



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DOCTOR EN AGRONOMIA

**“CARACTERIZACIÓN DE LAS FORMAS DE FÓSFORO Y DE LOS
PROCESOS QUE AFECTAN SU DISPONIBILIDAD EN SUELOS DE
DIFERENTES GEOFORMAS EN LA REGIÓN SEMIÁRIDA CENTRAL”**

Ing. Agr. María Lucila Alvarez

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

Año 2021

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Agronomía durante el período comprendido entre el 8 de septiembre de 2015 y el 25 de Septiembre de 2020, bajo la dirección de la Doctora Elke Noellemeyer¹ y la Doctora Nilda Amiotti².

¹Cátedra de Edafología y Manejo de Suelos. Facultad de Agronomía UNLPam.

²Profesora Extraordinaria Consulta de Génesis y Clasificación de Suelos y Edafología. Departamento Agronomía UNS.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y
Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el 28/06/2021 , mereciendo la calificación de sobresaliente diez (10).

AGRADECIMIENTOS

A mi directora Elke Noellemeyer y a mi co-directora Nilda Amiotti.

Al Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional del Sur.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Resumen

El objetivo de la tesis fue comprender los factores y procesos que afectan la variabilidad espacial de la disponibilidad de P en perfiles de suelo de la Región Semiárida Central, con la finalidad de adaptar el manejo de la fertilidad fosforada a las características de los suelos para mejorar la eficiencia en el uso del fertilizante. Se definieron cuatro toposecuencias en las principales subregiones agrícolas de la provincia de La Pampa, Planicie medanosa (PM) y Planicie con tosca (PT), con un suelo bajo uso agrícola y otro bajo vegetación natural en potreros lindantes en cada una, tres posiciones topográficas: loma, media loma y bajo y tres profundidades de muestreo: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. Se determinó carbono orgánico (COT), carbonato de calcio (CaCO_3), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), hierro (Fe), aluminio (Al), hierro ocluido (Fe_o) y aluminio ocluido (Al_o), capacidad de intercambio catiónico (CIC), textura y pH y la relación $\text{Ca}:\text{Fe}+\text{Al}$. Se determinaron las fracciones de P través del método de fraccionamiento secuencial propuesto por Hedley y Stewart (1982) modificado por Tiessen y Moir (2006): P-solución, P inorgánico y orgánico lábil (Pt lábil: $\text{Pi lábil}+\text{Po lábil}$), P inorgánico y orgánico ligado a Fe y Al (Pt-Fe/Al: $\text{Pi-Fe/Al}+\text{Po-Fe/Al}$), P-Ca, P inorgánico y orgánico estable (Pt estable: $\text{Pi estable}+\text{Po estable}$) y P total (Pt). En PT se hallaron contenidos más altos de Ca, $\text{Ca}:\text{Fe}+\text{Al}$ y CaCO_3 . En ambos sitios la fracción más importante fue P-Ca, mientras que el P-solución fue la fracción menor, sin embargo, se observaron diferencias entre PT y PM. El alto valor de P-Ca en PT estuvo explicado por el mayor contenido de Ca y CaCO_3 respecto a PM, mientras que el mayor contenido de P-Fe/Al en PM estuvo explicado por menor contenido de Ca y mayor de Fe y Al en dicho sitio. Las formas de P de mayor disponibilidad se encontraron en mayor proporción en PM, indicando que los procesos de fijación de P se darían con menor intensidad. Las formas orgánicas representaron aproximadamente un 20% del P total en ambas subregiones, y en PT se observó

