

AVANCE DE FORESTACIONES SOBRE PASTIZALES EN SUELOS DE REGIMEN ÁCUICO DEL N-NORESTE DE CORRIENTES

María Gabriela Luján Acosta ^{1*}, Diana Marcela Toledo ¹, Stella Maris Contreras Leiva ¹,
Juan Alberto Galantini ²

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste. Provincia de Corrientes, Argentina

² CIC, CERZOS - Dpto. Agronomía (UNS). Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires.

RESUMEN

En el N-NE de Corrientes, el avance de las forestaciones se produjo mayoritariamente a partir del reemplazo de pastizales naturales. Con el fin conocer si se producen cambios en el suelo y su magnitud, se propuso evaluar la sensibilidad de algunos indicadores de calidad, construir índices funcionales, y aplicar relaciones de estratificación de carbono y de nitrógeno. El trabajo fue realizado en Inceptisoles, de régimen ácuico. Se empleó un diseño de muestreo completamente al azar, con dos tratamientos: pastizal (Pz) y *Pinus* sp (Pi). Por tratamiento, se seleccionaron 3 lotes con 5 sitios de muestreo, tomando muestras de: 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0-1 m. Se determinaron: densidad aparente (Da), textura, pH, respiración (RES), carbono orgánico (COS), nitrógeno total (NT) y potencialmente mineralizable (NPM). Se aplicaron índices funcionales y relaciones de estratificación del carbono orgánico (COSr) y de nitrógeno total (NTSr). Se efectuó ANOVA, prueba de LSD ($P < 0,05$) y correlación de Pearson. Los suelos resultaron ácidos y de textura gruesa a media, los indicadores e índices fueron sensibles y detectaron cambios en la calidad. En los primeros 0,10 m del suelo, se produjeron disminuciones de: COS (-15%), NT (-43,3%), y de la actividad microbiana (RES: -23,8%, NPM: -67,7%). Se evidenció una modificación en el funcionamiento del sistema, en los índices NPM/RES, NPM/MO y NPM/NT. La eliminación del pastizal, el laboreo del suelo, y la implantación de *Pinus* sp. por más de 15 años produjo alteraciones importantes en el sistema, por lo que para mantener una producción sustentable son fundamentales las fertilizaciones de los sitios cuando presentan originalmente baja fertilidad, textura media a gruesa y régimen ácuico, como los Inceptisoles del N-NE de Corrientes. El NPM obtenido, podría ser empleado para ajustar programas de fertilizaciones en forestaciones, al ser incorporado al balance nutricional del nitrógeno para esta región y tipo de suelo.

Palabras clave: reemplazo del pastizal, forestaciones de *Pinus* sp, calidad de suelo.

FOREST EXPANSION ON NATIVE GRASSLANDS IN AQUICS SOILS IN THE N-NORTHEAST OF CORRIENTES

ABSTRACT

In the N-NE of Corrientes province, forest expansion has mainly been aimed at displacing native grassland areas. The objective of this research was to determine whether this affects soils, and to what extent. We assessed the sensitivity of some soil indicators, built some functional indices and applied stratification ratios of carbon and nitrogen. The assay was carried out in Inceptisols of an aquic moisture regime. A completely randomized design was applied, with two treatments: native grassland (Pz) and *Pinus* sp (Pi) plantations. For each treatment, three plots were used, with five sampling sites. The soil samples were collected at depths of 0-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, and 0-1 m. The following soil properties were determined: bulk density (Da), texture, pH, soil respiration (RES), soil organic carbon (COS), total nitrogen (Nt) and potentially

* Autor de contacto:
macosta@agro.uba.ar

Recibido:
19-06-22

Recibido con revisiones:
27-10-22

Aceptado:
28-10-22

mineralizable nitrogen (NPM). Functional indices were applied, as well as the stratification ratios of organic carbon (COSr) and total nitrogen (NTSr). The results were analyzed through ANOVA, an LSD test ($P < 0.05$) and a Pearson's correlation test. Soils proved to be acidic and coarse-to-medium textured. Soil indicators and indices were sensitive enough to detect changes in soil quality. Lower values were observed, for COS (-15%), NT (-43,3%) and microbial activity (RES: -23.8%, NPM: -67.7%) at 0-0.10 m. A change was seen in the functioning of the system, in the NPM/RES, NPM/MO and NPM/NT indices. Grassland clearing, soil tillage and *Pinus sp.* plantation for more than 15 years significantly affected the system. For a sustainable production, it is thus imperative to fertilize when soils are originally poor, medium-to-coarse textured and of an aquatic moisture regime, such as Inceptisols of the N-northeast of Corrientes province (Argentina). The resulting NPM may be used to adjust fertilization schemes in forested areas, as it is incorporated to the nutritional balance for this area and soil type.

Keywords: grassland clearing, *Pinus sp.* plantations, soil quality

INTRODUCCIÓN

Argentina presenta una cobertura de bosques de 53,6 millones de ha, distribuidos principalmente en siete regiones forestales: Selva Misionera (Selva Paranaense), Selva Tucumano Boliviana (Yungas), Parque Chaqueño, Bosque Andino Patagónico, Espinal, Monte y Delta e Islas del Río Paraná (Peirano et al., 2020). La superficie forestal implantada con especies nativas y exóticas asciende a 1,3 millones de ha, de las cuales el 80% se concentra en la región de la Mesopotamia principalmente en las provincias de Misiones y Corrientes. De la superficie total implantada, aproximadamente el 64% corresponde a coníferas (*Pinus elliotii*, *P. taeda* y en menor medida *Araucaria angustifolia*, *Pinus ponderosa*), el 33% a eucaliptus (*Eucalyptus grandis* y *E. saligna*), el porcentaje restante a Salicáceas (*Populus deltoides* y *Populus x euroamericana*, *Salix babylonica*, *S. nigra* e híbridos) y a latifoliadas (principalmente *Grevillea sp.*, *Paulownia sp.*, *Melia sp.*, *Robinia sp.*, *Prosopis sp.* y *Toona sp.*) (Sabattini et al., 2020). Las plantaciones forestales constituyen un sistema de monocultivo, con turnos de plantación variables según el destino de la producción por ejemplo para *Pinus sp.* 10 años cuando el destino es la producción de celulosa, y 20 años en promedio cuando el destino es la producción de madera.

