



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

Sede Andina, El Bolsón

Tesina de Licenciatura

Efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo y la relación con sus funciones en bosques de *Austrocedrus chilensis* del Sudoeste de Río Negro.

Autor: Olayer Pedro Esteban Cortés Pérez

Director: Nicolás Martín Bistolfi

Codirectora: Martha Cecilia Riat

Marzo del 2025

Agradecimientos

Agradecer, en este contexto, me trae la inevitable sensación de que limito y subestimo el valor de quienes, de manera directa e indirecta, hicieron posible que este trabajo se realizara y concluyera; mientras que, al mismo tiempo, sobrestimo el rol de mi individualidad.

Aún así, sobre estimando mi rol, agradezco ante todo a mis padres, hermanos, Cintia, Ana y Pitra. También, a quienes incidieron de manera directa sobre el desarrollo de este trabajo: Nicolás, Martha, Mariano, Paula y Ezequiel. Son muchos más –docentes, conocidos y amigos– quienes de alguna manera, estoy convencido, hacen minúsculo el rol de mi individualidad sobre esta instancia.

Así mismo, debo agradecer a las becas EVC-CIN por haber contribuido con el desarrollo de este trabajo, y en el mismo sentido, a la universidad pública que, exhibiendo la universalidad de la que estos tiempos carecen y a la que el insensato impugna, me abrió sus puertas –como a tantos otros– sin distinción alguna.

Finalmente, agradezco a todos aquellos vecinos y pobladores que nos permitieron ingresar en la intimidad del espacio que habitan, que siempre nos recibieron con sobrada amabilidad y cuyos consentimientos fueron imprescindibles para la realización de este trabajo.

Resumen

Las investigaciones relacionadas a los impactos que tiene la actividad forestal y ganadera sobre suelos de los bosques andino-patagónicos son escasas, lo que hace relevante ampliar el conocimiento respecto a este componente clave por su vinculación a múltiples funciones y servicios ecosistémicos. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo y la relación con sus funciones en bosques de *A. chilensis* del sudoeste de Río Negro. Para esto se realizaron muestreos en 57 rodales con diferentes intensidades de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF), determinadas según el número de heces y tocones por transecta. Se evaluó la densidad aparente (DA), estabilidad estructural de suelo (EES), conductividad hidráulica no saturada (Ku), densidad de raíces (DR), materia orgánica de suelo (MOS), materia orgánica particulada (MOP) y materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOAM). Para analizar la relación entre intensidades de uso y las variables, se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM), seleccionados por su criterio de información de Akaike (AIC) post comprobación de la homogeneidad y normalidad de los residuos. Además, a partir de una revisión narrativa, se describieron las relaciones entre las variables estudiadas y las funciones del suelo (FS). La DA, DR y la MOAM se relacionaron significativamente con cambios en la IUG, lo que implicó que la mayoría de las influencias sobre las FS fueran negativas. Finalmente, este trabajo destaca la necesidad de continuar investigando las posibles implicancias de la actividad silvopastoril en estos suelos, con miras a promover estrategias de manejo que compatibilicen la producción con la gestión sustentable de los bienes comunes naturales, con especial énfasis en la conservación de los suelos y sus funciones.

Palabras claves: sistemas silvopastoriles, andisoles, densidad aparente, estabilidad estructural de suelo, conductividad hidráulica no saturada, fracciones de materia orgánica de suelo, densidad de raíces.

Abstract

Research related to the impacts of forestry and livestock activities on the soils of Andean-Patagonian forests is scarce, and it is important to increase knowledge about this key component because of its link to multiple functions and ecosystem services. In this sense, the aim of this work was to study the effect of forest and livestock use on physical and biological aspects of the soil and the relationship with its functions in *A. chilensis* forests in southwestern Río Negro. For this purpose, 57 stands with different intensities of livestock (IUG) and forest (IUF) use were sampled. The intensity of use was determined by the number of stools and stumps per transect. Soil structural stability (SSS), unsaturated hydraulic conductivity (Ku), soil organic matter (SOM), particulate organic matter (POM), organic matter associated with mineral fraction (MAOM) and root density (RD) were determined at each site. Generalised linear models (GLM), selected for their Akaike information criterion (AIC) after testing their suitability by visual assessment of the homogeneity and normality of the residuals, were used to analyse the relationship between the intensity of use and the variables considered. DR and MOAM were significantly related to changes in IUG. This suggests that multiple soil functions could be affected. However, given the high resilience of these soils, such effects on soil functions may not be observed in practice. Finally, it is important to continue investigating the possible implications of silvopastoral activities in these ecosystems, in order to promote more sustainable management of the natural commons.

Keywords: Silvopastoral systems, andisols, bulk density, soil structural stability, unsaturated hydraulic conductivity, soil organic matter fractions, root density.

Índice

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Abstract.....	4
Abreviaturas.....	6
1. Introducción.....	7
Antecedentes académicos.....	8
De la pertinencia en agroecología.....	9
Delimitación del objeto y formulación del problema de investigación.....	10
Objetivos generales y específicos.....	11
2. Marco teórico.....	12
El suelo como sistema de agregados y poros.....	12
Materia orgánica del suelo.....	14
Las raíces en el ecosistema suelo.....	18
Funciones y servicios ecosistémicos del suelo.....	20
3. Metodología general y específica.....	23
Área de estudio y muestreo.....	23
Metodologías específicas para el objetivo 1.....	27
Metodologías específicas para el objetivo específico 2.....	32
Metodologías específicas para el objetivo específico 3.....	35
4. Resultados y discusión.....	37

	6
Aspectos físicos.....	37
Aspectos biológicos.....	39
Relaciones entre variables de suelo.....	42
Funciones del suelo (FS).....	46
Otras consideraciones.....	51
5. Conclusiones.....	52
6. Referencias.....	53

Abreviaturas

<i>DA</i>	Densidad aparente
<i>DR</i>	Densidad de raíces.
<i>EES</i>	Estabilidad estructural de suelo.
<i>FE</i>	Funciones ecosistémicas.
<i>FS</i>	Funciones del suelo.
<i>IUF</i>	Intensidad de uso forestal.
<i>IUG</i>	Intensidad de uso ganadero.
<i>Ku</i>	Conductividad hidráulica no saturada.
<i>Ku s0.5</i>	Conductividad hidráulica no saturada a una succión de 0,5 cm.
<i>Ku s2</i>	Conductividad hidráulica no saturada a una succión de 2 cm.
<i>MD</i>	Muestra disturbada.
<i>MOAM</i>	Materia orgánica asociada a la fracción mineral.
<i>MOP</i>	Materia orgánica particulada.
<i>MOS</i>	Materia orgánica del suelo.
<i>MP</i>	Muestra tomada con pala.
<i>MSD</i>	Muestra sin disturbar.
<i>SE</i>	Servicios ecosistémicos

1. Introducción

Los bosques de la región Andino-Patagónica históricamente han sufrido el impacto de presiones antropogénicas, entre las que destaca el uso del fuego, con el fin de crear pasturas; la ganadería, con sus implicancias en la regeneración forestal y composición del sotobosque; y la tala para la obtención de madera y leña. De esta manera, se han producido impactos de diversa severidad sobre estos sistemas forestales (Amoroso et al., 2018; Chillo et al., 2018; Piazza et al., 2018; Relva y Veblen, 1998; Rusch y Varela, 2019; Veblen et al., 2004).

Dada la relevancia de los ecosistemas boscosos en general y el bosque andino patagónico en particular –en virtud de sus múltiples servicios ecosistémicos (Chillo et al., 2021; Mori et al., 2017)–, resulta fundamental esclarecer las magnitudes y formas de impacto que las actividades humanas ejercen sobre estos, en particular la ganadera y forestal, que constituyen las principales actividades agropecuarias en estos ecosistemas (Cardozo, 2014; Rusch y Varela, 2019).

En vista lo expuesto, el presente trabajo pretende ampliar el conocimiento sobre los efectos de la actividad forestal y ganadera en un componente clave de los bosques, «el suelo», quien interviene en múltiples funciones y servicios ecosistémicos y constituye una de las principales variables explicativas del crecimiento del bosque (Buduba et al., 2020).

Antecedentes académicos

Para los bosques de ciprés y mixtos de ciprés-coihue, se han identificado modificaciones –vinculadas a la actividad forestal y ganadera– en su estructura y provisión de servicios ecosistémicos (SE) (Amoroso et al., 2018; Chillo et al., 2021). No obstante, dada la enorme heterogeneidad interna de esos ecosistemas, la información existente es todavía relativamente

escasa y no es clara respecto a una tendencia negativa sobre la multi-funcionalidad de estos ecosistemas (Amoroso et al., 2018; Chillo et al., 2018). Por otra parte, estos estudios se han centrado en la comunidad vegetal, no habiéndose abordado aún en profundidad las modificaciones asociadas a la actividad forestal y ganadera en el ecosistema suelo de los bosques de la Norpatagonia Andina.

Pese a lo planteado anteriormente, algunos trabajos y proyectos –como el que acompaña el desarrollo del presente trabajo– han evaluado e incorporado dentro de sus indicadores algunos parámetros de suelo, como densidad aparente y materia orgánica de suelo (MOS), que si bien son sencillos tienen implicancias en múltiples aspectos del ecosistema suelo (almacenamiento de agua, riesgo de erosión, actividad biológica, fertilidad etc). Por ejemplo, Piazza (2018) pudo identificar variaciones significativas en la densidad aparente (DA) en suelos de bosques de coihue (*N. dombeyi*) de la Norpatagonia sometidos a ganadería extensiva, sin embargo no fue ese el caso con la MOS, aspecto sobre el que el ganado mostró ser un factor de control poco relevante.

Aún cuando parámetros o indicadores como los mencionados puedan ser considerados robustos en relación a la amplitud de aspectos con los que se relacionan, son limitados y no dan luz respecto a gran diversidad de funciones y servicios ecosistémicos que tienen al suelo como protagonista, parecen necesarias y pertinentes aproximaciones que incorporen más variables en el análisis.

De la pertinencia en agroecología

Contribuir a la sustentabilidad de los agroecosistemas es uno de los cometidos de la

agroecología, lo cual si bien tiene implicancias de enorme complejidad, como lo es la construcción de proyectos transformadores y emancipadores en post de la soberanía alimentaria (Giraldo y Rosset, 2021; Guzmán, 2006); también posee otras más elementales como lo son la aplicación e investigación de procesos ecológicos en sistemas agrarios (Altieri y Hecht, 1999; Gliessman, 2002; Rosset y Altieri, 2018), lo cual sin dudas precisa del relevamiento de información básica, especialmente cuando esta resulta escasa.

Cabe destacar que la actividad ganadera y forestal integrada a los bosques andino-patagónicos del sudoeste de Río Negro en gran medida responden a pequeños productores, con fuerza de trabajo familiar donde la ganadería representa el principal ingreso predial, y aunque se hallen más o menos inmersos en una economía mercantil, estas unidades familiares en general no se enmarcan en dinámicas de acumulación (Cardozo, 2014). Además, estos actores poseen particular relevancia en tanto, en ciertos casos, actúan de forma implícita y/o explícita como resistencia frente a procesos de desterritorialización o avance de otros usos de suelo asociados al desarrollo inmobiliario y al turismo con gran inversión de capital (Cobelo, 2017).

Por otra parte, la capacidad de conciliar estos sistemas tradicionales con la sostenibilidad de los bienes comunes naturales podría contribuir a la conservación de modos de vida o de mundos en sentido ontológico, relevante en un contexto cultural tendiente a la homogeneización de la comprensión y el habitar del mundo, donde la diversidad en sí misma constituye resistencia a la universalización y condición de posibilidad de emergencias transformadoras (Giraldo, 2022; Kothari et al., 2019).

En síntesis, la pertinencia del presente trabajo para la agroecología se observa al

enmarcarse en la búsqueda de contribuir al uso sustentable de los bienes comunes naturales y con ello también de sujetos/actores claves para la propuesta agroecológica, en tanto fuentes de diversidad, conocimiento y resistencia frente a otros usos de suelo.

Delimitación del objeto y formulación del problema de investigación

Si bien existe claridad respecto a la existencia de efectos, producto de la explotación forestal y la actividad ganadera, sobre los bosques andino-patagónicos, dada la complejidad de estos sistemas y la enorme diversidad interna de la región andino-patagónica, persisten múltiples vacíos de información respecto a las posibles alteraciones en las dinámicas de estos ecosistemas y sobre sus consecuentes funciones y servicios ecosistémicos (Chillo et al., 2021).

De este incremento de información depende la capacidad de desarrollar y definir consideraciones y pautas de manejo que respondan a las especificidades del territorio y que apunten hacia la sostenibilidad de estos sistemas, de cuyo funcionamiento y aportes depende directa e indirectamente la capacidad de sostener múltiples formas de vida.

Cabe destacar que los estudios en torno a la actividad forestal - ganadera y sus efectos sobre estos sistemas en su mayoría se han centrado en bosques de *N. antarctica* y casi exclusivamente sobre la comunidad vegetal y sus dinámicas, no habiéndose analizado en profundidad posibles modificaciones en el ecosistema suelo. En este sentido, Chillo et al. (2021) se refiere a la necesidad de relevar información a nivel de cuenca relacionada a, entre otras cosas, la prevención de la erosión y la fertilidad de los suelos.

Este último aspecto, «el suelo», amerita especial atención considerando el papel central de los suelos forestales en la crisis climática actual, en tanto constituyen los principales

sumideros de carbono en ecosistemas terrestres y son importantes reguladores de flujos de gases de efecto invernadero (GEI), como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Lal, 2016; Montanarella et al., 2015).

Además, en relación a su importancia para la vida humana, los suelos intervienen en diversos SE, cumpliendo papeles claves y múltiples, por ejemplo, respecto a los SE de soporte y regulación, mediante la provisión de hábitat, formación y retención de suelo, secuestro de GEI, control de la erosión, purificación y almacenamiento de agua, entre otros (Lal, 2014).

Es en este marco, que el presente trabajo busca responder cómo afecta el uso forestal y ganadero a los suelos y sus funciones en bosques puros de ciprés de la cordillera del sudoeste de Río Negro, con especial consideración de aspectos físicos y biológicos poco evaluados en el contexto planteado.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general:

- Evaluar el efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo y la relación con sus funciones en bosques puros de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) del Sudoeste de Río Negro.

Objetivos específicos:

- (1) Determinar la densidad aparente (DA), estabilidad estructural (EES) y conductividad hidráulica no saturada (KU) de suelos sometidos a diferentes intensidades de uso forestal (IUF) y ganadero (IUG).
- (2) Cuantificar las fracciones de materia orgánica del suelo (MOS) y la densidad de raíces

(DR) de los primeros centímetros del perfil de suelos sometidos a diferentes IUF e IUG.

- (3) Analizar cambios en las variables consideradas en relación a las intensidades de uso y sus implicancias en las funciones del suelo (FS).

Hipótesis general:

- El uso forestal y ganadero afecta significativamente las propiedades físicas y biológicas del suelo estudiadas en bosques de ciprés (*A. chilensis*), reduciendo su estabilidad estructural, conductividad hidráulica no saturada, contenido de materia orgánica y densidad de raíces, e incrementando su densidad aparente, lo que influye negativamente en múltiples funciones del suelo.

2. Marco teórico

El suelo como sistema de agregados y poros.

El suelo, desde una perspectiva reduccionista pero útil, puede ser visualizado como un conjunto de numerosos agregados de partículas de múltiples tamaños, considerables como unidades estructurales. Como contraparte, la presencia de estas unidades estructurales conlleva la existencia de un conjunto de espacios entre-agregados (poros). La disposición, tamaños y formas de los agregados y poros conforman un sistema que otorga «estructura» al suelo.

Más allá de las teorías de cómo se produce la agregación, en general se reconoce como resultado de enlaces iónicos entre minerales y cationes, MOS, actividad microbiana, exudados radiculares y microbianos, entre otros factores (Bronick y Lal, 2005). A su vez, estos agregados, o más genéricamente, la estructura del suelo, condiciona múltiples procesos de índole biológico,

químico y físico, mediante sus implicancias en la disponibilidad de hábitats, crecimiento de plantas y raíces, almacenamiento y ciclado de nutrientes, retención e infiltración de agua, erosión hídrica y eólica, formación de poros, entre otras cosas (Díaz-Zorita et al., 2002). En este sentido, y como es de imaginarse, aquello que la estructura condiciona le condiciona a sí mismo, generándo múltiples y complejas interacciones de retroalimentación.

El aspecto de la estructura más evaluado es la estabilidad, para lo cual existen numerosas metodologías para su estudio en consideración de múltiples contextos y objetivos. En términos generales, la estabilidad estructural del suelo se entiende como la capacidad de un suelo de conservar su arreglo de partículas y poros después de ser sometido a un(os) factor(res) de estrés (Conti y Giuffré, 2014) como la lluvia, esorrentía, viento, pisadas, arados, etc. Usualmente, es un aspecto evaluado mediante el sometimiento de cierta fracción de agregados –normalmente macroagregados ($>250 \mu\text{m}$)– a sucesivas inmersiones en agua, considerándose el porcentaje de suelo conservado post-estrés como un indicativo de estabilidad (Rieke et al., 2022).

