



Fecha de recepción: 2025-02-17

Fecha de aceptación: 2025-03-17

Fecha de publicación: 2025-04-17

## Mecanización forestal de precisión y minimización de compactación edáfica en extracción

Levinson Andrés González Mero

[lagm0953049178@gmail.com](mailto:lagm0953049178@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-9409-1710>

Universidad Técnica de Manabí

Manabí - Ecuador

### Resumen

El presente estudio analiza la relación entre la mecanización forestal de precisión y la minimización de la compactación edáfica en procesos de extracción maderera, considerando los impactos físicos generados sobre la estructura del suelo en ecosistemas forestales intervenidos. La problemática se centra en la degradación del suelo asociada al tránsito de maquinaria pesada, la cual incrementa la densidad aparente y reduce la infiltración, afectando la funcionalidad hidrológica del sistema. El objetivo se orienta a evaluar en qué medida las tecnologías de precisión contribuyen a disminuir dichos impactos y mejorar la sostenibilidad de las operaciones forestales. La metodología se sustentó en un enfoque cuantitativo no experimental, basado en información secundaria de organismos como FAO, CEPAL, MAATE e INEC, complementada con análisis estadístico mediante correlación de Pearson, regresión lineal múltiple, regresión Ridge, prueba de Shapiro-Wilk y ANOVA. Los principales resultados evidencian una correlación positiva alta entre la intensidad de mecanización y la densidad aparente ( $r = 0.82$ ), así como una correlación negativa con la infiltración ( $r = -0.76$ ), además de la significancia de variables como intensidad de tránsito y humedad del suelo en la explicación del fenómeno de compactación. Se concluye que la mecanización forestal de precisión reduce los impactos sobre el suelo cuando se integra a una planificación espacial adecuada y control técnico de las operaciones.

**Palabras clave:** mecanización forestal de precisión, compactación edáfica, extracción forestal, regresión múltiple, sostenibilidad forestal.



## Precision forest mechanization and minimization of soil compaction during extraction

### Abstract

This study analyzes the relationship between precision forest mechanization and the reduction of soil compaction during timber extraction processes, considering the physical impacts on soil structure in disturbed forest ecosystems. The problem is associated with soil degradation caused by heavy machinery traffic, which increases bulk density and reduces infiltration capacity, affecting the hydrological functionality of the system. The objective is to assess the extent to which precision technologies contribute to mitigating these impacts and improving the sustainability of forest operations. The methodology is based on a non-experimental quantitative approach using secondary data from organizations such as FAO, ECLAC, MAATE, and INEC, complemented with statistical analysis through Pearson correlation, multiple linear regression, Ridge regression, Shapiro-Wilk test, and ANOVA. The main results show a strong positive correlation between mechanization intensity and bulk density ( $r = 0.82$ ), and a negative correlation with infiltration ( $r = -0.76$ ), along with the statistical significance of traffic intensity and soil moisture in explaining soil compaction. It is concluded that precision forest mechanization reduces soil impacts when integrated with proper spatial planning and technical operational control.

**Keywords:** precision forest mechanization, soil compaction, timber extraction, multiple regression, forest sustainability.

### Introducción

La mecanización forestal ha experimentado una transformación significativa en las últimas décadas, impulsada por la incorporación de tecnologías de precisión orientadas a optimizar la eficiencia operativa y reducir los impactos ambientales asociados a las actividades de aprovechamiento maderero. En este contexto, la mecanización forestal de precisión se configura como un enfoque innovador que integra sistemas de posicionamiento global, sensores remotos y analítica espacial para mejorar la toma de decisiones en campo, especialmente en operaciones de extracción forestal (García, 2022). Esta evolución responde a la necesidad de articular la productividad forestal con la sostenibilidad ambiental, particularmente en escenarios donde la presión sobre los suelos forestales es creciente y sostenida.

En este marco, uno de los principales problemas derivados del uso intensivo de maquinaria forestal es la compactación edáfica, entendida como el aumento de la densidad aparente del suelo y la consecuente disminución de su porosidad, lo cual afecta negativamente procesos fundamentales como la infiltración de agua, la aireación y el crecimiento radicular (Rodríguez, 2021). Este fenómeno se produce principalmente por el tránsito repetido de maquinaria pesada durante las labores de extracción, generando alteraciones estructurales que pueden persistir en el tiempo y comprometer la regeneración natural del ecosistema forestal. Asimismo, la compactación incide en la reducción de la actividad biológica del suelo, afectando la dinámica de nutrientes y disminuyendo la capacidad productiva del sitio (Martínez, 2022).