El Plan Forestal Nacional (ForestAr), propone como meta al 2030 un aumento de la superficie implantada a 2 millones de ha, para producir bienes demandados local e internacionalmente, desde una base bio-económica de desarrollo forestal sostenible, contemplando aspectos ambientales, económicos y sociales (Peirano, et al., 2020).

En la Provincia de Corrientes, se estiman aproximadamente 516.771 ha de plantaciones forestales, de las cuales 352.171 ha corresponden al género *Pinus*, 161.972 ha, a *Eucalyptus* y 2.567 ha a otras especies según datos del 2019 (Baruzzo, et al., 2020).

En las últimas dos décadas, en el norte de la provincia el avance de las forestaciones se produjo mayoritariamente a partir del reemplazo de pastizales naturales.

El cambio en el uso de las tierras puede provocar alteraciones en la calidad y funcionamiento del suelo. La calidad de suelo (CS) es la capacidad del mismo para funcionar dentro de ciertos límites del ecosistema, sustentar la productividad biológica, mantener la calidad del agua y del aire y promover la salud de plantas, animales y humanos (Karlen et al., 1997). La CS no puede medirse directamente, pero puede inferirse a través de la determinación de atributos físicos, químicos y/o biológicos que sirven de indicadores de calidad (Shukla et al., 2006) y a través de índices de calidad, índices funcionales, relaciones de estratificación y stocks de carbono y nitrógeno entre otros (Arzuaga et al., 2016; Franzluebbbers, 2002; Toledo et al., 2013b; Toledo et al., 2018). Cabe destacar que si bien las propiedades físicas, químicas y biológicas pueden ser buenos indicadores de calidad (IC), la mayoría no son universales y varían en función del ambiente, del tipo de suelo (Shukla et al., 2006) y de la escala de estudio (Toledo et al., 2013a).

Entre los IC, se destaca la materia orgánica (MO), considerada por muchos autores el indicador universal, debido a la influencia que tiene sobre los demás atributos y funciones del suelo y al efecto significativo que presenta como opción para la reducción del efecto invernadero por medio del secuestro de carbono (Franzluebbbers, 2002). La MO es de importancia vital en la provisión de energía y de sustrato, así como en la diversidad biológica necesaria para sostener numerosas funciones del suelo. Las relaciones entre los

contenidos de carbono orgánico (COS) en diferentes profundidades del suelo han sido aplicadas en numerosos estudios de CS, realizados en suelos de diferentes órdenes: Oxisol, Molisol, Vertisol, Aridisol, entre otros. (Arzuaga et al., 2016; Duval et al., 2016 Toledo et al., 2013a, 2013b).

La relación de estratificación del carbono (COSr) definida como la relación entre el contenido de carbono orgánico entre la capa superficial muestreada y una capa subsuperficial (Franzluebbers, 2002), ha sido empleada con éxito por numerosos autores a la hora de evaluar los sistemas y el impacto antrópico. Franzluebbers (2002), indicó que la COSr y la estratificación del nitrógeno total (NTSr) pueden resultar buenos indicadores de la calidad del suelo o del funcionamiento del ecosistema suelo. Por otra parte, la MO tiene un fuerte impacto en la CS, interactuando estrechamente con parámetros físicos, químicos y biológicos que influyen en el desarrollo de los cultivos. Así mismo los autores, destacaron una correlación positiva y lineal de las relaciones de estratificación COSr y NTSr, con el carbono orgánico, y con la tasa de secuestro de carbono edáfico (Sá y Lal, 2009). El nitrógeno presente en el suelo, se encuentra estrechamente vinculado a la captación y almacenamiento del COS, por tal motivo es también importante conocer como las reservas de nitrógeno (N) y los flujos se ven afectados por el cambio de uso del suelo (Zhao et al., 2014).

Un indicador muy destacado por numerosos autores y asociado a la actividad biológica del suelo es el potencial de mineralización de nitrógeno (NPM). Es importante incluirlo en un set de datos cuando se quiere hacer una evaluación completa de la CS (Dalurzo et al., 2005), y está estrechamente asociado a la calidad de la MO y a la actividad enzimática (Toledo et al., 2013a). La fracción de nitrógeno de la MO, que es susceptible a la mineralización puede ayudar a optimizar el manejo de fertilizantes nitrogenados. Su determinación aporta información muy valiosa que puede formar parte de los modelos de fertilización, posibilitando ajustar con una mayor exactitud las recomendaciones de fertilizaciones nitrogenadas (Arzuaga et al., 2022), disminuir pérdidas de nitrógeno como óxido nitroso y favorecer el cuidado del medio ambiente. El NPM se corresponde con la cantidad del nitrógeno orgánico edáfico que puede ser convertido por la actividad de la biomasa microbiana, a formas inorgánicas solubles (fundamentalmente NH_4^+ y NO_3^-) y que, debido a su sensibilidad a los cambios producidos por el uso del suelo y el manejo puede ser utilizado como un indicador de la capacidad del suelo para producir o como un indicador del aporte de N del suelo para apoyar fertilizaciones (Curtin y Campbell, 2006). La determinación del contenido de N-NH_4^+ producido en incubación anaeróbica (Nan) es un indicador confiable para estimar el aporte de N por mineralización, y se correlaciona estrechamente con el N potencialmente mineralizable (NPM) y ha sido propuesto como el mejor indicador del NPM (Arzuaga et al., 2022; Martínez et al., 2018; Soon et al., 2007). La determinación de Nan se puede utilizar para diagnosticar la fertilidad del suelo, y para monitorear la salud física y bioquímica del suelo, debido a su estrecha relación con propiedades como estabilidad de agregados, COS, carbono orgánico particulado entre otros (García et al., 2020).

Se pueden establecer numerosos índices y relaciones vinculados al COS, al NT, a la materia orgánica particulada (MOP), a otros indicadores biológicos como RES, NPM. Entre ellos la relación MOP/COT (Galantini et al., 2004); MOP/RES, NPM/MOP, NPM/RES, NPM/NT (Toledo et al., 2018), los índices de estratificación del COS, del NT (Franzluebbers, 2002) y del NPM (Toledo et al., 2013a).

