

Efectos del uso forestal y ganadero en el suelo de bosques de *Austrocedrus chilensis* del sudoeste de Río Negro, Argentina

OLAYER P. E. CORTÉS PÉREZ^{1,✉}; NICOLÁS M. BISTOLFI^{2,3}; MARTHA C. RIAT²; ANA P. BLAZINA^{2,3}; EZEQUIEL M. VILLACIDE¹ & MARIANO M. AMOROSO^{2,3}

¹Universidad Nacional de Río Negro (UNRN). ²Universidad Nacional de Río Negro, Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural (UNRN-IRNAD). ³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Investigaciones en Recursos Naturales, Agroecología y Desarrollo Rural (CONICET-IRNAD).

RESUMEN

1. Las investigaciones relacionadas con los impactos de las actividades forestal y ganadera sobre suelos de los bosques andino-patagónicos son escasas, a pesar del rol crítico de los suelos en múltiples funciones y servicios ecosistémicos.
2. El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo superficial (0-10 cm) y la relación con sus funciones en bosques de *Austrocedrus chilensis* del sudoeste de Río Negro.
3. Para ello se muestrearon 57 rodales con diferentes intensidades de uso ganadero y forestal, determinadas según el número de heces y tocones por transecta. Se evaluó la densidad aparente, la estabilidad estructural del suelo, la densidad de raíces, la materia orgánica del suelo, la materia orgánica particulada y la materia orgánica asociada a la fracción mineral. Para analizar la relación entre intensidades de uso y las variables, se utilizaron modelos lineales generalizados mixtos.
4. La densidad aparente, la densidad de raíces y la materia orgánica asociada a la fracción mineral se relacionaron significativamente con cambios en la intensidad de uso ganadero.
5. Las relaciones observadas implicaron que la mayoría de las influencias de las intensidades de uso sobre las funciones del suelo fueran negativas.
6. Implicancias. Este trabajo destaca la necesidad de continuar investigando las posibles implicancias de la actividad silvopastoril en estos suelos. Los hallazgos subrayan la importancia de 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 en los bosques andino-patagónicos.

[Palabras clave: silvopastoril, andisol, densidad aparente, estabilidad de suelo, MOS, MOP, MOAM, densidad de raíces]

ABSTRACT. Effects of forest and livestock use on the soil of *Austrocedrus chilensis* forests in southwestern Río Negro, Argentina

1. Research related to the impacts of forestry and livestock activities on the soils of Andean-Patagonian forests is scarce, despite the critical role of soils in multiple ecosystem functions and services.
2. The aim of this work was to study the effect of forest and livestock use on physical and biological aspects of the topsoil (0-10 cm) and its relationship with soil functions in *Austrocedrus chilensis* forests in southwestern Río Negro.
3. For this purpose, 57 stands with different intensities of livestock and forest use were sampled. Intensity of use was determined by the number of stools and stumps per transect. Bulk density, soil structural stability, soil organic matter, particulate organic matter, organic matter associated with the mineral fraction, and root density were measured at each site. Generalized linear mixed models were used to analyze the relationship between use intensity and the variables considered.
4. Bulk density, root density, and organic matter associated with the mineral fraction were significantly related to changes in livestock use intensity.
5. The observed relationships imply that most of the influences of use intensity on soil functions were negative.
6. Implications. This work highlights the need to continue researching the possible implications of silvopastoral activity on these soils. The findings underscore the importance of promoting management strategies that make production compatible with the sustainable management of natural commons, with special emphasis on soil conservation and its associated functions in Andean-Patagonian forests.

[Keywords: silvopastoral, andisols, bulk density, soil stability, SOM, POM, MAOM, root density]

INTRODUCCIÓN

Los bosques andino-patagónicos dominados por *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizzarri (ciprés de la cordillera) representan un tipo forestal de gran valor ecológico, paisajístico y productivo (Dezzotti and Sancholuz 1991; Loguercio et al. 1999), y más accesibles que otros tipos forestales por el piso altitudinal inferior en el que se desarrollan. Los usos principales de estos bosques son la ganadería extensiva —con baja inversión en infraestructura y mínimo manejo del pastoreo— y el uso forestal extractivo para leña y madera, con escasa planificación (Cardozo 2014; Rusch and Varela 2019; Amoroso et al. 2021). Estas actividades modifican la estructura y la provisión de servicios ecosistémicos (SE) de estos bosques (Amoroso et al. 2018; Chillo et al. 2021; Arpigiani et al. 2022). No obstante, la información existente es todavía escasa y no es clara respecto a una tendencia negativa sobre la multifuncionalidad de estos ecosistemas (Amoroso et al. 2018; Chillo et al. 2018).

En general, los suelos desempeñan un rol crucial en múltiples funciones ecosistémicas, tales como la producción de biomasa, el ciclado de nutrientes, la regulación hídrica y el almacenamiento de carbono, entre otras (CEC 2006). Además, en el contexto climático actual, los suelos cumplen una función central como sumideros de carbono en los ecosistemas terrestres, ya que concentran la mayor parte del carbono almacenado en los bosques, acumulado y estabilizado a partir de residuos aéreos y subterráneos (FAO and ITPS 2015; Lal 2016). En los bosques andino-patagónicos, los suelos ocupan un rol clave en su crecimiento y desarrollo, así como en su respuesta frente a las actividades antrópicas (Buduba et al. 2020; Gómez et al. 2022).

En la Norpatagonia andina, estudios previos evaluaron los impactos del uso silvopastoril sobre los bosques por sus implicancias en múltiples funciones del ecosistema suelo (e.g., almacenamiento de agua, riesgo de erosión, actividad biológica, fertilidad, etc.) (Chillo et al. 2018; Piazza et al. 2018; Gomez 2023). No obstante, los resultados de estos trabajos no son unánimes. Por ejemplo, existen coincidencias respecto al aumento en la densidad aparente producto del uso silvopastoril (Piazza et al. 2018; Gomez 2023), mientras que para la materia orgánica se identificaron tanto disminuciones (Chillo et al. 2018; Gomez 2023) como ausencia de modificaciones significativas (Piazza et al. 2018).

