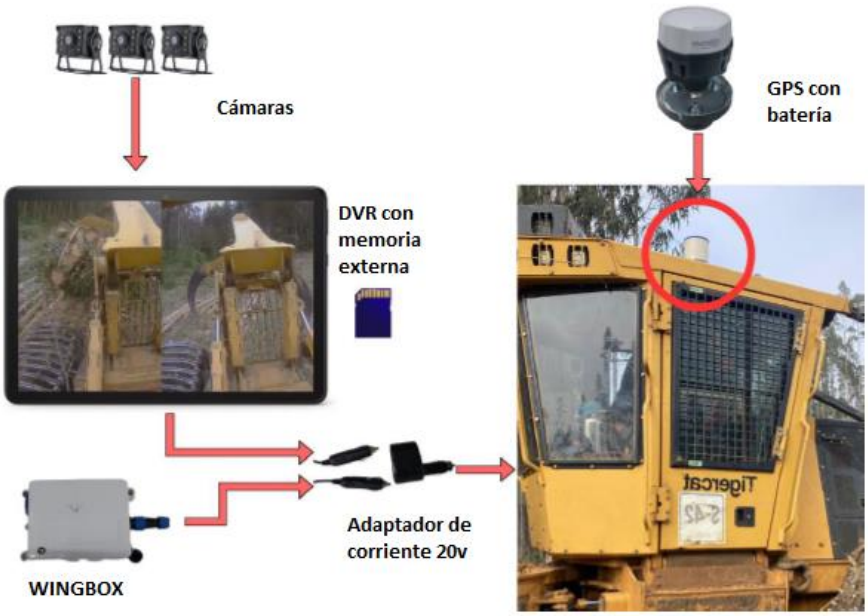

Figura 3. Proceso de instalación de cámaras y GPS.

3.3 Análisis de datos

El tiempo del ciclo de trabajo del skidder se definió considerando los siguientes elementos, tiempo total (TTotal), tiempo productivo de madereo (TCicloE) y tiempo productivo elemental (TCiclo). Donde en un ciclo típico de trabajo, el skidder viaja vacío desde la cancha o camino hacia el área de corta, gira para enganchar la troza y regresa arrastrando las trozas de vuelta a la cancha. (Gayoso y Gayoso 2009)

- Tiempo total (TTotal): considera todos los tiempos productivos y demoras del ciclo de trabajo del madereo.

- Tiempo productivo del madereo (TCicloE): excluye los tiempos de ordenación de desechos en cancha y los tiempos de demoras mecánicas y no mecánicas.

- Tiempo productivo elemental (TCiclo): sólo considera los tiempos elementales del ciclo de trabajo, incluyendo el viaje vacío (sin ordenamiento de desechos en bosque), carga (sin formación de carga), viaje cargado y descarga.

Los tiempos correspondientes a cada elemento fueron analizados mediante la revisión manual de las grabaciones en video en base a la metodología descrita en el cuadro (1). Para cada tipo de suelo, se llevaron a cabo mediciones en 50 ciclos de madereo, donde además se registró el número de árboles transportados por ciclo y se midieron los diámetros basales de estos árboles.

Cuadro 1. Descripción de elementos considerados en el estudio de los tiempos de trabajo.

Elemento	Descripción
Viaje vacío (TVVPre)	La medición del tiempo comienza cuando el Skidder deja el lugar de acopio, o libera en el bosque los desechos transportados desde la zona de acopio, y comienza a moverse sin carga por una vía de saca hasta que se detiene para iniciar la carga de una pila de árboles o gavilla.
Carga (TCPre)	La medición del tiempo comienza en el momento en que el Skidder abre la garra para cargar y termina cuando el Skidder levanta toda la carga para iniciar su traslado.
Viaje cargado (TVC)	La medición de tiempo comienza cuando el Skidder cargado se dirige desde el bosque hasta al lugar de acopio, y termina cuando el Skidder se detiene en el lugar de acopio para iniciar la descarga.
Descarga (TD)	La medición de tiempo comienza cuando el Skidder abre la garra para descargar la gavilla en el lugar de acopio y finaliza una vez que todos los árboles son descargados.
Ordenamiento de desechos en bosque (TDOD_bosque)	Tiempo en que el Skidder realiza actividades de ordenamiento de desechos en lugar en el bosque.
Formación de carga (TFC)	Tiempo en que el Skidder realiza actividades de formación de la carga. Comienza posterior al viaje vacío y previo a la carga.
Ordenamiento de carga (TOC)	La medición de tiempo comienza una vez que todos los árboles se han descargado, y termina cuando se ordena apropiadamente el último árbol en el lugar de acopio.
Ordenamiento de desechos en cancha (TDOD_cancha)	Tiempo en que el Skidder realiza actividades de ordenamiento de desechos en cancha o lugar de acopio.
Posicionamiento en cancha (TPOS_cancha)	Tiempo en que el Skidder realiza movimientos en cancha sin modificar cargas o desechos, para acomodarse y poder salir apropiadamente de la cancha o lugar de acopio.
Movimiento entre rodales (TMOV)	Tiempo de movimiento entre rodales de Skidder por falta de carga disponible para maderear en bosque.
Demoras no mecánicas (TDON)	Tiempo de demora en donde el Skidder debe esperar cargado fuera del lugar de acopio, ya que este todavía tiene madera del ciclo anterior o hay trabajo de otras máquinas en el lugar. También incluye descanso y revisión del terreno por parte del operador.
Demoras mecánicas (TDM)	Tiempo de demora por falla de la máquina, relleno de estanque, niveles de líquidos y lubricantes, o reparaciones.
Asistencia (TAS)	Tiempo de instalación o modificación de la asistencia.

3.3.1 Cálculo de la distancia de madereo y pendiente

La distancia de madereo se calculó sumando las distancias tridimensionales de las ubicaciones GNSS del Skidder durante el viaje vacío y viaje cargado en cada ciclo de trabajo. También se calculó la pendiente del viaje vacío y viaje cargado a partir de la diferencia en elevación y la distancia entre el inicio y final de cada uno de estos elementos. En cuanto a tamaño de carga, se consideraron o calcularon tres potenciales parámetros explicativos: el número de árboles madereados en cada uno de los 50 ciclos registrados; el volumen transportado, utilizando el volumen medio por árbol determinado; y el área total de árboles madereados (cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros considerados en análisis operacional de ciclos de madereo.