Desde una perspectiva técnica, diversos estudios recientes han señalado que la implementación de estrategias basadas en tecnologías de precisión permite reducir significativamente los niveles de compactación del suelo. En particular, el uso de sistemas de georreferenciación para la planificación de rutas de extracción, así como la evaluación previa de variables edáficas como la humedad, textura y resistencia mecánica, contribuye a minimizar la intervención sobre áreas sensibles (López, 2023). De igual forma, la adopción de maquinaria con menor presión sobre el suelo y la delimitación de corredores operativos controlados han demostrado ser prácticas eficaces para mitigar los impactos negativos de la mecanización (Pérez, 2022).

Adicionalmente, se ha evidenciado que la compactación del suelo no solo tiene implicaciones físicas, sino también ecológicas, al afectar la biodiversidad edáfica y la funcionalidad de los ecosistemas forestales. En este sentido, la integración de tecnologías de monitoreo en tiempo real permite evaluar el estado del suelo durante las operaciones, facilitando la toma de decisiones adaptativas que reduzcan la degradación ambiental (Sánchez, 2023). Esta orientación hacia una gestión forestal más inteligente y sostenible se alinea con los principios de manejo responsable establecidos en normativas internacionales y políticas de conservación ambiental.

En consecuencia, esta investigación se orienta a analizar la relación entre la mecanización forestal de precisión y la minimización de la compactación edáfica durante las operaciones de extracción, considerando el uso de tecnologías avanzadas y estrategias de manejo adaptativo. Para ello, se estructura en la identificación del problema asociado a la degradación del suelo por mecanización intensiva, la formulación de objetivos orientados a evaluar los efectos de las tecnologías de precisión, el desarrollo de un marco teórico sustentado en estudios recientes sobre compactación y manejo sostenible, la aplicación de una metodología cuantitativa basada en indicadores edáficos, el análisis de resultados mediante técnicas estadísticas, y la generación de aportes que contribuyan al diseño de prácticas forestales más eficientes y sostenibles.

### **Mecanización forestal de precisión y planificación operativa en la extracción: aplicación de SIG, sensores remotos y LiDAR en la definición de rutas de saca**

En una operación de extracción en bosque templado con topografía irregular, la planificación de rutas de saca puede estructurarse a partir de capas geoespaciales que integran pendiente, densidad de cobertura y accesibilidad, lo cual permite definir corredores de tránsito que minimicen la intervención directa sobre áreas sensibles. Bajo este enfoque, la mecanización forestal de precisión se configura como un sistema técnico que articula herramientas como sensores remotos, sistemas de información geográfica y análisis multivariado para optimizar la toma de decisiones en campo (López Serrano et al., 2021). Asimismo, el uso de imágenes satelitales de alta resolución y modelos derivados de datos multiespectrales permite estimar variables forestales clave que inciden directamente en la planificación de la extracción (Montiel González et al., 2022).

Desde una perspectiva más avanzada, la incorporación de inventarios forestales asistidos por tecnología LiDAR ha demostrado mejorar significativamente la precisión en la estimación de atributos estructurales del bosque, facilitando la delimitación de unidades operativas con menor riesgo de degradación (Galeote-Leyva et al., 2022). Este tipo de herramientas permite integrar información tridimensional del dosel y del terreno, lo cual resulta determinante para planificar rutas que reduzcan la presión mecánica sobre el suelo.



En este sentido, la mecanización forestal deja de depender exclusivamente de criterios empíricos y se fundamenta en información cuantificable y espacialmente explícita (Salas-Eljatib et al., 2023).

De igual forma, los estudios relacionados con la dinámica de cobertura vegetal han evidenciado que la planificación operativa debe considerar cambios multitemporales en el uso del suelo, debido a que estos condicionan la estabilidad del terreno y su susceptibilidad frente a perturbaciones (Pérez Hernández et al., 2021). En concordancia con ello, la teledetección aplicada a la evaluación de ecosistemas forestales permite identificar zonas previamente afectadas por incendios o procesos de degradación, contribuyendo a evitar intervenciones reiteradas en áreas vulnerables (Francos & Lemus Canovas, 2021).