Dada la complejidad intrínseca de los suelos y los bosques andinopatagónicos —caracterizada por una marcada heterogeneidad espacial, fuertes gradientes ambientales y procesos edáficos dominados por materiales volcánicos—, estudios sobre algunos parámetros como los mencionados, son limitados y no permiten dar cuenta de la gran diversidad de funciones y servicios ecosistémicos que tienen al suelo como protagonista e intermediario. Así, resultan pertinentes y necesarias nuevas aproximaciones que amplíen el espectro de variables analizadas. Por ejemplo, la diferenciación de las fracciones particulada (MOP) y asociada a minerales (MOAM) de la materia orgánica del suelo (MOS), dado que presentan sensibilidades distintas a los usos y se relacionan con procesos edáficos diferentes (Lavallee et al. 2019). También la inclusión de la densidad de raíces, ya que corresponde a un componente clave para la estructuración del suelo y sus ciclos de carbono y nutrientes, actuando como potencial indicador (Bardgett et al. 2014; Freschet and Roumet 2017).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del uso forestal y ganadero sobre aspectos físicos y biológicos del suelo superficial y la relación con sus funciones ecológicas en bosques puros de ciprés de la cordillera del sudoeste de Río Negro. Planteamos como hipótesis que el uso forestal y ganadero, mediante modificaciones en las propiedades físicas y biológicas del suelo superficial, influyen de manera negativa sobre su multifuncionalidad. A modo de predicciones, planteamos que el aumento en la intensidad de ambos usos reduce la estabilidad estructural del suelo (EES), el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), la materia orgánica particulada (MOP), la materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOAM) y la densidad de raíces (DR), e incrementa la densidad aparente (DA), lo que a su vez influye negativamente sobre todas las funciones del suelo superficial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica sobre la cuenca del Río Puelo en torno a la localidad de El Bolsón, provincia de Río Negro (Figura 1). El clima es templado-frío, con una temperatura media anual de 9.9 °C y una precipitación anual de 921 mm (Bustos and Rocchi 1993).

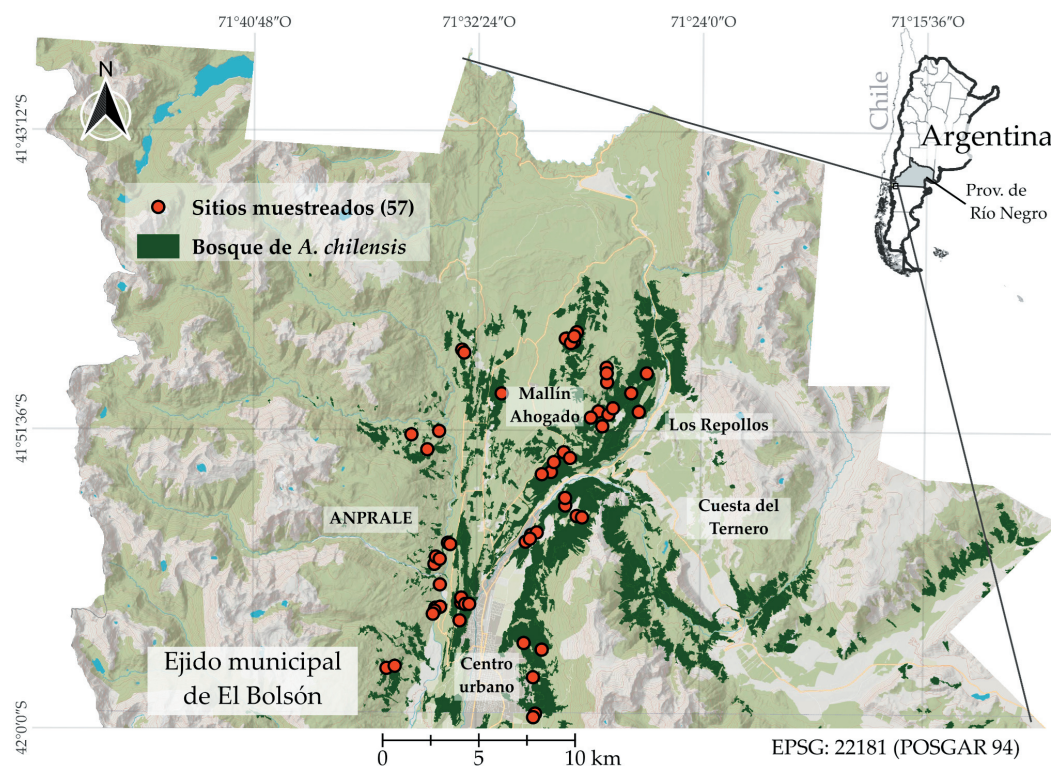


Figura 1. Ubicación del área de estudio, en El Bolsón, Río Negro, Argentina.

Figure 1. Location of the study area, in El Bolsón, Río Negro, Argentina.

Se caracteriza por una alta variabilidad que obedece a un gradiente oeste-este de clima, relieve y material originario del suelo (Lanciotti and Cremona 1999). Biogeográficamente, el área se encuentra en la ecorregión del Bosque Subantártico, representada por el Bosque Andino Patagónico, con diferentes tipos forestales; entre ellos, bosques puros de ciprés (*A. chilensis*) y otros con dominancia del género *Nothofagus* (CIEFAP and MAyDS 2016). Los suelos se caracterizan por texturas franco arenosas a arcillosas en horizontes superficiales, poseer horizontes A profundos (de 20 cm a 50 cm de espesor) con estructura granular. Son ricos en MOS y están muy influenciados por cenizas volcánicas. Los suelos dominantes son los andisoles, aunque también se pueden encontrar Molisoles en las zonas más bajas (Laya et al. 1970; Lanciotti and Cremona 1999).

El área de estudio se ubica dentro de la Reserva de Biosfera Andino Norpatagónica. Comprende establecimientos de pequeños y medianos productores ganaderos y forestales con distintos grados de intervención e incluye sectores del Área Natural Protegida Río Azul-Lago Escondido (ANPRALE), la Reserva Forestal El Guadal y la Reserva Natural Cerro Saturnino-Laguna Verde.

Muestreo

Se relevaron 57 rodales de bosques puros de ciprés (Figura 1) con diferente intensidad de uso forestal y ganadero, en un rango de precipitación media anual de entre 900 mm y 1500 mm; altitud, entre 400 m s. n. m. y 900 m s. n. m., y orientaciones de las laderas con exposición norte, este y oeste. El muestreo fue dirigido, buscando representar la mayor amplitud de intensidades de uso forestal y ganadero.

En cada rodal se tomaron muestras en tres puntos sobre una transecta de 50 m, en los puntos inicial (0 m), medio (25 m) y final (50 m). En cada punto se tomaron dos muestras con un barreno con cilindro interior removible (de Copains S.R.L), conservándose una de ellas sin disturbar (MSD) y otra disturbada (MD). También se extrajo una tercera muestra (MP) de ~200 cm³, con una pala. Para todas las muestras se despejó la superficie de todos los residuos orgánicos (i.e., mantillo, rastrojos, etc.) y se extrajeron de 0-10 cm de profundidad del suelo mineral, a una distancia de al menos 1 m de la base de árboles (Peri et al. 2022).