Variable	Unidad	Descripción
Ciclo	(-)	Número de ciclo de madereo.
TVV	(s)	Tiempo de viaje vacío
TC	(s)	Tiempo de carga
TVC	(s)	Tiempo de viaje cargado
TD	(s)	Tiempo de descarga
TOC	(s)	Tiempo de ordenamiento de la carga en zona de acopio
TFC	(s)	Tiempo de formación de carga
TDOD	(s)	Tiempo de ordenamiento de desechos
TDON	(s)	Tiempo de demoras no mecánicas
TDAS	(s)	Tiempo de instalación/reubicación de asistencia
TCiclo	(s)	Tiempo de ciclo considerando TVV. TC. TVC y TD
TCicloE	(s)	Tiempo de ciclo considerando TVV. TC. TVC. TD. TOC y TFC
Ttotal	(s)	Tiempo de ciclo considerando todos los tiempos
DVV	(m)	Distancia recorrida en viaje vacío
DVC	(m)	Distancia recorrida en viaje cargado
DOC	(m)	Distancia recorrida en ordenamiento de la carga en zona de acopio
DMAD	(m)	Distancia promedio recorrida en viajes vacío y cargado
PVV	(%)	Pendiente de viaje vacío
PVC	(%)	Pendiente de viaje cargado
PMAD	(%)	Pendiente promedio de PVV y PVC
NARB	(-)	Cantidad de árboles madereados
SAT	(m^2)	Área total de carga de árboles
VT	(m^3)	Volumen total transportado asumiendo volumen constante por árbol

3.4 Modelación estadística

3.4.1 Análisis de varianza y matriz de correlación

El análisis de varianza (ANOVA) es una técnica estadística utilizada para comparar las medias de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas. Se basa en la comparación de la variabilidad entre los grupos y dentro de los grupos para evaluar si las diferencias observadas en las medias son producto del azar o de un efecto real de las variables en estudio. (Cea 2014)

Para evaluar el efecto de los factores de suelo y temporada sobre las variables respuesta, se aplicó ANOVA. Donde se utilizó el paquete stats implementando la función aov (). Se analizaron las interacciones entre factores y se identificó la significancia estadística mediante p–valores que permitió evaluar si existen diferencias significativas en los tiempos de ciclo entre los diferentes tipos de suelo y estaciones. También se complementó con una matriz de correlación con el fin de analizar la relación entre variables cuantitativas como DMAD, PVC, TCiclo, VEL y NARB, utilizando la función cor ().

3.4.2 Análisis descriptivo

El análisis descriptivo es una técnica estadística utilizada para resumir, organizar e interpretar conjuntos de datos, proporcionando una visión general de sus características principales. Se basa en medidas como la media, mediana, moda, desviación estándar, rangos y percentiles, que permiten comprender la distribución y variabilidad de los datos.

Es por ello, que se aplicó un análisis descriptivo para evaluar los rangos de valores observados en las variables claves como la distancia de madereo (DMAD), pendiente viaje cargado (PVC) tiempo de ciclo (TCiclo), velocidad (VEL) y número de árboles (NARB). Con el fin de identificar, patrones, tendencias, anomalías y ciertas limitaciones que puedan presentar los datos para la elaboración de tiempos de ciclos.

Esto se llevó a cabo a través de RStudio con el paquete dplyr para estadística descriptiva como media, mediana, desviación estandar, mínimos y máximos, con el fin de comprender la variabilidad de los datos y ggplot2 para la visualización de datos. Se verifico la presencia de valores atípicos mediante gráficos de caja y bigotes (boxplots) y la interacción entre tipo de suelo y estacionalidad.

3.4.3 Modelación

Para la modelación de los ciclos productivos, se utilizó el programa estadístico RStudio para el lenguaje de la programación R. Esta herramienta fue elegida por su versatilidad en el análisis de datos, su capacidad para manejar grandes volúmenes de información y la disponibilidad de múltiples paquetes especializados en estadística y modelamiento.

A través de RStudio, se realizaron análisis exploratorios de los datos, pruebas estadísticas y la construcción de modelos de predictivos para evaluar la influencia del tipo de suelo y la estacionalidad en los tiempos de ciclo del madereo con skidder.

En la etapa de modelamiento predictivo de tiempos de ciclos, se desarrollaron modelos de regresión para estimar los tiempos de ciclo en función de las características del suelo y las estaciones. Se utilizo el paquete stats el cual viene por defecto y la función lm (). Para la selección de modelos y evaluación de su ajuste. Se probaron modelos evaluando su precisión con métricas como el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio cuadrático medio (RMSE).

3.4.4 Comparación de productividad entre tipo de suelo

En base a los modelos de tiempo de ciclo desarrollados para cada tipo de suelo es que se llevara a cabo una simulación de productividad. A través de esto se busca predecir los tiempos productivos esperados por cada tipo de suelo bajo diferentes condiciones estacionales, de esta forma se permitirá comparar el desempeño operativo entre tipos de suelo y dentro de cada tipo de suelo. Este análisis permitirá identificar posibles restricciones y/o limitaciones derivadas de la diferencia de distribución de datos entre los sitios de estudio y el rango de valores observados difiere entre estos.

Uno de los enfoques de este análisis será la comparación de los coeficientes asociados a la humedad del suelo dentro de los modelos ajustados. La humedad del suelo es un factor crítico en la operatividad forestal, ya que influye directamente en la resistencia mecánica del suelo, afectando el desplazamiento de la maquinaria, la compactación y la eficiencia general de las operaciones. Para evaluar este aspecto, se analizarán los coeficientes estimados en los modelos estadísticos, identificando si existen diferencias significativas en la forma en que la humedad impacta las variables operativas a lo largo de las distintas estaciones del año. De esta forma se permitirá determinar la magnitud del efecto de la humedad del suelo sobre los tiempos de ciclo y la productividad.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Análisis de varianza y matriz de correlación.

El ANOVA para el Tiempo de Ciclo (TCiclo) muestra que tanto el tipo de suelo como la estación del año tienen un efecto significativo en la duración de los ciclos operativos. El suelo presenta la mayor influencia ($F = 71.9568$, $p < 2.2e\text{-}16$), lo que indica que las características del terreno afectan directamente la eficiencia en las operaciones mecanizadas. Por otro lado, la estación también tiene un impacto significativo ($F = 7.4235$, $p = 0.00065$), sugiriendo que las condiciones estacionales modifican la duración de los ciclos. Además, la interacción suelo*estación es altamente significativa ($F = 64.8403$, $p < 2.2e\text{-}16$), lo que indica que el efecto del suelo sobre el tiempo de ciclo varía según la estación. (cuadro 3)

Cuadro 3. ANOVA sobre TCiclo (s).

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Suma de cuadrados medios	F-ratio	Pr (>F)
Suelo	2349850	5	469970	71.9568	< 2.2e-16 (***)
Estación	96970	2	48485	7.4235	0.00065 (***)
Suelo*Estación	2964431	7	423490	64.8403	<2.2e-16 (***)
Error	4637208	710	6531	-	-

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001.