Por otro lado, los poros y sus características tienen implicancias sobre aspectos similares y estrechamente relacionadas con las de los agregados, y es allí donde efectivamente ocurren todos los procesos químicos, físicos y biológicos (Conti y Giuffré, 2014). Los poros pueden ser categorizados en dos grandes grupos, aquellos de origen textural, que son consecuencia de la conformación granulométrica del suelo, de tamaños $<50 \mu\text{m}$ (meso-microporos) y se ubican al interior de los agregados; y de origen estructural, que poseen tamaños $>50 \mu\text{m}$ (macroporos) y son producto del espacio entre agregados. Estos últimos son especialmente afectados por los manejos e impactos antrópicos y afectan directamente sobre la capacidad de drenaje, movimiento

de aire, penetración y desarrollo radicular (Conti y Giuffré, 2014; Hamblin, 1986).

Este aspecto (porosidad) puede ser evaluado mediante aproximaciones a partir de la densidad aparente de suelo, imágenes de rayos X, valores de conductividad hidráulica no saturada (Šimůnek y Van Genuchten, 1996; Watson y Luxmoore, 1986), entre otras formas.

Las actividades ganaderas y forestales pueden impactar significativamente este sistema. Por una parte, como plantean Greenwood y McKenzie (2001), el pisoteo del ganado puede compactar el suelo, reducir su porosidad y destruir agregados del suelo; aumentando la densidad aparente y disminuyendo la estabilidad de estructural y la infiltración de agua. La magnitud de estos efectos varía según factores como la humedad del suelo, la presencia de residuos orgánicos, el tipo de ganado, etc. Por otro lado, el uso forestal, también puede generar compactación debido al tránsito de maquinaria, alterando la distribución de poros y agregados. Además, la remoción de biomasa reduce la incorporación de materia orgánica, pudiendo afectar a la estabilidad estructural del suelo (Greacen y Sands, 1980).

Materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) se refiere al conjunto de constituyentes orgánicos en el suelo en sus diversas formas y etapas de descomposición, tales como microorganismos y tejidos de plantas y animales muertos cuyos tamaños sean menores a 2 mm (FAO, 2017). Esta porción del suelo tiene incidencia sobre múltiples propiedades y procesos del suelo, como en la disponibilidad de nutrientes; retención, filtrado e infiltración del agua; estabilidad estructural; aireación, entre otras. Por otra parte, la MOS constituye una forma de reserva de carbono, mayor a las reservas contenidas en la atmósfera y la vegetación terrestre juntas (ITPS y FAO, 2015),

cuestión especialmente relevante en un contexto de cambio climático.

Dada su importancia, la MOS es un parámetro frecuentemente utilizado para estimar calidad de sitios, salud del suelo o para evaluar el riesgo e impacto de manejos. No obstante, para esto último, el porcentaje total de MOS suele ser un indicador con escasa sensibilidad a corto plazo, por lo que resulta poco útil con estos fines. Pese a lo anterior, la fracción menos estable – en términos generales– de la MOS ha mostrado ser especialmente sensible a los manejos y con ello una variable adecuada como indicador de impacto (Galantini et al., 2007). También se ha descrito como una importante fuente de nitrógeno mineralizable (Galantini et al., 2007; Talab et al., 2019), lo que podría permitir considerarla como indicadora de fertilidad.

Esta fracción menos estable, cualidad no asociada tanto a su naturaleza química como se creía históricamente, si no más bien a su baja protección¹ frente a la acción microbiana en el suelo (Schmidt et al., 2011), se denomina comúnmente «materia orgánica particulada (MOP)» y se define como la fracción de la MOS cuyo tamaño es mayor a 50/53 μm , aunque alternativamente puede definirse por su rango de densidad (Balesdent, 1996; Balesdent et al., 1998; Lavalley et al., 2020). Esta fracción deriva tanto de residuos aéreos como subterráneos, aunque estos últimos –en particular los radiculares– resultan especialmente eficientes en la formación de MOP (Villarino et al., 2021). A su vez, su formación deriva de los compuestos estructurales o más recalcitrantes (ricos en lignina y con alta relación C:N) de los residuos

1 Al respecto, Villarino y Pinto (2021) plantean 3 mecanismos de protección de la MOS frente a la descomposición microbiana: «por composición», «por ubicación» y «por enlaces físicos y químicos». La «protección por composición» se relaciona a la presencia de compuestos recalcitrantes ricos en lignina y con alta relación C:N. Por otra parte, la «protección por ubicación» se refiere a la oclusión de partículas de MOS en micro y macroagregados, lo que impide o reduce el acceso de la biota edáfica a estas partículas. Finalmente, la «protección por enlaces físicos y químicos», permite la adsorción de partículas orgánicas a las arcillas y la formación de compuestos órgano-minerales, lo que confiere protección dentro de microagregados.

(Cotrufo et al., 2015).

Por otra parte, la MOS con tamaño inferior a los 50/53 μm es denominada «materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOAM)», típicamente considerada como la fracción más estable de la MOS (Lavalley et al., 2020). Esta deriva, principalmente, de residuos de rápida descomposición (con baja relación C:N). Aunque la importancia relativa de una u otra fuente de residuos orgánicos en su contribución a la MOAM puede variar de un escenario a otro, en general, se estima que la principal fuente es la necromasa y los metabolitos microbianos²; como fuente secundaria, residuos vegetales transformados y estabilizados por la acción de microorganismos (Liang et al., 2017).

El impacto de la actividad ganadera sobre la MOS no es del todo claro ni generalizable. Dependiendo del contexto ambiental, el sistema productivo y el sistema de referencia, el pastoreo puede generar aumentos, disminuciones o no producir cambios significativos en la MOS. Por ejemplo, Piñeiro et al. (2009) observaron que la exclusión del ganado en pastizales generó tanto aumentos como disminuciones en la MOS, dependiendo de las condiciones edáficas. Estos cambios fueron asociados al balance entre la asignación de nitrógeno (N) a las raíces y las pérdidas de N por lixiviación y volatilización desde las deyecciones del ganado, lo que a su vez modula la formación y acumulación de MOS.

Respecto a la actividad forestal, los impactos –en sentido y magnitud– también pueden

2 Respecto a la dinámica de la MOAM, los modelos explicativos actuales le otorgan un papel central a los microorganismos del suelo (especialmente a hongos y bacterias), siendo dos los procesos más destacados: la descomposición de la MOAM («*priming effect*») e incorporación de necromasa microbiana («*entombing effect*») (Lavalley et al., 2020; Liang et al., 2017). Probablemente, este segundo proceso, ha sido el más contrastante respecto a los marcos conceptuales anteriores, donde los residuos vegetales ocupaban el papel principal y los microorganismos un papel de mediadores (Liang et al., 2020). No obstante, se ha constatado que en múltiples contextos (e.g., en suelos de sistemas forestales), los residuos vegetales pueden contribuir con más del 50 % de la MOAM (Angst et al., 2021).

ser muy variables según las especies forestales, prácticas de manejo y el tiempo transcurrido desde las intervenciones. Por ejemplo, la extracción de árboles completos puede reducir la MOS, a causa de la remoción de biomasa de hojas, ramas y raíces; mientras que la tala de troncos se ha asociado a aumentos en la MOS, dado que se mantiene o incorpora al suelo la biomasa restante (Johnson y Curtis, 2001).

En contextos forestales próximos al del presente estudio, Piazza et al. (2018) observaron que la presencia de ganado extensivo no generó cambios significativos en la MOS, a pesar de estar asociado a modificaciones ambientales notables. Por otro lado, Chillo et al. (2018) observaron que una alta intensidad de uso silvopastoril, lo cual incluye tanto el pastoreo como el uso forestal, se relacionó con una disminución en la MOS, lo cual vincularon con modificaciones en la relación C:N de la vegetación y a cambios en la biodiversidad funcional.

Cabe mencionar, que si bien es habitual que la MOS se considere dentro de la dimensión «química» del suelo, en este estudio se clasifica como un aspecto «biológico», como plantean Poppiel et al. (2025) y Jat et al. (2018). Esta consideración se fundamenta en su estrecha, permanente y dinámica relación con lo vivo, en tanto no solo actúa como insumo para la actividad biológica sino que, al mismo tiempo, es producto directo e indirecto de organismos de diversos orígenes y en diferentes estados (Angst et al., 2024; Lavallee et al., 2020). Además, su estimación incluye inevitablemente una fracción de organismos vivos (Magdoff, 2015; Sparling, 1992), lo que refuerza el sentido de su consideración dentro de los aspectos biológicos del suelo .

Las raíces en el ecosistema suelo

Las raíces juegan un rol importante en la configuración y funcionamiento del ecosistema

suelo. En este sentido, se les reconoce un papel clave en la estabilidad de suelo y en el ciclado de nutrientes y carbono (Bardgett et al., 2014).

En relación la estabilidad de suelo, las raíces actúan sobre el ciclo de formación y destrucción de agregados. Por medio de los exudados radiculares, que contienen polisacáridos y proteínas, se produce la unión entre partículas minerales y con ello la formación de agregados. Además, estos mismos componentes de los exudados, pueden otorgarle un recubrimiento hidrofóbico a las partículas de suelo, reduciendo así el impacto del agua y la humedad sobre estas (Czarnes et al., 2000), lo cual redundará en más estabilidad. Al mismo tiempo, la penetración de las raíces puede romper mecánicamente los agregados (Six et al., 2004a).

Respecto al ciclo de nutrientes, las raíces pueden afectar de manera directa la disponibilidad de nutrientes mediante la acción de exudados –por ejemplo, sobre la disponibilidad de fósforo (George et al., 2011)–; e indirectamente, por medio de la mineralización microbiana de la MOS, inducida por las rizodeposiciones (Bengtson et al., 2012).

Sobre el ciclo del carbono, las raíces no solo juegan un papel clave como proveedoras de residuos radiculares. Estas intervienen directa e indirectamente en la estabilización y desestabilización de la MOS. Sobre esta dinámica, Dijkstra et al. (2021) proponen una síntesis conceptual de las raíces como un motor en la dinámica de la MOS («*Rhizo-Engine framework*»), en donde estas intervienen mediante sus implicancias en el «recambio microbiano» y en la «matriz físico-química» del suelo.

A grandes rasgos, dentro de este marco conceptual, se expone el rol de las rizodeposiciones como potenciadoras de la actividad microbiana, lo que puede favorecer la

estabilización de la MOS en forma de MOAM a partir de la necromasa microbiana. Sin embargo, este aumento en la actividad microbiana, también puede desestabilizar la MOS, al ser usada como alimento por los microorganismos.

Por otra parte, como se describió con anterioridad, se plantea el rol de las raíces en la formación de agregados y, en consecuencia, en la protección y estabilización de la materia orgánica en el suelo. No obstante, las raíces también participan en la destrucción de agregados, exponiendo la MOS y haciéndola más susceptible a la descomposición.

En cuanto a los efectos de la actividad forestal y ganadera sobre las raíces, estos pueden ser diversos. Por una parte, los procesos de compactación causados por ambas actividades pueden reducir la biomasa radicular producto de la restricción física que la compactación impone al crecimiento de las raíces (Parlak y Parlak, 2011). Por otro lado, asociado al ramoneo, se han observado efectos negativos sobre la biomasa radicular de especies palatables (Paz y Raffaele, 2015), aunque también se ha observado que el pastoreo del ganado puede generar aumentos en la biomasa radicular superficial debido a la asignación de carbono y nitrógeno desde la parte aérea de la vegetación hacia las raíces (Piñeiro et al., 2009).

Funciones y servicios ecosistémicos del suelo

Las «funciones ecosistémicas» (FE) se refieren al conjunto de mecanismos que sostienen la integridad o el mantenimiento de los ecosistemas y se suele considerar –en contraste con el concepto de «servicios ecosistémicos»– como una perspectiva centrada en los ecosistemas (Brockerhoff et al., 2017). De Groot et al. (2002) define 4 grandes categorías de funciones: funciones de regulación, funciones de sustrato, funciones de producción y funciones de

información. Estas a su vez engloban múltiples y variadas –según el marco analítico– funciones ecosistémicas.

El ecosistema suelo interviene directa e indirectamente en todas las FE, denominándose como «funciones del suelo» (FS) aquellas más estrechamente ligadas a este sistema. Sobre estas se han desarrollado marcos conceptuales que han contribuido a poner en relieve la importancia y a conducir el estudio de sistema suelo. El frecuentemente citado (e.g., por la FAO) Marco Directivo del Suelo de la Unión Europea (CEC, 2006), define 7 FS: (1) producción de biomasa; (2) almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua; (3) reserva de biodiversidad, tal como hábitats, especies y genes; (4) entorno físico y cultural para las personas y sus actividades; (5) fuente de materias primas; (6) actúa como reservorio de carbono; y (7) como reservorio de patrimonio geológico y arqueológico.

A partir de la publicación de la *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio* (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) se consolidó el marco conceptual de los servicios ecosistémicos (SE), que hacen referencia a las contribuciones directas e indirectas de los ecosistemas al bienestar humano y por ende –a diferencia de las FE– poseen una formulación conceptual centrada en el bienestar y beneficio humano. Son cuatro las grandes categorías de SE comúnmente utilizadas y planteadas en el informe antes mencionado: soporte, regulación, provisión y cultural. A su vez, estos se comprenden como consecuencia de la ocurrencia de múltiples FE (de Groot et al., 2002; Haines-Young y Potschin, 2010a, 2010b).

Dos SE del suelo claves en el contexto de cambio global son los de regulación del clima y control de la erosión, especialmente si consideramos que las dos principales amenazas a la

función del suelo en América Latina son la erosión del suelo y el cambio de carbono orgánico, que derivan de las FS de regulación de GEI y de retención del suelo superficial (ITPS y FAO, 2015). A su vez, estas FS –y por ende sus SE asociados– dependen de múltiples propiedades y procesos.

Un aspecto del suelo relevante y uno de los indicadores más empleados es la «estabilidad de agregados», que tiene implicancias sobre la susceptibilidad a la erosión y la estabilidad de la materia orgánica del suelo (MOS) (Rabot et al., 2018), ambas cuestiones directamente ligadas a las FS mencionadas. No obstante lo anterior, por otras cualidades de los agregados –como la de constituirse como hábitat de múltiples micro/macro organismos– resulta posible ampliar considerablemente las implicancias de este aspecto sobre las FS. A su vez, los agregados y su estabilidad se ven directamente influenciadas por la actividad biológica del suelo, presencia de raíces, así como otros factores de naturaleza química y física (Torres-Guerrero et al., 2013).

Las raíces en el suelo, como mencionamos anteriormente, inciden sobre la formación de agregados y su estabilidad, y con ello sobre la función de retención del suelo, aunque no solo sobre esta. Si observamos al suelo como sistema poroso (perspectiva alternativa a la de sistema de agregados) las raíces cumplen un papel fundamental en su formación (tras su penetración, desarrollo y muerte en el suelo), y con ello tienen indirectamente incidencia en FS ligadas al sistema poroso, como el almacenamiento y transporte de agua (González-Barrios et al., 2011) y con ello a los SE de suministro y transporte de agua y regulación de la erosión. Por supuesto, al igual que con los agregados, el sistema poroso puede comprenderse como hábitat de múltiples organismos, lo que podría ampliar las FS y SE implicados.

Así, y en consideración de los antecedentes mencionados previamente, las actividades forestales y ganaderas, por medio de los procesos de compactación, tienen la capacidad de aumentar la densidad aparente, disminuir la estabilidad estructural del suelo, reducir la infiltración de agua y limitar el desarrollo radicular, afectando directamente funciones como el almacenamiento y filtrado de agua y la producción de biomasa; por medio de las modificaciones ambientales (relación C:N de los residuos, disponibilidad de biomasa, actividad biológica, etc.) y la destrucción de agregados, pueden acelerar procesos de mineralización que reduzcan la MOS, impactando funciones clave como el ciclado de nutrientes, el almacenamiento de carbono y el hábitat para la actividad biológica. De esta manera, eventualmente, todas las funciones del suelo pueden verse afectadas negativamente y con ello los servicios ecosistémicos asociados. No obstante, como se desprende de este marco teórico, el sentido y la magnitud de los efectos de una u otra actividad pueden cambiar de manera notable según la situación estudiada.