menor proporción de Po lábil y mayor proporción de Po estable. En PT las diferencias en la topografía estuvieron dadas principalmente por la escasa profundidad del calcrete en la loma y media loma donde se vio afectada la disponibilidad de P, y un perfil más profundo en el bajo con mayor disponibilidad. En PM el bajo se encontraba influenciado por el nivel freático alcalino, mostrando mayor disponibilidad de P mientras que la loma presentó un pH ácido, con un contenido más alto de Pt-Fe/Al y menor P disponible. El efecto de la profundidad sobre las formas de mayor disponibilidad de P fue similar en ambas subregiones, ya que la disponibilidad de P se encuentra asociada a la materia orgánica. En PT el P-Ca aumentó en profundidad relacionado con la cercanía del calcrete. El uso agrícola provocó en PT una disminución de las formas más lábiles y un incremento del Pi estable. En PM el Pt lábil fue mayor en el suelo natural, al igual que el Po-Fe/Al, mientras que en el suelo agrícola se observaron contenidos más altos de P-solución y P-Ca. Para evaluar el comportamiento del polifosfato líquido (PL) respecto al superfosfato triple de Ca granulado (SPT) se tomaron muestras de 0-20 cm de estos mismos suelos (PM y PT) bajo uso agrícola en loma, media loma y bajo. Se llevaron a cabo ensayos de incubación en cajas de Petri donde se midió el P extraíble a distintas distancias del punto de aplicación y se calculó la eficiencia de recuperación (ER) en cada caso. En general la ER fue similar en ambos sitios (29% PM; 31% PT). Los factores y procesos que limitaron la disponibilidad del fertilizante en cada subregión fueron distintos. En PM no se hallaron diferencias claras entre fertilizantes, pero se observó un importante efecto de la topografía sobre la disponibilidad de P, la cual se vio afectada principalmente en la loma asociado al pH ácido y al mayor contenido de Fe y Al respecto a la media loma y el bajo, donde la disponibilidad de P no estuvo limitada. En PT la variación espacial fue menor y la principal limitación fue el contenido de Ca

en la loma donde la disponibilidad de P mejoró al aplicar PL en lugar de SPT, mientras que el carbono orgánico favoreció la disponibilidad de P- fertilizante en el bajo donde no hubo diferencias entre fuentes. Se realizaron ensayos en macetas con trigo (*Triticum aestivum* L.) en invernáculo con suelo bajo uso agrícola de 0-20 cm de loma, media loma y bajo del sitio de PT, para evaluar la eficiencia de uso de PL y SPT bajo una condición óptima de humedad (H1) y una restrictiva (H2). En H1, SPT y PL presentaron mayor producción de MS que el testigo (T) en loma y media loma y en el bajo no hubo diferencias entre T, SPT y PL al igual que en H2. Según la relación N:P (Nitrógeno:Fósforo) en el tejido vegetal, las deficiencias más importantes de P se dieron en T y SPT de H2, los cuales tuvieron menor MS mientras que PL tuvo un mejor comportamiento indicando una mejor eficiencia de uso cuando se aplicó esta formulación. La geomorfología de la región fue uno de los principales factores que afectó la dinámica del P originando las diferencias observadas entre PM y PT, sumado a la incidencia del régimen de humedad del suelo el cual varió de ústico en PT a údico y ácuico en PM. La topografía también fue un factor importante y su efecto fue distinto según el sitio, así como también la profundidad del suelo tuvo un efecto sobre el P. El conocimiento de los factores y procesos que afectan la disponibilidad de P y el manejo racional de la fertilización conducen a un uso más eficiente del recurso y a la sustentabilidad del sistema.

Abstract

The objective of the thesis was to understand the factors and processes that affect the spatial variability of P availability in soil profiles of the Central Semiarid Region, in order to adapt the management of phosphorous fertility to the characteristics of the soils and improve the efficiency in the fertilizer use. Four toposequences were defined in the main agricultural subregions of the province of La Pampa, Sandy Plain (PM) and