El ANOVA para Velocidad (VEL) revela que la variable está fuertemente influenciada por los factores evaluados. La temporada es el factor con mayor impacto en la variación de la velocidad ($F = 185.267$, $p < 2.2e\text{-}16$), lo que sugiere que las estaciones juegan un papel clave en la eficiencia de las operaciones. Asimismo, el tipo de suelo también tiene un efecto significativo ($F = 50.760$, $p < 2.2e\text{-}16$), indicando que las características del terreno pueden afectar la velocidad de las operaciones mecanizadas. La interacción entre suelo y temporada también es altamente significativa ($F = 50.676$, $p < 2.2e\text{-}16$), lo que indica que la influencia del suelo en la velocidad varía dependiendo de la temporada. (cuadro 4)

Cuadro 4. ANOVA sobre Velocidad (m/s)**.**

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Suma de cuadrados medios	F-ratio	Pr (>F)
Suelo	16.503	5	3.3007	50.760	<2.2e-16 (***)
Estación	24.094	2	12.0468	185.267	<2.2e-16 (***)
Suelo*Estación	23.066	7	3.2952	50.676	<2.2e-16 (***)
Error	46.167	710	0.0650	-	

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001.

La matriz de correlación muestra la relación entre las variables DMAD, PVC, TCiclo, VEL y NARB indicada mediante colores, siendo azul una correlación más alta y rojo correlaciones negativas. Se observa que DMAD tiene una correlación positiva fuerte con TCiclo de 0.924, lo que indica que a medida que la distancia de madereo aumenta, el tiempo de ciclo también tiende a aumentar. Asimismo, DMAD muestra una correlación moderada con VEL de 0.527 y una correlación positiva más débil con NARB de 0.260. (cuadro 5)

Por otro lado, la PVC presenta una correlación negativa con DMAD de -0.262 y TCiclo con -0.233, sugiriendo que mayores valores de la pendiente del viaje cargado podrían estar asociados a menores distancias de madereo y tiempos de ciclos. (cuadro 5)

En general la relación más significativa se da entre DMAD y TCiclo. Mientras que la que tiene una menor influencia es NARB, mostrando correlaciones bajas con las otras variables, lo que indica que no está correlacionado con estas variables.

Cuadro 5. Matriz de correlación con las variables de interés.

Correlación	DMAD	PVC	TCiclo	VEL	NARB
DMAD	1.000	-0.262	0.924	0.527	0.260
PVC		1.000	-0.233	-0.157	0.058
TCiclo			1.000	0.217	0.250
VEL				1.000	0.169
NARB					1.000

4.2 Análisis descriptivo

La distancia de madereo (DMAD), presenta una alta variabilidad entre tipos de suelo y temporadas. En general, las mayores distancias promedio de madereo se presentan en las estaciones estivales (primavera y verano) superando los 200 m (anexos 3 y 4). El suelo rojo arcilloso presente en primavera tiene la mayor distancia promedio de madereo con 270.07 m, en contraste el suelo granítico presente en invierno tiene la menor distancia promedio de madereo con 37.45 m (anexo 2). Estas diferencias demuestran la alta variabilidad entre cada sitio relacionadas con la distribución de los rodales y las condiciones del terreno.

La pendiente del viaje cargado (PVC) es una variable que se relaciona netamente con las condiciones del terreno, más que temporada o tipo de suelo. Pero esta tiene una influencia directa en los tiempos de ciclo, dado que en suelos con PVC positiva (cenizas volcánicas y granítico en invierno), los tiempos de ciclo tienden a ser menores (124.38 s y 88.51 s, respectivamente), lo que sugiere que la maquinaria mantiene un desempeño estable en pendientes moderadas (anexo 2). En cambio, en suelos con PVC negativa (rojo arcilloso en primavera con -19.43%), los tiempos de ciclo aumentan con un 389.05 s en promedio (anexo 3), lo que indica que la pendiente descendente en el viaje cargado podría generar dificultades en el control y maniobrabilidad del equipo.

El tiempo de ciclo (TCiclo) muestra una tendencia de aumento en suelos con mayores distancias de madereo y pendiente. Los tiempos de ciclos más largos se observan en suelos rojo arcilloso y granítico durante la primavera alcanzando una media de 389.05 s y 316.81 s respectivamente (anexo 3). En contraste los menores tiempos de ciclos se encuentran en suelos de cenizas volcánicas presente en primavera con 111.25 s y granítico en invierno con 88.51 s (anexo 2).

Los datos indican que algunos sitios presentan una variabilidad considerable en los valores observados, lo que puede influir en la comparación entre estaciones y suelos. Por ejemplo, el suelo rojo arcilloso en primavera presenta una alta desviación estándar en DMAD con 193.98 m y TCiclo de 203.94 s, (anexo 3) lo que indica que la distribución de los datos es altamente dispersa.

En este sentido, dado la variabilidad de los datos en cada tipo de suelo es que los modelos productivos de sitio presentan ciertas limitaciones dado que el modelo debe ajustarse a los datos disponibles. Teniendo efecto en la estimación del coeficiente asociado a esa variable en los modelos de productividad de tiempo de ciclo.

Se observa que en invierno (I), el suelo arenales (A) presenta una mayor velocidad media en comparación con los demás tipos de suelo, mientras que granito (G) y metamórfico (M) tienen valores más bajos y una menor dispersión. En primavera (P), hay una mayor variabilidad en la velocidad, especialmente en el suelo rojo arcilloso (R), que presenta una distribución amplia con valores extremos. Por otro lado, los suelos M y sedimentos marinos (S) muestran velocidades más homogéneas y cercanas a 1 m/s. (figura 4)

En verano (V), la velocidad tiende a incrementarse en la mayoría de los tipos de suelo, destacando los suelos R y M, que presentan medianas más altas en comparación con las demás temporadas. Sin embargo, se mantiene una alta dispersión en algunos casos, lo que sugiere variaciones significativas en el desempeño de la velocidad según el tipo de suelo.

En general, el gráfico indica que tanto el tipo de suelo como la temporada influyen en la velocidad, mostrando diferencias significativas en la distribución de los datos. Además, se identifican valores atípicos (outliers), especialmente en invierno y verano, lo que sugiere que en ciertas condiciones específicas se alcanzan velocidades considerablemente diferentes al promedio.

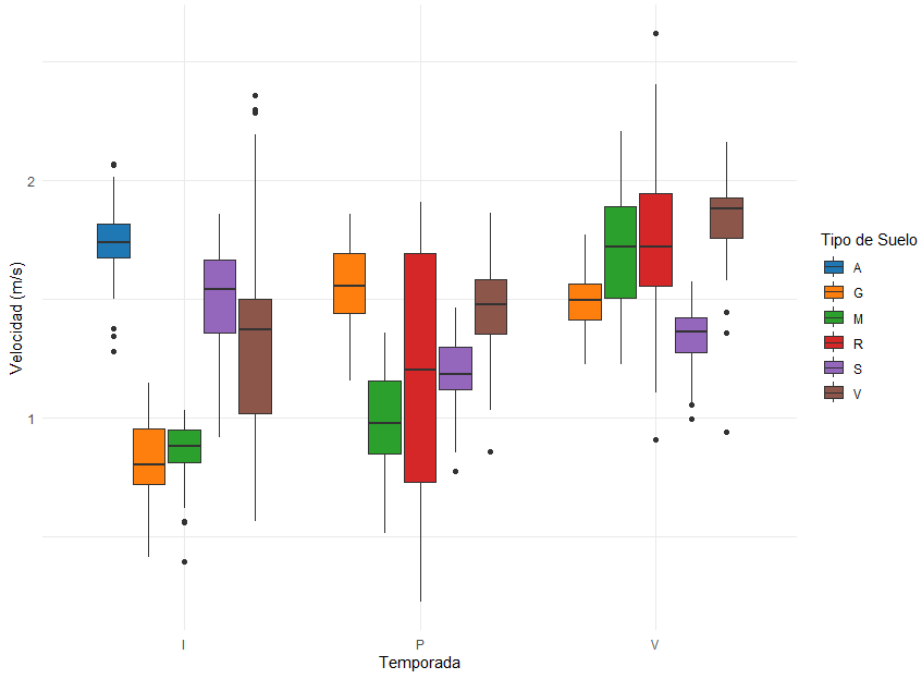

Figura 4. Caja y bigotes con la distribución de velocidad (m/s) por estación (invierno, primavera, verano) y tipo de suelo.