3. Metodología general y específica

Área de estudio y muestreo

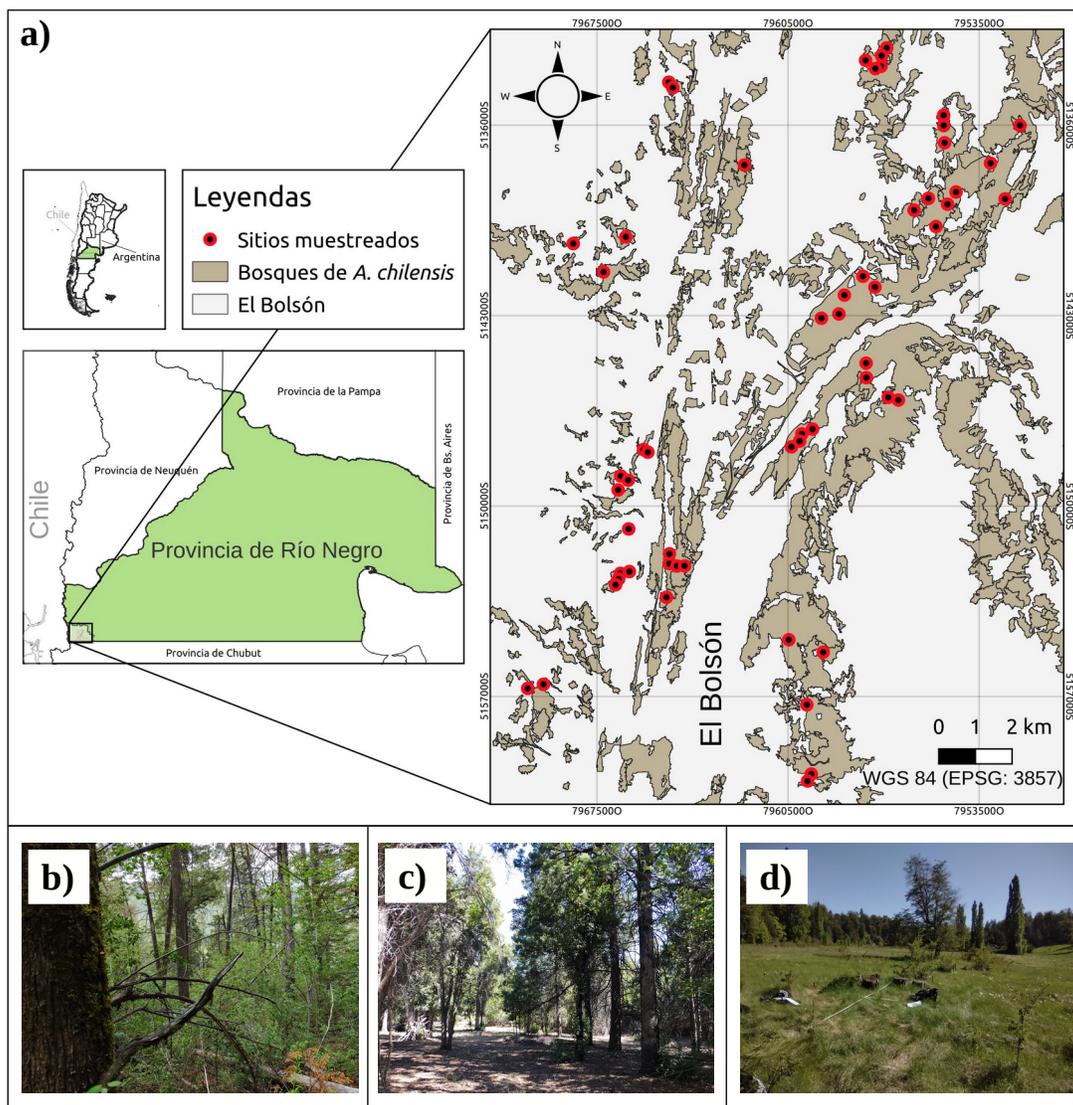
El área de estudio se localiza sobre la cuenca del Río Puelo en torno a la localidad de El Bolsón, prov. de Río Negro. El clima es templado-frío, con temperaturas medias mensuales que oscilan entre los 3 °C en el mes más frío y los 16 °C en el mes más cálido (Bustos y Rocchi, 2008). La cobertura forestal es de bosque andino-patagónico, con diferentes tipos forestales, entre ellos bosques puros de ciprés (*A. chilensis*) y otros con dominancia del género *Nothofagus* (CIEFAP y MAyDS, 2016). Los suelos se caracterizan por texturas franco arenosas a arcillosas

en horizontes superficiales, poseer estructura granular en el horizonte A, ser ricos en MOS y estar fuertemente influenciados por cenizas volcánicas, siendo dominantes los suelos Andisoles, aunque también es posible observar Molisoles en las zonas más bajas (Lanciotti y Cremona, 1999; Sistema de información Patagonia Norte, s. f.).

En bosques puros de ciprés se realizaron muestreos de suelo sobre 57 sitios (Figura 1.a), en torno a transectas de 50 m ubicadas en rodales representativos de alta, baja y media intensidad de uso forestal y ganadero (Figura 1. b, c y d). En general, situaciones de baja intensidad de uso forestal se asocian a sitios de baja intensidad de uso ganadero, debido a que la mayor abundancia de vegetación en el estrato arbóreo y arbustivo reduce el acceso del ganado; mientras que sitios de muy alta intensidad de uso forestal tienden a coincidir con altas intensidades de uso ganadero, facilitado por el mayor acceso del ganado y las mayores productividades primarias netas. Los sitios se ubicaron en un rango de precipitación media anual de entre 900 y 1500 mm; altitud, entre 400 y 900 msnm; y en orientaciones de las laderas con exposición norte, este y oeste. Las transectas se desplegaron en dirección del flujo del principal agente erosivo y mantuvieron una distancia mínima de 30 m de caminos, aguadas y bordes de alambrado.

Figura 1:

Mapa del área de estudio e imágenes ilustrativas de los sitios muestreados .



Nota. Arriba: a) Mapa del sitio de estudio. Abajo: imágenes ilustrativas de sitios muestreados con bajas (b), medias (c) y altas (d) intensidades de uso forestal y ganadero.

En torno a cada transecta se tomaron muestras de suelo en el punto inicial, medio y final.

En cada punto se tomaron dos muestras con un barreno con cilindro interior removible, conservándose una de ellas sin disturbar (MSD) y otra disturbada (MD). También, con una pala, se extrajo una tercera muestra (MP) de aprox. 200 cm³. Todas las muestras se extrajeron dentro de los primeros 10 cm de suelo y a una distancia de al menos 1 m de la base de árboles. Cabe mencionar que, para la MD, se tuvo especial cuidado de enrasar con un cuchillo el suelo que excedía los límites del volumen del cilindro removible, de modo tal que la MD tuviese un volumen conocido (100 cm³).

Por otra parte, dentro de una faja de 2 m a cada lado de la transecta, se contabilizaron las heces de ganado (ovino y bovino) y tocones, estos últimos clasificados en 4 categorías: grande (>10 cm de diámetro) y chico (<10 cm de diámetro) que a su vez se separaron en dos clases, nuevo, cuando se observaban íntegros; y viejos, cuando se observaban en proceso de desagregación. En base al número de heces se determinó la intensidad de uso ganadero (IUG)³ y en base al número de tocones la intensidad de uso forestal (IUF). Cabe destacar que el muestreo fue de tipo dirigido, con la finalidad de representar la mayor amplitud de intensidades de uso forestal y ganadero.

Los muestreos se realizaron durante la temporada de verano (noviembre a marzo) del periodo 2022-2023 en el contexto del desarrollo del proyecto de investigación (aprobado y financiado por Universidad Nacional de Río Negro) denominado *Efectos del uso silvopastoril en la estructura forestal y provisión de servicios ecosistémicos en bosques de Austrocedrus chilensis de la Norpatagonia Andina* con código PI 40-B-964.

3 Si bien es habitual utilizar la «carga ganadera» como un indicador de intensidad de uso, en la mayoría de los sitios estudiados no existe información precisa al respecto y, por otra parte, dada la heterogeneidad en el uso del espacio y los recursos por parte del ganado bovino y ovino integrado a los bosques de *A. chilensis*, resulta más apropiado hacer estimaciones directas sobre los sitios estudiados.

Metodologías específicas para el objetivo 1

Densidad aparente (DA): La DA se determinó en cada MD mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), haciendo uso de un barreno para muestras de densidad aparente de Copains S.R.L. (Figura 2). Para ello, las MD se llevaron a la estufa a 105 °C por 48 h para obtener su peso seco. Luego, como se observa en la fórmula que sigue, se calculó la DA como la relación entre el peso seco de la MD (PSMD) y el volumen de la MD (VMD), el cual corresponde al volumen del cilindro removible del barreno (100 cm³).

$$DA = \frac{PSMD}{VMD}$$

Figura 2:

Extracción de muestra para densidad aparente



Nota. a) Muestreo en campo con *barreno para muestras de densidad aparente* de Copains S.R.L.

b) Extracción del cilindro removible con muestra de suelo. c) Enrasado de muestra.

Estabilidad estructural de suelo (EES). La EES se midió en 3 submuestras (a modo de réplicas) para cada MSD mediante tamizados en húmedo con tamiz único (Kemper y Rosenau, 2018), y se comprendió como el porcentaje de conservación de los agregados de suelo tras sucesivas inmersiones en agua destilada.

Para esta evaluación se seleccionaron 4 g de agregados de entre 1 y 2 mm –haciendo uso de tamices de 1 y 2 mm de abertura– y se depositaron en un tamiz con abertura de 0,25 mm para ser sometidos a cerca de 102 inmersiones en agua destilada en 3 min. El agua destilada con el suelo que atravesó el tamiz se llevó a la estufa a 110 °C por 48 h, tras lo cual se pesó y se obtuvo el «peso seco del suelo perdido» (PSSP).

Luego, el suelo retenido en el tamiz se sometió a sucesivas inmersiones en 100 ml de solución dispersante (2 g NaOH/L) hasta que en los tamices solo se observasen restos de raíces y arena. La solución dispersante con suelo se llevó a la estufa a 110 °C por 48 h, tras lo cual se pesó y se obtuvo el «peso seco del suelo conservado» (PSSC).

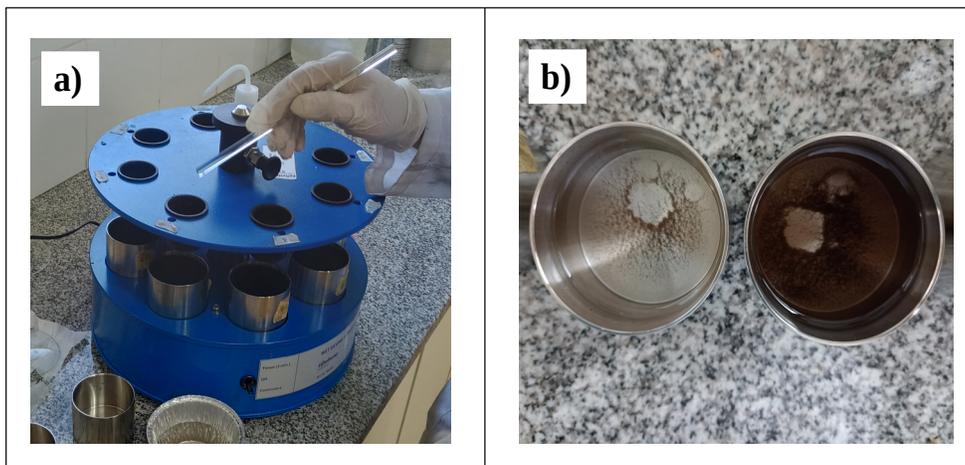
Finalmente, se calculó la EES mediante la siguiente fórmula:

$$EES = \frac{PSSC - 0,2g}{(PSSC - 0,2g) + PSSP} \times 100$$

Para este procedimiento se utilizó un equipo de tamizado en húmedo, el *wet sieving apparatus* de Royal Eijkelkamp (Figura 3), que automatiza las inmersiones y facilita la selección y posterior pesaje del suelo perdido y conservado tras las inmersiones.

Figura 3:

Equipo de tamizado en húmedo e imagen ilustrativas de casos con estabilidad contrastante.



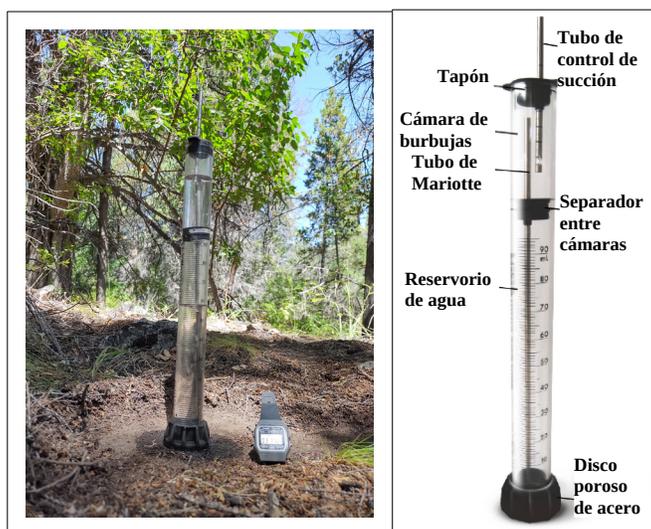
Nota. a) *Wet sieving apparatus* de Royal Eijkelkamp. b) Imagen ilustrativa del suelo perdido tras las inmersiones de dos situaciones con estabilidad contrastante.

Conductividad hidráulica no saturada (Ku). Para medir la Ku de suelo se utilizó un infiltrómetro de tensión, realizándose mediciones en el punto medio de cada transecta, en un área representativa del sitio. Para esto se realizó una preparación del sitio de medición, despejando el mantillo y la vegetación superficial –procurando minimizar la perturbación de la capa subyacente del suelo– con el fin de asegurar un buen contacto entre esta y la superficie del disco del infiltrómetro. Sobre el sitio preparado se realizaron mediciones cada 30 segundos, a succiones de -2 cm y -0,5 cm y hasta haberse infiltrado por lo menos 15 ml. Para el cálculo de Ku se utilizó el método propuesto por Zhang (1997), el cual relaciona la pendiente de una línea de tendencia (C1) –obtenida de la infiltración frente a la raíz del tiempo– y un valor (A) derivado de los parámetros de Van Genuchten, el valor de succión y el radio del infiltrómetro. Este cálculo se

realizó utilizando planilla de excel puesta a disposición por el fabricante (METER Group, 2021b), obteniendo un valor de K_u para cada succión.

Figura 4:

Infiltrómetro de tensión de minidisco.



Nota. A la izquierda, fotografía de una medición realizada en campo; a la derecha, diagrama del infiltrómetro de mini disco (modificado de METER Group (2021a)).

Textura. La clase textural se determinó en las MP obtenidas de los puntos de medición de K_u , y por medio del método de Bouyoucos (1936), en su versión modificada descrita por Beretta et al. (2014). Este dato fue utilizado para la obtención del valor A , empleado en el cálculo de las K_u .

El procedimiento se inicia con la oxidación de la MOS de 70 g de suelo previamente tamizado (en tamiz de 2 mm) y secado a 80 °C. Este tratamiento de oxidación se realizó en vasos precipitados sobre placas de calor a 80 °C (Figura 5), agregando alícuotas de peróxido de

hidrógeno (H_2O_2 de 130 volúmenes) hasta el cese de la efervescencia, tras lo cual se llevó el suelo tratado a la estufa por 48 h a 80 °C.

Luego, con el fin de desagregar las partículas, se pesaron 50 g de suelo tratado seco y se dejó en remojo por 24 h en una solución al 5 % de hexametáfosfato de sodio $((NaPO_3)_6)$. Al transcurrir las 24 h, la suspensión de suelo se agitó con una minipimer durante 5 min, obteniendo así la solución de suelo disperso. Posteriormente, esta solución se llevó a una probeta de 1lt, la cual se llenó con agua destilada hasta la marca de 1 L. Esta solución se homogenizó con un agitador manual, dando inicio a la decantación de partículas.

Finalmente, se realizó una primera medición con el hidrómetro de Bouyoucos a los 40 s, y una segunda a las 2 h, de iniciada la decantación de partículas. Tras cada medición de densidad se midió la T (°C). Paralelamente, se realizaron las mismas mediciones y en los mismos tiempos a una probeta con 1 L de agua destilada y hexametáfosfato de sodio (5 g), actuando como blanco con fines de correctivos.

Con estas determinaciones de densidades y temperaturas –e incluyendo una corrección debido a la temperatura de calibración del hidrómetro de Bouyoucos– se pudieron estimar los porcentajes de arena, arcilla y limo, utilizando las ecuaciones que siguen.

$$\% \text{ Arena} = \frac{100 - (L1 + (0,36 \times (T1 - 20))) - LB1 + (0,36 \times (TB1 - 20))}{PSS} \times 100$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{(L2 + (0,36 \times (T2 - 20))) - LB2 + (0,36 \times (TB2 - 20))}{PSS} \times 100$$

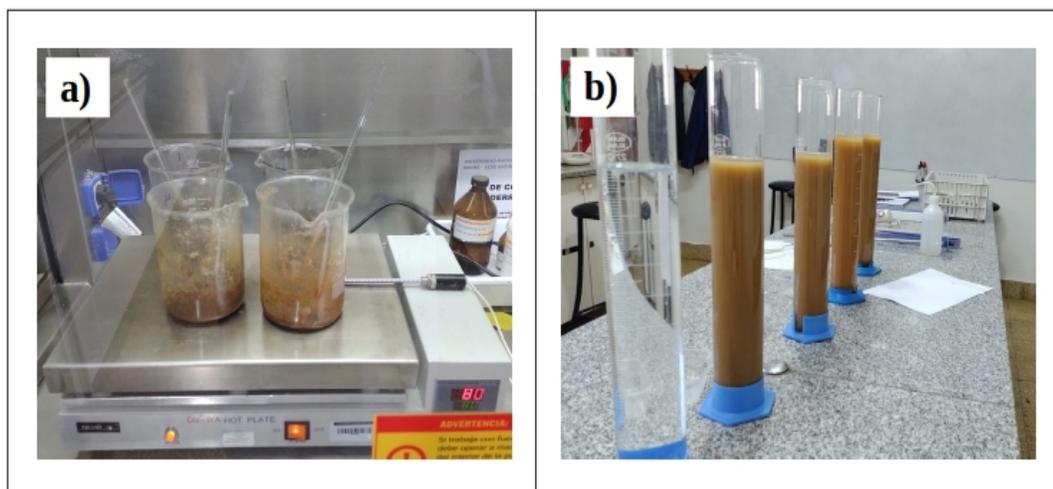
$$\% \text{ Limo} = 100 - \% \text{ Arena} - \% \text{ Arcilla}$$

A saber: L1, densidad (g/L) a los 40 s; T1, temperatura (°C) a los 40 s; LB1, densidad (g/L) del blanco a los 40 s; TB1, temperatura (°C) del blanco a los 40 s; L2, densidad (g/L) a las 2 h; T2, temperatura (°C) a las 2 h; LB2, densidad (g/L) del blanco a las 2 h; TB2, temperatura (°C) del blanco a las 2 h; PSS, peso seco de la muestra analizada, en gramos.