Caliche Plain (PT), with a soil under agricultural use and another under natural vegetation in neighboring fields, three topographic positions : topslope, midslope and footslope, and three sampling depths: 0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm. Organic carbon (TOC), calcium carbonate (CaCO_3), calcium (Ca), sodium (Na), potassium (K), magnesium (Mg), iron (Fe), aluminum (Al), occluded iron (Feo) and aluminum (Alo), cation exchange capacity (CEC), texture and pH and the Ca: Fe + Al ratio were determined. The P fractions were determined through the sequential fractionation method proposed by Hedley and Stewart (1982) modified by Tiessen and Moir (2006): P-solution, inorganic and organic labile P (labile Pt: labile Pi + labile Po), P inorganic and organic bound to Fe and Al (Pt-Fe / Al: Pi-Fe / Al + Po-Fe / Al), P-Ca, inorganic and stable organic P (stable Pt: stable Pi + stable Po) and total P (Pt). Higher contents of Ca, Ca: Fe + Al and CaCO_3 were found in PT. In both sites, the most important fraction was P-Ca, while P-solution was the smallest fraction, however, differences were observed between PT and PM. The high value of P-Ca in PT was explained by the higher content of Ca and CaCO_3 compared to PM, while the higher content of P-Fe / Al in PM was explained by its lower content of Ca and higher content of Fe and Al. The forms of P with greater availability were found in greater proportion in PM, indicating that the P fixation processes would occur with less intensity. The organic forms represented approximately 20% of the total P in both subregions, and in PT a lower proportion of labile Po and a greater proportion of stable Po were observed. In PT, the differences in topography were mainly due to the shallow soil depth to the calcrete at the topslope and midslope where the availability of P was affected, and a deeper profile in the footslope with higher P availability. In PM, the footslope was influenced by an alkaline water table, showing greater availability of P, while the topslope had an acid pH, with a higher content of Pt-Fe / Al and less available P. The

effect of depth on more available P fractions was similar in both subregions since P availability is associated with organic matter. In PT the P-Ca increased in depth related to the proximity of the calcrete. Agricultural use caused in PT a decrease in the most labile forms and an increase in stable Pi. In PM, labile Pt was higher in natural soil, as was Po-Fe / Al, while higher contents of P-solution and P-Ca were observed in agricultural soil. To evaluate the behavior of liquid polyphosphate (PL) compared to granulated Ca triple superphosphate (SPT), samples of 0-20 cm were taken from these same soils (PM and PT) under agricultural use in top, mid and footslope. Incubation tests were carried out in Petri dishes where the extractable P was measured at different distances from the application point and the recovery efficiency (ER) was calculated in each case. In general, ER was similar in both sites (29% PM; 31% PT). The factors and processes that limited the availability of the fertilizer in each subregion were different. In PM, no clear differences were found between fertilizers, but an important effect of the topography on the availability of P was observed, which was affected mainly in the topslope associated with the acidic pH and the higher content of Fe and Al with respect to the midslope and footslope, where the availability of P was not limited. In PT the spatial variation was less marked, and the main limitation was the Ca content in the topslope where the availability of P improved when applying PL instead of SPT, while the higher organic carbon content favored the availability of P-fertilizer in the footslope where no differences between sources were found. Trials were carried out in pots with wheat (*Triticum aestivum* L.) in a greenhouse with soil under agricultural use of 0-20 cm depth of top, mid and footslope of the PT site, to evaluate the efficiency of use of PL and SPT under a optimum humidity condition (H1) and a restrictive one (H2). In H1, SPT and PL presented higher DM production than the control (T) in the top and midslope, and in the footslope there were no differences

between T, SPT and PL as in H2. According to the N: P (Nitrogen: Phosphorus) ratio in the plant tissue, the most important deficiencies of P were in T and SPT of H2, which had lower DM, while PL showed a better performance indicating an improved use efficiency when this formulation was applied. The geomorphology of the region was one of the main factors that affected the P dynamics causing differences between PM and PT, additionally acted the incidence of the soil moisture regime, which varied from ustic in PT to udic and aquic in PM. The topography, as well as the depth of the soil were important factors that affected P fractions, and their effect was different depending on the site. Knowledge of the factors and processes that affect the availability of P facilitate the rational management of fertilization and lead to a more efficient resource use and improve the sustainability of the system.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción General.....	12
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo general.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
1.2 Hipótesis.....	19
1.2.1 Hipótesis general.....	19
1.2.2 Hipótesis específicas.....	19
2. Área de estudio.....	21
3. Capítulo 1	28
Fracciones de fósforo en suelos de toposecuencias de Planicie con tosca y Planicie medanosa ...	28
3.1 Introducción.....	29
3.2 Materiales y métodos.....	31
3.2.1 Toma de muestras.....	31
3.2.2 Determinación de propiedades físico- químicas del suelo.....	32
3.2.3 Método de fraccionamiento secuencial de P.....	33
3.2.4 Análisis estadísticos	34
3.3 Resultados.....	35
3.3.1 Caracterización de los suelos	35
3.3.2 Distribución de fracciones de P en Planicie con tosca y Planicie medanosa...	49
3.3.3 Formas de P inorgánicas	52
3.3.4 Formas de P orgánico.....	53
3.3.5 Relación entre fracciones de P orgánico e inorgánico	54
3.3.6 Relación de las fracciones de P con los componentes del suelo en Planicie con Tosca	56
3.3.7 Relación de las fracciones de P con los componentes del suelo en Planicie Medanosa	59
3.3.8 Efecto de la topografía sobre las fracciones de P	61
3.3.9 Efecto de la profundidad del suelo sobre la distribución de las fracciones de P85	
3.3.10 Efecto del uso del suelo sobre la distribución de las fracciones de P.....	89
3.4 Discusión	100
3.4.1 Efecto de geomorfología- subregión	100
3.4.2 Fracciones orgánicas de P	104
3.4.3 Efecto de la profundidad del suelo.....	107
3.4.4 Efecto del uso del suelo.....	109
3.4.5 Efecto de la topografía.....	112
3.5 Conclusiones	115