Se observa que en el suelo arenales (A), la velocidad en invierno es notablemente mayor en comparación con los demás suelos, con valores superiores a 2 m/s y una menor dispersión. En contraste, los suelos G y M presentan velocidades más bajas y menos variables en todas las temporadas. El suelo R muestra una gran variabilidad en primavera, con un rango amplio de velocidades, mientras que en verano la distribución es más compacta y con valores más elevados. (figura 5)

El suelo sedimentos marinos (S) presenta una menor variabilidad en comparación con otros suelos, pero se puede notar algunas diferencias entre temporadas, especialmente en invierno, donde hay una mayor dispersión de los datos. Finalmente, el suelo cenizas volcánicas (V) muestra una tendencia de mayor velocidad en verano, con valores más altos y una distribución más dispersa en comparación con invierno y primavera. (figura 5)

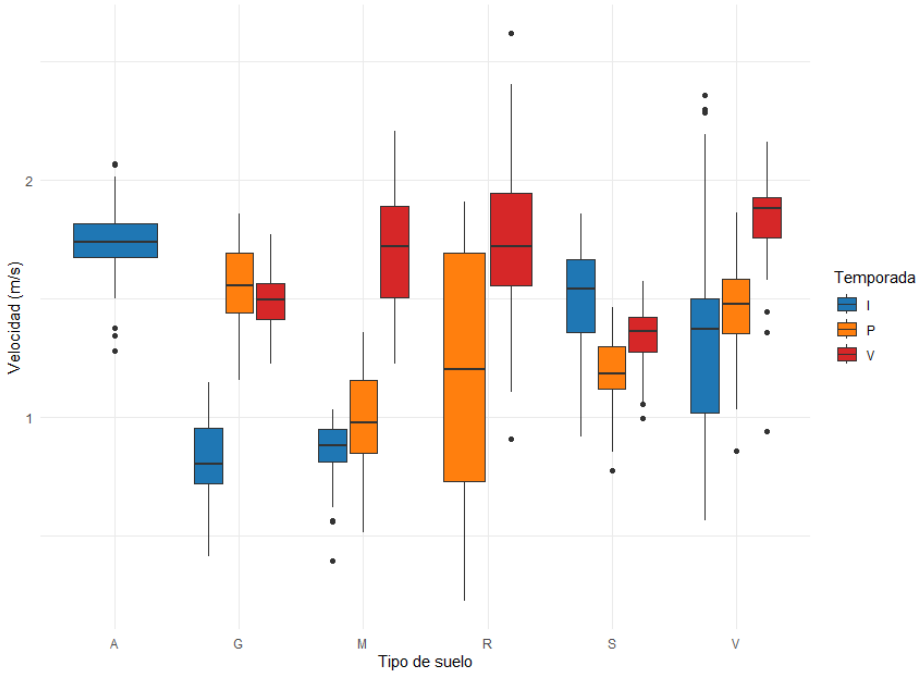

Figura 5. Caja y bigotes con la distribución de velocidad (m/s) por tipo de suelo y temporada (invierno, primavera, verano).

4.3 Modelos de tiempo de ciclos de madereo

Las variables independientes consideradas para el modelamiento del tiempo de ciclo de madereo fueron distancia de madereo (DMAD), pendiente de viaje cargado (PVC), humedad del suelo superficial (HVL) y número de árboles (NARB).

Cada modelamiento del tiempo de ciclo de madereo fueron de acuerdo con los tipos de suelo, es decir suelo rojo arcilloso, cenizas volcánicas, arenales, graníticos, sedimentos marinos y metamórfico. comprendidas en las temporadas.

- Invierno: Arenas, Cenizas volcánicas, Granítico, Metamórfico, Sedimentos marinos.
- Primavera: Cenizas volcánicas, Granítico, Metamórfico, Rojo arcilloso, Sedimentos marinos
- Verano: Cenizas volcánicas, Granítico, Metamórfico, Rojo arcilloso, Sedimentos marinos.

Para cada modelo según al tipo de suelo se presentan las covariables utilizadas en la formulación de cada ecuación en donde se describe el rango observado, tipo de coeficiente, valor de coeficiente y nivel de significancia. (cuadro 6, 7, 8, 9, 10, 11)

Modelo del suelo Arenas:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 DMAD + \beta_2 NARB$$

Cuadro 6. Valores covariables del modelo suelo arenas.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	48.4 – 265.0	-	-	-
Intercepto	-	β_0	14.32342	0.002 (**)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	40.0 – 252.1	β_1	0.92453	< 0.001 (***)
Número de árboles ($NARB$)	5 – 20	β_2	0.81125	0.038 (*)

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001

Este modelo se ajustó con datos observados de 50 ciclos de madereo (figura 6) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 354.1 y el segundo mejor modelo es 355.2. El coeficiente de determinación ajustado (R^2) es de 0.98, el error estándar de estimación es de 7.88 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 5,80 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

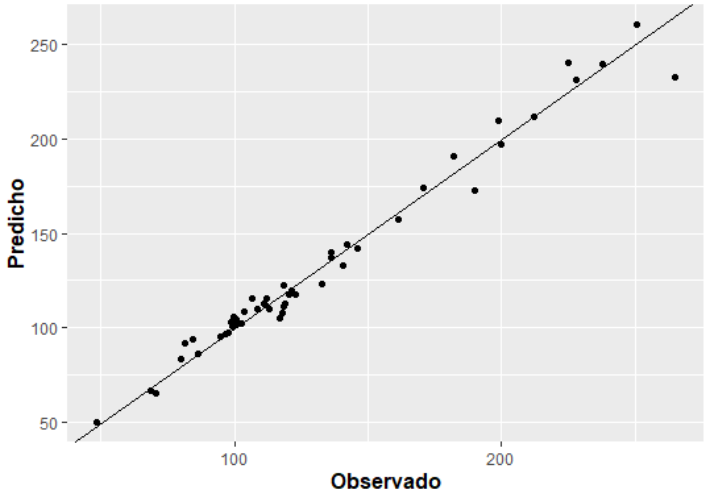

Figura 6. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en suelo de arenas.