Toledo et al. (2018) seleccionaron indicadores e índices biológicos de calidad de suelo en sistemas naturales de selva subtropical y sistemas forestales con exóticas, para suelos del orden Oxisol, indicando que atributos como MO, MOP, NT, NPM y RES, y los índices funcionales NPM/RES y MOP/RES fueron sensibles a los cambios provocados por el uso. Así mismo, confirmaron la estrecha relación entre el potencial del suelo para mineralizar nitrógeno, la calidad de los residuos orgánicos y la RES.

En la región Nordeste de la Argentina (NEA) los pastizales naturales cubren alrededor del 40% del área total y están compuestos por especies estivales, principalmente gramíneas C4, que crecen activamente desde la primavera hasta el otoño (Kurtz et al., 2020). En el Norte de la Provincia de Corrientes, los pastizales naturales o semi-naturales, pseudo-climax (Kurz et al., 2020), están localizados en extensas planicies y son ecosistemas únicos que ocupan más de 1,5 millones de ha. La mayor parte, se presentan en suelos con poco desarrollo pedogenético del orden Inceptisoles y Entisoles frecuentemente con encharcamientos e inundaciones de distinta intensidad presentando un régimen de humedad ácuico (Escobar et al., 1996).

En el N-NE de Corrientes, el avance de las forestaciones se produjo mayoritariamente a partir del reemplazo de los pastizales principalmente en suelos frágiles con riesgo de degradación debido al cambio de uso del suelo y a la erosión hídrica exacerbada por el manejo ganadero tradicional, además con efectos poco

estudiados por el uso del fuego, entre otras causas. A pesar de su importancia económica y ambiental los suelos de los pastizales en Corrientes han sido relativamente poco estudiados, limitando su estudio más frecuentemente a la cartografía y taxonomía (Escobar et al., 1996; Kurtz et al., 2018). Debido a su utilización más intensa para ganadería, por aumento de carga y al cambio de uso del suelo por especies forestales exóticas como *Pinus sp.*, se ha incrementado el interés por estos ambientes (Pereira et al., 2019).

Es por todo ello que se ha incrementado el interés por estos ambientes, ante la posible pérdida de provisión de servicios ambientales, como biodiversidad, conservación de suelo, captura de carbono (Pereira et al., 2019) existiendo incertidumbre y preocupación por su impacto sobre la calidad del suelo. La determinación científica de la CS, y de los cambios producidos por acción antrópica resulta necesaria para evaluar la sustentabilidad de los sistemas de producción, y constituye una herramienta fundamental a la hora de tomar decisiones de manejo para lograr sistemas sustentables que contribuyan a la calidad del suelo, del aire y del agua y ambiental a través de la mitigación de los gases efecto invernadero (GEI).

Se trabajó sobre la hipótesis de que suelos de reciente formación, baja fertilidad, de textura gruesa a media y con problemas de hidromorfismo, son vulnerables al uso y el reemplazo de la vegetación natural, la posterior remoción del suelo y la implantación de especies exóticas como *Pinus sp.* afecta negativamente la calidad del suelo.

El objetivo de este trabajo fue determinar indicadores de calidad, construir índices funcionales y establecer relaciones de estratificación de carbono y de nitrógeno, para detectar si ocurrieron cambios debidos al avance de la frontera forestal (*Pinus sp.*) sobre pastizales naturales en suelos Inceptisoles de régimen ácuico del Departamento de Ituzaingó (Corrientes).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y muestreo

El presente trabajo se llevó a cabo en suelos Inceptisoles, de régimen ácuico de la región Paranaense, Distrito Fitogeográfico de los Campos y Malezales (Escobar et al., 1996; Morello et al., 2012) ubicados al N-NE de la provincia de Corrientes. El área bajo estudio se encuentra en las unidades fitogeográficas U7 y U14 y alrededores (Homborg et al., 2009). Los suelos bajo estudio son poco evolucionados, dominando la fracción arenosa en todos los horizontes, salvo un horizonte arcilloso que origina una capa freática colgada fluctuante que queda cercana a la superficie en algunas épocas del año. Presenta fuerte acidez en superficie, y su fertilidad es limitada.

El clima es del tipo subtropical húmedo, sin estación seca, con una temperatura media de 20°, 4 o 5 días al año de heladas y con precipitaciones anuales entre 1500 y 1700 mm. Según la clasificación de Köppen y Geiger corresponde a Cfa-mesotermal, cálido sin estación seca.

Diseño y muestreo de suelos: se aplicó un diseño de muestreo completamente al azar, con dos tratamientos, pastizales naturales (Pz) y plantaciones de *Pinus sp.* de 15 a 17 años (Pi). Los suelos bajo pastizal natural, se tomaron como referencia de las condiciones preexistentes a la forestación. Se seleccionaron 3 lotes por tratamiento, y 5 sitios de muestreo. En cada sitio, durante el otoño, se realizó un muestreo aleatorio simple, tomando muestras del suelo mineral, compuestas por 3 submuestras a 4 profundidades (0-0,10; 0,10-0,20, 0,20-0,30 y 0,30-1 m), totalizando 120 muestras. Las muestras de suelo fueron secadas al aire, molidas y tamizadas por malla de 2 mm.

Las variables evaluadas fueron: pH (método potenciométrico, determinación en agua, relación suelo: agua: 1:2,5 (Dewis y Freitas, 1970); textura: por el Método de Bouyoucos (Dewis y Freitas, 1970); densidad aparente (Da), por el método de la probeta (Rojas, 2012); respiración del suelo (RES) por incubación con NaOH (Alvarez y Santanatoglia, 1985); carbono orgánico del suelo (COS) por combustión seca con Analizador de C y N- LECO (Leco Corporation, St Joseph, MI); nitrógeno total (NT) por combustión seca método de Dumas, con Analizador de C y N- LECO (Leco Corporation, St Joseph, MI). La determinación se realizó utilizando el método de combustión seca basado en el principio de Dumas. Las muestras fueron sometidas a una atmósfera de oxígeno a muy altas temperaturas, generando gases de carbono y nitrógeno, los cuales fueron cuantificados mediante una celda de detección IR (radiación infrarroja) y una celda de conductividad térmica. El potencial del suelo para mineralizar el nitrógeno orgánico (NPM) se estimó a partir del nitrógeno anaeróbico (Nan), aplicando a una muestra de suelo una incubación anaeróbica por 7 días a 40 °C, siguiendo

do el método propuesto por Waring y Bremner (1964), modificado por Keeney y Nelson (1982).