4. Capítulo 2	117
Ensayos de disponibilidad de P proveniente de dos fuentes de fertilizante fosforado	117
4.1 Introducción	118
4.2 Materiales y métodos.....	119
4.3 Resultados.....	121
4.3.1 Planicie Medanosa	122
4.3.2 Planicie con tosca.....	129
4.4 Discusión	135
4.4.1 Planicie medanosa	136
4.4.2 Planicie con tosca.....	138
4.4.3 Comparación entre fuentes de P	141
4.5 Conclusiones	142
5. Capítulo 3	143
Respuesta a la fertilización con dos fuentes fosforadas de distinta solubilidad	143
5.1 Introducción	144
5.2 Materiales y métodos.....	147
5.3 Resultados.....	149
5.3.1 Materia seca aérea	149
5.3.2 Biomasa radical	152
5.3.3 Relación tallo: raíz	154
5.3.4 Relación N:P.....	156
5.4 Discusión	157
5.5 Conclusiones	160
6. Capítulo Integrador	161
7. Bibliografía.....	168
8. Anexo	187

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La población global ha crecido en forma ininterrumpida y ya excede los 6000 millones de habitantes, con proyecciones que hablan de más de 9000 millones hasta el año 2050 (United Nations, 2008). El consumo diario de alimentos está alrededor de 12 MJ actualmente y puede crecer aún más, sobre todo como efecto del crecimiento económico en los países en vías de desarrollo (FAO, 2006). Estos factores hacen presumir que la demanda global de alimentos podría incrementarse en un 50% hasta el año 2050 (Glenn et al., 2008; Godfray et al., 2010). Las Naciones Unidas colocan la seguridad alimentaria en el centro de los grandes desafíos que enfrenta la humanidad (Stephens et al., 2017).

El fósforo (P), indispensable para la vida humana, animal y vegetal, juega un rol esencial en la seguridad alimentaria mundial. Su principal fuente es un recurso finito y no renovable (Ashley et al., 2011). El 90% de la demanda global de P es para la producción de alimentos, lo cual actualmente significa alrededor de 148 millones de toneladas de roca fosfórica por año (Smil, 2002).

Dada la alta dependencia del moderno sistema global de producción de alimentos con el suministro continuo de fertilizantes fosforados comerciales, el objetivo de lograr la seguridad alimentaria mundial podría verse obstaculizado por cualquier forma de escasez del recurso P mundial (Chowdhury et al., 2017). La demanda de fertilizantes fosforados para producir suficientes alimentos para la creciente población mundial aumentaría sustancialmente a mediados de este siglo (Chowdhury et al., 2017) ya que la aplicación de P como fertilizante para los cultivos es esencial para asegurar altos rendimientos (Herrera-Estrella y López-Arredondo, 2016) y al menos 60% de los suelos actualmente cultivados globalmente tienen deficiencias de N, P, K, S, Fe y Zn (Cakmak, 2002). Varios trabajos han reportado una potencial crisis de P para el futuro. Hay discrepancias en la estimación de la vida útil de las reservas de la roca fosfatada global, que oscila entre unos cientos a miles de años. Según las mejores estimaciones, alrededor del 20-35% de los