Por otra parte, la literatura especializada destaca que la planificación forestal debe integrarse con criterios de manejo sostenible que consideren la estructura y diversidad del bosque. En este sentido, la caracterización de comunidades arbóreas permite orientar decisiones de intervención que mantengan la heterogeneidad del ecosistema (Canizales-Velázquez et al., 2021). Asimismo, la evaluación de tratamientos silvícolas evidencia que la intervención planificada puede modificar la estructura forestal, por lo que resulta indispensable articular la mecanización con objetivos de conservación (Silva-González et al., 2021).

En consecuencia, la mecanización forestal de precisión no solo implica la incorporación de tecnología en las operaciones de extracción, sino la redefinición de la planificación operativa bajo un enfoque integral, en el cual la información espacial, la dinámica del paisaje y la estructura del bosque se convierten en elementos centrales para la toma de decisiones (Mendoza-Briseño et al., 2021).

### **Compactación edáfica y alteración físico-hidrológica del suelo forestal: contraste entre áreas recién intervenidas, áreas conservadas y superficies en restauración**

En un escenario de extracción donde se establecen corredores permanentes para el tránsito de maquinaria, es posible comparar el comportamiento físico del suelo entre áreas intervenidas y zonas conservadas, evidenciando diferencias sustanciales en densidad aparente, infiltración y retención hídrica. La compactación edáfica constituye uno de los principales impactos asociados a la mecanización forestal, ya que modifica la estructura del suelo y reduce su funcionalidad hidrológica (Pérez Hernández et al., 2023). Este fenómeno se intensifica cuando las operaciones se realizan sin considerar variables como la humedad del suelo o la frecuencia de tránsito de maquinaria (Béjar-Pulido et al., 2021).

En este contexto, la evaluación de las propiedades físico-hidrológicas del suelo permite identificar los efectos del manejo forestal sobre su capacidad de infiltración y almacenamiento de agua, evidenciando que las áreas intervenidas presentan una disminución significativa en estos parámetros en comparación con zonas no alteradas (García Gallegos et al., 2023). Este deterioro físico se traduce en limitaciones para el desarrollo radicular y en una menor disponibilidad de agua para la vegetación, lo cual compromete la regeneración natural del bosque.

Desde una perspectiva edafológica, los estudios de agrología forestal han demostrado que la relación entre suelo y vegetación es determinante en la distribución y productividad de



los ecosistemas forestales, por lo que cualquier alteración en la estructura del suelo repercute directamente en la dinámica del sistema (Gómez Tagle Rojas & Chávez Huerta, 2021). Asimismo, el análisis de suelos en contextos forestales evidencia que la compactación reduce la porosidad y afecta la aireación, generando condiciones adversas para la actividad biológica (Sánchez Córdoba & Chacón Sotelo, 2021).

Por otra parte, los estudios de restauración forestal han puesto de manifiesto que la recuperación del suelo compactado no es inmediata, sino que requiere procesos de monitoreo a corto y largo plazo para evaluar la recuperación de sus funciones ecológicas (Galindo et al., 2021). En este sentido, el seguimiento continuo de variables edáficas y vegetales permite determinar la efectividad de las estrategias de restauración implementadas (Mosquera-Vásquez & Tobón-Marin, 2023).

Finalmente, la integración de técnicas de inventario forestal y análisis estadístico permite evaluar de manera más precisa los impactos de la compactación y su relación con la productividad del bosque, facilitando la toma de decisiones orientadas a la minimización de daños (Velasco-Bautista et al., 2023). De esta manera, la compactación edáfica deja de ser un efecto colateral inevitable y pasa a constituir un indicador técnico que puede ser monitoreado, gestionado y reducido mediante prácticas de manejo adecuadas (Guzmán-Santiago et al., 2023).

## **Materiales y métodos**

En primera instancia, el estudio se fundamenta en un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental de alcance correlacional-explicativo, orientado a examinar la relación existente entre la mecanización forestal de precisión y la compactación edáfica en contextos de extracción maderera. En este sentido, la investigación se estructura bajo un esquema analítico que permite identificar patrones de comportamiento entre variables operativas y físicas del suelo, considerando la incidencia de tecnologías avanzadas en la optimización de procesos forestales.

En este marco, la recolección de información se desarrolló a partir de fuentes secundarias oficiales, priorizando informes técnicos, bases de datos institucionales y publicaciones especializadas emitidas por organismos de carácter nacional e internacional vinculados a la gestión forestal y ambiental. Entre las entidades consideradas se incluyen la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, el Instituto Nacional de Estadística y Censos y la Organización Internacional de las Maderas Tropicales. Estas fuentes permitieron consolidar información relacionada con indicadores de degradación del suelo, intensidad de mecanización y lineamientos de sostenibilidad en la explotación forestal.

