

Contenidos de nitrógeno y fósforo del suelo ante un cambio de cobertura y condición topográfica

Recibido 11 de junio de 2019 //
Aceptado 22 de febrero de 2021 //
Publicado online 11 de agosto de 2021

Besteiro, S.I.¹; Descalzo, A.I.B.²

RESUMEN

Las praderas de la Depresión del Río Salado se caracterizan por poseer una alta proporción de suelos con limitaciones productivas relacionadas con excesos hídricos, salinidad-sodicidad y deficiencias edáficas de algunos nutrientes a causa de la naturaleza de la Cuenca del Río Salado en la que se halla inmersa y a la pobreza de los materiales originales. El nitrógeno y el fósforo del suelo constituyen los nutrientes deficitarios por excelencia en estos ambientes y, por consiguiente, son condicionantes de la producción. El objetivo del trabajo fue estudiar los efectos o consecuencias de la implantación de forestaciones comerciales de rápido crecimiento (*Eucalyptus* sp.) en el contenido de nitrógeno total y fósforo lábil de algunos suelos característicos de la Depresión del Río Salado. Para alcanzar este objetivo, se realizaron determinaciones de N total y P disponible por los métodos de MicroKjeldahl y Bray-Kurtz 1 sobre suelos de tres localidades de la Depresión del Río Salado, en la provincia de Buenos Aires (Chascomús, Dolores y Uribelarrea). Las muestras fueron extraídas del horizonte superficial del suelo (0-20cm) en número de tres repeticiones por condición, completando un total de 36 muestras compuestas. Los valores analíticos de nitrógeno total y fósforo disponible fueron sometidos, primeramente, a un análisis de la varianza y comparación de medias (Tukey). Posteriormente, se incorporó la variable de sitio como factor random en un análisis de modelos mixtos. Los resultados obtenidos revelan que los contenidos de fósforo disponible se vieron afectados de forma significativa por los cambios de cobertura del suelo ($p\text{-value} < 4,00e^{-06}$) y la condición topográfica ($p\text{-value} < 2,55e^{-06}$), de modo tal que los mayores contenidos de este nutriente se encuentran en bajas situaciones y cobertura forestal. En cambio, los contenidos de nitrógeno total respondieron únicamente a un cambio de la cobertura ($p\text{-value} < 1,01e^{-05}$), hallándose en mayor proporción bajo las forestaciones. Se concluye que la instalación de especies forestales de rápido crecimiento generó cambios significativos en la disponibilidad de fósforo y contenido de nitrógeno total en el suelo, y se reconoce una mayor proporción de nitrógeno total y contenido de fósforo disponible bajo las forestaciones de *Eucalyptus* que frente a las coberturas herbáceas que reemplazan.

Palabras clave: fertilidad química del suelo, conversión pastizal-forestación, depresión del salado.

ABSTRACT

The prairies of the Depression of the Salado River are characterized by a high proportion of soils with productive limitations related to water excess, salinity-sodicity and edaphic deficiencies of some nutrients. This is caused by the nature of the Salado River Basin which is immersed and due to the poverty of the original materials. Soil nitrogen and phosphorus are the deficient nutrients in these environments and, therefore, are conditioning factors of production. The objective of the work is to study the effects and/or consequences of the implantation of fast-growing commercial

¹Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF), Cátedra de Topografía, Centro de Investigación de Suelos para la Sustentabilidad Agropecuaria y Forestal (CISSAF). Calles 60 y 119 (1900) La Plata, Argentina. Correo electrónico: sebabesteiro@agro.unlp.edu.ar

²Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF).

afforestation (Eucalyptus sp.) on the total nitrogen content and labile phosphorus of some soils characteristic of the Depression of the Salado River. To achieve this goal, the total N and P available were determined by the methods of MicroKjeldahl and Bray-Kurtz 1 on soils of three localities of the Depression of the Salado River, in the province of Buenos Aires (Chascomús, Dolores and Uribelarrea). The samples were extracted from the surface horizon of the soil (0-20cm) with three repetitions per condition, completing a total of 36 composite samples. The analytical values of total nitrogen and available phosphorus were subjected, firstly, to a variance analysis and to a comparison of means (Tukey). Subsequently, the site variable was incorporated as a random factor in a mixed model analysis. The results obtained reveal that the available phosphorus contents are affected significantly by the changes in soil cover (p -value $<4.00e^{-06}$) and topographic condition (p -value $<2.55e^{-06}$), so that the highest contents of this nutrient were found in situations of low and forest cover. On the other hand, the total nitrogen content responds only to a change in the coverage (p -value $<1.01e^{-05}$), being higher its proportion under afforestation. It is concluded that the installation of fast-growing forest species generates significant changes in the availability of phosphorus and total nitrogen content in the soil. It has been recognized higher proportions of total nitrogen and phosphorus content available under the Eucalyptus afforestation compared to the herbaceous cover that they replace.

Keywords: soil chemistry fertility, pasture-afforestation conversion, depression of the Salado River.

INTRODUCCIÓN

Las praderas de la depresión del Salado se caracterizan por poseer una alta proporción de suelos con limitaciones productivas relacionadas con excesos hídricos, salinidad-sodicidad y deficiencias edáficas de algunos nutrientes, a causa de la naturaleza de la cuenca del Río Salado en la que se halla inmersa y a la pobreza de los materiales originales (Vázquez y García, 2012).