En base a las estimaciones del % de arena, limo y arcilla, y por medio del triángulo textural (Ditzler et al., 2017) , se determinó la clase textural.

Figura 5:

Determinación de textura de suelos mediante el método de Bouyoucos,



Nota. a) Oxidación de la materia orgánica del suelo con H_2O_2 sobre placa de calor. b) Probeta blanco (primera desde la izquierda) y probetas con muestras de suelo durante la ejecución del método de Bouyoucos.

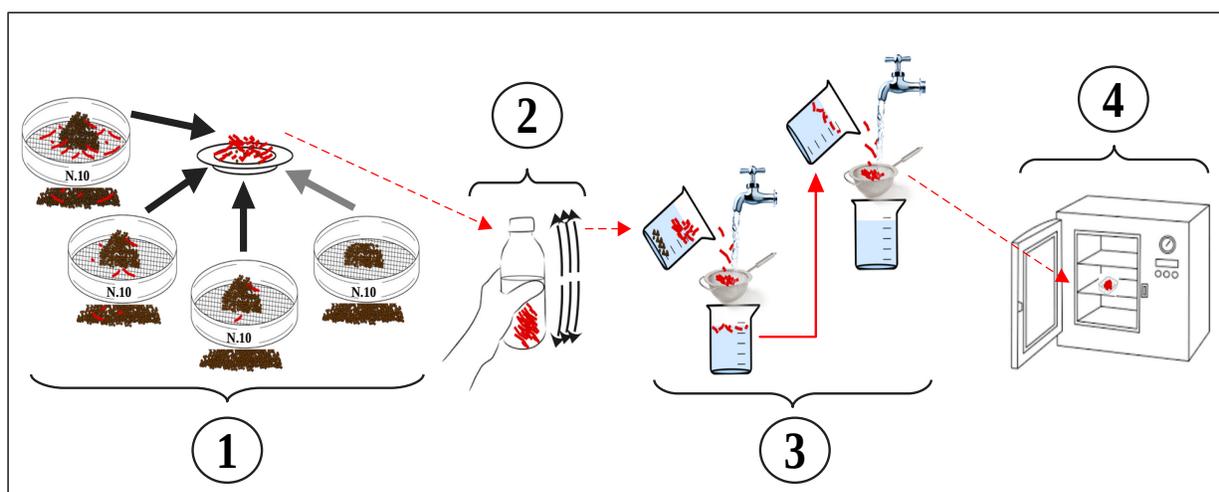
Metodologías específicas para el objetivo específico 2

Densidad de raíces (DR). Se evaluó en todas las MD. El valor de DR se obtuvo de la

relación entre el peso seco de las raíces (PSr) y el volumen de la muestra (VM). Para la obtención de las raíces se realizaron sucesivos tamizados de las MD con un tamiz de 2 mm de abertura hasta no observarse raíces retenidas sobre este. Posteriormente, las raíces retenidas se agitaron mecánicamente en una solución de NaCl al 10% (p/v) (con el fin de desagregar y separar el suelo adherido a las raíces), para luego ser pasadas por un colador de 1 mm de abertura bajo un flujo de agua. Finalmente, las raíces se llevaron a la estufa por 24 h a 80 °C para su posterior pesaje, lo que permitió obtener el valor de PSr.

Figura 6:

Imagen ilustrativa del procedimiento definido para la extracción de raíces.



Nota. **(1)** Tamizados sucesivos de las muestras de suelo y extracciones de las raíces retenidas sobre el tamiz (hasta que no se observen raíces sobre este). **(2)** Agitación de las raíces en solución de NaCl al 10% para separar las partículas de suelo adheridas. **(3)** Lavado de las raíces por diferencia de densidad en un vaso precipitado con agua, recolectando las raíces con un

colador de 1 mm bajo el grifo. El procedimiento se repite para las raíces que pasen por el colador. (4) Secado de las raíces en estufa a 80 °C por 24 h para determinar su peso seco (PSr).

Materia orgánica de suelo (MOS). Se midió para cada punto de las transectas a partir de las MP previamente pasadas por un tamiz de 2 mm. Su determinación se realizó mediante el método de pérdida de peso por ignición (Davies, 1974). Para esto, cada muestra se llevó a la estufa por 24 h a 105 °C, tras lo cual se pesaron 3 submuestras de suelo (a modo de réplicas) de aprox. 5 g en crisoles de porcelana de peso conocido. Luego, se llevaron los crisoles con suelo a una mufla (Figura 7) por 24 h a 430 °C, tras lo cual se pesaron los crisoles con suelo y se determinó el % MOS a partir de la diferencia entre el peso inicial y final, como se expone en la fórmula que sigue:

$$\% \text{MOS} = \frac{\text{peso a } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso a } 430^{\circ}\text{C}}{\text{peso a } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$$

Figura 7:

Mufla con muestras de suelo en crisoles.



Materia orgánica particulada (MOP). Se midió para cada punto de las transectas a partir de las MP. Para su determinación, siguiendo el procedimiento descrito por Cambardella y Elliot (1992) y en consideración de los resultados de Videla et al. (2008), se tomaron 20 g de suelo seco al aire, tamizado por 2 mm y desagregado con hexametáfosfato de sodio (5 g/L) en agitador orbital por 15 h. Luego, las muestras fueron tamizadas en húmedo con un tamiz de 50 μm . La fracción $>50 \mu\text{m}$ fue secada en estufa a 80 °C durante 24 h y pesada. Sobre esta fracción se determinó el porcentaje de materia orgánica mediante el método de pérdida de peso por ignición como se describió para la estimación de MOS.

$$\% MOP = \frac{\%MOSR \times PSSR(g)}{20}$$

A saber: % MOSR, porcentaje de materia orgánica en el suelo retenido sobre el tamiz de 50 μm ; PSSR, peso seco del suelo retenido.

Materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOAM). Se estimó a partir de la diferencia entre los porcentajes de MOS y MOP.

$$\% MOAM = \%MOS - \%MOP$$

Metodologías específicas para el objetivo específico 3

Para analizar la relación entre las intensidades de uso y las variables de suelo se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM), seleccionados por su criterio de información de Akaike (AIC) post comprobación de su idoneidad mediante evaluación visual de la homogeneidad y normalidad de los residuos. Se consideró un nivel de significancia (α) del 5%. Todos los análisis estadísticos se realizaron en R (R Core Team, 2023).

Cabe destacar que, para cada variable de suelo, se realizó una identificación de valores atípicos (outliers), eliminando aquellos valores que estuviesen a una distancia mayor a 1,5 veces el rango intercuartil (IQR) del primer (1Q) y tercer cuartil (3Q), es decir, por fuera del rango: $1Q - 1.5 * IQR - 3Q + 1.5 * IQR$.

Así mismo, se analizaron las relaciones entre las variables de suelo con el fin de identificar «relaciones potenciales» entre las intensidades de uso y cambios en suelo, es decir, aquellas relaciones que podrían no observarse directamente debido al ruido estadístico o que podrían evidenciarse en análisis futuros. Para estas relaciones también se utilizaron modelos lineales generalizados (GLM), teniendo las mismas consideraciones de idoneidad y significancia que al analizar la relaciones entre variables de suelo e intensidades de uso.

Por otro lado, se llevó a cabo una revisión bibliográfica detallada (de tipo narrativa) utilizando el motor de búsqueda «Google Scholar» y el catálogo académico «OpenAlex». Se seleccionaron publicaciones que evaluaban funciones de suelo (FS) o analizaban la evaluación de FS, identificando tanto las FS consideradas como las variables empleadas para su análisis. También, se determinó el sentido en que las FS se ven afectadas por cambios en las variables de suelo, así como la relevancia de estas como indicadores. Para aquellas variables que no eran consideradas en estos estudios, se llevó a cabo una búsqueda adicional en los mismos repositorios, seleccionando trabajos que establecieran relaciones teóricas entre dichas variables y las FS, con el objetivo de inferir posibles direcciones y magnitudes de estas interacciones.

A partir de las definiciones y determinaciones realizadas en los puntos anteriores, se analizó cómo se ven afectadas las funciones del suelo según las intensidades de uso y las

variables consideradas.

Resulta importante mencionar que en los gráficos de regresión que se exponen a la sección «Resultados y discusión», bajo el nombre de IUG se unificaron –mediante la ponderación de sus coeficientes– las variables n.º de heces de bovinas (hva), n.º de heces ovinas (hov); y para el caso de la IUF se ponderaron n.º de tocones (viejos, nuevos, chicos y grandes). Las unificaciones para ambas intensidades fueron normalizadas en una escala del 0 al 10, siendo el 0 sitios en los que no se encontraron heces, para el caso de la IUG; y tocones, para el caso de la IUF.

4. Resultados y discusión

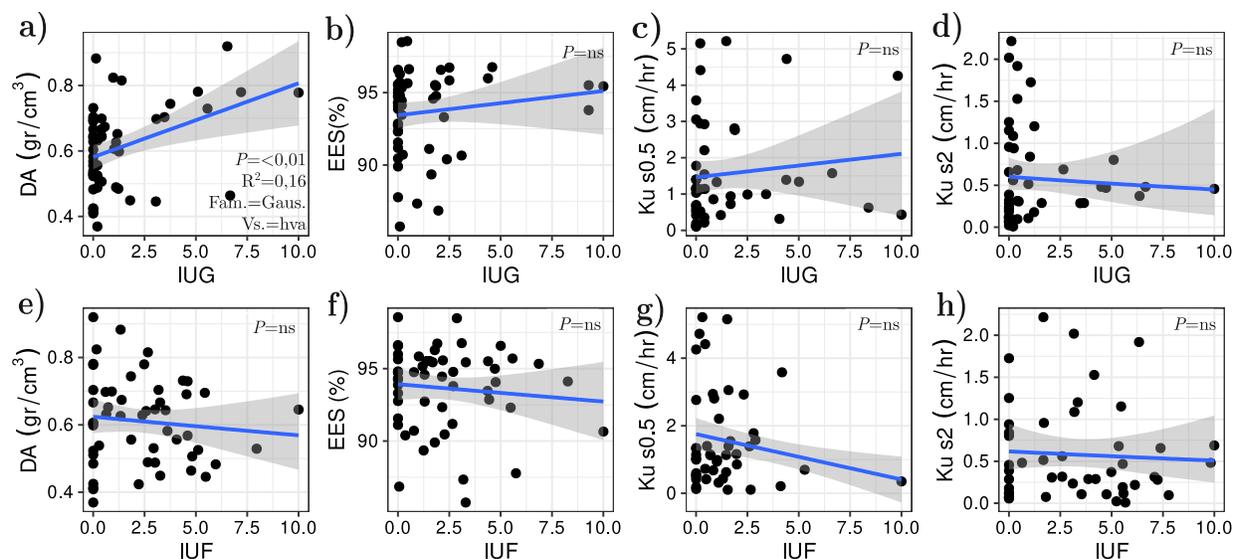
A continuación se presentan los principales resultados de la investigación, no obstante, cabe precisar que a continuación de las Referencias pueden encontrarse los resúmenes estadísticos de las variables (Tabla 2) y de los modelos (Tabla 3 y Tabla 4), así como las clases texturales determinadas para la obtención de las Ku's (Figura 12).

Aspectos físicos

Respecto a las variables físicas evaluadas, la DA se relacionó de manera significativa y positiva con la IUG, no observándose otras relaciones significativas con la IUG ni con la IUF (Figura 8).

Figura 8:

Gráficos de regresión entre variables físicas e intensidad de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF)



Nota. ns = no significativo, nivel de significación (α) = 0,05. DA = densidad aparente, EES = estabilidad estructural de suelo, Ku s0.5 = conductividad hidráulica no saturada a una succión de 0,5 cm, Ku s2 = conductividad hidráulica no saturada a una succión de 2 cm.

Estos aumentos en la DA asociados a la IUG, concuerdan con otros estudios en Andisoles y bosques andino patagónicos (Dörner et al., 2011; Gomez, 2023; Piazza et al., 2018), en donde la presencia de ganado se asoció a mayores valores de DA frente a sitios con baja o inexistente presencia de ganado.

La relación no significativa de las Ku's (Ku s0,5 y Ku s2) con la IUG e IUF podría sugerir la ausencia de impactos sobre el sistema poroso, no obstante, esto no se coincide con las modificaciones observadas en la DA. En este sentido, cabe considerar que algunos trabajos

(Sánchez, 2009; Sinoga et al., 2003) plantean que el uso del infiltrómetro de minidisco puede no ser un método sensible a cambios sutiles, debido a variaciones en las mediciones producto de pequeñas modificaciones en la aplicación del método (alteraciones sobre el sitio, momento de la medición, contacto del disco poroso con el suelo, etc.), siendo preciso ser cauto con la interpretación de estos resultados, especialmente teniendo en cuenta la gran heterogeneidad de los sitios estudiados.

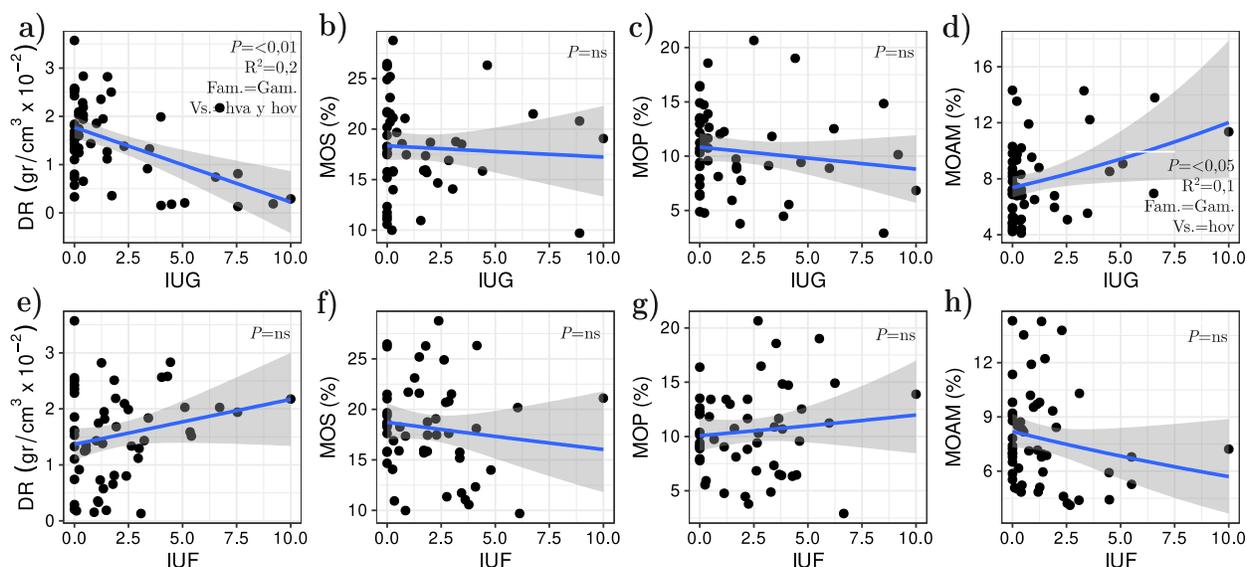
Respecto a la EES, la ausencia de relación significativa con las intensidades de uso podrían comprenderse como consecuencia de los altos valores de MOS de los sitios estudiados (Tabla 1), quien es considerada la principal agente en la cementación de partículas de suelo y estabilización estructural a nivel de macroagregados (Koorevaar et al., 1999; Zúñiga et al., 2014).

Aspectos biológicos

Como se observa en la Figura 9, la DR se relacionó de forma significativa y negativa con los cambios en la IUG, mientras que la MOAM se relacionó de forma significativa y positiva con la IUG. Tanto la MOS como la MOP, no presentaron relaciones significativas con los cambios en la IUG. Respecto a la IUF, ninguna de las variables se relacionó significativamente con esta.

Figura 9:

Gráficos de regresión entre variables biológicas e intensidades de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF)



Nota. Gam. = Gamma, Gau. = Gaussian, ns = no significativo, nivel de significación (α) = 0,05.

Vs= variables que componen la intensidad de uso que resultan significativas en el modelo, DR = densidad de raíces, MOS = materia orgánica de suelo, MOP = materia orgánica particulada, MOAM = materia orgánica asociada a la fracción mineral.

La DR resultó ser una variable más sensible que la DA y la MOAM a los cambios en la IUG, presumiblemente debido a que se relaciona de forma más compleja con múltiples aspectos (recursos y condiciones) que se ven modificados con estas actividades.