Intensidad de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF). La IUG se concibió como la magnitud

de presencia efectiva del ganado dentro de un sitio, mientras que la IUF se refiere a la magnitud de la remoción de biomasa leñosa en el mismo. Ambas intensidades son definidas con independencia del esquema productivo o de manejo a escala predial. Para sus determinaciones, dentro de una faja de 2 m a cada lado de la transecta se contabilizaron las heces de ganado —vacuno (hva) y ovino (hov)— y los tocones resultantes de la actividad forestal, estos últimos clasificados en cuatro 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). Con el número de heces se estimó la IUG y en base al número de tocones la IUF.

Las heces observadas reflejan un uso ganadero de entre 1 y 2 años desde la eyección (Von Müller et al. 2012). Por otro lado, los tocones viejos se relacionan con extracciones antiguas, puesto que signos evidentes de degradación estructural se corresponden a procesos de larga duración temporal dada la alta vida media de los troncos de *A. chilensis* (Barrera et al. 2004). Sin embargo, no es posible establecer un límite temporal preciso.

Determinación de aspectos físicos

Densidad aparente (DA). La DA se determinó en cada MD mediante el método del cilindro (Blake and Hartge 1986). Para ello, las muestras se llevaron a la estufa a 105 °C por 48 h para obtener su peso seco. A continuación se determinó la DA como el cociente entre el peso seco (PSMD) y el volumen (VMD), según se expone en la Ecuación 1.

$$DA = PSMD / VMD \quad \text{Ecuación 1}$$

Estabilidad estructural del suelo (EES). La EES se determinó en 2 réplicas para cada MSD mediante tamizados en húmedo con tamiz único (Kemper and Rosenau 1986), 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 mm y 2 mm, y se depositaron en un tamiz con abertura de 0.25 mm para ser sometidos a inmersiones en agua destilada durante 3 minutos. 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). El suelo retenido se sometió a

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 (Ecuación 2), corrigiendo el valor de PSSC por la masa de NaOH (0.2 g) presente en la solución dispersante.

$$EES (\%) = (PSSC - 0.2 \text{ g}) / ([PSSC - 0.2 \text{ g}] + PSSP) \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Para este procedimiento se utilizó un equipo de tamizado en húmedo (de Royal Eijkelpamp) que automatiza las inmersiones y facilita la selección y posterior pesaje del suelo perdido y conservado tras las inmersiones.

Determinación de aspectos biológicos

Materia orgánica del suelo (MOS). Se determinó 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 tres réplicas de ~4 g en crisoles de porcelana de peso conocido. Luego, se llevaron los crisoles con suelo a una mufla por 24 h a 430 °C, tras lo cual se pesaron los crisoles con suelo y se determinó la MOS a partir de la diferencia entre el peso inicial y final, como se expone en la Ecuación 3.

$$MOS (\%) = (\text{Peso a } 105 \text{ °C} - \text{Peso a } 430 \text{ °C}) / (\text{Peso a } 105 \text{ °C}) \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Este método puede conllevar una sobreestimación de la MOS al incluir la pérdida de agua estructural de minerales arcillosos (Schulte and Hopkins 1996).

Materia orgánica particulada (MOP). Se midió para cada punto de las transectas a partir de las MP, siguiendo el procedimiento descrito por Cambardella y Elliott (1992), y considerando los aportes 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 utilizando un tamiz de 50 µm. La fracción retenida (>50 µm) fue secada en estufa a 80 °C durante 24 h y pesada, obteniendo el peso seco del suelo retenido (PSSR). Sobre esta fracción se determinó el porcentaje de

materia orgánica del suelo retenido sobre el tamiz (MOSR) mediante el método de pérdida de peso por ignición (Davies 1974), como se describió para la estimación de la MOS. Para estimar la MOP, la MOSR fue corregida en función del peso de la fracción retenida y el de la muestra inicial (20 g) como se presenta en la Ecuación 4.

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

Ecuación 4

Materia orgánica asociada a la fracción mineral (MOAM). Se estimó a partir de la diferencia entre los porcentajes de MOS y MOP (Ecuación 5).

$$\text{MOAM (\%)} = \text{MOS (\%)} - \text{MOP (\%)}$$

Ecuación 5

Densidad de raíces (DR). Se evaluó en todas las MD. Para la extracción de las raíces cada muestra fue tamizada repetidamente con una malla de 2 mm de abertura hasta no observarse raíces retenidas. Después, las raíces obtenidas se agitaron mecánicamente en una solución de NaCl al 10% (p/v) para desagregar el suelo adherido y facilitar su remoción, facilitando su posterior limpieza en un colador de 1 mm de abertura bajo un flujo de agua. Una vez limpiadas, las raíces se secaron en una estufa por 24 h a 80 °C para obtener el peso seco de las raíces (PSr). Finalmente, la DR se calculó como el cociente entre el PSr y el volumen de la muestra (VM) (Ecuación 6).

$$\text{DR} = \text{PSr} / \text{VM}$$

Ecuación 6

Determinación de textura

Se realizó una determinación de clase textural por sitio, a partir de las MP previamente tamizadas a 2 mm, mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (1936), en su versión modificada (Beretta et al. 2014). Previo al análisis, las muestras fueron tratadas con peróxido de hidrógeno y se dispersaron con una solución de hexametáfosfato de sodio. Los porcentajes de arena, limo y arcilla se estimaron a partir de lecturas de densidad y temperatura realizadas a los 40 segundos y a las 2 horas de decantación, aplicando correcciones por temperatura y lecturas del blanco. La clase textural se definió mediante el triángulo textural (Ditzler et al. 2017). Esta variable fue considerada en los análisis estadísticos para contemplar la variabilidad del suelo atribuible a la textura.

Análisis de la relación entre usos y variables de suelo

Para analizar la relación entre las intensidades de uso y las variables de suelo se utilizaron modelos lineales generalizados mixtos con el paquete glmmTMB (Brooks et al. 2017), seleccionados por su criterio de información de Akaike post comprobación de su idoneidad mediante evaluación de la homogeneidad y normalidad de los residuos con el paquete DHARMA (Hartig 2024). Se consideró un nivel de significancia (α) del 5%. Todos los análisis estadísticos se realizaron en R (R Core Team 2025). Cabe destacar que, para cada variable de suelo, se identificaron valores atípicos, eliminando aquellos que estuviesen a una distancia mayor a 1.5 veces el rango intercuartil del primer y tercer cuartil.