Posteriormente, se determinaron los índices funcionales: NPM/RES; NPM/NT, NPM/MO, COS/Li+Arc, MO/RES, COS/RES. Se calcularon las relaciones de estratificación de carbono orgánico (COS) y de nitrógeno total (NT) a partir de las concentraciones de COS y de NT obtenidos a la profundidad de 0-0,10 m, dividida la correspondiente a 0,20-0,30 m (COSr1 y NTSr1 respectivamente) (Franzluebbbers, 2002). Asimismo, se obtuvieron también las relaciones de estratificación considerando las profundidades 0-0,10 m y 0,10-0,20 m (COSr2 y NTSr2 respectivamente) (Toledo et al., 2013a).

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante un ANOVA y se efectuaron comparaciones de medias utilizando el Test LSD ($P < 0,05$). Para evaluar las relaciones entre variables, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre pares de variables ($P < 0,05$). Los datos fueron procesados mediante el programa estadístico Infostat 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos evaluados presentaron textura franco arenosa a franco arcillo arenosa. La mayor fracción correspondió a la arena con valores medios entre 58 y 60%, en tanto que los contenidos de Li+Arc variaron entre 39 y 42 %. La reacción fue ácida, siendo el tratamiento Pi el que presentó el menor valor de pH en las tres profundidades, con diferencias significativas para la primera y tercera profundidad ($P < 0,05$) (Tabla 1). La mayor acidez se asoció a las características propias de las acículas de pino, ricas en ligninas, de ciclado lento, que al descomponerse liberan ácidos orgánicos en mayores cantidades. Este tipo de descomposición restringe, por un lado, la adecuada disponibilidad de elementos nutritivos para el rodal y por otro, favorece la formación de ácidos orgánicos menos estables y de efecto ácido más pronunciado (Schlatter, 1987).

Tabla 1. Valores medios de indicadores de suelo bajo sistemas natural (Pz) y forestal (Pi) para las distintas profundidades.

Table 1. Mean contents of indicators of soils under native grassland (Pz) and Pinus sp (Pi) plantations for different soil depths.

-	Prof. (m)	Pz	Pi	CV	P≤F
Limo + Arcilla g kg⁻¹	0-0,10	396,8a	420,9a	12,37	0,202
Da	0-0,10	1,05a	1,14b	7,4	0,0082
Mg m⁻³	0,10-0,20	1,15a	1,18a	5,98	0,1724
	0,20-0,30	1,33a	1,28a	6,62	0,1112
pH	0-0,10	5,17b	4,88a	4,91	0,003
	0,10-0,20	5,28a	5,14a	4,68	0,1063
	0,20-0,30	5,33b	5,17a	3,29	0,0176
	0,30-1	5,17b	4,88a	4,91	0,003
COS g kg⁻¹	0-0,10	32,76b	27,86a	19,76	0,0333
	0,10-0,20	20,20a	20,30a	16,52	0,8988
	0,20-0,30	12,52a	13,07a	22,89	0,6102
	0,30-1	10,29b	7,60a	11,09	<0,0001
NT g kg⁻¹	0-0,10	2,98b	1,69a	20,97	<0,0001
	0,10-0,20	1,69b	1,36a	23,92	0,0197
	0,20-0,30	0,95a	0,77a	29,73	0,1802
	0,30-1	0,73b	0,32a	35,1	<0,0001
C/N	0-0,10	11a	16b	17,90	<0,0001
	0,10-0,20	12a	15b	19,2	<0,0071
	0,20-0,30	14a	17a	25,2	0,0656
	0,30-1	15a	24b	22	<0,0001
RES kg CO₂ ha⁻¹ día⁻¹	0-0,10	42b	32a	29	0,0218
NPM g kg⁻¹	0-0,10	0,096b	0,031a	55	<0,0001

pH, COS: carbono orgánico, NT: nitrógeno total, C/N: relación carbono:nitrógeno, RES: respiración, NPM: nitrógeno potencialmente mineralizable. Medias, coeficiente de variabilidad (CV) y valor de probabilidad ($P \leq F$). Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

pH, COS: soil organic carbon, NT: total nitrogen, C/N: relation carbon:nitrogen, RES: soil respiration, NPM: potentially mineralizable nitrogen. Different letters represent significant statistical differences among treatments ($P < 0.05$).

El sistema bajo pastizal, presentó la menor Da ($1,05 \text{ Mg m}^{-3}$), lo cual fue atribuido a la mayor cobertura herbácea del suelo, al sistema radical adventicio y sus beneficios en el incremento de su fertilidad natural, en la agregación, en la retención de agua, debido a los aportes continuos de biomasa, por la parte aérea y por las raíces (Senra, 2009). El uso forestal, produjo un aumento en la densidad aparente suelo (Da: $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$), observándose diferencias significativas en la primera profundidad ($P < 0,007$).

El NT fue menor en suelos bajo pino en todas las profundidades, con disminuciones del 43% en superficie, 19,5% en la segunda profundidad, 19% en la tercera y 56% en la última profundidad estudiada respecto de Pz, con diferencias significativas en la primera, segunda y última profundidad ($P < 0,0001$, $0,0197$ y $< 0,0001$ respectivamente). Esto puede ser explicado por el efecto de la materia orgánica aportada por las raíces, en los pastizales las distintas especies herbáceas que se desarrollan, aportan una mayor cantidad de materia orgánica y de NT. El cambio de uso, provocó una pérdida de los contenidos de carbono y del nitrógeno del suelo, el tratamiento Pi produjo en los primeros $0,10 \text{ m}$ una disminución de las reservas de COS y de NT, del 15% y del 43% respectivamente ($P < 0,05$). Las pérdidas de COS por efecto del uso forestal por más de 15 años, produjeron a su vez disminuciones en el NT debido a la estrecha relación entre la materia orgánica del suelo y los depósitos y flujos de nitrógeno edáfico, y por el mayor consumo de N por parte de los árboles (Zhao et al., 2014), destacándose que con la cosecha gran parte del nitrógeno es exportado del sitio forestal. La cantidad de nutrientes exportados será menor cuanto mayor sea la cantidad de residuos de cosecha que se dejen en el campo (Stharinger et al., 2018). El ciclado de nutrientes es altamente dependiente de las tasas de descomposición de los residuos principalmente de las acículas, del nutriente y de la existencia de mecanismos de pérdidas durante el proceso de descomposición que, en el caso del nitrógeno, son particularmente importantes (Hernández Legnazzi, 2016).