Los aumentos en la MOAM asociados a la IUG van en sentido opuesto a la DR, cuestión no esperada considerando la estrecha relación entre la biomasa de raíces, las rizodeposiciones y la formación de MOAM (Villarino et al., 2021). Esto podría relacionarse al mayor

establecimiento y predominancia de pastos (gramíneas y leguminosas) en los sitios de mayor IUG (Eclesia et al., 2012) y con ello a modificaciones de naturaleza cualitativa en las raíces predominantes (e.g., en la proporción de raíces finas, producción de rizodeposiciones, etc.) (Poirier et al., 2018) y a cambios en las relaciones C:N de los residuos predominantes (Cotrufo et al., 2013). Además, tales aumentos en de la MOAM, podrían vincularse a diversas modificaciones en las condiciones micro-climáticas –como temperatura, humedad, y radiación incidente– producto del pastoreo (Piazza, 2006; Wei et al., 2023).

Estos cambios en la MOAM, también podrían relacionarse a lo planteado por Fulon-Smith et al. (2024), quienes identificaron una mayor acumulación de la MOAM en el suelo superficial –en comparación con la MOP– producto de una intensa actividad microbiana. Esto coincidiría con lo observado por Arias Sepúlveda y Chillo (2017) en bosques mixtos de ciprés y coihue cercanos a nuestra área de estudio, quienes identificaron una tasa de descomposición del mantillo significativamente superior en sistemas con alta intensidad de uso silvopastoril frente a sitios con baja intensidad de uso, cuestión que vincularon a una mayor presencia de especies de plantas con menor relación C:N. Pese a lo recién planteado, una mayor tasa de descomposición en sitios con alta intensidad de uso silvopastoril también se ha relacionado a disminuciones significativas en la MOS (Chillo et al., 2018), consecuencia no observada en este caso y que podría responder al efecto de la heterogeneidad espacial natural sobre las dinámicas del carbono (Piazza, 2006).

Cabe mencionar, que la ausencia de relación significativa entre la MOP y las intensidades de uso resultó particularmente llamativo en tanto es descrita por múltiples autores como una

fracción de la MOS especialmente sensible a los manejos y modificaciones ambientales (Duval et al., 2013; Enriquez y Cremona, 2018; Rocci et al., 2021; Videla et al., 2008).

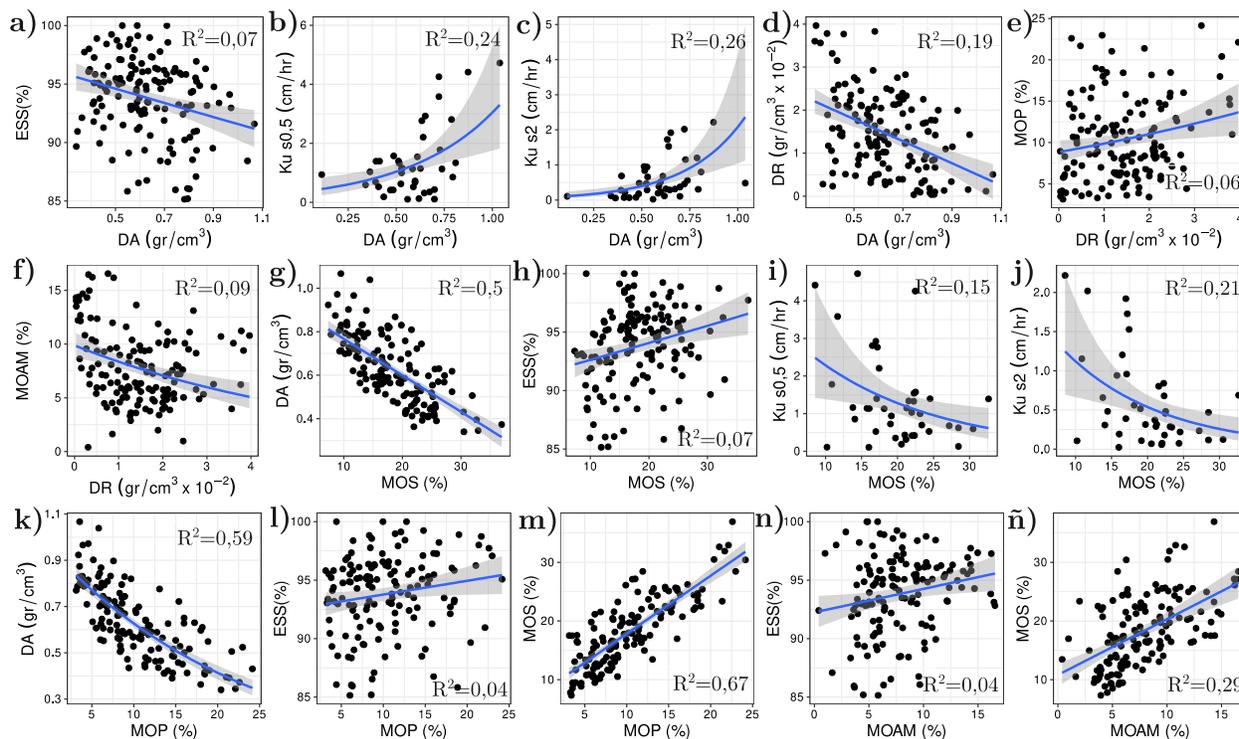
Relaciones entre variables de suelo

Como se expone en la Figura 10, al analizar las relaciones entre variables de suelo (Tabla 4), se identificaron múltiples relaciones significativas⁴. Entre las variables asociadas a cambios en la IUG, la EES, las Ku's y la DR se relacionan significativamente con la DA (Fig. 10 a, b, c y d); la MOP y la MOAM, con la DR (Fig. 10 e y f); y la EES, con la MOAM (Fig. 10 n), aunque en este último caso no queda claro cuál variable actúa como explicativa.

4 En la Figura 13 se presenta una matriz de correlación de Spearman como una mirada alternativa que permite visualizar la intensidad y dirección de las relaciones entre las variables de suelo. Sin embargo, es importante destacar que esta matriz presenta discrepancias respecto a la significancia de las relaciones, probablemente debido a que el método tiene un menor ajuste a la distribución específica de los datos en comparación con el análisis principal (basado en GLM's).

Figura 10:

Gráficos de regresión entre variables de suelo para relaciones significativas



Nota. DA = densidad aparente, EES = estabilidad estructural de suelo, Ku s0,5 = conductividad hidráulica no saturada a una succión de 0,5 cm, Ku s2 = conductividad hidráulica no saturada a una succión de 2 cm, DR = densidad de raíces, MOS = materia orgánica de suelo, MOP = materia orgánica particulada, MOAM = materia orgánica asociada a la fracción mineral.

Respecto a la relación negativa entre la EES y la DA (Fig. 10 a), esta se podría explicar por múltiples factores, entre los que cabría destacar: los aumentos en la proporción de partículas de mayor tamaño –vinculado de manera positiva con la DA– que conllevan una menor capacidad de agregación y retención de agentes agregantes (Salamanca y Sadeghian, 2006); por la estrecha

relación (negativa) de la DA con la materia orgánica de suelo (MOS), quién a su vez juega un rol clave en los procesos de agregación y estabilización del suelo (Oades, 1984; Regelink et al., 2015); y por las posibles implicancias de las modificaciones en el sistema poroso sobre las dinámicas de las comunidades microbianas del suelo (Ritz y Young, 2004; Xu et al., 2021), quienes también juegan un rol clave en la estabilidad de los agregados (Gupta y Germida, 2015; Tang et al., 2011).

El efecto negativo de la DA sobre la DR (Fig. 10 d) coincide con lo ampliamente descrito en la literatura, un fenómeno atribuido tanto a la limitación física que la compactación impone al crecimiento de las raíces, como a las respuestas fisiológicas que estas desarrollan frente a condiciones de suelo compactado (Gregory y Nortcliff, 2013; Parlak y Parlak, 2011).

La relación observada entre las K_u 's y la DA (Fig. 10 b y c) fue contrario a lo esperado inicialmente. En nuestra hipótesis inicial planteábamos que los aumentos en la intensidad de uso tendrían implicancias sobre el sistema poroso, cuyo volumen se vería reducido y con ello también las K_u 's. No obstante, en el sentido de lo descrito por Assouline (2006) y Richard et al. (2001), estos resultados sugieren que el incremento en la DA conlleva aumentos en la proporción de poros de menor diámetro, quienes facilitan la retención y el movimiento de agua a través de fuerzas capilares, lo que podría incrementar el flujo de agua en condiciones no saturadas.

La relación positiva entre DR y MOP (Fig. 10 e) podría explicarse por los aportes de residuos radiculares, quienes constituyen un insumo especialmente eficiente para la formación de MOP (Villarino et al., 2021). Por otro lado, la relación negativa entre DR y MOAM (Fig. 10 f) podría explicarse, en primera instancia, por el efecto de cebado asociado a las raíces («root

priming effect») (Jilling et al., 2021) y su superioridad frente al efecto sepultura («entombing effect») (Liang et al., 2017). Esto significa, que la descomposición o mineralización de la MOAM, estimulada por los exudados radiculares y la actividad microbiana que estos inducen, supera los procesos de estabilización de la biomasa microbiana como MOAM en superficies minerales o dentro de agregados del suelo. No obstante, no es claro que lo recién planteado se deba directamente al aumento en la DR, ya que podría relacionarse a otros factores, como los cambios en la IUG, con quien se relaciona negativamente la DR y positivamente la MOAM. A su vez, como planteábamos el apartado anterior (*Aspectos biológicos*), la IUG podría impactar sobre las dinámicas de carbono orgánico mediante múltiples modificaciones ambientales, tales como cambios en la vegetación, en la composición de los residuos predominantes y en las condiciones micro-climáticas.

La relación entre la EES y la MOAM (Fig. 10 n), también observable entre la EES y la MOP (Fig. 10 l), podría deberse a los mecanismos de agregación asociados a la MOS (Even y Cotrufo, 2024; Oades, 1984). No obstante, visto en un sentido contrario, las variaciones en las fracciones de la MOS podrían deberse a los procesos de protección o desprotección de estas producto de los aumentos o disminuciones en la estabilidad de los agregados (Angst et al., 2017; Even y Cotrufo, 2024).

Entre las otras relaciones significativas de menor interés para el objetivo de este trabajo, se observa una fuerte relación entre la MOS y DA (Fig. 10 g). Como describe Perie y Ouimet (2008), esta relación está ampliamente constatada en la bibliografía al punto de ser planteada como una relación de aplicación universal y particularmente útil para predecir la DA en suelos

que presentan dificultades en su determinación (Jeffrey, 1970). Cabe resaltar que estas variaciones asociadas a la MOS están explicadas, fundamentalmente, por los cambios en la fracción particulada (MOP) (Fig. 10 k), hecho atribuible al importante rol de esta fracción sobre las dinámicas de agregación y, con ello, de formación y mantención del sistema poroso (Piñeiro et al., 2021; Six et al., 2004b).

Respecto a la relación entre la MOS y las K_u 's (Fig. 10 i y j), esta podría explicarse producto de la fuerte relación entre la MOS y la DA. No obstante, también podría contribuir en esta relación las implicancias hidrofóbicas de materia orgánica, fenómeno observado a campo en su expresión más severa, impidiendo por completo el ingreso de agua en el suelo, y que ha sido mencionado como un factor que –asociado a la MOS– interviene sobre las mediciones de conductividad hidráulicas no saturada (Cuevas Becerra, 2006; Gómez Muñoz, 2011).

En cuanto a las relaciones entre la MOS y sus fracciones (Fig. 10 m y o), cabría destacar que la mayor parte de la variabilidad observada en la MOS es explicada por MOP. Esto coincide con lo esperado, ya que esta fracción se forma directamente a partir de los residuos vegetales, está más accesible a la descomposición por microorganismos y, por lo tanto, resulta más sensible a las modificaciones ambientales (Rocci et al., 2021).

Funciones del suelo (FS)

En consideración de la revisión narrativa (Tabla 5 y Tabla 6) se establecieron las relaciones expuestas en la Tabla 1. A cada relación se le atribuyó una intensidad en función de cuán estrecha o relevante es una variable respecto a las FS en base a los autores revisados. Además, a cada relación se le otorgó un color según la frecuencia con que la variable fue

considerada para la evaluación de FS.

Para el caso de la DR y las fracciones de la MOS, al no ser variables consideradas en los trabajos revisados, se establecieron relaciones en base a lo descrito en la Tabla 6. Respecto a las Ku's, aunque pueda ser interpretada como una medida o indicador de la porosidad del suelo, sus implicancias sobre las FS no es tan clara ni directa como en las otras variables. Si bien los resultados del análisis entre variables podrían sugerir una relación y sentido de las influencias equivalente a los de la DA –es decir, que aumentos las Ku's, podrían afectar en un sentido negativo a todas las FS–, no resulta convincente extrapolar influencias y relaciones en forma directa, dado que su relación con la DA es relativamente débil o moderada y que, a diferencia de la DA, no posee una fuerte relación con las otras variables de suelo. Además, dada su escasa sensibilidad a las intensidades de uso en el contexto estudiado, no parece adecuado insistir en establecer vinculaciones con las FS, siendo más adecuado considerarles como interrogantes.

Tabla 1:

Síntesis de la revisión de relaciones entre funciones del suelo y las variables de suelo estudiadas

Funciones del suelo	Variables de suelo						
	DA	EES	Ku	DR	MOS	MOP	MOAM
Producción (fertilidad)			?				
Ciclado (movilización y amortiguamiento) de nutrientes			?				
Almacenamiento de carbono			?				

Almacenamiento y filtrado de agua			?				
Hábitat para la actividad biológica			?				

Nota. Porcentaje de trabajos revisados que consideran el atributo (N=8) = .

Intensidad y sentido del efecto al incrementar la variable de suelo = .

Basado en los trabajos de Bardgett et al. (2014), Freschet y Roumet (2017), Greiner et al. (2017), Jilling et al. (2021), Lavallee et al. (2020), Lehmann y Stahr (2010), Lilburne et al. (2020), Rabot et al. (2018), Piñeiro et al. (2021).

Las relaciones identificadas y expuestas hasta ahora, entre la intensidad de uso forestal y ganadero (IUF e IUG), las variables de suelo y las FS, sugieren que todas las funciones podrían estar viéndose afectadas en un sentido negativo con el aumento en las IUG debido a los aumentos en la DA y disminuciones en la DR. No obstante, dados los incrementos en la MOAM asociados al aumento en la IUG, podrían plantearse implicancias positivas sobre la mayoría de las funciones, con excepción de la función de «almacenamiento y filtrado de agua». Las influencias de estas relaciones –denominadas «influencias directas» en la Figura 11– sobre las FS, son en su mayoría negativas y con predominancia de relaciones fuertes.

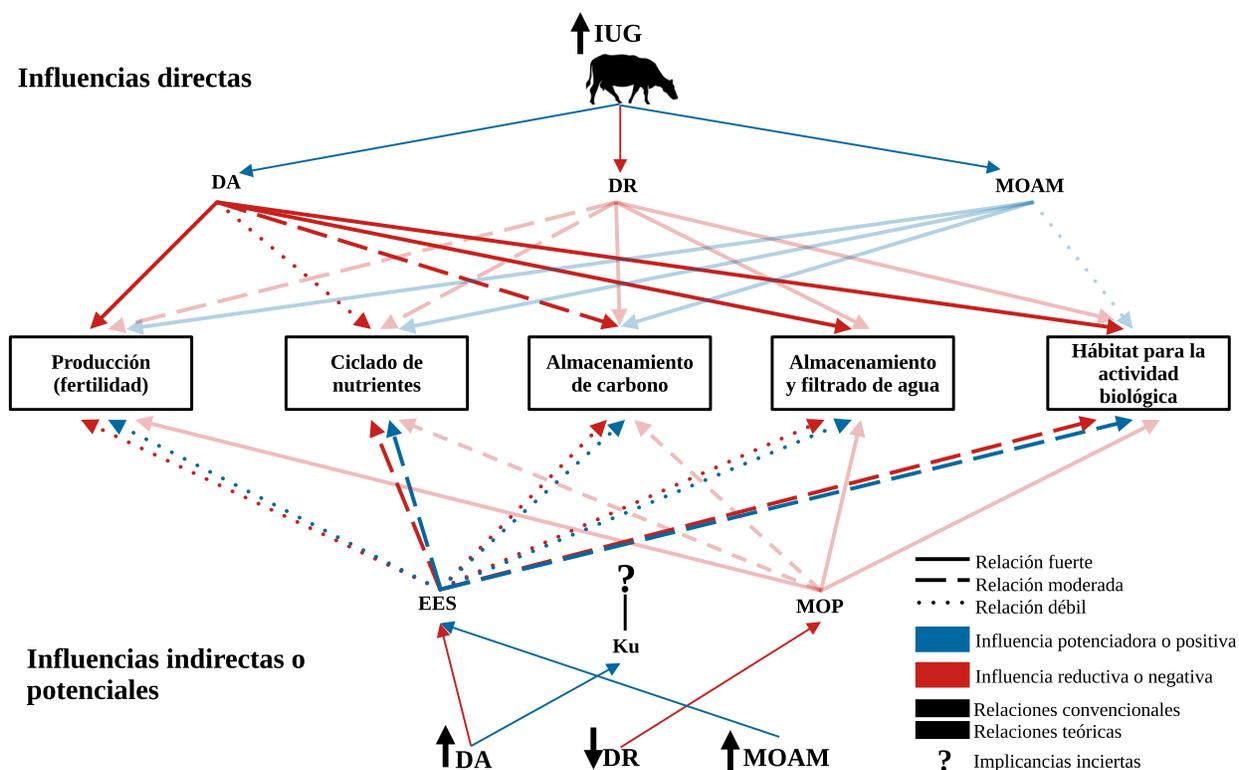
Por otro lado, considerando los resultados del análisis entre variables de suelo, es posible plantear influencias potenciales y negativas de la IUG sobre la EES y la MOP, en virtud de los aumentos de la DA y disminuciones en la DR. Relacionado a los aumentos en la MOAM, podría observarse una influencia positiva sobre la EES aunque, como planteábamos en el apartado de

Relaciones entre variables de suelo, no es claro el sentido de tal relación. En general, las «influencias indirectas o potenciales» son mayoritariamente negativas y moderadas o débiles.