Para la presentación gráfica de estos resultados, se construyó un gradiente de intensidad de uso ganadero y otro de intensidad de uso forestal para cada modelo vinculado a una variable de suelo. Cada gradiente se obtuvo normalizando, en una escala de 0 a 10, la suma de las variables de uso ponderadas por sus coeficientes estimados en el modelo correspondiente como se expone en la Ecuación 7.

$$\text{IU} = 10 \times [(\text{ce}(V_1) \times V_1) + \dots + (\text{ce}(V_n) \times V_n)] / \text{MVP}$$

Ecuación 7

donde IU se refiere a la intensidad de uso (forestal o ganadero); ce, al coeficiente estimado de una variable de uso (número de tipos de heces o tocones, según corresponda); V_1, V_2, \dots, V_n , a las variables de uso consideradas; y MVP, al máximo valor de la suma ponderada de variables de usos correspondiente a la IU calculada.

Relación entre los usos y las funciones del suelo (FS)

Con el objetivo de interpretar las implicancias del uso forestal y ganadero sobre las funciones del suelo (FS), se utilizó una matriz (Tabla 1) que relaciona las variables edáficas evaluadas con cinco funciones clave del suelo: producción (P), ciclado de nutrientes (CN), almacenamiento de carbono (AC), almacenamiento y filtrado de agua (AFA), y hábitat para la actividad biológica (HAB). Esta matriz se elaboró a modo de síntesis narrativa de estudios relevantes que vinculan las variables estudiadas con las funciones del suelo, consignando el sentido (positivo, negativo o nulo) e intensidad relativa (fuerte, moderada o débil) de cada relación.

Tabla 1. Relaciones entre las variables estudiadas y las funciones del suelo. DA: densidad aparente. EES: estabilidad estructural del suelo. MOS: materia orgánica del suelo. MOP: materia orgánica particulada. MOAM: materia orgánica asociada a la fracción mineral. DR: densidad de raíces. P: producción. CN: ciclado de nutrientes. AC: almacenamiento de carbono. AFA: almacenamiento y filtrado de agua. HAB: hábitat para la actividad biológica. El tipo de signo indica el sentido de la relación (-: negativa; +: positiva) o su ausencia (/), y el número de signos refleja su intensidad (e.g., +++: fuerte; ++: moderada; +: débil).

Table 1. Relationships between soil functions and the variables studied. DA: bulk density. EES: soil structural stability. MOS: soil organic matter. MOP: particulate organic matter. MOAM: mineral-associated organic matter. DR: root density. P: production. CN: nutrient cycling. CA: carbon storage. AFA: water storage and filtration. HAB: habitat for biological activity. The type of sign indicates the sense of the relationship (-: negative; +: positive) or its absence (/), and the number of signs reflects its intensity (e.g., +++: strong; ++: moderate; +: weak).

Variables de suelo	Funciones del suelo					Fuentes
	P	CN	AC	AFA	HAB	
↑DA	---	-	--	---	---	Kuykendall (2008); Lehmann y Stahr (2010); Greiner et al. (2017); Rabot et al. (2018)
↑EES	+	++	+	+	++	
↑MOS	+++	++	+++	+	+	
↑MOP	+++	++	+	++	+++	Lavallee et al. (2019); Piñeiro et al. (2021); Jilling et al. (2021)
↑MOAM	+++	+++	+++	/	+	
↑DR	++	++	+++	+++	+++	Bardgett et al. (2014); Freschet y Roumet (2017)

RESULTADOS

Respecto de las variables físicas, la densidad aparente mostró una relación significativa y positiva con la IUG ($R^2=0.13$; $p(\text{hva})=0.003$, $p(\text{hov})=0.02$) (Figura 2a). Para el resto de las variables físicas estudiadas no se observaron relaciones significativas con la IUG y la IUF (Figura 2b,c,d). Los detalles de los modelos se reportan en el Material Suplementario-Tabla S2.

En cuanto a las variables biológicas, la densidad de raíces presentó una relación significativa y negativa con los cambios en

la IUG ($R^2=0.32$; $p(\text{hva})<0.001$, $p(\text{hov})<0.001$) (Figura 3d), mientras que la MOAM se relacionó de forma significativa y positiva con la IUG ($R^2=0.08$; $p(\text{hva})=0.009$) (Figura 3c). Las restantes variables biológicas (i.e., MOS y MOP) no presentaron relaciones significativas con la IUG (Figura 3a,b). Por otra parte, ninguna de las variables mostró relaciones significativas con la IUF (Figura 3e,f,g,h). Los detalles de los modelos se reportan en el Material Suplementario-Tabla S3.

Las relaciones identificadas entre las intensidades de uso y las variables de suelo

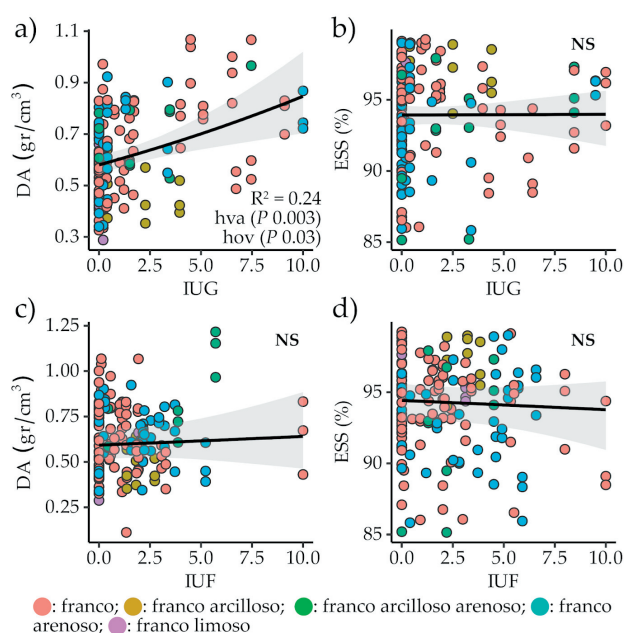


Figura 2. Relaciones entre variables físicas e intensidades de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF). DA: densidad aparente. EES: estabilidad estructural del suelo. NS: relación no significativa. hva y hov (el número de heces vacunas y ovinas, respectivamente) son predictores de intensidad de uso ganaderos; su presencia indica significancia ($\alpha=0.05$) dentro de los modelos. Los modelos correspondientes a DA (a, c) se ajustaron con distribución gamma, y los correspondientes a EES (b, d), con distribución beta.

Figure 2. Relationships between physical variables and livestock use intensities (IUG) and forestry (IUF). DA: bulk density. EES: soil structural stability. NS: non-significant relationship. hva and hov (number of cattle and sheep feces, respectively) are predictors of livestock use intensity; their presence indicates significance ($\alpha=0.05$) within the models. The models corresponding to DA (a, c) were adjusted with a gamma distribution, and those corresponding to EES (b, d), with a beta distribution.