En suelos de diferentes órdenes taxonómicos, bajo forestaciones de *Pinus sp.*, fueron observadas pérdidas de COS y relacionadas principalmente con el laboreo de preparación del suelo para la plantación (Hernández Legnazzi, 2016). El laboreo favorece la mineralización de las sustancias orgánicas, así la pérdida por remoción puede ser importante en estos suelos forestales, dadas sus características de bajo contenido de COS y la mayor fragilidad de las sustancias orgánicas al tener un muy bajo contenido de arcilla, y no contar con su rol de protección. Delgado et al. (2006) evaluaron los efectos de preparación del terreno en suelos forestales y concluyeron que en el corto plazo la principal causa de disminución del COS son causados por los efectos de la intensidad del laboreo preplantación, y si bien en el largo plazo ocurren modificaciones por efecto del cambio de vegetación, los efectos del laboreo pueden perdurar.

Eclesia et al. (2016) sostuvieron que las plantaciones forestales afectan de diferente manera el COS dependiendo del sistema al que reemplazan, y encontraron que la conversión de pastizales en plantaciones de árboles disminuyó el contenido total de COS mientras que la conversión de bosques en pastizales aumentó el contenido de COS.

El NPM, hace referencia al potencial del suelo para mineralizar el nitrógeno orgánico, presentando los suelos bajo uso forestal el menor valor, con diferencias significativas respecto al pastizal ($P < 0,0001$). Los suelos forestados presentaron un 70% menos de NPM que el suelo bajo pastizal. Los menores valores de NPM concuerdan con los encontrados por Toledo et al. (2013a) en sistemas agrícolas en los primeros $0,10 \text{ m}$ (pérdidas del 75 al 69%). El NPM es un indicador relacionado a la calidad de la MO del suelo y un importante indicador que se recomienda incluir en los programas de fertilización forestal. En la medida que se trabaje con el balance del nutriente, se podrán ajustar las fertilizaciones a las necesidades de cada sitio y de cada sistema posibilitando la sustentabilidad de la producción forestal. En las situaciones bajo estudio considerando los primeros $0,10 \text{ m}$ de profundidad, y las Da promedio arriba mencionadas, la estimación del potencial de mineralización de nitrógeno (NPM estimado como Nan) para Pz fue de 100 kg ha^{-1} y para Pi de 35 kg ha^{-1} .

La eliminación de los pastizales, y el posterior uso forestal, afectó la actividad de la biota, lo cual se vio reflejada en una disminución de la RES del orden del 23% con diferencias significativas ($P < 0,0218$). Los menores valores de RES en suelos bajo Pi, se relacionaron a que la actividad microbiana está sujeta a los efectos de las condiciones del medio, al pH, a la disponibilidad de sustrato y a las presiones parciales de oxígeno y de dióxido de carbono (Brookes et al., 2008). La hojarasca de pino de relación C/N alta, conlleva a una tasa de descomposición lenta, lo que se traduce en el aumento de la necromasa y del espesor de la hojarasca por acumulación, (en los pinares bajo estudio aproximadamente de 10 a 15 cm de espesor) y en la pérdida del carbono orgánico del suelo. La necromasa del mantillo en un momento dado representa el balance entre la masa que ingresa por productividad de la hojarasca y la masa que se pierde por descomposición (respiración+incorporación de C al suelo) (Malhi et al., 1999).

Al evaluar la relación C/N en suelos bajo Pz, se observó que la misma varió entre 11 y 15, siendo menor en los primeros 0,10m, aumentando con la profundidad. En los suelos forestales la relación C/N fue mayor que bajo Pz, aumentó con la profundidad y varió entre 15 y 24 con diferencias significativas entre tratamientos. La mayor relación estaría asociada a las características de los residuos de pino y mantillo ricos en ligninas (27 a 28%) y fenoles (Lupi et al., 2014; Olsson et al., 1996). Bajas tasas de descomposición de las acículas y del mantillo de *Pinus taeda* fueron determinadas por Hernández Legnazzi (2016) y atribuidas al alto contenido de ligninas y fenoles, como así también a la baja proporción de compuestos solubles lo cual ententece su descomposición. Al mismo tiempo la mayor relación C/N en suelos bajo Pi, se asocia a la disminución del N encontrada, indicando la formación de humus de baja calidad (Lupi et al., 2014). Valores similares de relación C/N en suelos forestales bajo diferentes especies del género *Pinus* fueron encontrados por varios autores (Gallardo Lancho et al., 2016; Toledo et al., 2018).

Los índices de calidad determinados para cada situación bajo estudio en la profundidad 0-0,10 m fueron NPM/RES, NPM/MO, COS/Li+Arc, NPM/NT, (Tabla 2).

Tabla 2. Índices de calidad del suelo (0-0,10 m) bajo los diferentes tratamientos (Trat)

Table 2. Soil quality index obtained for 0-0.10 m under different treatments.

Trat	NPM/RES	NPM/MO	COS/Li+Arc	NPM/NT
Pz	0,002b	0,0018b	0,082a	0,03b
Pi	0,001a	0,0007a	0,066b	0,02a
CV	55,12	58,32	23,38	53,54
P≤F	0,0028	0,0002	0,0142	0,0051

NPM: nitrógeno potencialmente mineralizable, (g kg^{-1}), RES: respiración ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$), MO: materia orgánica (g kg^{-1}), COS: carbono orgánico del suelo (g kg^{-1}), Li+Arc: limo + arcilla (g kg^{-1}), NT: nitrógeno total (g kg^{-1}). MO fue estimada en base a COS, aplicando factor de Van Benmelen (1,724) en base a los valores COS de la tabla 1.

NPM: potentially mineralizable nitrogen (g kg^{-1}), RES: soil respiration ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), MO (organic matter g kg^{-1}), COS: soil organic carbon, NT: total nitrogen (g kg^{-1}). $\text{MO} = \text{COS} * 1,724$ Van Benmelen factor.

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($P < 0,05$).

Different letters represent significant statistical differences among treatments ($P < 0.05$).