Lo planteado no implica que tales influencias se traduzcan en el deterioro efectivo de una u otra función, sin embargo, proporciona indicios sobre el sentido de las implicancias de las modificaciones observadas y sus riesgos. Además, cabe tener presente, que dada la alta resiliencia natural de estos suelos, pueden ser necesarias fuertes alteraciones para poder observar modificaciones, punto en el que la reversibilidad de estas puede ser baja o nula (Gomez, 2023; Quantin, 1972; Vidal et al., 1981).

Figura 11:

Diagrama de influencias observadas y teóricas de la IUG sobre variables del suelo y sus funciones.



Nota. Relación fuerte, moderada y débil, se refiere a que tan estrecha es, según la teoría y el criterio de los autores consultados, la relación entre una variable y la función de suelo con que se vincula. Influencia potenciadora o positiva, se refiere a aquella que aumenta la magnitud de una variable, o afectan positivamente para el caso de una función. Influencia reductiva o negativa, se refiere a aquella que reduce la magnitud de una variable o afecta negativamente a una función. Las relaciones convencionales (líneas nítidas) son aquellas comúnmente utilizadas para evaluar FS, mientras que las relaciones teóricas (líneas con transparencia) se refieren a aquellas no –o

raramente— utilizadas para evaluar FS, pero sobre las que existen desarrollos teóricos y empíricos que permiten su consideración y cualificación. Las implicancias inciertas, indican que no existe suficiente información teórica y empírica para establecer el sentido y la magnitud de la influencia que el cambio en una variable de suelo podría tener sobre una función específica del suelo.

Otras consideraciones

Aunque no se observó una relación directa y significativa entre el uso forestal y las variables del suelo, es importante destacar que el uso forestal condiciona la accesibilidad del ganado a los sitios y la productividad del forraje en estos (Peri y Navall, 2022). Por lo tanto, aunque los métodos e indicadores utilizados no hayan detectado un efecto directo, es pertinente considerar que el uso forestal impacta indirectamente al suelo, al menos, mediante modificaciones en la dinámica del pastoreo.

Por otra parte, es relevante señalar que se exploraron posibles efectos de interacción entre ambas intensidades de uso sobre las variables de suelo mediante modelos lineales generalizados (GLM) que incluyeron términos de interacción entre la IUG y la IUF. Sin embargo, no se observaron efectos significativos. Pese a lo anterior, es importante aclarar que el diseño del estudio y la variedad de combinaciones de intensidades uso que fue posible relevar no fueron los más adecuados para detectar posibles interacciones entre ambos tipos de uso.

Adicionalmente, se exploraron las posibles implicancias de la textura del suelo como factor fijo y su interacción con las variables de uso (IUG e IUF), no encontrándose nuevas relaciones significativas.

5. Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo y la relación con sus funciones en bosques puros de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) del Sudoeste de Río Negro.

Se observó que la DA, DR y MOAM se relacionaron de manera significativa con cambios en IUG. A su vez, a estas variables se relacionaron de manera significativa con variables no afectadas de forma directa o notable por la IUG, como la EES, las Ku's y la MOP, pudiéndose ampliar las posibles implicancias asociadas al uso ganadero. Además, cabe destacar el potencial de la DR como variable indicadora, dada su particular sensibilidad al uso ganadero y a su relación con otras variables de suelo.

De acuerdo a lo anterior, es posible plantear en términos teóricos, que los aumentos en la IUG ejercen influencias predominantemente negativas sobre todas las FS. No obstante, tal efecto negativo no es claro ni notable in situ, en tanto, entre las variables más directa y convencionalmente relacionadas a las FS, solo la DA se observó afectada significativamente, mientras que otras, como la MOS y la EES, no. Esto posiblemente se deba a la alta resiliencia natural de los suelos estudiados, lo cual puede dificultar la observación de impactos sobre el suelo hasta que se vean fuertemente alterados, punto en el que las consecuencias pueden ser de difícil reversibilidad.

Teniendo en cuenta la hipótesis de que «ambos usos afectarían significativamente las propiedades del suelo estudiadas y, en consecuencia, a las funciones del suelo asociadas», los resultados obtenidos respaldan parcialmente esta hipótesis. Por una parte, solo la IUG se vio

relacionada a cambios en variables de suelo, y de estas variables solo la DA, DR y MOAM se relacionaron significativamente con los cambios en la IUG; por otro lado, aunque la mayoría de las influencias sobre las FS son negativas, producto del aumento en la DA y disminución en la DR, es posible identificar posibles influencias positivas asociadas al aumento en la MOAM.

Pese a lo anterior, es importante considerar que, aunque no se hayan observado implicancias directas de la IUF sobre las variables de suelo mediante los indicadores evaluados, el acceso del ganado a los sitios y la disponibilidad forrajera en estos están condicionados por las modificaciones en la estructura forestal asociadas al aprovechamiento de los recursos forestales. En este sentido, si bien los resultados no permiten comprender en detalle las implicancias del uso forestal, tampoco permiten descartar sus efectos en el suelo. Por el contrario, nos llevan a cuestionar la idoneidad de las variables utilizadas para evaluar la IUF y a reflexionar sobre cómo, en futuros estudios, se podría reflejar este uso de manera más precisa.

Para concluir, cabría preguntarse qué otras variables podrían ser pertinentes para observar cambios en el suelo asociados al uso forestal y ganadero. En este sentido, pareciera relevante re-preguntarse qué cambios o aspectos del suelo son relevantes y plausibles de ser estudiados en estos ecosistemas particulares. Al respecto, los ciclos de nutrientes y la estructura de las comunidades microbianas han sido aspectos poco estudiados en este contexto, pero fundamentales para la productividad y estabilidad de estos ecosistemas. En consecuencia, este trabajo destaca la necesidad de continuar investigando las posibles implicancias de las actividades silvopastoriles sobre los suelos de bosques de ciprés de la cordillera del sudoeste de Río Negro, con miras a promover estrategias de manejo que compatibilicen la producción con la

gestión sustentable de los bienes comunes naturales, con especial énfasis en la conservación de los suelos y sus funciones.

6. Referencias

- Altieri, M. A., y Hecht, S. B. (1999). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable* (Segunda edición). Fundación Instituto Agricultura Ecológica y Sostenible (FIAES).
- Amoroso, M. M., Chillo, M. V., Alcalá, V. M., Rezzano, C. A., Arpigiani, D. F., y Villacide, E. M. (2018). ¿Cómo modifica el uso silvopastoril la estructura y la dinámica poblacional de los bosques mixtos de ciprés de la cordillera y coihue? *Ecosistemas*, 27(3), 33-40. <https://doi.org/Doi.: 10.7818/ECOS.1502>
- Angst, G., Mueller, K. E., Kögel-Knabner, I., Freeman, K. H., y Mueller, C. W. (2017). Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay-sized particulate and mineral associated organic matter. *Biogeochemistry*, 132(3), 307-324. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0304-2>
- Angst, G., Mueller, K. E., Nierop, K. G. J., y Simpson, M. J. (2021). Plant- or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 156, 108189. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>
- Angst, G., Potapov, A., Joly, F.-X., Angst, Š., Frouz, J., Ganault, P., y Eisenhauer, N. (2024). Conceptualizing soil fauna effects on labile and stabilized soil organic matter. *Nature Communications*, 15(1), 5005. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49240-x>
- Arias Sepúlveda, J. E., y Chillo, V. (2017). Cambios en la diversidad funcional del sotobosque y

- la tasa de descomposición frente a diferentes intensidades de uso silvopastoril en el noroeste de la Patagonia, Argentina. *Ecología austral*, 27(1), 29-38.
- Assouline, S. (2006). Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Hydraulic Conductivity Function. *Vadose Zone Journal*, 5(2), 697-705.
<https://doi.org/10.2136/vzj2005.0084>
- Balesdent, J. (1996). The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *European Journal of soil science*, 47(4), 485-493.
- Balesdent, J., Besnard, E., Arrouays, D., y Chenu, C. (1998). The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. *Plant and soil*, 201, 49-57.
- Bardgett, R. D., Mommer, L., y De Vries, F. T. (2014). Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(12), 692-699.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>
- Bengtson, P., Barker, J., y Grayston, S. J. (2012). Evidence of a strong coupling between root exudation, C and N availability, and stimulated SOM decomposition caused by rhizosphere priming effects. *Ecology and Evolution*, 2(8), 1843-1852.
<https://doi.org/10.1002/ece3.311>
- Beretta, A. N., Silbermann, A. V., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R., y García-Lamohte, A. (2014). Soil texture analyses using a hydrometer: Modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e Investigación Agraria*, 41(2), 25-26.
<https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>
- Blake, G. R., y Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In: A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis*.

- Part 1. Physical and mineralogical methods. *Agron.* 9: 363-375. *Amer. Soc. Agron., Madison, Wisc.*
- Bouyoucos, G. J. (1936). Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. *Soil Science*, 42(3), 225-230.
- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., Lyver, P. O., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I. D., van der Plas, F., y Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005-3035. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>
- Bronick, C. J., y Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Buduba, C. G., la Manna, L. A., y Irisarri, J. A. (2020). El suelo y el bosque en la Región Andino Patagónica. En P. Imbellone y O. A. Barbosa (Eds.), *Suelos y Vulcanismo: Argentina* (1a ed., pp. 361-390). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACCS).
- Bustos, J. C., y Rocchi, V. (2008). *Caracterización termoplumiométrica de algunas estaciones meteorológicas de Río Negro y Neuquén* (Comunicación técnica No. 26). Área Recursos Naturales, Agrometeorología. INTA EE.
- Cambardella, C. A., y Elliott, E. T. (1992). Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783.
- Cardozo, A. (2014). *Estrategias socio-productivas de establecimientos ganaderos del sudoeste de la provincia de Río Negro, Argentina* [Tesis de MSc.]. Universidad de Buenos Aires.

- CEC. (2006). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC/* COM/2006/0232 final-COD 2006/0086.*
- Chillo, V., Amoroso, M., y Rezzano, C. (2018). La intensidad en el uso silvopastoril modifica la provisión de servicios ecosistémicos a través de cambios en la diversidad en bosques del noroeste de la Patagonia Argentina. *Ecosistemas*, 27(3), 75-86. <https://doi.org/Doi.:10.7818/ECOS.1486>
- Chillo, V., Ladio, A. H., Salinas Sanhueza, J., Soler, R., Arpigliani, D. F., Rezzano, C. A., Cardozo, A. G., Peri, P. L., y Amoroso, M. M. (2021). Silvopastoral systems in northern argentine-chilean andean Patagonia: Ecosystem services provision in a complex territory. En *Ecosystem Services in Patagonia* (pp. 115-137). Springer.
- CIEFAP, y MAyDS. (2016). *Actualización de la Clasificación de Tipos Forestales y Cobertura del Suelo de la Región Bosque Andino Patagónico [Informe final].* CIEFAP. <https://drive.google.com/open?id=0BxfNQutfxxeaUHNCQm9IYmk5RnM>
- Cobelo, C. M. (2017). *Transformaciones territoriales en los Andes Patagónicos. El caso de las zonas rurales de El Bolsón, Río Negro [PhD Thesis].* Estación Experimental Agropecuaria Bariloche. Agencia de Extensión Rural El Bolsón.
- Conti, M. E., y Giuffré, L. (2014). *Edafología: Bases y aplicaciones ambientales argentinas.* Editorial Facultad de Agronomía, UBA.
- Cotrufo, M. F., Soong, J. L., Horton, A. J., Campbell, E. E., Haddix, M. L., Wall, D. H., y Parton, W. J. (2015). Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of

- litter mass loss. *Nature Geoscience*, 8(10), 776-779. <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>
- Cotrufo, M. F., Wallenstein, M. D., Boot, C. M., Deneff, K., y Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), 988-995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Cuevas Becerra, J. (2006). Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(2), 13-27.
- Czarnes, S., Hallett, P. D., Bengough, A. G., y Young, I. M. (2000). Root- and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51(3), 435-443. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00327.x>
- Davies, B. E. (1974). Loss-on-Ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, 38(1), 150-151. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800010046x>
- de Groot, R. S., Wilson, M. A., y Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393-408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Dijkstra, F. A., Zhu, B., y Cheng, W. (2021). Root effects on soil organic carbon: A double-edged sword. *New Phytologist*, 230(1), 60-65. <https://doi.org/10.1111/nph.17082>
- Ditzler, C., Scheffe, K., y Monger, H. C. (2017). *Soil Survey Manual*. Government Printing Office.
- Diaz-Zorita, M., Perfect, E., y Grove, J. H. (2002). Disruptive methods for assessing soil

- structure. *Soil and Tillage research*, 64(1-2), 3-22.
- Dörner, J., Dec, D., Zúñiga, F., Sandoval, P., y Horn, R. (2011). Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil and Tillage Research*, 115-116, 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.07.002>
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Iglesias, J. O., Canelo, S., Martinez, J. M., y Wall, L. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.001>
- Eclesia, R. P., Jobbagy, E. G., Jackson, R. B., Biganzoli, F., y Piñeiro, G. (2012). Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Change Biology*, 18(10), 3237-3251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x>
- Enriquez, A. S., y Cremona, M. V. (2018). Particulate organic carbon is a sensitive indicator of soil degradation related to overgrazing in Patagonian wet and mesic meadows. *Wetlands Ecology and Management*, 26(3), 345-357. <https://doi.org/10.1007/s11273-017-9577-4>
- Even, R. J., y Cotrufo, M. F. (2024). The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation. *Geoderma*, 442, 116760. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116760>
- FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: El potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.
- Freschet, G. T., y Roumet, C. (2017). Sampling roots to capture plant and soil functions.

- Functional Ecology*, 31(8), 1506-1518. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12883>
- Fulton-Smith, S., Even, R., y Cotrufo, M. F. (2024). Depth impacts on the aggregate-mediated mechanisms of root carbon stabilization in soil: Trade-off between MAOM and POM pathways. *Geoderma*, 452, 117078. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.117078>
- Galantini, J., Landriscini, M. R., y Hevia, C. (2007). *Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo*.
- George, T. S., Fransson, A.-M., Hammond, J. P., y White, P. J. (2011). Phosphorus Nutrition: Rhizosphere Processes, Plant Response and Adaptations. En E. Bünemann, A. Oberson, y E. Frossard (Eds.), *Phosphorus in Action* (Vol. 26, pp. 245-271). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-15271-9_10
- Giraldo, O. F. (2022). *Multitudes agroecológicas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Giraldo, O. F., y Rosset, P. M. (2021). Principios sociales de las agroecologías emancipadoras. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 58. <https://doi.org/10.5380/dma.v58i0.77785>
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE. <https://biowit.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/11/agroecologia-procesos-ecolc3b3gicos-en-agricultura-sostenible-stephen-r-gliessman.pdf>
- Gomez, F. A. (2023). *Servicios ecosistémicos del bosque andino patagónico de la provincia del Chubut: Efectos de la ganadería bovina sobre los recursos suelo y agua* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Comahue]. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17362>
- Gómez Muñoz, J. A. G. (2011). *Conductividad hidráulica no saturada en tres suelos rojo arcillosos sometidos a distinto uso* [PhD Thesis]. Universidad Austral de Chile.

- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., y Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 369-377.
- Greacen, E., y Sands, R. (1980). Compaction of forest soils. A review. *Soil Research*, 18(2), 163. <https://doi.org/10.1071/SR9800163>
- Greenwood, K. L., y McKenzie, B. M. (2001). Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: A review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(8), 1231. <https://doi.org/10.1071/EA00102>
- Gregory, P. J., y Nortcliff, S. (Eds.). (2013). *Soil conditions and plant growth*. Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118337295>
- Greiner, L., Keller, A., Grêt-Regamey, A., y Papritz, A. (2017). Soil function assessment: Review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. *Land Use Policy*, 69, 224-237. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.025>
- Gupta, V. V. S. R., y Germida, J. J. (2015). Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 80, A3-A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Guzmán, E. S. (2006). Agroecología y agricultura ecológica: Hacia una “re” construcción de la soberanía alimentaria. *Agroecología*, 1, 7-18.
- Haines-Young, R., y Potschin, M. (2010a). Proposal for a common international classification of ecosystem goods and services (CICES) for integrated environmental and economic accounting. *European Environment Agency*, 30.