Esos ambientes presentan pendientes promedio inferiores al 0,1% y llega, en sectores próximos a la costa, a valores del 0,001% (Batista *et al.*, 2005). El clima es subhúmedo mesotérmico con un régimen pluviométrico isohigro de lluvias distribuidas a lo largo de todo el año que oscilan entre 700 mm y 1000 mm (New *et al.*, 2002), con frecuentes períodos de inundaciones invernales o primaverales y de déficit hídrico estival (León y Bukart, 1998; Batista *et al.*, 2005) y excesos hídricos de 0 a 250 mm/año concentrados en el período otoño-invernal (Auge *et al.*, 2006). Sus suelos hidro-halomórficos pertenecen mayoritariamente a los grandes grupos Natracuol y Natracualf (Miaczynski, 1995; Soil Survey Staff, 2006; Lavado, 2010), poseen en profundidad un horizonte arcilloso de baja permeabilidad y alto contenido de sales sódicas, conocido como horizonte nátrico, que limita los flujos ascendentes y descendentes de agua en el perfil (Salazar *et al.*, 1989; Nuñez *et al.*, 2007; Taboada *et al.*, 2009; Lavado, 2010). La presencia de horizontes Bt en general y nátricos en particular contribuye a evitar que el agua subterránea más cargada en sales alcance la superficie de los suelos deteriorándolos (Taboada y Damiano, 2007; Taboada *et al.*, 2009). Se ha comprobado que en momentos húmedos y de nivel freático alto, la calidad del agua de la parte superior del acuífero, ubicada a unos 50 cm de profundidad, posee una composición química totalmente distinta a la superficial (Sala *et al.*, 1981; Lavado y Taboada, 1988).

Jobbágy *et al.* (2006) indican que el establecimiento de plantaciones forestales sobre pastizales se expande en Argentina y Uruguay, incentivado por los altos rendimientos, el apoyo fiscal y el inminente comercio de bonos de carbono. En parti-

cular, La Pampa Deprimida es tomada como área piloto para la implementación de un programa de instalación de forestaciones de servicio como parte de las herramientas de promoción forestal nacional del Ministerio de Asuntos Agrarios (Besteiro, 2014). Este hecho resulta potencialmente beneficioso debido a las cualidades mundialmente reconocidas de las forestaciones para modificar la dinámica hídrica de estos ambientes, al punto de ser consideradas verdaderas herramientas correctoras de los procesos naturales que lo degradan. Sin embargo, dada la utilización de especies de alto consumo hídrico y rápido crecimiento, resulta necesario profundizar los estudios sobre los costos y beneficios de estas acciones. Las forestaciones presentan una mayor producción de biomasa (productividad primaria) frente a las pasturas naturales y, por tanto, un mayor consumo hídrico, un aumento de la cantidad de agua evapotranspirada, una disminución del rendimiento hidrológico y un mayor almacenamiento de nutrientes (Jobbágy *et al.*, 2006).

El nitrógeno (N) es un elemento primario tanto en plantas como en el resto de los seres vivos, se lo puede encontrar en los aminoácidos y proteínas; en las amidas, la clorofila y las hormonas (auxinas y citoquininas, nucleótidos, vitaminas, alcaloides y ácidos nucleicos). El ciclo biogeoquímico de este nutriente es uno de los más importantes y dinámicos de la naturaleza, producto de estrecha vinculación con el ciclo del carbono y la actividad biológica del suelo (Marbán y Ratto, 2005).

Las raíces pueden absorber el nitrógeno en su forma iónica como nitrato (NO_3^-), mientras que algunas plantas pueden utilizar el nitrógeno del amonio (NH_4^+). En el suelo, se produce un proceso denominado nitrificación, que consiste en la conversión de N^{-3} (tal como está presente en la mayoría de los compuestos biológicos como aminoácidos) a N^{+5} , como se encuentra en los nitratos, forma principal absorbida por las plantas. En la naturaleza, la nitrificación se cataliza por dos grupos de bacterias, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*. Las bacterias *Nitrosomonas* provocan la transición del amoníaco al nitrato, mientras que la oxidación de nitrato a nitrato es mediada por *Nitrobacter* (Manahan, 2006). El N suele ser uno de los

elementos que escasean y que es factor limitante de la productividad de muchos ecosistemas (IICA, 2001).

El fósforo (P) es un elemento que estimula el desarrollo del sistema radicular y el establecimiento temprano de las plantas. Es muy importante en la función reproductiva, por lo que es abundante en flores y frutos. El fósforo se encuentra en los suelos tanto en forma orgánica como inorgánica y su solubilidad en el suelo es baja. Existe un equilibrio entre el fósforo en la fase sólida del suelo y el fósforo en la solución del suelo, sin embargo, presenta la particularidad de que no se recicla por lluvia ni agentes atmosféricos y su reactividad y distribución no dependen de los procesos de oxidación-reducción del suelo (Giuffré, 2005).

Las plantas pueden absorber solamente el fósforo disuelto en la solución del suelo y, puesto que la mayor parte del fósforo en el suelo existe en compuestos químicos estables, solo una pequeña cantidad está disponible para la planta en cualquier momento dado. Se estima que la cantidad de fósforo disponible para la planta en un momento dado es inferior al 1% del P total del suelo (Boschetti y Quintero, 2005). Al absorber el fósforo de la solución del suelo por las raíces, parte del adsorbido en la fase sólida es liberado a la solución del suelo para mantener un equilibrio químico. Los tipos de compuestos de fósforo que existen en el suelo son principalmente determinados por el pH del suelo y por el tipo y la cantidad de los minerales en el suelo. Por lo general, los compuestos minerales que forma el fósforo son compuestos de aluminio, hierro, manganeso y calcio. Las formas más solubles o disponibles de fósforo existen dentro del rango de pH de 6,0 a 7,5. Las plantas absorben el fósforo de la solución del suelo principalmente como el ion ortofosfato $H_2PO_4^-$ y en menor proporción como HPO_4^{2-} , dependiendo del pH del suelo (Navarro y Navarro, 2013).