recursos actuales se extraerían para el año 2100, y en el peor de los casos se estima que sea alrededor del 40-60%. Al mismo tiempo, la producción se concentrará en África y Asia occidental, y los costos de producción probablemente aumentarán (Cordell et al., 2009). Hasta el momento, no está claro cómo el acceso a este stock de recursos, que es heterogéneo en términos de grado y ubicación, cambiará a medida que se utilicen los yacimientos disponibles, que se desarrollen tecnologías de extracción y procesamiento, y los costos económicos relativos varíen (Springer, 2017). Como no hay procesos naturales alternativos para proveer a los suelos de fósforo, podría decirse que el agotamiento parcial de los recursos puede ser relevante para la sostenibilidad de la agricultura, planteando la influencia antropogénica una serie de desafíos para la misma. Además, la distribución global de la producción y las reservas de fosfato es muy sesgada y tiene el potencial de representar una amenaza para la seguridad alimentaria en los países en desarrollo a través de factores tales como la volatilidad del precio del fosfato o el establecimiento de precios por parte de proveedores con un poder de mercado significativo (Heckenmüller et al., 2014).

Las técnicas disponibles para una mejor eficiencia de uso aún no se han explotado completamente (Schröder et al., 2011). La aplicación de P en forma apropiada y racional en los sistemas agropecuarios puede mejorar la eficiencia en su uso, a través de prácticas de manejo que aseguren la funcionalidad y la provisión de los servicios ecosistémicos que brindan los suelos. Un manejo adecuado podría contribuir significativamente a la intensificación agrícola sostenible, prolongando la vida útil de este recurso escaso, manteniendo los rendimientos de los cultivos y minimizando el impacto ambiental de las pérdidas de P.

Las características físico-químicas edáficas condicionan la disponibilidad de P para los cultivos en cada suelo en particular (Jalali y Ranjbar, 2010). En suelos ácidos, calcáreos y alcalinos, la disponibilidad de P puede ser limitante (Daroub et al., 2003).

Mientras que en los suelos ácidos las interacciones con cationes ácidos como hierro (Fe) y aluminio (Al) producen la adsorción y eventualmente la fijación u oclusión de P en los minerales (variscita), en suelos calcáreos los procesos de sorción y desorción involucran el CaCO_3 y la precipitación de fosfato de calcio y su estabilización como apatita (Bertrand et al., 2003; Schoumans, 2014).

A medida que las raíces de las plantas eliminan P de la solución del suelo, éste se repone con el P residual en el suelo. Los microorganismos del suelo transforman las formas orgánicas de P de los residuos en P disponible para la planta a través del proceso de mineralización. La solución del suelo también se puede reponer desde varios "pooles" de P inorgánico en el suelo. Los minerales sólidos de P en el suelo, como los fosfatos de Ca pueden disolverse en la solución del suelo cuando las concentraciones de P soluble disminuyen. El P adsorbido a partículas de suelo como arcilla y minerales de Fe y Al puede liberarse de estas partículas del suelo, suministrando P a la solución del suelo a través de la desorción (Sposito, 2008). Por lo tanto, la disponibilidad de P para las plantas depende de la distribución de las distintas formas de P en el suelo, la cual se encuentra relacionada con otras propiedades químicas del suelo y consecuentemente con su desarrollo pedogenético (Hedley et al., 1982). Los cambios debidos al grado de desarrollo de suelo, como la reducción del pH o de la saturación de bases, la acumulación de materia orgánica, entre otros, se reflejan en modificaciones en la distribución de las diferentes fracciones de P en el suelo (Tiessen et al., 1984).

El análisis de la distribución de las distintas fracciones de P permite hacer una estimación del tamaño de estos "pooles" de P y de las relaciones entre ellos. El fraccionamiento secuencial propuesto por Hedley y modificado por Tiessen y Moir (2006) es una aproximación para ésta caracterización.