Modelo del suelo Granítico:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 HVL + \beta_2 DMAD + \beta_3 PVC + \beta_4 NARB + \beta_5 NARB^2$$

Cuadro 7. Valores covariables del modelo suelo granítico.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	41.4 – 460.4	-	-	-
Intercepto	-	β_0	61.64605	0.0100 (*)
Humedad del suelo superficial (HVL, %)	16.9 – 38.4	β_1	-0.61091	0.0613 (+)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	15.4 – 340	β_2	1.08281	< 0.001 (***)
Pendiente viaje cargado (PVC, %)	0.3 – 15.3	β_3	1.49146	0.0424 (*)
Número de árboles ($NARB$)	2 – 7 (PR) 7 – 21 (EN)	β_4	-3.97795	0.2912 (ns)
Número de árboles al cuadrado ($NARB^2$)	-	β_5	0.33406	0.0265 (*)

(*) + = P < 0,1; * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001; ns = no significativo.

Este modelo se ajustó con datos observados de 124 ciclos de madereo (figura 7) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 1158.74 y el segundo mejor modelo es 1161.69. El coeficiente de determinación ajustado (R2) es de 0.95, el error estándar de estimación es de 24.97 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 9,14 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

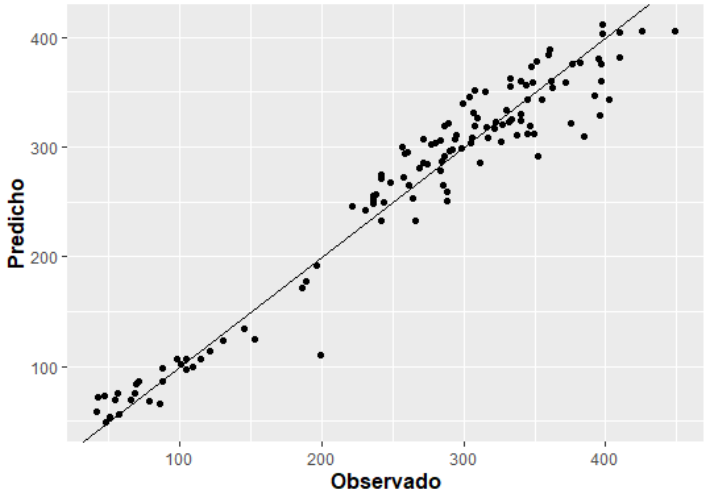

Figura 7. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en suelo granítico.

Modelo del suelo Metamórfico:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 HVL + \beta_2 DMAD + \beta_3 DMAD^2 + \beta_4 PVC + \beta_5 NARB$$

Cuadro 8. Valores covariables del modelo suelo metamórfico.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	33.6 – 464.4	-	-	-
Intercepto	-	β_0	-116.808	< 0.001 (***)
Humedad del suelo superficial (HVL, %)	21.1 – 62.3	β_1	2.30447	< 0.001 (***)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	14.3 – 379.5	β_2	1.92371	< 0.001 (***)
Distancia de madereo al cuadrado ($DMAD^2$)	-	β_3	-0.00188	< 0.001 (***)
Pendiente viaje cargado (PVC, %)	0 – 21.1	β_4	1.22753	< 0.001 (***)
Número de árboles ($NARB$)	1 – 9 (PR)	β_5	0.82361	0.6327 (ns)

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001; ns = no significativo.

Este modelo se ajustó con datos observados de 146 ciclos de madereo (figura 8) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 1398.72 y del segundo mejor modelo es 1412.47. El coeficiente de determinación ajustado (R2) es de 0.91, el error estándar de estimación es de 28.26 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 13.34 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

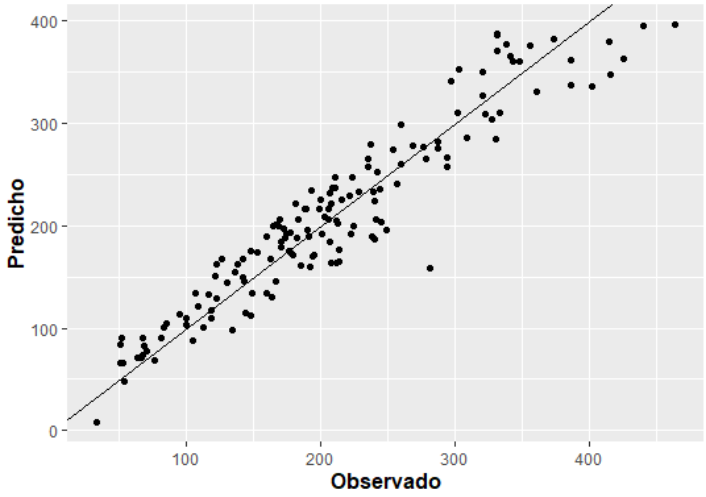

Figura 8. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en suelo metamórfico.

Modelo del suelo Rojo Arcilloso:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 HVL + \beta_2 DMAD + \beta_3 PVC + \beta_4 NARB + \beta_5 (DMAD \cdot PVC) + \beta_6 (DMAD \cdot NARB)$$

Cuadro 9. Valores covariables del modelo suelo rojo arcilloso.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	51.8 – 673.4	-	-	-
Intercepto	-	β_0	1.09854	0.979 (ns)
Humedad del suelo superficial (HVL, %)	22.7 – 35.0	β_1	2.52233	0.106 (ns)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	17.6 – 542.3	β_2	0.77405	< 0.001 (***)
Pendiente viaje cargado (PVC, %)	3.6 – 33.5	β_4	2.30991	0.008 (**)
Número de árboles ($NARB$)	1 – 14 (PR)	β_5	4.00727	0.057 (ns)
Interacción $DMAD \cdot PVC$	-	β_6	-0.04734	< 0.001 (***)
Interacción $DMAD \cdot NARB$	-	β_7	-0.03653	< 0.001 (***)

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001; ns = no significativo.

Este modelo se ajustó con datos observados de 104 ciclos de madereo (figura 9) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 1013.34 y el segundo mejor modelo es 1063.40. El coeficiente de determinación ajustado (R^2) es de 0.97, el error estándar de estimación es de 30.07 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 10.19 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

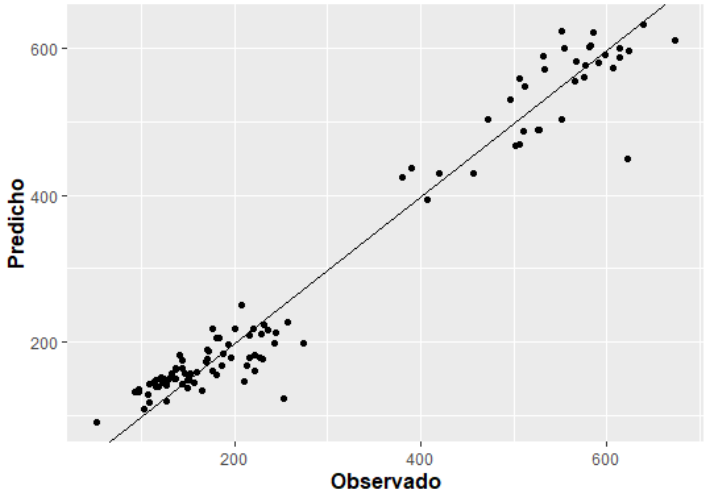

Figura 9. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en rojo arcilloso.