Son escasos los estudios sobre el efecto de las conversiones de pastizal a forestaciones, en lo que respecta a la cantidad y distribución de nutrientes limitantes como el nitrógeno y el fósforo. La determinación y análisis cuantitativo de estos elementos resulta necesario para caracterizar la fertilidad de los suelos y esta, a su vez, para el correcto uso de los recursos.

En este sentido, los estudios de estabilidad de nutrientes bajo distintos escenarios de aprovechamiento forestal de-

muestran que los contenidos de nitrógeno (N) y calcio (Ca) en suelos son críticos bajo estos sistemas productivos, mientras que los de fósforo (P) y potasio (K) se comportan como nutrientes más estables.

Al respecto, Frangi *et al.* (2015) indican que una plantación de primer ciclo de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en Concordia demuestra una avidez por el P y N que se manifiesta por la captura de estos por vía foliar. A su vez, afirman que los requerimientos de N fueron provistos mayormente por absorción, mientras que los de P lo hacen por redistribución. La absorción abarca los nutrientes de retención (madera y raíces gruesas) más los de retorno (caída de hojarasca, mortalidad de raíces y agua de trascolación y flujo caulinar). La redistribución, en cambio, hace referencia a la diferencia entre el contenido de nutrientes en estructuras anuales (hojas, ramas finas, frutos y raíces finas) y la suma del retorno más los nutrientes contenidos en agua de lluvia y absorbidos en copas. Estos autores (Frangi *et al.*, 2015) observaron un descenso del N bajo estas plantaciones (Goya *et al.*, 2013), a la vez que señalaron que la mayor eficiencia de redistribución que presenta el P se interpreta como una mayor independencia de los procesos de mineralización/inmovilización edáfica de este nutriente con respecto al N bajo forestaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.

Del mismo modo, Graciano *et al.* (2006) analizaron los nutrientes en el suelo y hojarasca de una crono-secuencia de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, comprobando que, a medida que se desarrolla el rodal, los contenidos de N decrecen mientras que la concentración de P se mantiene estable. Además, remarcaron el hecho de que si bien los nutrientes del suelo decrecen a lo largo de la crono-secuencia estudiada, los contenidos de estos nutrientes en hojarasca se incrementa, por lo que el sistema forestal actuaría agotando los nutrientes del suelo para acumularlos en la hojarasca.

En Dourados, Brasil, Doffinger Ramos *et al.* (2013) realizaron un estudio sobre los contenidos de carbono (C) y N total ante un cambio de uso de los suelos. En él se concluye que, mientras que la conversión de rotación soja/maíz bajo labranza cero a *Eucalyptus* generaba un incremento de C en su fracción más activa (ácidos fúlvicos) y, a su vez, la conversión de labranza convencional a labranza cero promovía un incremento en los contenidos de N total, la conversión de rotación de cultivo con labranza convencional a *Eucalyptus* no manifestaba una diferencia significativa respecto al N total.

Al respecto, Díaz Rosello (1992) observó, para tres ciclos de rotación, un efecto positivo de las pasturas en relación con suelos bajo cultivo intensivo. Este efecto se manifestó como un incremento de más de 0,02% de N total en el suelo para una rotación de una pastura mixta de gramíneas y leguminosas, y un detrimento de aproximadamente 0,01% para un cultivo de grano.

En función de los antecedentes presentados, se plantea la hipótesis de que la instalación de masas forestales de rápido crecimiento y alto consumo hídrico ejerce cambios significativos en la disponibilidad de fósforo y contenido de nitrógeno total en el suelo. Por un lado, se espera que los contenidos de N total y P disponible sean significativamente dependientes de la cobertura y se encuentren en mayor cantidad bajo la cobertura forestal. Por otro lado, se postula que solo el N total tiene una relación significativa con la topografía, dado su vínculo con la materia orgánica del suelo, y se encuentra en mayor proporción en situaciones de bajo.

El objetivo de esta propuesta es estudiar los efectos de la implantación de forestaciones comerciales de rápido crecimiento

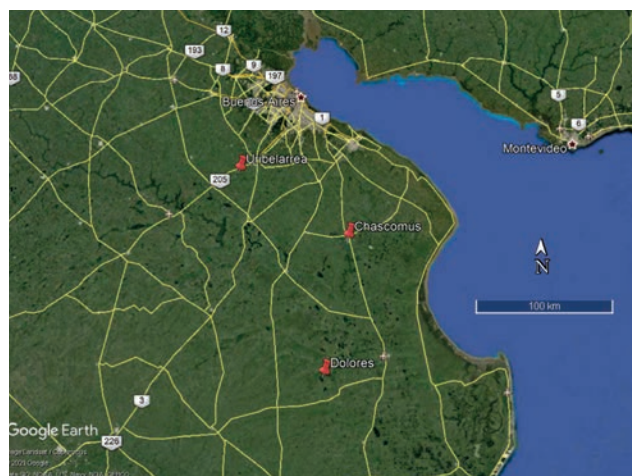


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo (adaptado de Google Maps).

to en los contenidos de nitrógeno total y fósforo disponible de algunos suelos característicos de la Depresión del Río Salado.

MATERIALES Y MÉTODOS

En total fueron analizadas 36 muestras compuestas de suelo, provenientes de las localidades de Chascomús, Dolores y Uribelarrea (figura 1), con cuatro situaciones diferentes en cada localidad: loma forestada, loma pastizal, bajo forestado y bajo pastizal. Todas las muestras fueron obtenidas del horizonte superficial del suelo (0-20 cm) y fueron sometidas a las determinaciones de nitrógeno total (N tot.) y fósforo disponible (P disp.), a razón de dos repeticiones por muestra.