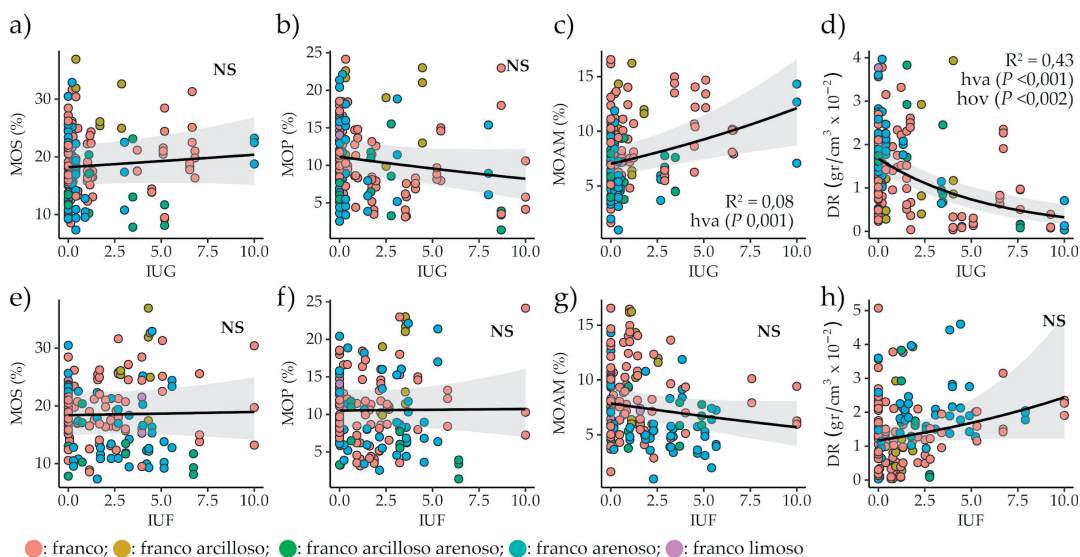


Figura 3. Relaciones entre variables biológicas e intensidad de uso ganadero (IUG) y forestal (IUF). MOS: materia orgánica del suelo. MOP: materia orgánica particulada. MOAM: materia orgánica asociada a la fracción mineral. DR: densidad de raíces. NS: relación no significativa. hva y hov (el número de heces vacunas y ovinas, respectivamente) son predictores de intensidad de uso ganaderos; su presencia indica significancia ($\alpha=0.05$) dentro de los modelos. Los modelos correspondientes a MOS (a, e), MOP (b, f) y MOAM (c, g) se ajustaron con distribución beta, y los correspondientes a DR (d, i), con distribución tweedie.

Figure 3. Relationships between physical variables and livestock use intensity (IUG) and forestry (IUF). MOS: soil organic matter. MOP: particulate organic matter. MOAM: mineral-associated organic matter. DR: root density. NS: non-significant relationship. hva and hov (number of cattle and sheep feces, respectively) are predictors of livestock use intensity; their presence indicates significance ($\alpha=0.05$) within the models. The models corresponding to MOS (a, e), MOP (b, f), and MOAM (c, g) were adjusted using a beta distribution, and those corresponding to DR (d, i), using a tweedie distribution.

(Figura 2a y Figura 3c,d) sugieren influencias negativas sobre todas las funciones del suelo superficial producto del aumento en las IUG, mediante incrementos en la densidad aparente y disminuciones en la densidad de raíces (Figura 4a). No obstante, dados

los incrementos en la MOAM asociados al aumento en la intensidad de uso ganadero, podrían plantearse implicancias positivas sobre la mayoría de las funciones, con excepción de la función de almacenamiento y filtrado de agua (Figura 4a). Las influencias

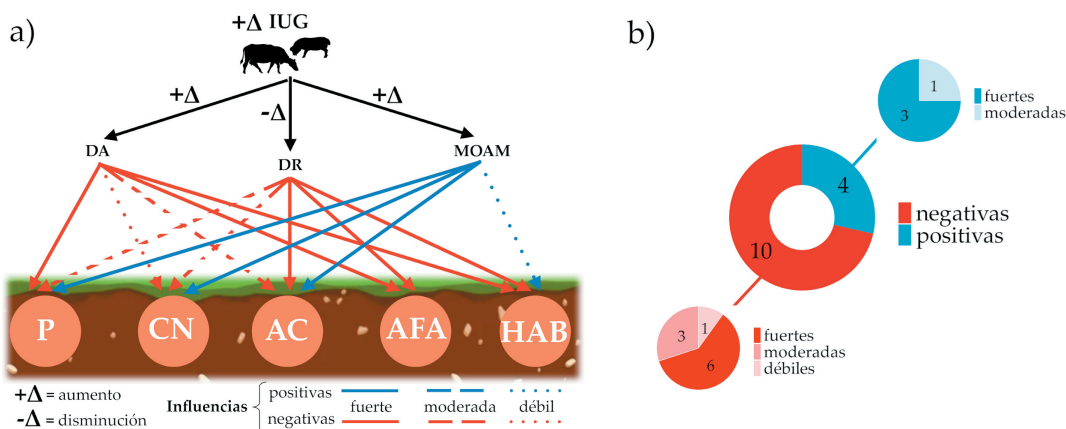


Figura 4. a) Influencias del aumento en la intensidad de uso ganadero (IUG) sobre las funciones del suelo como consecuencia de las relaciones observadas. P: producción. CN: ciclo de nutrientes. AC: almacenamiento de carbono. AFA: almacenamiento y filtrado de agua. HAB: hábitat para la actividad biológica. b) Síntesis de las influencias. Los números en el gráfico representan la cantidad de influencias.

Figure 4. a) Influences of the increase in livestock use intensity (IUG) on soil functions as a consequence of the observed relationships. P: production. CN: nutrient cycling. AC: carbon storage. AFA: water storage and filtration. HAB: habitat for biological activity. b) Synthesis of the influences. The numbers on the graph represent the number of influences.

de estas relaciones sobre las funciones del suelo, son en su mayoría negativas y con predominancia de influencias fuertes (Figura 4b).

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio respaldan parcialmente la hipótesis de que los usos ganadero y forestal influyen negativamente sobre la multifuncionalidad del suelo superficial en bosques de ciprés de la cordillera. En particular, la IUG resultó en un aumento en la densidad aparente, una disminución en la densidad de raíces y un incremento en la MOAM. Estas modificaciones sugieren que determinados niveles de uso ganadero ejercen influencias predominantemente negativas sobre las funciones clave del suelo: producción, ciclado de nutrientes, almacenamiento de carbono, almacenamiento y filtrado de agua, y provisión de hábitat para la actividad biológica. Sin embargo, también es posible identificar influencias positivas vinculadas al incremento de la materia orgánica asociada a la fracción mineral. La intensidad de uso forestal, en cambio, no mostró relaciones directas con las variables evaluadas, aunque podrían existir efectos indirectos no detectados.