El índice NPM/RES está asociado al potencial de mineralización y la actividad microbiana del suelo. El mismo fue menor en suelos bajo *Pinus sp.* respecto a los suelos bajo pastizal con diferencias significativas ($P < 0,0028$). Esta caída del potencial para mineralizar el nitrógeno en los suelos bajo sistemas forestales, es atribuido a la alta acidez generada por la hojarasca de Pi, que favorecería la proliferación de hongos los cuales son menos eficientes en la mineralización del N orgánico. Por otra parte, la calidad de la MO caracterizada por su acidez, y alto contenido en ligninas, contribuye con sus características a una menor mineralización del nitrógeno orgánico. La mineralización del nitrógeno depende del contenido de MO y de la relación C: N de los materiales orgánicos aportados al suelo (Fernández, 1987; Olsson et al., 1996, como se citó en Lupi et al., 2014).

El índice NPM/MO, está asociado al potencial del suelo de suministrar N a los vegetales a partir de la descomposición del material orgánico. Este índice fue menor en suelos bajo Pi, presentando diferencias significativas respecto a Pz ($P < 0,0002$) y en concordancia con el índice anterior. Los cambios en la calidad de la MO, determinan alteraciones en la mineralización y las pérdidas de nutrientes por lixiviación, lo cual puede afectar la productividad de las plantaciones (Lupi et al., 2012), y en el caso bajo estudio, la gran pérdida de NT.

El índice COS/Li+Arc presentó diferencias entre tratamientos, atribuidas directamente a las diferencias en los contenidos de COS. El mismo, resultó sensible para distinguir suelos bajo sistemas naturales, de sistemas forestales. Considerando que no se encontraron diferencias significativas en las fracciones limo+arcilla, el índice estaría respondiendo únicamente a las diferencias en los contenidos de COS y su utilización sería más recomendable cuando los suelos bajo las situaciones a comparar difieran en su granulometría, a fin de minimizar los efectos en las variaciones debidos a la textura (Quiroga et al., 2008).

El índice NPM/NT, representa la proporción del nitrógeno total del suelo que estará potencialmente disponible para las plantas en un período de tiempo específico, como el siguiente ciclo de cultivo (Toledo et al., 2013a). Como se observa en la Tabla 1, este índice resultó sensible para diferenciar pastizales de sistemas forestales con diferencias significativas ($P < 0,005$). El índice fue sensible para diferenciar suelos bajo pastizal natural de las forestaciones, demostrando su sensibilidad, en el caso de Pi, el nitrógeno potencial correspondió al 2% del nitrógeno total del suelo. Valores y relaciones similares fueron encontrados por Toledo et al. (2018) bajo rodales de *Pinus sp.* de la misma edad, en suelos rojos con microestructuras características llamadas pseudoarenas.

Las relaciones de estratificación del carbono orgánico (COSr1 y COSr2), y del nitrógeno total (NTSr1 y NTSr2) permitieron observar que existe una mayor estratificación en los suelos de Pz tomados como referencia de las condiciones previas a la plantación.

La relación COSr1 en ambos tratamientos, resultó superior a 2 (Fig. 2), lo cual indica según Franzluebbbers (2002) que no habría una degradación del suelo, ya que destacó que suelos clímax presentan $COSr1 > 2$. Respecto a los índices de estratificación del nitrógeno total, tanto el NTSr1 como el NTSr2, resultaron sensibles para distinguir suelos bajo pastizal de suelos forestados.

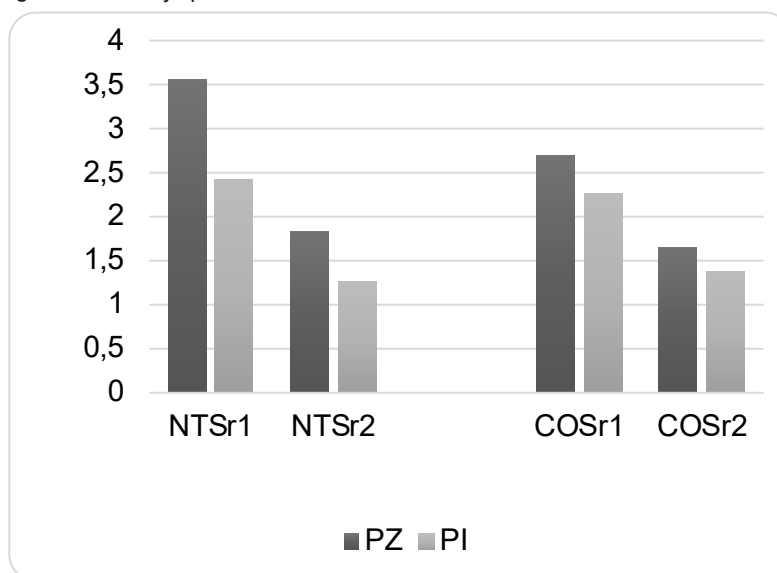


Figura 2. Índices de estratificación de nitrógeno total del suelo (NTS) de 0-0,10 m/0,20-0,30 m (NTSr1) y de 0-0,10 m/0,10-0,20 m (NTSr2) e índices de estratificación del carbono orgánico del suelo (COS) bajo pastizal (PZ) y pino (PI). COSr1: 0-0,10 m/0,20-0,30 m y COSr2: 0-0,10 m/0,10-0,20 m.

Figure 2. Stratifications ratios COS (soil organic carbon) and NTS (soil total nitrogen) r1: 0-0,10 m/0,20-0,30 m and r2: 0-0,10 m/0,10-0,20 m, under native grassland (Pz) and *Pinus sp* (Pi) plantations.

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0,05$) entre los tratamientos.

Los resultados obtenidos indicarían que Inceptisoles del NE de Corrientes bajo vegetación natural pre-

sentarían un índice de estratificación NTSr2 >1,5 y que valores menores corresponderían a una pérdida de calidad de suelo. El cambio de uso provocó disminución de los valores de los índices de estratificación, muy por debajo de los determinados para sistemas naturales. Suelos sin disturbar presentaron los mayores potenciales, con índices superiores a 2,5 en tanto que los suelos bajo cultivo presentaron un NTSr₁ <1,5, en coincidencia con valores encontrados por Toledo et al. (2013a) en suelos en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. Arzuaga et al. (2016), trabajaron con similares relaciones de estratificación de carbono y nitrógeno en Oxisoles suelos bajo forestaciones de *Pinus sp.* de 15 a 17 años de edad, y señalaron que tanto los índices de estratificación del COS como los del NT fueron menores bajo plantaciones de pinos respecto a la vegetación Pz tomada de referencia.