Para la determinación de N tot. fueron seguidos los pasos del método MicroKjeldahl (SAMLA-SAGPyA, 2004). Este método comprende tres fases fundamentales, en las que el N de la muestra es convertido a amonio (NH₄⁺) por digestión con H₂SO₄ concentrado (conteniendo sustancias que facilitan esta conversión), y el NH₄⁺ se determina por titulación de la cantidad de NH₃ liberado por destilación del digesto con álcali.

La determinación de P disp. fue efectuada por medio del método de Bray y Kurtz I, el cual está fundamentado en la propiedad del ion F⁻ de formar complejos con los iones Al³⁺ y Fe³⁺, liberando así el P retenido por estos cationes (Bray y Kurtz,

1945). El ensayo comprende dos etapas: extracción y determinación (IRAM-SAGPyA 29570-1, 2010). La naturaleza ácida del extractante utilizado en este método (pH 2,6) contribuye a la disolución del P disp. del Al, Ca y Fe, formas enlazadas en la mayoría de los suelos, que luego es centrifugado y filtrado para cuantificar el P en el extracto por espectrofotometría.

Los valores analíticos obtenidos de N tot. y P disp. fueron contrastados con los valores de referencia que comúnmente se utilizan para la caracterización de suelos según los macronutrientes evaluados (tablas 1 y 2).

El análisis estadístico de los datos analíticos fue realizado, primeramente, con el programa InfoStat (InfoStat, 2004), para evaluar la significancia de las variables analizadas. Posteriormente, fue realizado un análisis con el programa estadístico R (R CoreTeam, 2015) y los paquetes: lme4, xlsx y ggplot2 (Bates et al., 2015; Dragulescu, 2014; Wickham, 2009), con el fin de incorporar la variable de "sitio" (figura 1) como factor random en un análisis de modelos mixtos. La exploración de variables "topografía" y "cobertura" se realizó según el criterio de información de AKAIKE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 3 fue confeccionada con los valores promedio de las determinaciones de laboratorio y posee el detalle de las localidades y condiciones consideradas en el análisis.

Según lo indicado en la tabla 1, los suelos de las tres localidades se ubican en la categoría de "Rico" a "Extremadamente rico" en lo que respecta al contenido de N total, con excepción

Nitrógeno total (%)	Categoría
< 0,032	Extremadamente pobre
0,032 – 0,063	Pobre
0,064 – 0,095	Medianamente pobre
0,096 – 0,126	Medio
0,127 – 0,158	Medianamente rico
0,159 – 0,221	Rico
> 0,221	Extremadamente rico

Tabla 1. Clasificación de suelos según el contenido de nitrógeno total. Adaptado de Moreno (1978).

Fósforo disponible (ppm)	Categoría
< 15	Pobre
15 – 30	Medio
≥ 30	Rico

Tabla 2. Referencia para la clasificación de suelos según su contenido de fósforo en solución. Adaptado de NOM-021 (2002).

Procedencia	Condición topográfica	Cobertura	%N			P (ppm)		
Dolores	Loma	Forestal	0,18	0,17	0,17	5,1	4,7	4,0
		Herbácea	0,13	0,20	0,15	2,2	2,2	2,5
	Bajo	Forestal	0,18	0,22	0,23	3,7	2,4	3,6
		Herbácea	0,23	0,17	0,15	4,5	8,9	6,6
Chascomús	Loma	Forestal	0,30	0,29	0,27	11,4	7,6	12,4
		Herbácea	0,26	0,24	0,25	3,5	4,6	4,2
	Bajo	Forestal	0,25	0,20	0,24	27,6	22,2	22,2
		Herbácea	0,20	0,23	0,22	3,7	3,2	3,4
Uribelarrea	Loma	Forestal	0,20	0,21	0,20	329,4	313,3	202,4
		Herbácea	0,23	0,27	0,21	225,7	435,5	252,6
	Bajo	Forestal	0,27	0,30	0,20	108,5	150,6	161,4
		Herbácea	0,12	0,14	0,13	28,3	17,2	30,1

Tabla 3. Resultados analíticos de nitrógeno total y fósforo disponible.

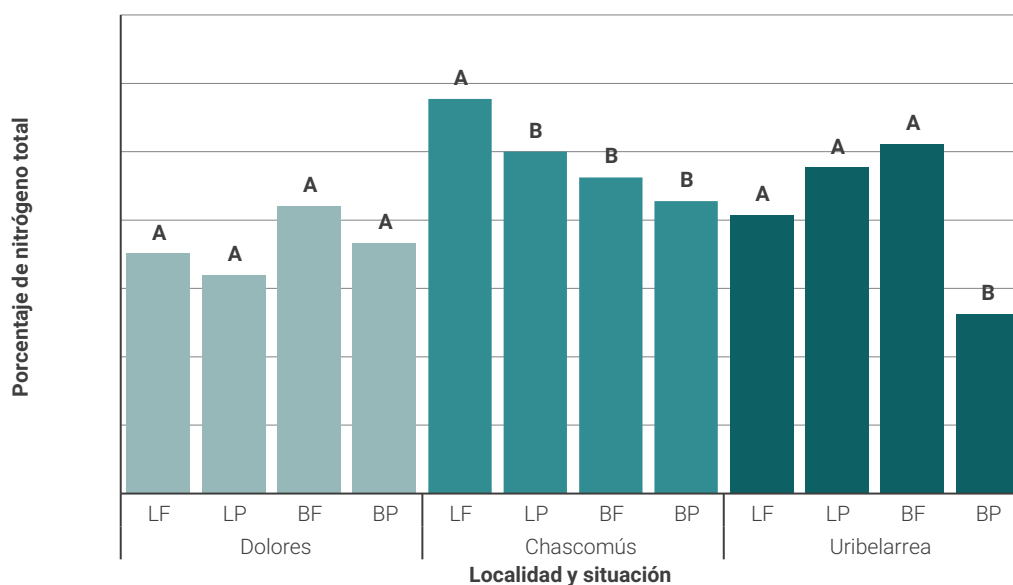


Figura 2. Representación gráfica de los valores medios de N total (%). Loma (L); bajo (B); cobertura herbácea (P) y cobertura forestal (F). Letras iguales sobre las barras de cada localidad indica que no existen diferencias significativas entre medias ($\alpha=0,05$).