Cambios en las propiedades físicas y biológicas del suelo

El incremento de la densidad aparente asociado a la IUG concuerda con estudios previos en Andisoles de bosques andino patagónicos, donde la presencia de ganado se vinculó con incrementos en la densidad aparente producto del pisoteo (Dörner et al. 2011; Piazza et al. 2018; Gomez 2023).

Respecto a la estabilidad estructural del suelo, la ausencia de relación significativa con las intensidades de uso podría atribuirse al carácter ándico de estos suelos, donde la presencia de alófanos —con su alta superficie específica y capacidad para formar complejos estables y persistentes con la MOS— contribuye a una matriz altamente cohesionada y, con ello, a una elevada estabilidad estructural de estos (Quantin 1972; Gomez et al. 2022). Lo anterior se evidencia en los elevados contenidos de MOS registrados ($\bar{x}=19\%$; $s=7.6\%$) (Material Suplementario-Tabla S1), componente habitualmente señalado como el principal agente en la cementación de partículas y estabilización estructural a nivel de macroagregados del suelo (Koorevaar et al. 1999; Zúñiga et al. 2014).

Por su parte, la densidad de raíces resultó ser una variable más sensible a la IUG que la densidad aparente y la MOAM, presumiblemente porque responde de manera directa a las modificaciones en la composición, estructura y dinámica de la vegetación, las cuales están condicionadas por la dinámica del pastoreo (Piazza 2006). En este sentido, se posiciona como una potencial variable indicadora, cuya relación con otros atributos y procesos del suelo amerita ser explorada con mayor profundidad.

En contraste con la densidad de raíces, la MOAM se relacionó positivamente con la IUG, reflejando una tendencia inesperada considerando la estrecha relación entre la biomasa de raíces, las rizodeposiciones y la formación de MOAM (Villarino et al. 2021), aunque en concordancia con lo observado por Zhou et al. (2025). Una posible explicación es el mayor establecimiento y predominancia de 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 que podrían favorecer la producción y permanencia de MOAM (Lavallee et al. 2019). Además, los incrementos de la MOAM se podrían vincular a diversas modificaciones en las condiciones microclimáticas (e.g., temperatura, humedad y radiación incidente) derivadas de modificaciones en la estructura de la vegetación asociadas a la actividad ganadera y, en consecuencia, en la actividad microbiológica en el suelo (Piazza 2006; Wei et al. 2023; Zhou et al. 2025). En línea con esto, Fulon-Smith et al. (2024) identificaron una mayor acumulación de la MOAM en el suelo superficial —en comparación con la MOP— producto de una intensa actividad microbiana. Esto podría coincidir también con lo observado por Arias Sepúlveda y Chillo (2017) en bosques mixtos de ciprés y coihue, quienes identificaron una tasa de descomposición del mantillo superior en sitios con alta intensidad de uso silvopastoril en comparación 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 planteado, una mayor tasa de descomposición en sitios con alta intensidad de uso silvopastoril se relacionó con 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).

Es importante considerar que los modelos que explican esta última relación (i.e., entre la IUG y la MOAM), aunque estadísticamente significativos, presentan un ajuste relativamente bajo, debiendo ser cautos al interpretar la relevancia del efecto del uso ganadero sobre la MOAM. Eventualmente, estudios que incorporen otros factores ambientales y biológicos podrían mejorar la comprensión de los mecanismos detrás de esta relación.

Cabe mencionar que la ausencia de relación significativa entre la MOP y las intensidades de uso resultó llamativa, dado que esta fracción de la MOS fue descrita como la más sensible a disturbios de origen antrópico y cambios ambientales, y, por ello, se la propuso como posible indicadora de impacto en sistemas productivos (Videla et al. 2008; Duval et al. 2013; Enriquez and Cremona 2018; Rocci et al. 2021). Esta ausencia de relación podría deberse a la heterogeneidad ambiental de los ecosistemas estudiados (e.g., variabilidad en el relieve, luminosidad, composición y estructura de la vegetación, etc.) o a una elevada resiliencia de los mismos, capaz de atenuar los efectos de las intensidades de uso relevadas.

Funciones y resiliencia del suelo

El predominio de influencias negativas sobre algunas funciones del suelo superficial producto del aumento en la IUG, plantea un potencial aumento de la pérdida de la funcionalidad integral del suelo, aun cuando pudieran no existir deterioros efectivos de una u otra función. Por ejemplo, vemos que indicadores directos de la función de almacenamiento de carbono, como lo son la MOS y la MOAM, indican que no existe un deterioro efectivo en esta función. Sin embargo, teniendo en cuenta las implicancias claves de la densidad de raíces y la densidad aparente sobre los procesos que sostienen la formación y estabilización de la MOS, la función en cuestión podría verse afectada en el futuro. De manera similar, funciones como el hábitat para la actividad biológica y el almacenamiento y filtrado de agua podrían verse afectadas por la disminución de la densidad de raíces y el aumento en la densidad aparente. 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 (Quantin 1972; Vidal et al. 1981; Gomez 2023).

Consideraciones finales

La ausencia de relaciones significativas directas entre el uso forestal y las variables evaluadas no implica necesariamente un efecto nulo. En sistemas silvopastoriles, el acceso del ganado a los sitios de pastaje y la disponibilidad forrajera están condicionados por las modificaciones en la estructura forestal asociadas al aprovechamiento de los recursos forestales (Chillo et al. 2018; Peri and Navall 2022). Esta interacción sugiere que, aunque los métodos e indicadores utilizados no hayan detectado un efecto directo, es pertinente considerar que el uso forestal impacta indirectamente al suelo mediante modificaciones en la dinámica del pastoreo. Además, la intensidad de uso forestal (IUF) representada por el número y tipo de tocones, podría no haber captado los efectos de este uso debido a la alta heterogeneidad en tamaños y estados de descomposición de los tocones, lo que sugiere la necesidad de desarrollar o considerar indicadores más integrales (e.g., basados en parámetros estructurales). En este sentido, Lantschner y Rusch (2007) frente a la complejidad de representar directa e independientemente el uso forestal y ganadero, optaron por representar su intensidad de manera simultánea mediante el grado de cobertura arbórea.

Teniendo en cuenta la frecuente simultaneidad y multiplicidad de combinaciones entre las intensidades de estos usos, exploramos modelos lineales generalizados que incluyeran términos de interacción entre la IUG e IUF, sin observar relaciones significativas vinculadas a modificaciones en las variables de suelo. Sin embargo, el diseño del estudio y la variedad de combinaciones de intensidades de uso que fue posible relevar no fueron las más adecuadas para detectar posibles interacciones entre ambos tipos de uso.