Particularmente en la Región Semiárida Central (RSC), la problemática de la baja disponibilidad de P para los cultivos ha sido poco explorada ya que los antecedentes sobre el tema involucran a otras zonas de estudio (Vázquez et al., 2011). La región presenta un manto eólico compuesto por un sedimento limo-arenoso pobremente estratificado con acumulaciones de CaCO_3 muy comunes. Los constituyentes minerales primarios de este material eólico tienen predominantemente una composición volcánica (Zárate y Tripaldi, 2012). El vidrio volcánico que ha sido mezclado con la matriz del suelo actualmente se encuentra en parte meteorizado (Iturri y Buschiazzo, 2014), dando origen a materiales amorfos que podrían afectar la disponibilidad de P en estos suelos mediante la adsorción del fosfato.

Dentro de la RSC, se destacan como principales zonas agrícolas de la provincia de La Pampa, las subregiones de Planicie medanosa y Planicie con tosca, donde además del material parental descrito anteriormente, otros factores formadores podrían estar jugando un rol importante en el ciclo del P en el suelo. Las diferencias en el grado de desarrollo del suelo entre ambas subregiones, dado en parte por el gradiente de régimen de humedad, podría ser un factor a tener en cuenta (Mehmood et al., 2018; Yang y Post, 2011). Dentro de cada subregión y a nivel de lote, la topografía es otro factor a considerar, donde podrían encontrarse diferencias entre posiciones altas y bajas (Agbenin y Tiessen, 1995; Araújo et al., 2004; Jamil et al., 2016; Shariatmadari et al., 2006). El efecto antrópico a través del cambio en el uso del suelo hacia la agricultura también puede generar cambios en la dinámica del P (Maranguit et al., 2017; Slazak et al., 2014; Stutter et al., 2015).

Es decir, son varios los factores y procesos que podrían estar condicionando la disponibilidad de P para las plantas en la región. El fraccionamiento secuencial podría ser una herramienta para entender la dinámica entre los distintos "pooles" de P e identificar los principales factores que afectan su biodisponibilidad según el ambiente.

El P aplicado como fertilizante reacciona con los constituyentes del suelo produciendo compuestos de distinto grado de solubilidad, pudiendo quedar adsorbido a la superficie de partículas minerales, incorporarse dentro de las estructuras minerales (formando variscitas o apatitas) o precipitar para formar nuevos sólidos. Estos procesos dependen de las características físico-químicas edáficas y condicionan la disponibilidad de P para los cultivos en cada suelo en particular (Jalali y Ranjbar, 2010). Suñer y Galantini (2013) evaluaron el efecto de la aplicación de P sobre el equilibrio de este elemento en suelos de la región sudoeste pampeana. Sus resultados mostraron que la cantidad de P fijado por Fe y Al dependió de la relación entre estos elementos y el Ca del suelo. Por otro lado, la formación de fosfatos de Ca fue más variable, y estos compuestos con el tiempo se transforman en sustancias menos solubles (probablemente apatitas) de menor disponibilidad.

Frente a los problemas de la baja solubilidad y disponibilidad del P proveniente de los fertilizantes granulados tradicionales se desarrollaron diversas formulaciones líquidas de P que están disponible en el mercado local. Varios autores han comparado formulaciones líquidas y granulares en distintos tipos de suelos, encontrando una mejora en la disponibilidad y difusión del P proveniente de fuentes líquidas en suelos calcáreos (Holloway et al., 2001; Khatiwada et al., 2014; Lombi et al., 2004a, 2004b). Estos resultados indican que los fertilizantes líquidos pueden resultar más eficientes en los suelos calcáreos de PT. Sin embargo, en suelos como los de PM, con contenidos más bajos de Ca, podrían no observarse diferencias entre estas formulaciones. Estos antecedentes resaltan la importancia de profundizar en el conocimiento de las interacciones de P con los constituyentes edáficos y los equilibrios del P resultantes, para comprender las condiciones edáficas que afectan la disponibilidad de este nutriente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Comprender los factores y procesos que afectan la variabilidad espacial de la disponibilidad de P en perfiles de suelo a lo largo de toposecuencias en situaciones bajo agricultura y bajo vegetación natural en diferentes regiones geomorfológicas de la Región Semiárida Central y determinar la interacción de las fuentes fosforadas externas con los suelos conjuntamente con el comportamiento de distintas formulaciones, con la finalidad de adaptar el manejo de la fertilidad fosforada a las características de los suelos de los distintos ambientes para mejorar la eficiencia en el uso del fertilizante.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar las fracciones de P según el método de fraccionamiento secuencial de Hedley modificado por Tiessen y Moir (2006) en los perfiles de suelo a lo largo de toposecuencias en situaciones bajo agricultura y bajo vegetación natural en sitios ubicados en Planicie medanosa y Planicie con tosca de la Región Semiárida Central.
2. Relacionar la distribución de las formas de P en las distintas situaciones con las características edáficas y los factores pedogenéticos.
3. Evaluar el comportamiento de una formulación líquida de fertilizante fosforado (polifosfato) y de una formulación sólida (superfosfato triple de calcio) en los suelos en distintas posiciones topográficas a lo largo de las toposecuencias en situaciones bajo agricultura de los mismos sitios ubicados en Planicie medanosa y Planicie con tosca, a través de ensayos de incubación en el laboratorio. Comprender los procesos y factores que afectan la disponibilidad de P- fertilizante en estos suelos.