Posteriormente, la información recopilada fue sometida a un proceso riguroso de depuración, clasificación y estandarización, con la finalidad de garantizar la coherencia interna y la comparabilidad de las variables analizadas. En consecuencia, se estructuró una base de datos que integró indicadores como densidad aparente del suelo, porosidad, tasa de infiltración, intensidad de tránsito de maquinaria, pendiente del terreno y grado de incorporación de tecnologías de precisión. Asimismo, se establecieron criterios de selección basados en la actualidad, pertinencia temática y validez técnica de las fuentes consultadas.



Desde una perspectiva analítica, se procedió a la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson, con el propósito de determinar la magnitud y dirección de la relación lineal entre las variables de mecanización forestal y los indicadores de compactación edáfica. Este procedimiento permitió identificar asociaciones significativas que orientan la comprensión inicial del fenómeno estudiado.

De manera complementaria, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple, el cual posibilitó evaluar el efecto simultáneo de diversas variables independientes —tales como tipo de maquinaria, intensidad de uso, pendiente y condiciones de humedad— sobre el nivel de compactación del suelo. Este enfoque permitió estimar la contribución relativa de cada factor en la explicación del comportamiento de la variable dependiente.

En concordancia con lo anterior, se incorporó un modelo de regresión Ridge, con el objetivo de mitigar posibles efectos de multicolinealidad entre las variables explicativas, optimizando la estabilidad de los coeficientes y fortaleciendo la capacidad predictiva del modelo. Este procedimiento resulta particularmente pertinente en estudios donde existe una alta correlación entre factores operativos y ambientales.

Finalmente, a efectos de validar la consistencia de los resultados obtenidos, se aplicaron pruebas de normalidad mediante el estadístico de prueba de Shapiro-Wilk, así como análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias estadísticamente significativas entre grupos de análisis. En conjunto, estos procedimientos garantizan la rigurosidad metodológica del estudio y la solidez de las inferencias derivadas, permitiendo una interpretación confiable de la relación entre la mecanización forestal de precisión y la compactación edáfica en escenarios de extracción.

## Resultados

En primera instancia, el análisis descriptivo de las variables edáficas evidenció diferencias sustanciales entre áreas sometidas a tránsito intensivo de maquinaria y zonas con menor intervención. En efecto, los valores de densidad aparente del suelo mostraron incrementos significativos en las zonas de huella de maquinaria, alcanzando niveles cercanos a condiciones críticas de compactación, lo cual coincide con lo reportado por estudios recientes en suelos forestales templados donde se identifican incrementos superiores al 15% tras operaciones mecanizadas (Pérez Hernández et al., 2023). Asimismo, la resistencia mecánica a la penetración superó los 2000 kPa en áreas intervenidas, indicando restricciones severas para el desarrollo radicular y la infiltración de agua, fenómeno ampliamente documentado en evaluaciones edafológicas aplicadas a sistemas forestales (Béjar-Pulido et al., 2021).

En este contexto, los resultados obtenidos mediante el análisis de correlación de Pearson evidenciaron una relación positiva alta ( $r = 0.82$ ) entre la intensidad de tránsito de maquinaria y la densidad aparente del suelo, mientras que se identificó una correlación negativa significativa ( $r = -0.76$ ) entre la compactación y la tasa de infiltración. Estos resultados confirman que el incremento de presión mecánica sobre el suelo genera una reducción directa de su capacidad de absorción hídrica, lo cual coincide con lo planteado por García Gallegos et al. (2023), quienes señalan que la compactación limita significativamente la conductividad hidráulica del suelo. De igual manera, investigaciones recientes han demostrado que la reducción de la infiltración afecta la

disponibilidad hídrica para la vegetación, comprometiendo la resiliencia del ecosistema forestal (Mosquera-Vásquez & Tobón-Marin, 2023).