Para concluir, a la luz de los resultados obtenidos, se vuelve pertinente volver a preguntarse qué cambios o aspectos del suelo son particularmente relevantes y plausibles de ser estudiados en estos sistemas. Los ciclos de nutrientes y la estructura de las comunidades microbianas han sido aspectos poco estudiados en este contexto,

pero fundamentales para la productividad, estabilidad y salud de estos ecosistemas (Vallejo-Quintero 2013). 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, con el fin de desarrollar 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.

AGRADECIMIENTOS. Agradecemos a los pobladores que brindaron su tiempo y autorización para el acceso a sus establecimientos, así como al INTA, la SAyCC, y la Dirección de Bosques de Río Negro por las autorizaciones otorgadas. El presente trabajo se desarrolló en el marco de una beca de Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC-CIN) y fue financiado por la Universidad Nacional de Río Negro (PI 2021-B-964) y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (FONCyT, PICT 2020-03694).

REFERENCIAS

- Amoroso, M. M., M. V. Chillo, V. M. Alcalá, C. A. Rezzano, D. F. Arpigliani, and E. M. Villacide. 2018. ¿Cómo modifica el uso silvopastoril la estructura y la dinámica poblacional de los bosques mixtos de ciprés de la cordillera y coihue? *Ecosistemas* 27:33-40. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1502>.
- Amoroso, M. M., P. L. Peri, M. V. Lencinas, R. M. Soler Esteban, A. E. Rovere, M. González Peñalba, L. M. Chauchard, M. F. Urretavizcaya, G. Loguercio, and I. A. Mundo. 2021. Región Patagónica (Bosques Andino Patagónicos). Pp. 693-809 en *Uso sostenible del bosque: Aportes desde la Silvicultura Argentina*. 1a edición especial. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (MAyDS), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. URL: tinyurl.com/yw5hhre4.
- Arias Sepúlveda, J. E., and V. Chillo. 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: 29-38. <https://doi.org/10.25260/EA.17.27.1.0.297>.
- Arpigliani, D., V. Chillo, R. Soler, and M. M. Amoroso. 2022. Differential response of natural regeneration to silvopastoral use intensity in mixed forests of northern Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management* 520:120408. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120408>.
- Bardgett, R. D., L. Mommer, and F. T. De Vries. 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology and Evolution* 29:692-699. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.10.006>.
- Barrera, M. D., J. L. Frangi, J. J. Ferrando, and J. F. Goya. 2004. Descomposición del mantillo y liberación foliar neta de nutrientes de *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Serm. et Bizzarri en El Bolsón, Río Negro. *Ecología austral* 14: 99-112. URL: tinyurl.com/4udwu4yz.
- Beretta, A. N., A. V. Silbermann, L. Paladino, D. Torres, D. Bassahun, R. Musselli, and A. García-Lamohte. 2014. Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e Investigación Agraria* 41: 25-26. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200013>.
- Blake, G. R., and K. H. Hartge. 1986. Bulk Density. Pp. 363-375 en A. Klute (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*. Second edition. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>.
- Bouyoucos, G. J. 1936. Directions for making mechanical analyses of soils by the hydrometer method. *Soil Science* 42: 225-230. <https://doi.org/10.1097/00010694-193609000-00007>.
- Brooks, M. E., K. Kristensen, K. J. Van Benthem, A. Magnusson, C. W. Berg, A. Nielsen, H. J. Skaug, M. Mächler, and B. M. Bolker. 2017. glmmTMB Balances Speed and Flexibility Among Packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling. *The R Journal* 9:378-400. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066>.
- Buduba, C. G., L. A. la Manna, and J. A. Irisarri. 2020. El suelo y el bosque en la Región Andino Patagónica. Pp. 361-390 en P. Imbellone and O. A. Barbosa (eds.). *Suelos y Vulcanismo: Argentina*. 1a ed. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. URL: tinyurl.com/yc8a493u.
- Bustos, J. C., and V. Rocchi. 1993. Caracterización termoplumiométrica de veinte estaciones meteorológicas de Río Negro y Neuquén. *Comunicación técnica*, INTA-EEA Bariloche, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.
- Camardella, C. A., and E. T. Elliott. 1992. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56:777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- 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, Argentina. URL: tinyurl.com/34dchwu6.
- CEC. 2006. Directive of the European Parliament and of the Council: Establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. P. 30. Commission of the European Communities, Bruselas, Bélgica. URL: tinyurl.com/2aaffu6f.
- Chillo, V., M. Amoroso, and C. Rezzano. 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* 27:75-86. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1486>.
- Chillo, V., A. H. Ladio, J. Salinas Sanhueza, R. Soler, D. F. Arpigliani, C. A. Rezzano, A. G. Cardozo, P. L. Peri, and M. M. Amoroso. 2021. Silvopastoral systems in northern argentine-chilean andean Patagonia: Ecosystem services provision