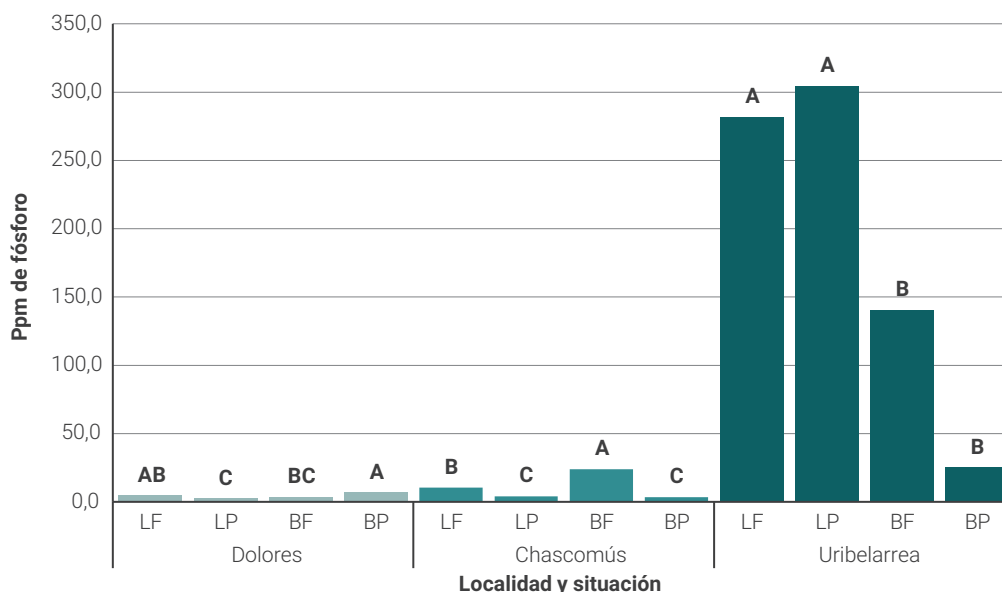


Figura 3. Representación gráfica de los valores medios de P disponible (ppm). Loma (L); bajo (B); cobertura herbácea (P) y cobertura forestal (F). Letras iguales sobre las barras de cada localidad indica que no existen diferencias significativas entre medias ($\alpha=0,05$).

del bajo con cobertura herbácea en Uribelarrea, que entra en la categoría “Medianamente rico”, producto del intensivo proceso de extracción que allí se realiza. Además, se observa de forma consistente que los %N bajo forestaciones superan a las de cobertura herbácea, posiblemente por la acumulación de materia orgánica por caída de hojas y ramas finas.

En lo que respecta al contenido de P disp. (tabla 2), los suelos estudiados se presentan desde pobres (Dolores) a ricos (Uribelarrea), pasando por una situación intermedia en Chascomús.

Llama la atención la magnitud de los valores de P obtenidos en Uribelarrea para las situaciones de loma y bajo forestal, el motivo responde al aporte externo de este nutriente, producto de más de 5 años de enmiendas con residuos de corral y gallineros.

Los valores analíticos de N tot. y P disp. fueron sometidos a un análisis de la varianza y comparación de medias (Tukey) y volcados en las figuras 2 y 3.

En la figura 2 es posible apreciar visualmente que los contenidos de N total son superiores bajo la cobertura forestal. Sin

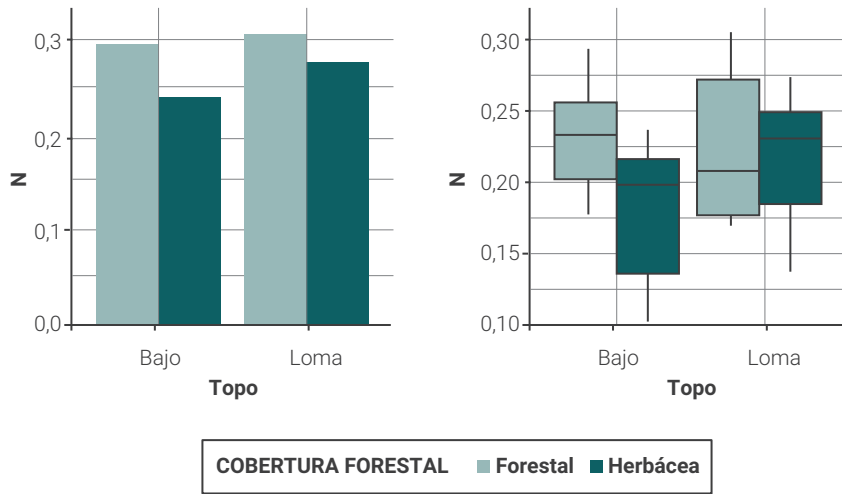


Figura 4. a- gráfico de barras de valores ajustados y acumulados de N total [%] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor cober". b- Boxplot de los valores analíticos ajustados de N total [%] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor cober" (cobertura forestal en verde claro y herbácea en verde oscuro).