Por otra parte, cabe destacar que la RES presentó una alta correlación con las relaciones de estratificación, con el NPM y con el COS.

Considerando los primeros 0,10 m de profundidad, y aplicando correlación de Pearson ($P < 0,05$), el NPM presentó una correlación positiva y significativa con las variables pH ($r = 0,49$), COS ($r = 0,17$), NT ($r = 0,36$) y los índices de estratificación: COSr1 ($r = 0,23$), NTSr1 ($r = 0,16$), NTSr2 ($r = 0,09$), COSr2 ($r = 0,05$). El COS correlacionó con la mayoría de las variables estudiadas, aunque en este caso se lograron bajos valores de correlación. En los sistemas agrarios, la materia orgánica del suelo contribuye a las funciones vitales del mismo como la actividad microbiana, el ciclado de nutrientes y la productividad de los cultivos, y es un indicador determinante clave de la calidad del suelo, considerado universal por muchos autores (Galantini y Rosell, 2006; Shukla et al., 2006) y relacionado estrechamente a la sustentabilidad de los sistemas.

CONCLUSIONES

Los indicadores COS, RES, NT y NPM, los índices de calidad: NPM/RES, NPM/MO, NPM/NT, COS/li+Arc, y las relaciones de estratificación (COSr1, COSr2, NTSr1 y NTSr2), mostraron sensibilidad para distinguir los cambios producidos por el uso forestal. Se observó una alteración del equilibrio natural del sistema, puesta de manifiesto en el impacto en los contenidos orgánicos, el NT, y en los procesos biológicos como el potencial del suelo para mineralizar el nitrógeno orgánico.

La eliminación del pastizal, el posterior laboreo del suelo, y la implantación de una especie exótica como *Pinus sp.* produjo pérdidas de nutrientes por lo que, para mantener una producción forestal sustentable podría resultar conveniente realizar fertilizaciones de manera de mantener la calidad de los sitios.

El NPM bajo forestaciones de *Pinus sp.* obtenido, aporta un valor hasta hoy desconocido que puede ser empleado para ajustar programas de fertilizaciones en forestaciones contemplando el suministro de nutrientes del suelo, pudiendo ser incorporado al balance nutricional del nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría General de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional del Nordeste. Al Ing. Agr. Ramiro Joaquín Gómez, por su participación en la determinación de NPM.

REFERENCIAS

- Alvarez, R. y Santanatoglia, O. J. (1985). Actividad biológica y biomasa microbiana en diferentes suelos incubados bajo las mismas condiciones ambientales. *Ciencia del Suelo*, 3(1-2), 180-184.
- Arzuaga, S. A., Toledo, D. M., Contreras Leiva, S. M. y Vazquez, S. (2016). Stocks y relaciones de estratificación del carbono y nitrógeno en Oxisoles bajo sistemas forestales. *Ciencia del Suelo*, 34(1), 13-20.
- Arzuaga, S. A., Sotelo, C., Contreras Leiva, S. M. y Toledo, D. M. (2022). Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis (Nan). En: C. Sotelo et al. (Eds.), *Técnicas de análisis de indicadores microbiológicos ambientales de suelo*. Cap. 5. Ex.77-2019-00663. Editorial EUDENE. Universidad Nacional del Nordeste. En prensa.
- Baruzzo, M. N., Smichowski, H., Martinez, S. E. y Contreras, F. I. (2020). Plantaciones Forestales: crecimiento y expansión de la actividad forestal en las Lomadas Arenosas en Corrientes, Argentina. *Revista Investigaciones y Ensayos Geográficos (IEG)*. UNAF, 1(17), 71-82.
- Brookes, P. C., Cayuela M. L., Contin, M., De Nobili, M., Kemmitt, S. J. y Mondini, C. (2008). The mineralization of fresh and humified soil organic matter by the soil microbial biomass. *Waste Management*, 28(4), 716-722.
- Curtin, D. y Campbell, C. A. (2006). Mineralizable Nitrogen. Chapter 46. *New Zealand Institute for Crop and Food Research Christchurch. New Zealand Agriculture and Agri-Food*, Canada Ottawa, Ontario, Canadá.
- Dalurzo, H. C., Toledo, D. M. y Vazquez, S. (2005). Parámetros químicos y biológicos en Oxisoles con uso citrícola. *Ciencia del Suelo*, 23(2), 159-165.