Modelo del suelo Sedimentos Marinos:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 HVL + \beta_2 DMAD + \beta_3 DMAD^2 + \beta_4 PVC + \beta_5 NARB$$

Cuadro 10. Valores covariables del modelo suelo sedimentos marinos.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	48.4 – 378.0	-	-	-
Intercepto	-	β_0	24.45421	0.1145 (ns)
Humedad del suelo superficial (HVL, %)	32.4 – 52.8	β_1	-1.12959	< 0.001 (***)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	24.7 – 303.5	β_2	1.55251	< 0.001 (***)
Distancia de madereo al cuadrado ($DMAD^2$)	-	β_3	-0.00141	< 0.001 (***)
Pendiente viaje cargado (PVC, %)	1.3 – 14.9	β_4	1.88530	< 0.001 (***)
Número de árboles ($NARB$)	7 – 33 (EG)	β_5	1.80376	< 0.001 (***)

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001; ns = no significativo.

Este modelo se ajustó con datos observados de 147 ciclos de madereo (figura 10) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 1300.31 y el segundo mejor modelo es 1306.49. El coeficiente de determinación ajustado (R^2) es de 0.93, el error estándar de estimación es de 19.58 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 10.05 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

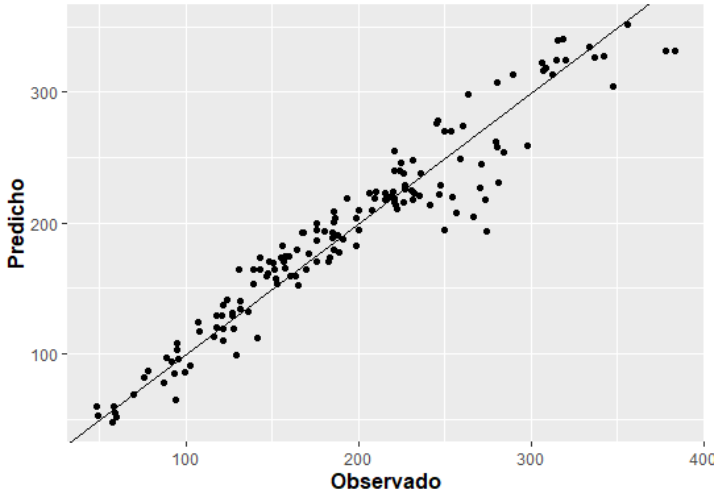

Figura 10. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en suelo de sedimentos marinos.

Modelo del suelo Cenizas Volcánicas:

$$TCiclo = \beta_0 + \beta_1 HVL + \beta_2 DMAD + \beta_3 PVC + \beta_4 NARB + \beta_5 (DMAD \cdot PVC)$$

Cuadro 11. Valores covariables del modelo suelo cenizas volcánicas.

Covariable	Rango observado	Coef.	Valor	Sig.
Tiempos del madereo ($TCiclo$, segundos)	22.2 – 248.4	-	-	-
Intercepto	-	β_0	29.3259	0.0613 (ns)
Humedad del suelo superficial (HVL, %)	39.8 – 48.8	β_1	-0.18526	0.6404 (ns)
Distancia de madereo ($DMAD$, m)	9.5 – 239.1	β_2	0.88018	< 0.001 (***)
Pendiente viaje cargado (PVC, %)	0.4 – 19.3	β_3	0.84932	0.1275 (ns)
Número de árboles ($NARB$)	2 – 12 (PR)	β_4	0.76373	0.3576 (ns)
Interacción $DMAD \cdot PVC$	-	β_5	0.02075	< 0.001 (***)

(*) * = P < 0,05; ** = P < 0,01; *** = P < 0,001; ns = no significativo.

Este modelo se ajustó con datos observados de 146 ciclos de madereo (figura 11) y presenta el menor valor de Akaike de un conjunto de seis modelos. El valor del criterio de Akaike es 1232.31 y el segundo mejor modelo es 1238.81. El coeficiente de determinación ajustado (R^2) es de 0.90, el error estándar de estimación es de 15.98 segundos y el error medio cuadrático de estimación (REMC) de 12.32 %. El Factor de Inflación de Varianza (VIF) es menor a cinco para todas las covariables del modelo, indicando que no existe problema de multicolinealidad entre los regresores.

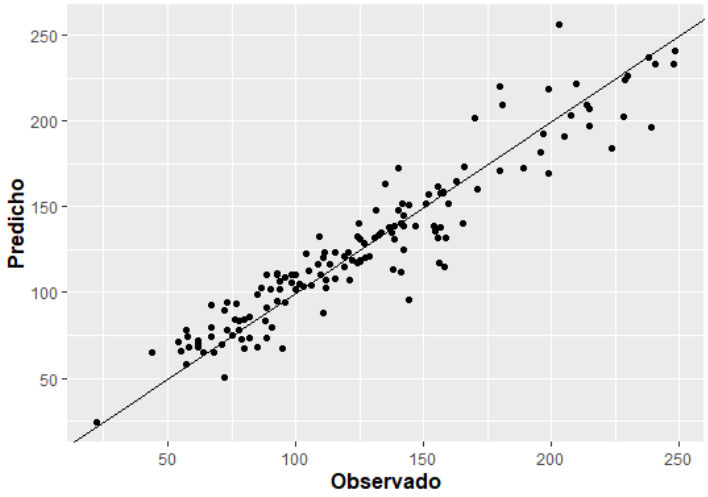

Figura 11. Relación entre valores observados y predichos para tiempo de ciclo de madereo en suelo de cenizas volcánicas.

5. CONCLUSIONES

A través del análisis de datos operacionales recopilados en distintos tipos de suelo y durante tres estaciones del año, se evidencia que ambos factores influyen significativamente en variables clave como la distancia de madereo, la pendiente en viaje cargado, los tiempos de ciclo y la velocidad de operación. El análisis estadístico, realizado mediante métodos descriptivos y modelos de regresión en RStudio, confirma que las condiciones del suelo y la variabilidad estacional afectan el rendimiento operativo, siendo la menor variable influyente el número de árboles por ciclo.

Los resultados preliminares indican que se cuenta con los elementos necesarios para evaluar el efecto del tipo de suelo y la estacionalidad en la productividad del madereo terrestre mecanizado. El análisis de varianza (ANOVA) identifica una variabilidad significativa en las principales variables operacionales, lo que evidencia que tanto el tipo de suelo como la estacionalidad influyen en el desempeño del madereo con skidders.