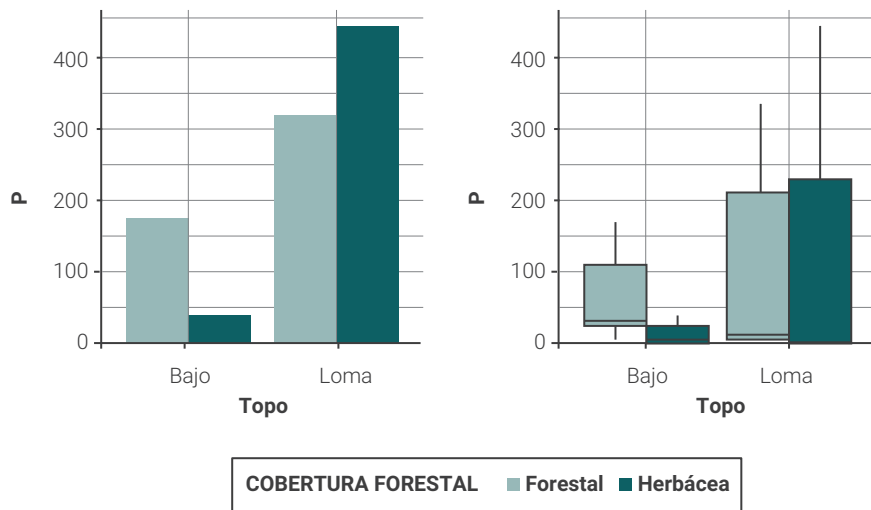


Figura 5. a- gráfico de barras de valores ajustados y acumulados de P disponible [ppm] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor cober". b- Boxplot de los valores analíticos ajustados de P disponible [ppm] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor cober" (cobertura forestal en verde claro y herbácea en verde oscuro).

embargo, no se puede establecer una relación clara entre la proporción de este nutriente y la condición topográfica. Esta indeterminación puede estar dada por un conjunto de variables propias de cada localidad en estudio, tales como características puntuales de temperatura, exposición y pluviometría, o las prácticas agrícolas que allí se efectúan. Estas últimas, van desde el pastoreo de pasturas naturales (Dolores) o implantadas (Chascomús) hasta la rotación de cultivos con aporte de enmiendas de residuos de corral (Urubelarrea). El análisis

estadístico de los valores medios de este nutriente indica que no existen diferencias estadísticas entre los valores de cada localidad, lo que anularía la primera apreciación gráfica de los resultados analíticos.

En la figura 3 se aprecia el mismo efecto antes indicado para el N, una mayor disponibilidad de P bajo forestaciones y una relación poco clara con respecto a la topografía. Al mismo tiempo, es posible apreciar un contenido excesivo de P disponible en Urubelarrea. Esto podría explicarse por el hecho de que, a

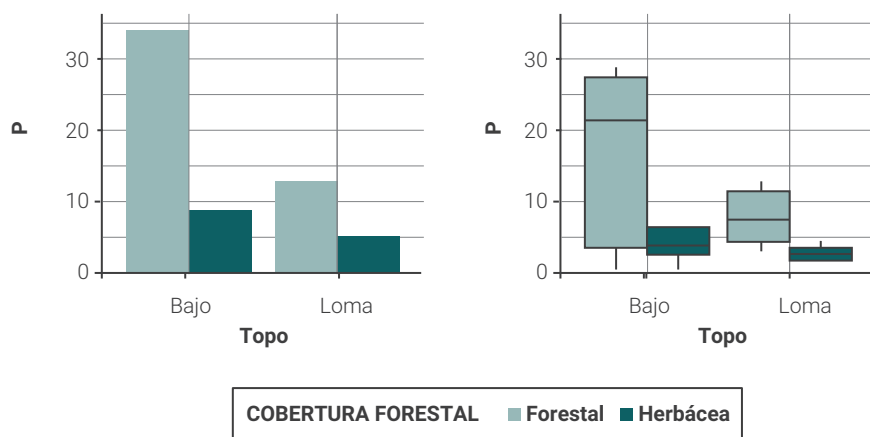


Figura 6. a- gráfico de barras de valores ajustados y acumulados de P disponible [ppm] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor coper". b- Boxplot de los valores analíticos ajustados de P disponible [ppm] (ordenadas) para cada condición topográfica "topo" (abscisas) y cobertura "factor coper" (cobertura forestal en verde claro y herbácea en verde oscuro). En ambos gráficos no se consideraron los datos provenientes de Uribelarrea.

diferencia del nitrógeno, que guarda una estrecha relación con la actividad microbiana y el contenido de materia orgánica del suelo, el contenido de P depende casi exclusivamente del material originario, y su balance es de tipo químico. Con esto se entiende que, dada la escasa movilidad de este nutriente, el aporte externo de P por medio de enmiendas permanece en el suelo por largo tiempo, siendo una posible explicación de estos valores extremos. En este caso, el análisis estadístico indica que el cambio de cobertura y condición topográfica genera cambios en los contenidos de P disp., sin embargo, no es posible identificar un patrón claro en estos efectos.

Para poder interpretar correctamente estos datos, se trabajaron con modelos mixtos a través del programa estadístico R y del paquete "lme4". Esto permitió considerar el efecto generado por el sitio al incorporar las localidades como variable random en el modelo. El resultado de este análisis indica que los cambios de cobertura inciden significativamente en el contenido de N total y P disponible en el suelo ($p\text{-value} < 1,01e^{-05}$), mientras que la topografía no afecta de forma significativa el contenido de los nutrientes evaluados ($p\text{-value} > 0,06$).