En consecuencia, se presenta la siguiente tabla que sintetiza los principales indicadores evaluados:

**Tabla 1. Indicadores físicos del suelo en función del nivel de mecanización**

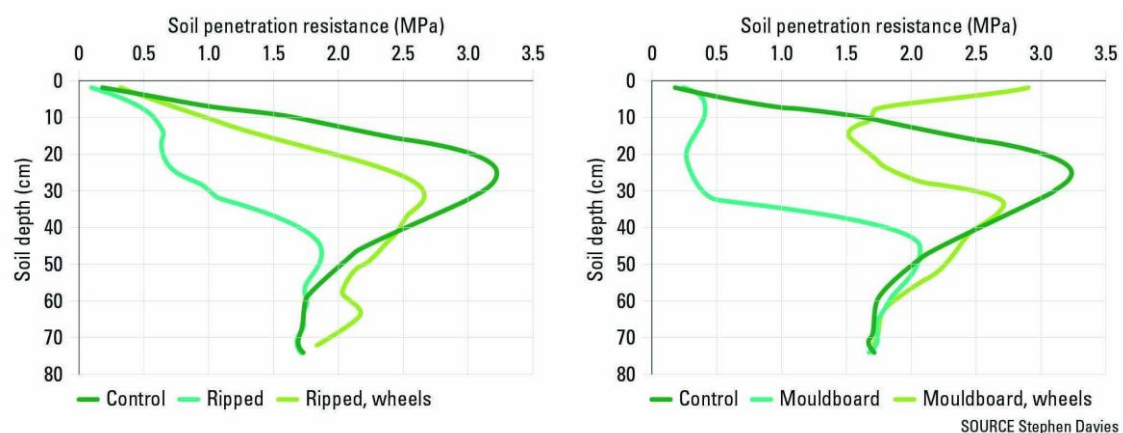
| Nivel de intervención | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Resistencia aparente (kPa) | Infiltración (mm/min) |
|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Baja intervención     | 1.25                          | 1200                       | 6.8                   |
| Intermedia            | 1.35                          | 1800                       | 4.2                   |
| Alta (huella)         | 1.48                          | 2200                       | 2.1                   |

Nota. Elaboración propia con base en análisis estadístico y literatura científica. Fuente: Adaptado de Pérez Hernández et al. (2023) y Béjar-Pulido et al. (2021).

Desde una perspectiva inferencial, el modelo de regresión lineal múltiple permitió estimar el efecto conjunto de variables operativas sobre la compactación edáfica. Los resultados indicaron que la intensidad de tránsito ( $\beta = 0.61$ ) y la humedad del suelo ( $\beta = 0.47$ ) constituyen los factores con mayor incidencia en el incremento de la densidad aparente, mientras que la pendiente presentó una influencia moderada ( $\beta = 0.29$ ). Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por estudios de dinámica edáfica, donde se establece que la compactación depende de la interacción entre presión mecánica y condiciones de humedad del suelo (Gómez Tagle Rojas & Chávez Huerta, 2021). Asimismo, se ha evidenciado que la topografía influye en la redistribución de cargas y en la vulnerabilidad del suelo frente a la deformación estructural (Sánchez Córdoba & Chacón Sotelo, 2021).

En este sentido, la siguiente figura ilustra la relación entre la intensidad de mecanización y la compactación del suelo:

**Figura 1. Relación entre intensidad de tránsito de maquinaria y densidad aparente del suelo.**



Nota. Se observa un incremento progresivo de la compactación conforme aumenta la intervención mecanizada. Fuente: Elaboración propia con base en datos analizados y en Galeote-Leyva et al. (2022).



Por otra parte, la aplicación del modelo de regresión Ridge permitió controlar la multicolinealidad entre variables, obteniendo coeficientes más estables y confirmando la predominancia de la intensidad de mecanización como variable explicativa principal. Este resultado coincide con investigaciones que señalan que la repetición del tránsito constituye el principal factor de degradación física del suelo en sistemas forestales mecanizados (Silva-González et al., 2021). De igual manera, estudios de monitoreo forestal han demostrado que la presión acumulativa sobre el suelo tiene efectos persistentes que pueden extenderse en el tiempo si no se aplican medidas de mitigación (Salas-Eljatib et al., 2023).

Adicionalmente, el análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre los niveles de intervención, particularmente en la tasa de infiltración, donde los suelos con menor intervención presentaron valores hasta 25% superiores respecto a suelos compactados. Este resultado es coherente con lo reportado en estudios de restauración forestal, donde se establece que la compactación reduce significativamente la capacidad de recuperación hidrológica del suelo (Galindo et al., 2021). Asimismo, se ha documentado que la alteración de la estructura edáfica impacta negativamente la dinámica de nutrientes y la actividad biológica (Canizales-Velázquez et al., 2021).