- in a complex territory. Pp. 115-137 en P. L. Peri, G. Martínez Pastur and L. Nahuelhual (eds.). *Ecosystem Services in Patagonia*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69166-0_6.
- CIEFAP, and MAyDS. 2016. Actualización de la Clasificación de Tipos Forestales y Cobertura del Suelo de la Región Bosque Andino Patagónico. Informe final, CIEFAP. URL: tinyurl.com/4a893jb9.
- Davies, B. E. 1974. Loss-on-Ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal* 38: 150-151. <https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800010046x>.
- Dezzotti, A., and L. Sancholuz. 1991. Los bosques de *Austrocedrus chilensis* en Argentina: ubicación, estructura y crecimiento. *Bosque* 12:43-52. <https://doi.org/10.4206/bosque.1991.v12n2-04>.
- Ditzler, C., K. Scheffe, and H. C. Monger. 2017. *Soil Survey Manual*. Government Printing Office. URL: tinyurl.com/2stbmyr.
- Dörner, J., D. Dec, F. Zúñiga, P. Sandoval, and R. Horn. 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., J. A. Galantini, J. O. Iglesias, S. Canelo, J. M. Martinez, and L. Wall. 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., E. G. Jobbágy, R. B. Jackson, F. Biganzoli, and G. Piñeiro. 2012. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Change Biology* 18:3237-3251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x>.
- Enriquez, A. S., and M. V. Cremona. 2018. Particulate organic carbon is a sensitive indicator of soil degradation related to overgrazing in Patagonian wet and mesic meadows. *Wetlands Ecology and Management* 26:345-357. <https://doi.org/10.1007/s11273-017-9577-4>.
- FAO and ITPS. 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, Rome, Italy. URL: tinyurl.com/3438vpck.
- Freschet, G. T., and C. Roumet. 2017. Sampling roots to capture plant and soil functions. *Functional Ecology* 31:1506-1518. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12883>.
- Fulton-Smith, S., R. Even, and M. F. Cotrufo. 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>.
- 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, San Carlos de Bariloche, Argentina. URL: tinyurl.com/mwk64use.
- Gomez, F., A. Von Müller, M. Tarabini, and L. La Manna. 2022. Resilient Andisols under silvopastoral systems. *Geoderma* 418:115843. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115843>.
- Greiner, L., A. Keller, A. Grêt-Regamey, and A. Papritz. 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>.
- Hartig, F. 2024. DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. URL: tinyurl.com/3cvyj5cj.
- Jat, M. L., Bijay-Singh, C. M. Stirling, H. S. Jat, J. P. Tatarwal, R. K. Jat, R. Singh, S. Lopez-Ridaura, and P. B. Shirsath. 2018. Soil Processes and Wheat Cropping Under Emerging Climate Change Scenarios in South Asia. *Advances in Agronomy* 148:111-171. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.006>.
- Jilling, A., M. Keiluweit, J. L. M. Gutknecht, and A. S. Grandy. 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>.
- Kemper, W. D., and R. C. Rosenau. 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. Pp. 425-442 en A. Klute (ed.). *SSSA Book Series*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, WI, USA. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.
- Koorevaar, P., G. Menelik, and C. Dirksen. 1999. *Elements of soil physics*. Fifth impression. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. URL: tinyurl.com/3pehccxx.
- Kuykendall, H. 2008. Soil quality physical indicators: Selecting dynamic soil properties to assess soil function. Soil Quality Technical Note No. 10, United States Department of Agriculture, NRCS, Soil Quality National Technology Development Team, Washington D. C., USA.
- Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security* 5:212-222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fes3.96>.
- Lanciotti, M. L., and M. V. Cremona. 1999. Los suelos del área de influencia de la Agencia de Extensión Rural de El Bolsón. INTA-EEA Bariloche, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. URL: tinyurl.com/3a7h3cuy.
- Lantschner, M. V., and V. Rusch. 2007. Impacto de diferentes disturbios antrópicos sobre las comunidades de aves de bosques y matorrales de *Nothofagus antarctica* en el NO Patagónico. *Ecología Austral* 17:99-112. URL: tinyurl.com/yc8ykynn.
- Lavallee, J. M., J. L. Soong, and M. F. Cotrufo. 2019. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 26:261-273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

- Laya, H., T. González, A. Lazzari, N. Aranguren, C. Degele, and J. C. de Lara. 1970. Suelos en el área de El Bolsón y Mallín Ahogado, Río Negro, su distribución y relaciones genéticas. P. 42. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. <https://tinyurl.com/yf8u568p>.
- Lehmann, A., and K. Stahr. 2010. The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use. *Journal of Soils and Sediments* 10:1092-1102. <https://doi.org/10.1007/s11368-010-0207-5>.
- Loguercio, G., P. Burschel, and M. Rey. 1999. El Bosque de Ciprés de la Cordillera: su conservación y uso. Guía Práctica. P. 21. Folleto de divulgación, CIEFAP.
- Peri, P. L., D. Maradei, A. M. Lupi, C. Tato Vazquez, J. Gyenge, M. G. Gatica, M. Sandoval, and M. Gaute. 2022. Reporte nacional: Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina. INTA-Dirección Nacional de Desarrollo Foresto-Industrial del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. URL: tinyurl.com/32c9h3w7.
- Peri, P. L., and J. M. Navall. 2022. Sistemas silvopastoriles en bosque nativo. Pp. 152-207 en S. E. Sharry, R. A. Stevani and S. P. Galarco (eds.). *Sistemas agroforestales en Argentina*. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina. URL: tinyurl.com/4yrb2k3h.
- Piazza, M. V. 2006. Impacto de los herbívoros domésticos sobre el reciclado de C y N: cambios mediados por la vegetación y el ambiente. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. URL: tinyurl.com/3wds7ae.
- Piazza, M. V., L. A. Garibaldi, T. Kitzberger, and E. J. Chaneton. 2018. Impactos ecológicos del ganado extensivo en bosques de coihue. *Macroscofia* 6:14-19. <http://hdl.handle.net/11336/126131>.
- Piñeiro, G., P. Pinto, P. Berenstecher, T. Della Chiesa, and S. H. Villarino. 2021. La salud del suelo y la sustentabilidad de los agroecosistemas. *Revista MDA* 2:17-22. URL: tinyurl.com/3y3a7rfx.
- Poirier, V., C. Roumet, and A. D. Munson. 2018. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. *Soil Biology and Biochemistry* 120:246-259. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>.
- Quantin, P. 1972. Les andosols. *Revue bibliographique des connaissances actuelles*. Cahiers ORSTOM 10:273-301. URL: tinyurl.com/4bfjr8ww.
- R Core Team. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: R-project.org.
- Rabot, E., M. Wiesmeier, S. Schlüter, and H.-J. Vogel. 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>.
- Rocci, K. S., J. M. Lavallee, C. E. Stewart, and M. F. Cotrufo. 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>.
- Rusch, V. E., and S. A. Varela. 2019. Bases para el manejo de bosques nativos con ganadería en Patagonia Norte. Parte I. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. URL: tinyurl.com/4jcw5hkw.
- Vallejo-Quintero, V. E. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal* 16:83-99. <https://doi.org/10.14483/udistrita.ljour.colomb.for.2013.1.a06>.
- Vidal, I., B. Fernández, and N. Duarte. 1981. Influencia de cuatro métodos de labranza sobre la velocidad de infiltración y estabilidad de los agregados del suelo. *Agricultura Técnica* 41:83-88.
- Videla, L. S., C. M. Rostagno, and M. A. Toyos. 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* 26:219-227. URL: tinyurl.com/2tjnah9u.
- Villarino, S. H., P. Pinto, R. B. Jackson, and G. Piñeiro. 2021. Plant rhizodeposition: A key factor for soil organic matter formation in stable fractions. *Science Advances* 7:eabd3176. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd3176>.
- Wei, Y., B. Wei, M. Ryo, Y. Bi, X. Sun, Y. Zhang, and N. Liu. 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>.
- Zhou, Y., M. Xu, S. Ren, Y. Du, Y. Yue, H. Yu, Y. Zhang, S. Jiang, T. Xu, and L. Wang. 2025. More Than a Decade of Moderate Grazing: No Impact on Soil Organic Carbon Stocks and Enhancement of Mineral-Associated Organic Carbon via Livestock Diversification. *Global Change Biology* 31:e70466. <https://doi.org/10.1111/gcb.70466>.
- Zúñiga, F., D. Dec, S. R. Valle, J. Dörner, and R. MacDonald. 2014. Estabilidad estructural de un Andisol (Typic Durudand) bajo bosque nativo y pradera en el Sur de Chile. *Agro Sur* 42:55-66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n3-06>.