Los resultados gráficos de este análisis se muestran en forma de gráficos de barras y boxplot para los valores obtenidos de N total (figuras 4a y 4b) y P disponible (figuras 5a y 5b), respectivamente.

En las figuras 4 y 5 se confirma parcialmente lo observado en el análisis gráfico (figuras 2 y 3). Los contenidos acumulados de N total (figura 4a) son superiores bajo las coberturas de eucaliptos, sin embargo, los valores medios de este nutriente bajo cobertura herbácea y situación de loma (figura 4b) superan a los valores medios obtenidos bajo forestaciones de eucaliptos. Se observa, además, que la mayor dispersión de datos se da en bajos con cobertura herbácea y lomas con cobertura forestal, donde los valores medios son superados por sus homólogos topográficos. En la figura 5, en cambio, no hay una mayor acumulación de P disponible en forestaciones (figura 5a), pero sí un predominio de P disponible bajo forestaciones respecto a los valores medios de este nutriente

(figura 5b), acompañado de una mayor dispersión de datos en situaciones de loma. Esta dispersión de datos se debe a los valores extremos de P disponible encontrados en Uribelarrea.

Si ahora evaluamos el total de los datos, descontando los correspondientes a Uribelarrea, y realizamos nuevamente el análisis estadístico para el caso del P, se obtiene una interpretación gráfica más clara (figura 6) y una relación distinta entre variables. Este análisis revela que tanto los cambios de cobertura ($p\text{-value} < 4,00e^{-06}$) como los de topografía ($p\text{-value} < 2,55e^{-06}$) generan cambios significativos sobre los contenidos de P disponible.

El contenido de P disponible varía en función de la cobertura y condición topográfica, de tal modo que los mayores contenidos de este nutriente se encontrarían en situaciones de bajo y cobertura forestal. Este comportamiento podría estar relacionado con la mayor eficiencia en la redistribución del P indicada por Frangi *et al.* (2015) para el *Eucalyptus grandis* y a la capacidad de fijación de este nutriente por la forestación (Graciano *et al.*, 2006).

CONCLUSIONES

La instalación de especies forestales de rápido crecimiento generó cambios significativos en la disponibilidad de fósforo y contenido de nitrógeno total en el suelo, no habiendo reunido evidencias para rechazar la hipótesis formulada.

Se evidenció una mayor proporción de N total y contenido de P disponible bajo las forestaciones de *Eucalyptus* que frente a las coberturas herbáceas que reemplazan.

Se advierte que no existió relación entre la proporción de N total y P disponible respecto a la condición topográfica. Sin embargo, al procesar y analizar los datos sin considerar Uribelarrea, se obtiene una relación significativa entre la topografía y el contenido de P disponible.

Se reconoce la ventaja de la utilización de modelos mixtos para la interpretación de los datos analíticos de distintas procedencias.

AGRADECIMIENTOS

A Mabel Vázquez (titular del curso de Manejo y Conservación de suelos) por poner a disposición el laboratorio de suelos de la Cátedra de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata.

A Victor Merani (personal de apoyo del curso de Edafología) y Guillermo Millán (JTP curso de Edafología) por su apoyo constante en el desarrollo de las metodologías de laboratorio e interpretación de datos.

Al CONICET por su participación como ente financiador del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