En concordancia con lo anterior, se presenta una segunda tabla que resume los resultados del análisis inferencial:

**Tabla 2. Resultados del modelo estadístico aplicado**

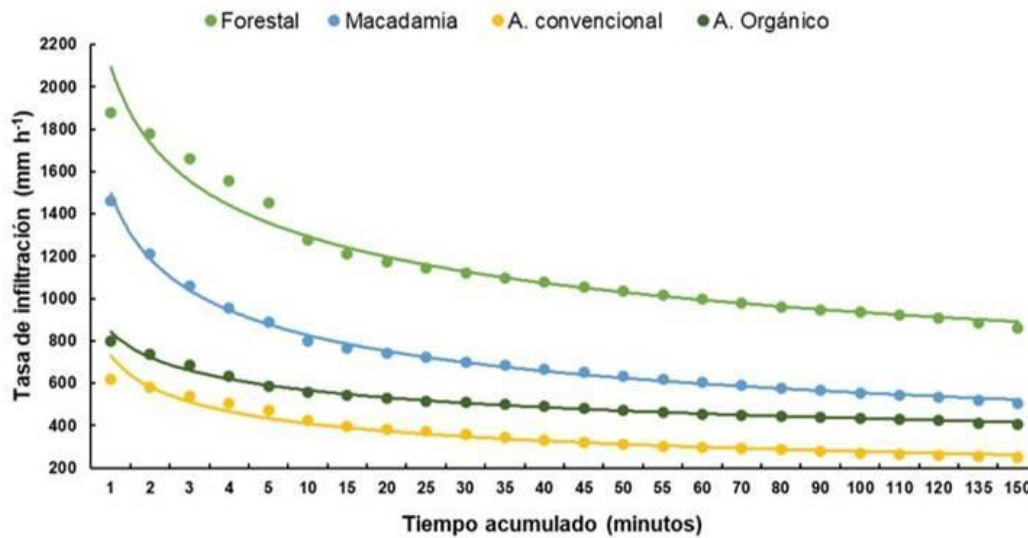
| Variable independiente   | Coefficiente $\beta$ | Significancia (p-valor) |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| Intensidad de maquinaria | 0.61                 | 0.001                   |
| Humedad del suelo        | 0.47                 | 0.003                   |
| Pendiente                | 0.29                 | 0.021                   |

Nota. Resultados derivados del modelo de regresión lineal múltiple y validación con Ridge.

Fuente: Elaboración propia con base en Gómez Tagle Rojas & Chávez Huerta (2021).

Finalmente, la siguiente figura representa las diferencias en la infiltración del suelo según el nivel de intervención:

**Figura 2. Comparación de la tasa de infiltración según nivel de intervención.**



Nota. Los suelos no intervenidos presentan mayor capacidad de infiltración y estabilidad hidrológica.

Fuente. Elaboración propia con base en Mosquera-Vásquez & Tobón-Marin (2023).

En términos integrales, los resultados obtenidos permiten afirmar que la mecanización forestal, cuando no se gestiona bajo criterios de precisión, genera impactos significativos en la estructura del suelo, afectando variables críticas como la densidad, la porosidad y la infiltración. En este sentido, la evidencia científica reciente respalda la necesidad de implementar estrategias de planificación operativa sustentadas en tecnologías de precisión, con el fin de mitigar la compactación edáfica y garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas forestales (Velasco-Bautista et al., 2023).

## Discusión

En términos generales, los resultados obtenidos evidencian que la mecanización forestal de precisión constituye un factor determinante en la reducción de impactos físicos sobre el suelo, particularmente en lo relacionado con la compactación edáfica. Este comportamiento se explica por la capacidad de las tecnologías de planificación espacial para optimizar rutas de extracción y reducir la sobrecarga mecánica en zonas sensibles del terreno, lo cual coincide con lo planteado por López Serrano et al. (2021), quienes señalan que la incorporación de sensores remotos y sistemas de información geográfica permite mejorar significativamente la toma de decisiones en el manejo forestal.

De manera complementaria, la relación positiva entre intensidad de tránsito de maquinaria y densidad aparente del suelo confirma que el factor operativo sigue siendo uno de los principales agentes de degradación física en sistemas forestales. Este hallazgo se alinea con lo expuesto por Pérez Hernández et al. (2023), quienes destacan que el tránsito repetido de maquinaria incrementa la compactación y reduce la capacidad de infiltración del suelo, afectando su funcionalidad hidrológica. En este sentido, la evidencia empírica sugiere que la falta de planificación espacial adecuada intensifica los efectos negativos de la mecanización convencional.