- Haines-Young, R., y Potschin, M. (2010b). The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being. En D. G. Raffaelli y C. L. J. Frid (Eds.), *Ecosystem Ecology* (1.^a ed., pp. 110-139). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511750458.007>
- Hamblin, A. P. (1986). The Influence of Soil Structure on Water Movement, Crop Root Growth, and Water Uptake. En *Advances in Agronomy* (Vol. 38, pp. 95-158). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60674-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60674-4)
- ITPS y FAO. (2015). *Status of the world's soil resources (SWSR)—Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Jat, M. L., Bijay-Singh, Stirling, C. M., Jat, H. S., Tetarwal, J. P., Jat, R. K., Singh, R., Lopez-Ridaura, S., y Shirsath, P. B. (2018). Soil Processes and Wheat Cropping Under Emerging Climate Change Scenarios in South Asia. En *Advances in Agronomy* (Vol. 148, pp. 111-171). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.006>
- Jeffrey, D. W. (1970). A Note on the use of Ignition Loss as a Means for the Approximate Estimation of Soil Bulk Density. *The Journal of Ecology*, 58(1), 297. <https://doi.org/10.2307/2258183>
- Jilling, A., Keiluweit, M., Gutknecht, J. L. M., y Grandy, A. S. (2021). Priming mechanisms providing plants and microbes access to mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 158, 108265. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108265>
- Johnson, D. W., y Curtis, P. S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage:

- Meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140(2-3), 227-238.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6)
- Kemper, W. D., y Rosenau, R. C. (2018). Aggregate Stability and Size Distribution. En A. Klute (Ed.), *SSSA Book Series* (pp. 425-442). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Koorevaar, P., Menelik, G., y Dirksen, C. (1999). *Elements of soil physics* (5. impr). Elsevier.
- Kothari, A., Salleh, A., Escobar, A., Demaria, F., y Acosta, A. (2019). *Pluriverso: Un diccionario del posdesarrollo*. Editorial Abya-Yala.
- Lal, R. (2014). Soil conservation and ecosystem services. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(3), 36-47.
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212-222.
<https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Lanciotti, M. L., y Cremona, M. V. (1999). Los suelos del área de influencia de la Agencia de Extensión Rural de El Bolsón. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, El Bolsón*.
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., y Cotrufo, M. F. (2020). Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology*, 26(1), 261-273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>
- Lehmann, A., y Stahr, K. (2010). The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *Journal of Soils and Sediments*, 10(6), 1092-1102. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0207-5>
- Liang, C., Kästner, M., y Joergensen, R. G. (2020). Microbial necromass on the rise: The

- growing focus on its role in soil organic matter development. *Soil Biology and Biochemistry*, 150, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108000>
- Liang, C., Schimel, J. P., y Jastrow, J. D. (2017). The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2(8), 17105. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>
- Lilburne, L., Eger, A., Mudge, P., Ausseil, A.-G., Stevenson, B., Herzig, A., y Beare, M. (2020). The Land Resource Circle: Supporting land-use decision making with an ecosystem-service-based framework of soil functions. *Geoderma*, 363, 114134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114134>
- Magdoff, F. (2015). Soil Organic Matter Fractions and Implications for Interpreting Organic Matter Tests. En F. R. Magdoff, M. A. Tabatabai, y E. A. Hanlon (Eds.), *SSSA Special Publications* (pp. 11-19). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub46.c2>
- METER Group. (2021a). *MINI DISK INFILTROMETER*. https://publications.metergroup.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf
- METER Group. (2021b). *New-Minidisk-Infiltrrometer-Macro*. <http://metergroup.com/minidisk-support>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. World Resources Institute.
- Montanarella, L., Badraoui, M., Chude, V., Costa, I., Mamo, T., Yemefack, M., Aulang, M. S., Yagi, K., Hong, S. Y., y Vijarnsorn, P. (2015). Status of the world's soil resources: Main

- report. *Embrapa Solos-Livro científico (ALICE)*.
- Mori, A. S., Lertzman, K. P., y Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: A research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12-27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76(1-3), 319-337. <https://doi.org/10.1007/BF02205590>
- Parlak, M., y Parlak, A. Ö. (2011). Effect of soil compaction on root growth and nutrient uptake of forage crops. *J. Food Agric. Environ*, 9, 275-278.
- Paz, M., y Raffaele, E. (2015). Efecto del ganado sobre la asignación de recursos de especies leñosas de los matorrales y bosques andino patagónicos. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 50(4), 575-584.
- Peri, P. L., y Navall, J. M. (2022). Sistemas silvopastoriles en bosque nativo. En S. E. Sharry, R. A. Stevani, y S. P. Galarco (Eds.), *Sistemas agroforestales en Argentina* (pp. 152-207). Editorial de la Universidad Nacional de la Plata. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/191800/CONICET_Digital_Nro.ee4df5c0-aa10-4d08-8d0b-a3b8b5bfbf82_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Perie, C., y Ouimet, R. (2008). Organic carbon, organic matter and bulk density relationships in boreal forest soils. *Canadian journal of soil science*, 88(3), 315-325.
- Piazza, M. V. (2006). *Impacto de los herbívoros domésticos sobre el reciclado de C y N: Cambios mediados por la vegetación y el ambiente* [PhD Thesis]. Universidad de Buenos Aires.

- Piazza, M. V., Garibaldi, L. A., Kitzberger, T., y Chaneton, E. J. (2018). *Impactos ecológicos del ganado extensivo en bosques de coihue*.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B., y Oesterheld, M. (2009). Grazing effects on belowground C and N stocks along a network of cattle exclosures in temperate and subtropical grasslands of South America. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2), 2007GB003168. <https://doi.org/10.1029/2007GB003168>
- Piñeiro, G., Pinto, P., Berenstecher, P., Della Chiesa, T., y Villarino, S. H. (2021). *La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas*.
- Poppiel, R. R., Cherubin, M. R., Novais, J. J. M., y Demattê, J. A. M. (2025). Soil health in Latin America and the Caribbean. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 141. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02021-w>
- Quantin, P. (1972). *Les andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelle* (273-301).
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., y Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Regelink, I. C., Stoof, C. R., Rousseva, S., Weng, L., Lair, G. J., Kram, P., Nikolaidis, N. P., Kercheva, M., Banwart, S., y Comans, R. N. J. (2015). Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*, 247-248, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.01.022>
- Relva, M. A., y Veblen, T. T. (1998). Impacts of introduced large herbivores on *Austrocedrus chilensis* forests in northern Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management*,

- 108(1-2), 27-40. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00313-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00313-7)
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F., Bruand, A., y Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52(1), 49-58.
- Rieke, E. L., Bagnall, D. K., Morgan, C. L. S., Flynn, K. D., Howe, J. A., Greub, K. L. H., Mac Bean, G., Cappellazzi, S. B., Cope, M., Liptzin, D., Norris, C. E., Tracy, P. W., Aberle, E., Ashworth, A., Bañuelos Tavarez, O., Bary, A. I., Baumhardt, R. L., Borbón Gracia, A., Brainard, D. C., ... Honeycutt, C. W. (2022). Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma*, 428, 116156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116156>
- Ritz, K., y Young, I. M. (2004). Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist*, 18(2), 52-59. <https://doi.org/10.1017/S0269915X04002010>
- Rocci, K. S., Lavallee, J. M., Stewart, C. E., y Cotrufo, M. F. (2021). Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 793, 148569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148569>
- Rosset, P., y Altieri, M. (2018). *Agroecología: Ciencia y política*. Icaria.
- Rusch, V. E., y Varela, S. A. (2019). *Bases para el manejo de bosques nativos con ganadería en Patagonia Norte. Parte I*. Ediciones INTA.
- Salamanca, A., y Sadeghian, S. (2006). *La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana*.
- Sánchez, A. M. (2009). *Conductividad hidráulica en diferentes suelos en el departamento de*

- Boaco* [PhD Thesis, Universidad Nacional Agraria, UNA].
<http://repositorio.una.edu.ni/2078/>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., y Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Šimůnek, J., y Van Genuchten, M. T. (1996). Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 32(9), 2683-2696.
- Sinoga, J. R., Santamaría, B. L., Lopera, A. R., Robles, M. N., Reina, A. G., Carrero, J. M., y Murillo, J. M. (2003). Determinación de la conductividad hidráulica en laderas mediante el uso de infiltrómetros de minidisco a lo largo de un gradiente pluviométrico mediterráneo. *Estudios de la zona no saturada del suelo*, 143-152. https://abe.ufl.edu/Faculty/Carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v6/p143-152.pdf
- Sistema de información Patagonia Norte. (s. f.). *Clima de la Comarca Andina del paralelo 42°*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://sipan.inta.gov.ar/productos/ssd/vc/comarca/ig.html?&url=ig/clima.htm>
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., y Denef, K. (2004a). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., y Denef, K. (2004b). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sparling, G. (1992). Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Soil Research*, 30(2), 195. <https://doi.org/10.1071/SR9920195>
- Talab, E., Villarino, S. H., Di Gerónimo, P. F., Videla, C., y Piñeiro, G. (2019). *¿Qué fracción de la materia orgánica del suelo aporta el nitrógeno para los cultivos, la fracción particulada o la fracción asociada a los minerales?* XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2do Congreso Uruguayo de Suelos, Montevideo, Uruguay. https://www.conicet.gov.ar/new_scp/detalle.php?keywords=&id=36277&congresos=yes&detalles=yes&congr_id=8685378
- Tang, J., Mo, Y., Zhang, J., y Zhang, R. (2011). Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 47(3), 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.01.001>
- Torres-Guerrero, C. A., Etchevers, J. D., Fuentes-Ponce, M. H., Govaerts, B., León-González, F. D., y Herrera, J. M. (2013). Influencia de las raíces sobre la agregación del suelo. *Terra latinoamericana*, 31(1), 71-84.
- Veblen, T. T., Kitzberger, T., Villalba, R., Arturi, M. F., Frangi, J. L., y Goya, J. F. (2004). Nuevos paradigmas en ecología y su influencia sobre el conocimiento de la dinámica de los bosques del sur de Argentina y Chile. *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina. La*

Plata, Argentina, EDULP. Presentación multimedia.

Vidal, I., Fernández, B., y Duarte, N. (1981). De los agregados del suelo. *AGRICULTURA TECNICA (CHILE)*, 41(2), 83-88.

Videla, L. S., Rostagno, C. M., y Toyos, M. A. (2008). La materia orgánica particulada: Comparación de métodos para su determinación y su valor como indicador de calidad de suelos del Chubut. *Ciencia del suelo*, 26(2), 219-227.

Villarino, S. H., y Pinto, P. (2021). *Materia orgánica, cobertura y servicios ecosistémicos*. Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola.

Villarino, S. H., Pinto, P., Jackson, R. B., y Piñeiro, G. (2021). Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Science Advances*, 7(16), eabd3176. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3176>

Watson, K. W., y Luxmoore, R. J. (1986). Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x>

Wei, Y., Wei, B., Ryo, M., Bi, Y., Sun, X., Zhang, Y., y Liu, N. (2023). Grazing facilitates litter-derived soil organic carbon formation in grasslands by fostering microbial involvement through microenvironment modification. *CATENA*, 232, 107389. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107389>

Xu, Y., Jeanne, T., Hogue, R., Shi, Y., Ziadi, N., y Parent, L. E. (2021). Soil bacterial diversity related to soil compaction and aggregates sizes in potato cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 168, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104147>

- Zhang, R. (1997). Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1024-1030. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x>
- Zúñiga, F., Dec, D., Valle, S. R., Dörner, J., y MacDonald, R. (2014). Estabilidad estructural de un Andisol (Typic Durudand) bajo bosque nativo y pradera en el Sur de Chile. *Agro Sur*, 42(3), 55-66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n3-06>

Tabla 2:*Estadísticos descriptivos de las variables de suelo y uso analizadas*

Variables de suelo	n	\bar{x}	s	Vmin	\tilde{x}	Vmax	Histograma
DA	52	0,6	0,1	0,4	0,6	0,9	
EES	53	93.8	2.9	85.8	94.6	98.6	
Ku s0,5	47	1.6	1.4	0.1	1.1	5.2	
Ku s2	47	0.6	0.6	0.0	0.4	2.2	
DR	55	1.5	0.8	0.1	1.5	3.6	
MOS	51	18.6	4.9	9.7	18.3	28.8	
MOP	54	10.5	3.9	2.9	10.4	20.7	
MOAM	53	8.0	2.8	4.1	7.2	14.3	
toc_ng	54	1.9	2.8	0	0	10.0	
toc_nch	54	0.7	2.1	0	0	12.0	
toc_vg	54	2.8	3.1	0	2	13.0	
toc_vch	54	2.8	5.3	0	0	25.0	
hva	54	4.5	10.0	0	0	49.0	
hov	54	4.0	9.6	0	0	40.0	

Nota. n, número de observaciones; \bar{x} , media; s, desviación estándar; Vmin, valor mínimo; \tilde{x} , mediana; Vmax, valor máximo; Ku s2, Ku (cm/hr) a una succión de 2 cm; Ku s0,5, Ku (cm/hr) a una succión de 0,5 cm; EES, estabilidad estructural de suelo (%); DR, densidad de raíces (gr/cm³ x10⁻²); MOS, materia orgánica de suelo (%); MOP, materia orgánica particulada (%); MOAM, materia orgánica asociada a la fracción mineral (%); toc_ng, n° de tocones nuevos grandes; toc_nch, n° de tocones nuevos chicos; toc_vg, n° de tocones viejos grandes; toc_vch, n° de tocones viejos chicos; hva, n° de heces vacunas y hov, n° de heces ovinas.

Tabla 3:

Resumen de parámetros estadísticos de los modelos lineales generalizados (GLM) usados para el análisis de relaciones entre las variables de suelo e intensidades de uso.

Parámetros	Variables físicas				Variables biológicas				
	DA	EES	Ku s0,5	ku s2	DR	MOS	MOP	MOAM	
IUG	Familia	Gaus	Gaus	Gam	Gam	Gam	Gam	Gam	Gam
	Pendiente	+				—			+
	R ²	0,16				0,2			0,1
	P valor	<0,05	ns	ns	ns	<0,01	ns	ns	<0,05
	Var. Sig.	hva				hva y hov			hva
	RMSE	0,12				0.70			2,54
	Num. Obs.	53	53	47	47	55	52	54	53
IUF	Familia	Gam	Gam	Gam	Gam	Gaus	Gaus	Gaus	Gam
	Pendiente								
	R ²								
	P valor	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	Var. Sig.								
	RMSE								
Num. Obs.	53	53	47	47	55	52	54	53	

Nota. ns = no significativo; ~ = no aplica; Gam. = Gamma; Gaus. = Gaussian.

Tabla 4:

Resumen de parámetros estadísticos de los modelos lineales generalizados (GLM) usados para el análisis de relaciones entre las variables de suelo.

Parámetros	Variables físicas				Variables biológicas				
	DA	EES	Ku s0,5	ku s2	DR	MOS	MOP	MOAM	
DA	Familia	~	Gam	Gam	Gam	Gam	Gam	Gam	Gaus
	Pendiente	~	-	+	+	-	-	-	
	R ²	~	0,07	0,24	0,26	0,19	0,47	0,6	
	P valor	~	<0,001	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	ns
	RMSE	~	3,3	0,95	0,57	0,8	4,25	3,17	
	Num. Obs.	~	143	41	41	143	143	143	143
EES	Familia	Gaus	~	Gam	Gam	Gam	Gam	Gam	Gaus
	Pendiente	-	~				+	+	+
	R ²	0,07	~				0,07	0,03	0,03
	P valor	<0,01	~	ns	ns	ns	<0,001	<0,05	<0,05
	RMSE	0,15	~				5,8	4,88	3,34
	Num. Obs.	143	~	41	41	143	143	143	143
Ku s0,5	Familia	Gaus	Gam	~	~	Gam	Gaus	Gam	Gaus
	Pendiente	+		~	~		-	-	
	R ²	0,29		~	~		0,15	0,09	
	P valor	<0,001	ns	~	~	ns	<0,05	<0,05	ns
	RMSE	0,14		~	~		4,9	4,8	

	Num. Obs.	41	143	~	~	41	41	41	47
ku s2	Familia	Gaus	Gam	~	~	Gam	Gam	Gam	Gam
	Pendiente	+		~	~		-	-	-
	R ²	0,18		~	~		0,27	0,11	0,09
	P valor	<0,01	ns	~	~	ns	<0,001	<0,05	<0,05
	RMSE	0,15		~	~		4,68	4,69	3,49
	Num. Obs.	41	143	~	~	41	41	47	47
DR	Familia	Gaus	Gaus	Gam	Gam	~	Gam	Gam	Gaus
	Pendiente	-				~		+	+
	R ²	0,2				~		0,06	0,09
	P valor	<0,001	ns	ns	ns	~	ns	<0,05	<0,001
	RMSE	0,14				~		4,8	3,25
	Num. Obs.	143	143	41	41	~	143	143	143
MOS	Familia	Gam	Gaus	Gam	Gam	Gaus	~	Gam	~
	Pendiente	-		-	-		~	+	+
	R ²	0,5	0,07	0,15	0,21		~	0,65	0,3
	P valor	<0,001	<0,01	<0,05	<0,01	ns	~	<0,001	<0,001
	RMSE	0,11	3,3	1,07	0,49		~	2,98	2,83
	Num. Obs.	143	143	41	41	143	~	143	143
MOP	Familia	Gaus	Gaus	Gam	Gam	Gaus	Gaus	~	Gaus
	Pendiente	-	+			+	+	~	
	R ²	0,59	0,04			0,05	0,67	~	
	P valor	<0,001	<0,05	ns	ns	<0,01	<0,001	~	ns
	RMSE	0,1	3,34			0,89	3,4	~	

	Num. Obs.	143	143	41	41	143	143	~	143
	Familia	Gaus	Gaus	Gam	Gam	Gam	Gamma	Gam	~
	Pendiente	ns	+			-	+		~
	R ²		0,04			0,06	0,29		~
MOAM	P valor		<0,05	ns	ns	<0,001	<0,001	ns	~
	RMSE		3,32			0,89	4,96		~
	Num. Obs.	143	143	41	41	143	143	143	~

Nota. ns = no significativo; ~ = no aplica; Gam. = Gamma; Gaus. = Gaussian.