Esto sugiere que la productividad del madereo puede optimizarse mediante una planificación que considere la interacción entre el suelo y la estacionalidad. En particular, el desarrollo de modelos predictivos que incorporen estas variables permite estimar con mayor precisión el desempeño esperado en diferentes condiciones, facilitando la toma de decisiones en la gestión forestal. Esto es especialmente relevante para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y minimizar el impacto ambiental en los distintos tipos de suelo y épocas del año.

6. REFERENCIAS

Bygdén G, L Eliasson, I Wästerlund. 2004. Rut Depth, soil compaction and Rolling resistance when using bogie tracks. *Journal of Terramechamics* 40:179-190.

Carey P, V Sandoval, R Saldivia. 2007. Proyección de los sistemas de cosecha forestal en las plantaciones establecidas en el contorno de la reserva Río Cruces para los próximos diez años. *Bosque* 28(2):173-177.

Carey P, R Labbé, G Trincado, O Thiers, D Gárate. 2018. Productivity and costs of two low-investment biomass harvesting systems applied in a situation of mixed forest of semi-natural regeneration. *Bosque 39(3): 419-430.*

Cea, N. 2014. Aplicación de un Experimento Bifactorial en un Diseño Completamente Aleatorio para determinar los efectos de la altura de las zonas y los manejos fitosanitarios sobre el rendimiento del frijol (Phaseolus vulgaris L.) para el ciclo agrícola 2012. León, Nicaragua. Facultad de Ciencias y Tecnologías, Universidad Nacional de Nicaragua – León. 67

CONAF (Corporación Nacional Forestal, CL). DL 701 y sus Reglamentos. Consultado 4 de febrero de 2025. Disponible en https://www.conaf.cl/manejo-de-ecosistemas/gestion-forestal-suelos-y-agua/plantaciones-forestales/dl-701-y-sus-reglamentos/

DGA (Dirección General de Aguas, CH). 2023. Sistema Hidrométrico en Línea. Consultado 6 sep. 2023. Disponible en https://dga.mop.gob.cl/Paginas/hidrolineasatel.aspx

DGA (Dirección General de Aguas, CH). 2024. Sistema Hidrométrico en Línea. Datos de estaciones en línea. Consultado 24 may. 2024. Disponible en https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_param/dgasat_param.jsp?param=1

Ellies A, C Ramírez, H Figueroa. 1993. Modificaciones estructurales de un suelo sometido a distintos usos forestales. *Bosque* 14(2):25-30.

Ellies, A. 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. *Bosque* 20(1):37-45.

Gaete N, J Carrasco. S.f. Prácticas de conservación de suelos y aguas para el control de la erosión hídrica. Temuco: Serie Carillanca. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14001/39715

Gayoso J, A. Iroumé. 1993. Impacto al suelo por efecto de la cosecha forestal. En: Boletín N° 10 Suelos Forestales. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Valdivia, pp. 98-106.

Gayoso J, A. Iroumé. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque* 16(2): 3-12.

Gayoso P. 2003. Evaluación del impacto en el suelo de un equipo de madereo en un rodal de *Pinus radiata* D.Don. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 84 p.

Gayoso J, S Gayoso. 2009. Vías de saca: Extracción forestal en plantaciones bajo restricciones ambientales. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 100 p.

González M. 2021. Revisión bibliográfica de los impactos físicos acumulados en el suelo en función del tráfico de la maquinaria de madereo. Tesis Ingeniera Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile. 25 p.

INFOR (Instituto Forestal) 2024. El sector forestal chileno. 52 p

INFOR (Instituto Forestal) 2024. Anuario Forestal 2024. Santiago, Chile. 290 p. (Boletín estadístico N° 199).

INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CH). 2024. Agrometeorología. Red Agrometeorológica de INIA. Consultado 13 may. 2024. Disponible en https://agrometeorologia.cl/#

Naghdi R, I Bagheri, M Lotfalian, B Setodeh. 2009. Rutting and soil displacement caused by 450C Timber Jack wheeled skidder (Amsalem Forest northern Iran). *Journal of Forest Science* 55(4):177-183.

Neuenschwander R. 2001. Maquinaria de Explotación Forestal: Métodos, Máquinas, Costos. Talca, Chile. Universidad de Talca. 150 p.

Pinard M, F Putz, J Tay, T Sullivan. 1995. Creating Timber Harvest Guidelines for a Reduced-Impact Logging Project in Malaysia. *Journal of Forestry* 93(10):41-45.

Weaver W, E Weppner, D Hagans. 2014. Manual de caminos forestales y rurales: Una guía para planificar, diseñar, construir, reconstruir, mejorar, mantener y cerrar caminos forestales. Arcata, Estados Unidos. Pacific Watershed Associates. 416 p.

Williamson J, W Nielsen. 2000. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. *Canadian Journal of Forest Research* 30:1196-1205.

ANEXOS

Anexo 1. Características generales de los 15 predios de acuerdo con cada estación.

Estación	Característica/Predio	La Cantera	Colicheu	Quilañanco	Los Guindos	Bellavista
Invierno	Región	Ñuble	Bio-Bío	Bío-Bío	La Araucanía	La Araucanía
	Tipo de suelo	Cenizas volcánicas	Arenas	Sedimentos marinos	Granítico	Metamórfico
	Especie	*P.radiata*	*P.radiata*	*E.globulus*	*P.radiata*	*P.radiata*
	Edad cosecha (años)	21	20	17	21	20
	Temperatura (°C)	10.3	7.8	11.0	6.3	10.6
	Precipitación (mm)	1464	1065	1367	1772	1430
	VMA (m^3 árbol^{-1})	1.00	0.45	0.43	0.86	0.96
	Densidad (arb ha^{-1})	666	653	1397	500	466
	Volumen (m^3 ha^{-1})	666.0	294.0	601.0	430.0	447.4
	Humedad (%)	48.8	31.0	44.8	38.4	62.3
	Equipo de volteo	Feller	Feller	Feller	Feller	Shovel
Estación	**Característica/Predio**	**Cachapoal**	**El Mirador**	**V.Lebu y Los Altos**	**Parcelas Cabrera**	**El Arrayán**
Primavera	Región	Ñuble	Bio-Bío	Bío-Bío	Bío-Bío	La Araucanía
	Tipo de suelo	Cenizas volcánicas	Rojo arcilloso	Sedimentos marinos	Granítico	Metamórfico
	Especie	*P.radiata*	*P.radiata*	*E.globulus*	*E.nitens*	*P.radiata*
	Edad cosecha (años)	21	23	16	12	24
	Temperatura (°C)	14.4	9.5	11.0	16.8	12.2
	Precipitación (mm)	1465	1301	1420	1587	1485
	VMA (m^3 árbol^{-1})	1.63	0.92	0.61	0.50	1.43
	Densidad (arb ha^{-1})	376	468	792	1011	494
	Volumen (m^3 ha^{-1})	613.1	430.6	483.1	505.5	706.4
	Humedad (%)	39.8	35.0	52.8	31.7	55.9
	Equipo de volteo	Feller	Shovel	Feller	Feller	Shovel
Estación	**Característica/Predio**	**El Parron**	**Quilapalos**	**Antilhue**	**Choroico**	**Parlamento**
Verano	Región	Maule	Bio-Bío	Bío-Bío	Bío-Bío	La Araucanía
	Tipo de suelo	Metamórfico	Cenizas volcánicas	Sedimentos marinos	Granítico	Rojo arcilloso
	Especie	*P.radiata*	*P.radiata*	*E.globulus*	*E.nitens*	*P.radiata*
	Edad cosecha (años)	21	23	16	13	22