- AUGE, M.; WETTEN, C.; BAUDINO, G.; BONORINO, G.; GIANNI, R.; GONZÁLEZ, N.; GRIZINIK, M.; HERNÁNDEZ, M.; RODRÍGUEZ, J.; SISUL, A.; TINEO, A.; TORRES, C. 2006. Hidrogeología de Argentina. Boletín Geológico y Minero 117(1):7-23.
- BATISTA, W.B.; TABOADA, M.A.; LAVADO, R. S.; PERELMAN, S.B.; LEÓN, R.J.C. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. En: OESTERHELD, M.; AGUILAR, M.R.; GHERSA, C.M.; PARUELO, J.M. (Eds.). La heterogeneidad de la vegetación en los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando JC León. 2005. Editorial de la Facultad de Agronomía (UBA). 113-129 pp.
- BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. Journal of Statistical Software, 67(1), 1-48. doi:10.18637/jss.v067.i01
- BESTEIRO, S.I. 2014. Evaluación de la influencia hidrológica de forestaciones en la llanura pampeana. Tesis doctoral, Universidad de La Plata.
- BOSCHETTI, G.; QUINTEROS, C. 2005. Extracción de P disponible por el método de Bray y Kurtz i. Capítulo vi Fósforo. En: MARBÁN, L.; RATTO, S. Tecnologías en análisis de los suelos. Alcance a Laboratorios Agropecuarios. 1.ª ed. Asoc. Argentina de Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina. 215 p.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Science 59:39-45.
- DÍAZ-ROSELLO, R. 1992. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. INIA Investigaciones Agronómicas 1(1)27-35.
- DOFFINGER RAMOS, D.; DA SILVA, E.F.; ENSINAS, S.C.; HILGERT DE SOUZA, N.; COSTA POTRICH, D.; ELENA DE FREITAS, M.; NAZARIFORMAGIO, A.S.; DO CARMO VIEIRA, M. 2013. Estoques de carbono e nitrogênio-tais substâncias húmicas do solo sob diferentes sistemas de manejo. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 34, n. 5. 2219-2228 pp. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n5p2219
- DRAGULESCU, A.A. 2014. xlsx: Read, write, format Excel 2007 and Excel 97/2000/XP/2003 files. package version 0.5.7. (Disponible: <https://CRAN.R-project.org/package=xlsx> verificado: mayo de 2019).
- Frangi, J.; Pérez, C.; Goya, J.; Tesón, N.; Barrera, M.; Arturi, M. 2015. Modelo integral de una plantación de Eucalyptus grandis de primer ciclo en Concordia, Entre Ríos. xxix Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia. 5 p.
- GIUFFRÉ, L. 2005. El fósforo como elemento crítico. Capítulo vi Fósforo. En: MARBÁN, L.; RATTO, S. Tecnologías en análisis de los suelos. Alcance a Laboratorios Agropecuarios. 1.ª ed. Asociación Argentina de Ciencia del Suelo, Bs. As. 215 p.
- GOYA, J.; ARTURI, M.; SANDOVAL, D.M.; PÉREZ, C.; FRANGI, J.L. 2013. Efecto de las Plantaciones de Eucalyptus grandis sobre el Contenido de N del Suelo en el NE de Entre Ríos. IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazú, Misiones, Argentina.
- GRACIANO, C.; GOYA, J.F.; FRANGI, J.L. 2006. Eucalyptus Grandis Plantations in Argentina in the context of sustainable silviculture. Capítulo 2. En: VERNE, N. C. (ed.). Forest Ecology Research Horizons. Nova Science Publishers, Inc. 39-76 pp.
- INFOSTAT. 2004. InfoStat versión 2004. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA (IICA). 2001. Comercio y medio ambiente: análisis de la nueva normativa. Situación actual: comercio y medio ambiente. 20-21 pp.
- IRAM-SAGPYA 29570-1. 2010. Determinación de fósforo extraíble en suelos. Parte 1 – Método BrayKurtz 1 modificado (Extracción con solución de fluoruro de amonio – ácido clorhídrico). 1.ª Edición.
- JOBBÁGY, E.G.; VASALLO, M.; FARLEY, K.A.; PIÑEIRO, G.; GARBULSKY, M.F.; NOSETTO, M.D.; JACKSON, R.B.; PARUELO, J.M. 2006. Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. Agrociencia Vol. x. 109-124 pp.
- LAVADO, R.S. 2010. Salinidad y alcalinidad: propiedades, efectos sobre los cultivos y manejo. En: ÁLVAREZ, R.; RUBIO, G.; ÁLVAREZ, C.R.; LAVADO, R.S. (Eds.). Fertilidad de suelos caracterización y manejo en la Región Pampeana. Editorial de la Facultad de Agronomía (UBA). 97-115 pp.
- LAVADO, R.S.; TABOADA, M.A. 1988. Water, salt and sodium dynamics in a natraquoll in Argentina. CATENA 15:577-594.
- LEÓN, R.J.C.; BURKART, S.E. 1998. El Pastizal de la Pampa Deprimida: Estados Alternativos, Sociedad Venezolana de Ecología. Ecotrópicos 11(2):121-130.
- MANAHAN, S.E. 2006. Introducción a la química ambiental. Reverte. 126-322 pp.
- MARBÁN, L.; RATTO, S. 2005. Tecnologías en análisis de los suelos. Alcance a Laboratorios Agropecuarios. 1.ª ed. Asociación Argentina de Ciencia del Suelo, Bs. As. 215 p.
- MIACZYNSKI, C. 1995. Los suelos hidromórficos e hidrohalmórficos de la provincia de Buenos Aires. Revista Facultad de Agronomía 15:23-36.
- MORENO, D.R. 1978. Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrientes asimilables. INIA-SARH. Ciudad de México.
- NAVARRO GARCÍA, G.; NAVARRO GARCÍA, S. 2013. Química agrícola, Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas. 3.ª ed. Mundi-Prensa. 305 p.
- NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. Climate Research 21:1-25.
- NOM-021. 2002. Norma oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial, Segunda Sección. México. 85 pp.
- NUÑEZ, M.N.; CALVO, L.M.; SAULO, C. 2007. Vulnerabilidad de la Pampa Bonaerense, Segunda Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina, Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 113 p.
- R CORE TEAM. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Austria. (Disponible: <https://www.R-project.org/> verificado: mayo de 2019).
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, PESCA Y ALIMENTOS, BUENOS AIRES, ARGENTINA (SAMLA-SAGPYA). 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos, Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas (SAMLA). Recopilación de técnicas de laboratorio vigentes y reconocidas en proceso de revisión y actualización en el marco del convenio IRAM-SAGPYA. Resolución N.º 478/98 y 238/03.
- SALA, O.; SORIANO, A.; PERELMAN, S. 1981. Relaciones hídricas de algunos componentes de un pastizal de la Depresión del Salado. Revista Facultad de Agronomía 2(1):1-10.
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C.; MOSCATELLI, G. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, Escala 1:500.000. SEAGyP, INTA, Buenos Aires, 527 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10.a ed, USDA, NRCS. Washington D. C. 341 p.
- TABOADA, M.A.; DAMIANO, F. 2007. Suelos. En: NUÑEZ, M.N.; CALVO, L.M.; SAULO, C. 2007. Vulnerabilidad de la Pampa Bonaerense, Segunda Comunicación Nacional del Gobierno de la República Argentina, Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático 83-93.
- TABOADA, M.A.; DAMIANO, F.; LAVADO, R.S. 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Inundaciones en la Región Pampeana, Consecuencias sobre los suelos. Facultad de Agronomía. Buenos Aires, Argentina. 103-127.
- VÁZQUEZ, M.; GARCÍA, M. 2012. Capacitación de la comunidad agropecuaria para la prevención y tratamiento de problemáticas del suelo del Partido de Pila, Provincia de Buenos Aires. Programa de extensión universitaria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. 130 p.
- WICKHAM, H. 2009. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.