Tabla 5:*Síntesis de la revisión de atributos e indicadores asociados a las diferentes funciones de suelo*

Autores	Funciones de suelo	Atributos indicadores
	Estabilidad física y soporte para plantas y animales y estructuras asociadas con la habitación humana	Estabilidad de agregados (2,5/3), densidad aparente (3/3), estructura y macroporos de suelo (2/3).
	Almacenamiento y ciclado de nutrientes y carbono	Estabilidad de agregados (2/3), capacidad de agua disponible (2/3), densidad aparente (1/3), estructura y macroporos de suelo (1/3).
	Filtrado, amortiguación, degradación, desintoxicación de materiales orgánicos e inorgánicos	Infiltración (1/3), estructura y macroporos de suelo (1/3).
	Regulación y partición de agua y flujo de solutos	Estabilidad de agregados (2/3), capacidad de agua disponible (2,5/3), densidad aparente (3/3), infiltración (2/3), desagregación en agua (“slaking”) (2,5/3), costra de suelo (2,5/3), estructura y macroporos de suelo (1,5/3).
	Sostener la diversidad, actividad y productividad biológica	Estabilidad de agregados (2/3), capacidad de agua disponible (3/3), densidad aparente (2,5/3), desagregación en agua (“slaking”) (1/3), estructura y macroporos de suelo (1,5/3).
Lehmann y Stahr (2010)	Producción de biomasa	Profundidad de horizontes, densidad aparente, textura, MOS, estructura de suelo.
	Ciclo de nutrientes	profundidad de horizontes, material grueso, MOS, pH, estructura de suelo.
	Ciclo del agua	Profundidad de horizontes, material grueso, densidad aparente, textura, MOS.
	Base/sostén para la vida	Profundidad de horizontes, material grueso, densidad aparente, textura, redoximorfico.
	Transformación de contaminantes orgánicos	profundidad de horizontes, material grueso, MOS, pH, estructura de suelo.
	Filtrado y buffer de metales	Profundidad de horizontes, material grueso, textura, MOS, pH.
	Almacenamiento, suministro y ciclado	Disponibilidad de agua, macroporosidad, n.º de lombrices, pH, toxicidad por Al,

	de nutrientes	actividad enzimática, nutrientes, indicadores correlacionados (MOS, CIC, microporosidad).
	infiltración, almacenamiento y suministro de agua	Disponibilidad de agua, macroporosidad, n.º de lombrices, indicadores correlacionados 1 (MOS, densidad aparente, microporosidad) e indicadores correlacionados 2 (agregados estables en agua y diámetro medio en peso).
	Sustento de la actividad biológica	Biomasa microbiana, MOS, n.º de lombrices, actividad microbiológica y respiración de suelo.
Greiner et al. (2017)	Producción	Textura, MOS, densidad aparente, pH, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Ciclado de nutrientes	Textura, MOS, pH, densidad aparente, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Reserva de carbono	Textura, MOS, densidad aparente, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Ciclado de agua	Textura, MOS, densidad aparente, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Hábitat	Textura, MOS, densidad aparente, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Filtrado y amortiguación de contaminantes orgánicos	Textura, MOS, densidad aparente, pH, profundidad, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
	Filtrado y amortiguamiento de contaminantes inorgánicos	Textura, MOS, densidad aparente, pH, propiedades hidromórficas, contenido de piedra y profundidad de suelo.
Rabot et al. (2018)	Producción de biomasa	Densidad aparente, distribución del tamaño de agregados, macroporosidad, capacidad de campo, capacidad de agua disponible, entre otros.
	Almacenamiento y reciclado de nutrientes	Estabilidad de agregados, dispersión de arcillas en agua, capacidad de campo, porosidad, macroporosidad, microporosidad, entre otros.
	Almacenamiento de carbono	Distribución de tamaños de agregados, microagregados dentro de macroagregados, área superficial específica, macro y microporosidad y conectividad.
	Almacenamiento y filtrado de agua	Características de los peds, dispersión de arcillas en agua, estabilidad de agregados, distribución de tamaños de agregados, porosidad, capacidad de agua disponible, macro y microporosidad, conectividad, entre otros.
	Hábitat para la actividad biológica	Macro y microporosidad y capacidad de campo.

	Estabilidad física y soporte	Densidad aparente, estabilidad de agregados, distribución de tamaño de agregados, dispersión de arcillas en agua, área superficial específica, macroporosidad y conectividad.
	Producción (fertilidad)	Densidad aparente (2/2), capacidad de aire (2/2), agua disponible para plantas (2/2), conductividad hidráulica (2/2), MOS (2), pH (2/2), abundancia de lombrices (1/2), diversidad de especies (1/2).
	Ciclado de nutrientes: movilización y amortiguación	Densidad aparente (0/2), capacidad de aire(0/2), agua disponible para plantas (0/2), conductividad hidráulica (0/2), MOS (1/2), pH (2/2), abundancia de lombrices (0/2), diversidad de especies (0/2).
	Almacenamiento de carbono	Densidad aparente (2/2), capacidad de aire (0/2), agua disponible para plantas (0/2), conductividad hidráulica (0/2), MOS (2/2,X), pH (0/2), abundancia de lombrices (1/2), diversidad de especies (0/2).
	Almacenamiento y filtrado de agua	Densidad aparente (2/2,X), capacidad de aire (2/2), agua disponible para plantas (2/2), conductividad hidráulica (2/2), MOS (2/2), pH (1/2), abundancia de lombrices (0/2), diversidad de especies (0/2).
	Hábitat para la actividad biológica	Densidad aparente (2/2), capacidad de aire (1/2), agua disponible para plantas (1/2), conductividad hidráulica (0/2), MOS (2/2), pH (2/2), abundancia de lombrices (1/2), diversidad de especies (1/2,X).
Lilburne et al. (2020)	Producción de biomasa	Especialmente relevante en contexto de sustentabilidad para silvicultura
	Filtrado, almacenamiento y transformación de nutrientes	Sin menciones
	Ciclado y almacenamiento de carbono	Especialmente relevante en contexto de sustentabilidad para silvicultura
	Almacenamiento y suministro de agua	Sin menciones
	Soporte para la biodiversidad	Sin menciones

Nota. Los números entre paréntesis son valoraciones realizadas por el autor respecto a la importancia y/o intensidad del atributo respecto a la función. La “x” indica que un atributo es una medida directa de determinada función.

Tabla 6:

Relación teórica entre las raíces y las fracciones de la MOS con las funciones del suelo

Funciones de suelo	Raíces	MOP	MOAM
Producción (fertilidad)	Mejoran la estructura del suelo, favorecen la actividad biológica, participan del ciclado de nutrientes y contribuyen con la formación de materia orgánica del suelo. Así, se les asocia la capacidad de influir favorablemente sobre todas las dimensiones de la fertilidad del suelo (física, química y biológica).	La POM contribuye a la producción al mejorar la fertilidad física del suelo mediante la formación de macroagregados, que incrementan la macroporosidad y favorecen la aireación y el desarrollo radicular. Esta mejora estructural permite que las raíces exploren un mayor volumen de suelo, facilitando la absorción de agua y nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas.	Contribuye a la función de producción (fertilidad) no solo por su capacidad de almacenar nutrientes de forma estable, sino también por su dinámica de formación y mineralización continua. A medida que se mineraliza, libera nutrientes que las plantas pueden absorber rápidamente, especialmente en la rizósfera, donde la actividad microbiana y las raíces favorecen este proceso. Esta liberación dinámica de nutrientes permite un suministro constante que apoya la fertilidad y la productividad del suelo.
Ciclado (movilización y amortiguamiento) de nutrientes	Son fundamentales en el ciclado de nutrientes, facilitando la absorción de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio. Las raíces exudan compuestos orgánicos que promueven la actividad microbiana, acelerando la descomposición y formación de la materia orgánica y la mineralización de nutrientes	Dada su constitución compleja y relativamente baja asimilabilidad para plantas y microbios, juega un rol importante como reservorio transitorio, de relativamente lenta liberación de nutrientes asimilables.	Es clave en virtud de su alta concentración de compuestos lábiles ricos en nutrientes y su capacidad de mineralización, especialmente en la rizósfera. Aunque su asociación con minerales le confiere estabilidad a largo plazo, su dinámica activa permite liberar nutrientes esenciales que las plantas pueden

absorber rápidamente, por lo que esta fracción es un componente central en la provisión de nutrientes.

Almacenamiento de carbono

Contribuyen al almacenamiento de carbono en el suelo tanto directa como indirectamente. Directamente, mediante la acumulación de biomasa radicular y, tras la muerte y descomposición de las raíces, transformando parte de ese carbono en materia orgánica del suelo. Indirectamente, las raíces promueven la formación de MOS estable mediante aportes de rizodeposiciones a los microorganismos de suelo, y por medio de la formación de agregados que protegen la materia orgánica de la descomposición, facilitando el secuestro de carbono a largo plazo.

Si bien la MOP se asocia, en general, a tiempos de residencia en el suelo mucho menores que la MOAM, dadas buenas condiciones de protección puede mantenerse estable por largos periodos de tiempo. Además, en ciertos contextos edáficos con poca capacidad de acumulación de MOAM, la MOP puede ser la vía más apropiada de almacenamiento de carbono.

La MAOM es fundamental para el almacenamiento de carbono debido a su asociación con minerales, lo que le confiere una alta estabilidad y le permite permanecer en el suelo durante siglos.

Almacenamiento y filtrado de agua

Las raíces mejoran la capacidad del suelo para almacenar y filtrar agua al crear porosidad en el suelo. Esta porosidad facilita la infiltración y el almacenamiento de agua en el perfil del suelo. Además, la biomasa radicular influye en la distribución de la humedad en el suelo.

La POM contribuye al almacenamiento y filtrado de agua al promover la formación de macroagregados, que mejoran la estructura del suelo y aumentan la macroporosidad. Esta estructura facilita la infiltración y el movimiento del agua en el suelo.

No se encontraron elementos para establecer una relación nítida.

Hábitat para la actividad biológica

Proporcionan un hábitat y una fuente de alimento para una amplia gama de organismos del suelo, incluidos microbios, hongos, nemátodos y fauna edáfica. Las

Proporciona un sustrato rico en materia orgánica que favorece el crecimiento de hongos, microorganismos y fauna del suelo. Estos organismos, a su vez, contribuyen a la formación de agregados y a la

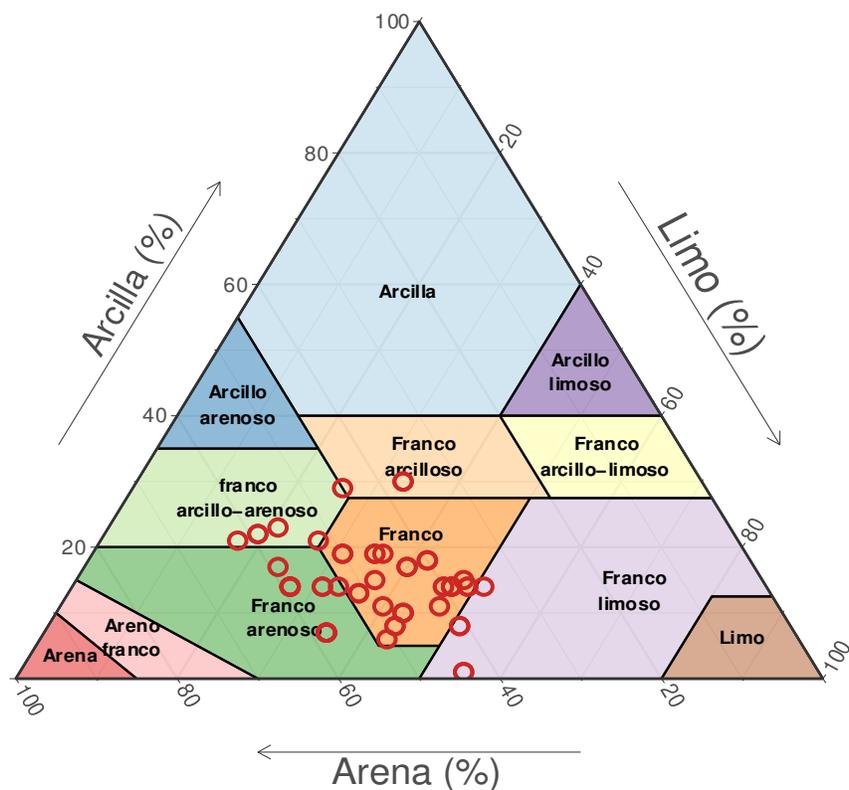
Constituye una reserva de nutrientes para microorganismos y plantas.

exudaciones radiculares y la materia orgánica de las raíces muertas estimulan la actividad microbiana, lo que a su vez mejora la estructura del suelo y el ciclado de nutrientes, creando un entorno propicio para la vida en el suelo.	descomposición de materia orgánica, promoviendo un entorno biológicamente activo y diverso que apoya la salud y el funcionamiento del ecosistema del suelo.
---	---

Nota. Basado en Bardgett et al. (2014), Freschet y Roumet (2017), Piñeiro et al. (2021), Lavallee et al. (2020) y Jilling et al. (2021).

Figura 12:

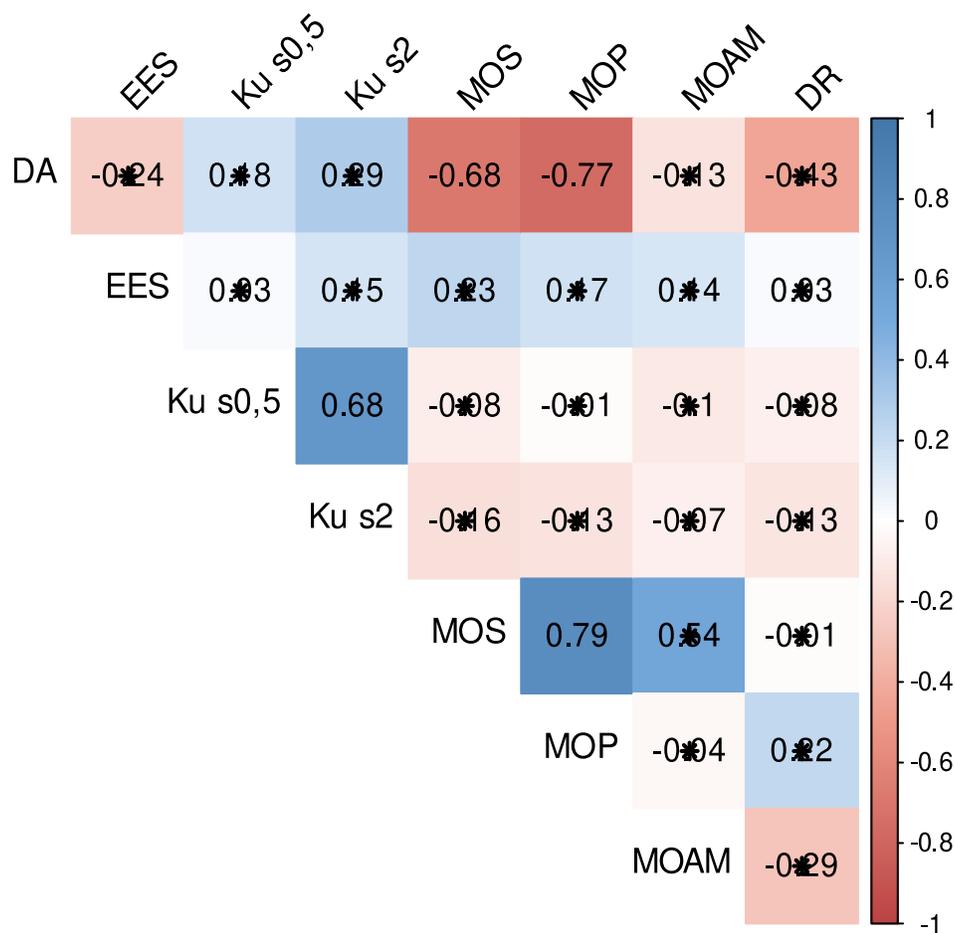
Clases texturales de los sitios estudiados.



Nota. Los círculos rojos representan los sitios de estudio (transectas) y su ubicación en el triángulo textural –basado en el triángulo del USDA (Ditzler et al., 2017)– a la proporción de arena, arcilla y limo determinada mediante el método de Bouyoucos (1936).

Figura 13:

Matriz de correlaciones de Spearman entre variables de suelo



Nota. Los valores indican la magnitud y sentido (positivo o negativo) de la correlación. De la misma manera, la intensidad del color indica su magnitud y el color el sentido (rojo, negativo; azul, positivo) de la correlación. Los asteriscos indican insignificancia ($p < 5\%$).