	Temperatura (°C)	11.8	14.0	15.7	19.9	19.5
	Precipitación (mm)	920	1877	1420	1772	1301
	VMA (m^3 árbol^{-1})	1.09	1.26	0.40	0.39	0.53
	Densidad (arb ha^{-1})	491	355	1297	919	573
	Volumen (m^3 ha^{-1})	535.2	447.3	518.8	363	303.7
	Humedad (%)	21.1	40.0	32.4	16.9	22.7
	Equipo de volteo	Shovel	Feller	Feller	Shovel	Feller

Anexo 2. Estadística descriptiva estación de invierno.

Estación	**Tipo de suelo**	**Variables**	**Mínimo**	**Máximo**	**Media**	**Mediana**	**Desv. Estándar**
Invierno	Arenas	DMAD (m)	30.99	252.13	117.41	100.03	53.17
		PVC (%)	-2.34	1.09	-0.24	-0.02	0.73
		TCiclo (s)	48.4	265	131.78	117.5	50.54
		VEL (m/s)	1.28	2.07	1.74	1.74	0.16
		NARB	5	20	10.98	11	3.09
	Cenizas volcánicas	DMAD (m)	16.55	239.10	90.39	79.38	58.32
		PVC (%)	0.61	19.34	8.28	8.68	5.20
		TCiclo (s)	44	239	124.38	126.0	53.47
		VEL (m/s)	0.57	2.36	1.35	1.37	0.45
		NARB	4	10	6.17	6	1.36
	Granítico	DMAD (m)	15.37	79.41	37.45	31.49	19.06
		PVC (%)	0.53	16.04	10.55	10.98	3.45
		TCiclo (s)	41.40	199.20	88.51	85.60	38.35
		VEL (m/s)	0.41	1.15	0.84	0.80	0.20
		NARB	2	7	4.70	5	1.38
	Metamórfico	DMAD (m)	35.95	158.19	90.91	85.49	29.45
		PMAD (%)	14.21	21.12	18.41	18.35	1.47
		TCiclo (s)	109.20	334.20	210.99	208.20	56.73
		VEL (m/s)	0.39	1.03	0.85	0.88	0.14
		NARB	2	9	4.79	5	1.54
	Sedimentos marinos	DMAD (m)	24.67	303.53	169.31	162.72	83.03
		PMAD (%)	0.68	6.84	3.41	3.27	1.36
		TCiclo (s)	48.40	383.40	218.30	224.80	93.78
		VEL (m/s)	0.92	1.86	1.49	1.54	0.22
		NARB	9	24	16.32	16	3.42

Anexo 3. Estadística descriptiva estación de primavera.

Estación	Tipo de suelo	Variables	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desv. Estándar
Primavera	Granítico	DMAD (m)	175.37	339.92	244.32	242.26	37.14
		PVC (%)	0.25	7.99	3.71	4.10	2.03
		TCiclo (s)	221.20	449.00	316.81	309.80	52.71
		VEL (m/s)	1.16	1.86	1.55	1.55	0.16
		NARB	7	21	12.71	12	3.10
	Metamórfico	DMAD (m)	14.28	128.69	64.60	56.17	33.00
		PVC (%)	-26.95	17.93	-1.03	-3.68	8.54
		TCiclo (s)	33.60	245.00	127.46	120.80	55.91
		VEL (m/s)	0.52	1.36	1.00	0.98	0.20
		NARB	1	6	3.06	3	1.27
	Rojo arcilloso	DMAD (m)	17.58	542.33	270.07	304.17	193.98
		PVC (%)	-33.52	-9.68	-19.43	-16.89	7.74
		TCiclo (s)	51.80	673.40	389.05	496.00	203.94
		VEL (m/s)	0.23	1.91	0.18	1.20	0.47
		NARB	1	14	8.42	9	2.81
	Sedimentos marinos	DMAD (m)	25.86	192.86	96.02	92.38	42.34
		PVC (%)	3.74	14.93	11.60	12.54	2.78
		TCiclo (s)	57.40	347.60	161.02	146.80	69.12
		VEL (m/s)	0.78	1.46	1.18	1.18	0.16
		NARB	10	33	19.32	18	5.45
	Cenizas volcánicas	DMAD (m)	9.51	151.51	81.82	80.76	25.88
		PVC (%)	-0.40	8.42	5.68	5.99	1.98
		TCiclo (s)	22.20	223.40	111.25	108.80	34.64
		VEL (m/s)	0.86	1.86	1.47	1.48	0.20
		NARB	2	7	4.38	4	1.18

Anexo 4. Estadística descriptiva estación de verano.

Estación	Tipo de suelo	Variables	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desv. Estándar
Verano	Granítico	DMAD (m)	117.83	326.48	231.78	221.63	48.60
		PVC (%)	-2.25	9.18	4.47	6.50	3.64
		TCiclo (s)	185.80	426.00	310.19	309.50	59.51
		VEL (m/s)	1.23	1.77	1.49	1.50	0.12
		NARB	7	17	11.56	12	2.69
	Metamórfico	DMAD (m)	106.09	379.48	243.78	238.43	83.24
		PVC (%)	0.03	17.45	3.80	2.75	3.25
		TCiclo (s)	130.40	464.40	285.01	295.70	85.20
		VEL (m/s)	1.23	2.21	1.70	1.72	0.24
		NARB	4	9	6.24	6	1.45
	Rojo arcilloso	DMAD (m)	57.83	271.25	151.28	140.10	51.71
		PVC (%)	-4.58	3.60	-1.81	-2.26	1.88
		TCiclo (s)	92.80	274.40	172.30	169.80	45.22
		VEL (m/s)	0.91	2.62	1.75	1.72	0.35
		NARB	5	16	9.08	9.00	1.97
	Sedimentos marinos	DMAD (m)	53.87	189.00	134.30	133.65	26.43
		PVC (%)	-0.81	11.45	5.25	4.34	3.62
		TCiclo (s)	102.20	284.40	201.64	200.30	42.92
		VEL (m/s)	1.00	1.57	1.34	1.36	0.13
		NARB	7	18	10.94	11.00	2.51
	Cenizas volcánicas	DMAD (m)	33.87	236.35	134.99	126.71	54.90
		PVC (%)	-1.19	0.90	-0.41	-0.47	0.39
		TCiclo (s)	61.60	248.40	146.09	141.80	53.80
		VEL (m/s)	0.94	2.16	1.82	1.88	0.20
		NARB	4	12	7.35	7.00	2.05