- Delgado, S., Alliaume, F., García Préchac, F. y Hernández J. (2006). Efecto de las plantaciones de *Eucalyptus sp.* sobre los recursos naturales en Uruguay. *Agrociencia*, 10(2), 95-107.
- Dewis, J. y Freitas, F. (1970). Physical and chemical methods of soil and water analysis. *FAO Soils Bulletin* 10, 36-57. FAO, Rome.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. *InfoStat versión 2020*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Martínez, J. M. e Iglesias, J. O. (2016). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del Suelo*, 34(2), 197-209.
- Eclesia, R. P., Jobbagy, E. G., Jackson, R. B., Rizzotto, M. G. & Piñeiro, G. (2016). Stabilization of new carbon inputs rather than old carbon decomposition determines soil organic carbon shifts following woody or herbaceous vegetation transitions. *Plant and Soil*, 409(1-2), 99-116.
- Escobar, E. H., Ligier, H., Melgar, R., Matteio, H. y Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes*, INTA. pp. 258.
- Fernández, R. A. (1987). Influencia del sistema desmonte-re-forestación con *Pinus. sp* sobre algunas características químicas de los suelos. *Ciencia del Suelo*, 5(2), 123-129.
- Franzluebbers, A. J. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95-106.
- Galantini, J. A., Senesi, N., Brunetti, G. y Rosell, R. (2004). Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina. *Geoderma*, 123(1-2), 143-152.
- Galantini, J. A. y Rosell, R. (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Tillage Research*, 87, 72-79.
- Gallardo Lancho, J. F. (2016). Modelización de la dinámica de la materia orgánica. pp. 281. En J. F. Gallardo Lancho, (Ed.), *La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono*. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Orientadora Grafica.
- García, G. V., Wyngaard, N., Reussi Calvo, N. I., San Martino, S., Covacevich, F. y Studdert, G. A. (2020). Soil survey reveals a positive relationship between aggregate stability and anaerobically mineralizable nitrogen. *Ecological Indicators*, 117 (2020) 106640, 1-10.
- Hernández Legnazzi, J. (2016). *Dinámica de los nutrientes y la materia orgánica del suelo en los sistemas forestales*. [Tesis de Doctorado en Ciencias Agrarias] Universidad de la República Facultad de Agronomía. Montevideo (Uruguay). Repositorio Colibrí.
- Homberg, M. A., Zuleta, G. A., Schell, D. G., Faggi, A., Capmourteres, V. E. y Tobar, D. (2009). ANEXO II-Implementación en Argentina de la Red Temática de Ecosistemas Terrestres para las Américas. Informe Técnico Final de la Universidad Maimónides Departamento de Ecología y Ciencias Ambientales para el IABIN-OEA.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. y Schuman, G. E. (1997). Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Keeney, D. R. y Nelson, D. W. (1982). Nitrogen-Inorganic Forms. En: Page, A. L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Agronomy Monograph 9, Part 2 (2nd ed., pp. 643-698). Madison, WI: ASA, SSSA.
- Kurtz D. B., Matteio, R. H., Vallejos, O., Garay, J. M., Perucca, S.C., Ybarra, D. D., Collantes, A. O., Escobar, C. A., Matteio, J. P., Flores, C. L. J. y colaboradores. (2018). Informe Final. *Cartografía de Suelos y Aptitud de Tierras del Departamento Mercedes*. Corrientes. MP-CFI-INTA. Argentina. .
- Kurtz, D., Rey Montoya, S., Ybarra, D., Grancic, C. y Sanabria, C. (2020) Impacto del pastoreo en propiedades físico-químicas de un Psammacuent en pastizales del nordeste argentino. *Revista Argentina de Producción Animal*, 40(2), 1-13.
- Lupi, A. M., Conti, M. E. y Fernández, R. A. (2012). Calidad del carbono orgánico del suelo en diferentes técnicas de manejo de residuos forestales. *Ciência Florestal*, 22(2), 295-303.
- Lupi, A. M., Fernandez, R., Martiarena, R., Von Wallis, A., Pahr, N. y Boca, T. (2014). *Evolución de un suelo subtropical con diferentes manejos de residuos forestales*. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014, Buenos Aires, Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.
- Malhi, Y., Baldocchi, D. D. y Jarvis, P. G. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 22(6), 715-740.
- Martínez, J. M., Galantini, J. A. y Duval, M. E. (2018). Contribution of nitrogen mineralization indices, labile organic matter and soil properties in predicting nitrogen mineralization. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(1), 73-89.
- Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F. y Silva, M. 2012. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. 1ª ed. Buenos Aires: *Orientación Gráfica Editora*.
- Olsson, B. A., Staaf, H., Lundkvist, E., Bengtsson, J. y Rosh, K. (1996). Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest Ecology and Management*, 82, 19-32.
- Peirano, C., Bussio, D. y Beccar Varela, A. (2020). *Plan estratégico forestal y foresto industrial Argentina 2019-2030*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Secretaría de Agroindustria, Ministerios de Producción y Trabajo, Salud y Desarrollo Social, Educación, Cultura, Ciencia y Técnica, y The Nature Conservancy. Argentina.

- Pereira, L., Toledo, D. M., Acosta, L. y Kurtz, D. (2019). *Modelado del estado de degradación de Inceptisoles del Noreste de la Provincia de Corrientes, Argentina*. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 7 y 11 de octubre de 2019. Montevideo Victoria Plaza Hotel - Montevideo, Uruguay.
- Quiroga, A., Fernandez, R., Funaro, D. y Peinemann, N. (2008). Materia orgánica en Molisoles de la región semiárida pampeana. Influencia sobre propiedades físicas y productividad. En: J. Galantini et al. (Eds.) *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina* (pp. 97-116). Editorial Universidad Nacional del Sur (UNS).
- Rojas, J. (2012). Densidad aparente. *Comparación de métodos de Ensayo de rotaciones en siembra directa*. INTA Saenz Peña.
- Sá, J.C. de M. y Lal, R. (2009). Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage cronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Research*, 103, 46-56.
- Sabattini, J. A., Dalla Costa, B., Franci, D. y Dallava, A. B. (2020). Producción forestal en la Mesopotamia Argentina: situación actual y potencialidades en el uso de la madera como fuente energética. En: Universitat Politècnica de València (Eds.). *Optimización de los procesos de extracción de biomasa Sólida para uso energético* Trabajos de investigación 2019. Red IBEROMASA Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Cuadernos de la RED IBEROMASA.
- Schlatter, J. E. (1987). La fertilidad del suelo y el desarrollo Pinus radiata D. Don en Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. *Bosque* 8(1):13-19.
- Shukla, M. K., Lal, R. y Ebingerb, M. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Tillage Research*, 87, 194-204.
- Senra, A. (2009). Impacto del manejo del ecosistema del pastizal en la fertilidad natural y sostenibilidad del suelo. *Avances en investigación agropecuaria*, 13(2), 3-15.
- Soon Y. K., Haq, A. y Arshad, M. A. (2007) Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38, 2029-2043.
- Stharinger, N. I., Neves J. C. L., Paulucio, R. V., Texeira, J. L., Sussini, P. A., Argüelles, R. T. y Chamorro L. L. (2018). Recomendación de fertilizantes para Pinus y Eucalyptus, en Corrientes Argentina, utilizando balance nutricional. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica IAH*, 30, 14-22.
- Toledo, D. M., Galantini, J. A., Ferreccio, E., Arzuaga, S., Gimenez, L. y Vazquez S. (2013a). Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del Suelo*, 31(2), 201-212.
- Toledo, D. M., Galantini, J. A., Dalurzo, H. C., Vazquez, S. y Bollero, G. (2013b). Methods for assessing the effects of land-use changes on carbon stocks of subtropical Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 77, 1542–1552.
- Toledo, D. M., Arzuaga, S.A., Galantini, J. A. y Vazquez, S. (2018). Indicadores e índices biológicos de calidad de suelo en sistemas forestales. *Ciencia del Suelo*, 36(2), 1-12.
- Waring, S. A. y Bremner, J. M. (1964). Ammonium production in soil under water logged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201, 951-952.
- Zhao, F., Yang, G., Han, X., Feng, Y. y Ren, G. (2014). Stratification of Carbon Fractions and Carbon Management Index in Deep Soil Affected by the Grain-to-Green Program in China. *PLOS ONE*, 9s(6), e99657.