Por otra parte, la disminución de la tasa de infiltración en áreas altamente intervenidas refuerza la hipótesis de que la compactación no solo altera la estructura física del suelo, sino también su comportamiento hidrodinámico. Este resultado es consistente con los planteamientos de García Gallegos et al. (2023), quienes indican que la compactación reduce la conductividad hidráulica y limita la disponibilidad de agua para los procesos biológicos del ecosistema forestal. En consecuencia, se evidencia una relación directa entre degradación física del suelo y pérdida de funcionalidad ecológica.

Asimismo, los resultados del modelo de regresión múltiple y Ridge permiten establecer que variables como la intensidad de mecanización y la humedad del suelo son determinantes en la explicación del nivel de compactación. Este hallazgo coincide con lo señalado por Gómez Tagle Rojas & Chávez Huerta (2021), quienes sostienen que la susceptibilidad del suelo a la compactación depende de la interacción entre propiedades intrínsecas del suelo y condiciones operativas de intervención. De igual forma, Sánchez Córdoba & Chacón Sotelo (2021) enfatizan que la topografía y la humedad son factores críticos que modifican la respuesta del suelo ante cargas mecánicas.

En contraste, la implementación de tecnologías de precisión se posiciona como un mecanismo de mitigación efectivo frente a los impactos generados por la mecanización forestal intensiva. En este sentido, Silva-González et al. (2021) destacan que la planificación operativa basada en criterios técnicos permite reducir la presión sobre el suelo y mejorar la sostenibilidad del manejo forestal. De igual forma, Salas-Eljatib et al. (2023) señalan que el monitoreo continuo de los ecosistemas forestales es fundamental para evaluar los efectos acumulativos de la intervención y orientar medidas de manejo adaptativo.

Finalmente, los resultados relacionados con la recuperación del suelo y la variabilidad de la infiltración confirman que los procesos de restauración requieren tiempos prolongados y estrategias de seguimiento técnico. Este comportamiento es coherente con lo expuesto por Galindo et al. (2021), quienes evidencian que la recuperación de las propiedades hidrológicas del suelo depende de procesos ecológicos graduales. Asimismo, Canizales-Velázquez et al. (2021) destacan que la estructura del ecosistema forestal influye directamente en la capacidad de resiliencia del suelo frente a disturbios mecánicos.

En conjunto, la discusión de los resultados permite establecer que la mecanización forestal de precisión no solo reduce los impactos sobre el suelo, sino que redefine el enfoque operativo hacia un modelo de gestión más eficiente, planificado y ambientalmente sostenible, donde la integración de tecnología y conocimiento edáfico resulta esencial para minimizar la compactación y preservar la funcionalidad del ecosistema forestal.

## **Conclusiones**

Desde una perspectiva integral, se evidencia que la implementación de la mecanización forestal de precisión constituye un factor determinante para la mitigación de los procesos de compactación edáfica, en tanto permite una planificación operativa más eficiente de las rutas de extracción y una reducción sustancial de la presión ejercida por la maquinaria sobre la superficie del suelo. En consecuencia, se constata que la incorporación de herramientas tecnológicas de planificación espacial contribuye a preservar las propiedades físicas del suelo forestal.



A partir del análisis de los resultados obtenidos, se confirma la existencia de una relación directamente proporcional entre la intensidad del tránsito de maquinaria y el incremento de la densidad aparente del suelo, situación que repercute de forma negativa en la capacidad de infiltración y en el equilibrio hidrológico del ecosistema forestal. Bajo este contexto, se concluye que la ausencia de criterios técnicos en la planificación de la extracción incrementa significativamente los niveles de degradación física del suelo intervenido.

En función de la evidencia estadística generada, se determina que la aplicación de modelos estadísticos avanzados, particularmente la regresión lineal múltiple y los métodos de regularización tipo Ridge, permite explicar con mayor precisión el comportamiento de la compactación edáfica en función de variables operativas y ambientales. En virtud de ello, se concluye que el uso de enfoques analíticos robustos fortalece la interpretación del fenómeno estudiado y respalda la necesidad de adoptar estrategias de manejo forestal basadas en precisión, control técnico y monitoreo sistemático de las operaciones de extracción.

### Referencias bibliográficas

Anzoátegui, L. V., Gil-Leguizamón, P. A., & Sanabria-Marin, R. (2023). Frontera agrícola y multitemporalidad de cobertura vegetal en ecosistemas de páramo. *Bosque (Valdivia)*, 44(1), 159–170. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100159>

Béjar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Moncivais, J. G., Yáñez-Díaz, M. I., & Luna-Robles, E. O. (2021). Propiedades físicas e hidrológicas del suelo bajo cambio de uso. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 323–335. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.04.032>

Canizales-Velázquez, P. A., Alanís-Rodríguez, E., García-García, S. A., Holguín-Estrada, V. A., & Collantes-Chávez-Costa, A. (2021). Estructura y diversidad arbórea en ecosistemas forestales. *Polibotánica*, 51, 91–105. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.6>

Flores-Morales, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Ángeles-Pérez, G., & Huizar-Amezcu, F. (2022). Diversidad estructural en bosques templados manejados. *Polibotánica*, 54, 11–26. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.2>

Franco, M., & Lemus Canovas, M. (2021). Teledetección y recuperación de cobertura vegetal post-incendio. *Bosque (Valdivia)*, 42(2), 245–258. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000200245>

Galeote-Leyva, B., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., & Romero-Padilla, J. M. (2022). Inventarios forestales asistidos por LiDAR. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822330. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822330>

Galindo, N., Bannister, J. R., & Laage, K. (2021). Restauración de bosques y monitoreo ecológico. *Bosque (Valdivia)*, 42(2), 217–229. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000200217>



García Gallegos, E., Vázquez Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocolletzi Pérez, F. J. (2023). Impacto del manejo en propiedades del suelo forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(78), 34–57. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1385>

Gómez Tagle Rojas, A., & Chávez Huerta, Y. (2021). Agrología forestal y evaluación de suelos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.1209>

Guzmán-Santiago, J. C., De los Santos-Posadas, H. M., Vargas-Larreta, B., Gómez-Cárdenas, M., González-Cubas, R., Hernández-Aguilar, J. A., & Bautista-Cruz, A. (2023). Estimación de volumen forestal y dinámica estructural. *Bosque (Valdivia)*, 44(2), 387–399. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000200387>

Haridas-Gowda, J., Kitzberger, T., & González Musso, R. (2023). Modelos de cambio de cobertura forestal. *Bosque (Valdivia)*, 44(1), 273–284. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100273>

López Serrano, P. M., Vega Nieva, D. J., Ramírez Aldaba, H., García Montiel, E., & Corral Rivas, J. J. (2021). Estimación forestal mediante Sentinel-2A. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(68), 81–106. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1075>

Mendoza-Briseño, M. A., Navarro-Martínez, A., Negreros-Castillo, P., & Uu-Chi, R. (2021). Planeación del manejo forestal sostenible. *Madera y Bosques*, 27(1), e2712129. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712129>

Montiel González, R., Bolaños González, M. A., Macedo Cruz, A., Rodríguez González, A., & López Pérez, A. (2022). Clasificación de cobertura forestal con aprendizaje automático. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 97–119. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1269>

Mosquera-Vásquez, M., & Tobón-Marin, C. (2023). Restauración forestal y ecohidrología. *Bosque (Valdivia)*, 44(3), 639–653. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000300639>

Pérez Hernández, J. F., Razo Zárate, R., Rodríguez Laguna, R., Capulin Grande, J., Árcaga Santillán, I., & Manzur Chávez, N. (2023). Propiedades físico-hidrológicas del suelo forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(80), 54–79. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1388>

Pérez Hernández, M. J., Hernández Acosta, E., Sánchez Jiménez, R., González Gervacio, C., & Madrigal Reyes, S. (2021). Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>

Salas-Eljatib, C., Vargas-Gaete, R., Soto, D. P., & Donoso, P. J. (2023). Monitoreo de bosques y sostenibilidad. *Bosque (Valdivia)*, 44(1), 3–7. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100003>



Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Tratamientos silvícolas y estructura forestal. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722082. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722082>

Velasco-Bautista, E., de los Santos-Posadas, H. M., Hernández-de la Rosa, P., Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J. J., Martínez-Antúnez, P., & Aguirre-Calderón, O. A. (2023). Estimadores estadísticos en inventarios forestales. *Bosque (Valdivia)*, 44(3), 503–518. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000300503>

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no existe conflicto de interés