4. Comparar la eficiencia de uso de la formulación líquida (polifosfato líquido) y de la formulación sólida (superfosfato triple de calcio) en suelos bajo agricultura de loma, media loma y bajo en el sitio de Planicie con tosca, a través de ensayos en macetas con plantas de trigo (*Triticum aestivum L.*) en invernáculo bajo dos condiciones contrastantes de humedad edáfica.

1.2 HIPÓTESIS

1.2.1 Hipótesis general

La capacidad del suelo de adsorber e inmovilizar P presentará una fuerte heterogeneidad espacial y vertical y estos procesos van a ser diferentes de acuerdo con la posición en el relieve y la profundidad del perfil del suelo. El efecto antrópico a través del cambio en el uso del suelo hacia la agricultura también genera cambios en la dinámica del P. Por otro lado, en suelos calcáreos con problemas de fijación como los de Planicie con tosca, los fertilizantes fosforados líquidos presentarán un mejor comportamiento que los granulados, sobre todo en condiciones donde la humedad es limitante para su difusión en el suelo.

1.2.2 Hipótesis específicas

1. La geomorfología de la región y las diferencias en el desarrollo de los perfiles entre Planicie con tosca y Planicie medanosa afectan la distribución de las formas de P. El menor grado de meteorización de los suelos de Planicie con tosca, sumado al régimen de humedad más seco y la menor profundidad de la tosca como fuente de calcio en el suelo, produce una disminución en las formas disponibles de P y un incremento de las formas menos lábiles.
2. El efecto antrópico a través del cambio en el uso del suelo hacia la agricultura puede generar cambios en la dinámica del P, disminuyendo su disponibilidad debido a la intensificación de procesos que contribuyen a la fijación de P.

3. El fertilizante aplicado no siempre se encuentra inmediatamente disponible para las plantas, y su retención en las partículas del suelo depende principalmente de la abundancia de Ca, Fe y Al.
4. En suelos que fijan el P, las formulaciones líquidas mejoran la disponibilidad de P incrementando la eficiencia en el uso del fertilizante.
5. El conocimiento de los procesos que afectan a la disponibilidad de P en cada posición topográfica permite adecuar el manejo de la fertilización y aumentar su eficiencia.

2. ÁREA DE ESTUDIO

En la región oriental de la provincia de La Pampa se encuentran ubicadas las subregiones de Planicies con tosca y Planicies medanosas, las cuales conforman la principal zona agrícola ganadera de la provincia. El clima es sub-húmedo seco, mejorando las condiciones para la producción agrícola hacia el noreste de la provincia, es decir hacia la zona de Planicies medanosas. Los suelos predominantes son Molisoles, los cuales se encuentran más evolucionados en esa misma dirección, coincidiendo con el incremento en las precipitaciones (Figura 2.1) y la temperatura (Figura 2.2). Existe una pendiente regional de la costra calcárea o calcrete hacia el este, sobre el cual se ha dado una acumulación diferencial de sedimento eólico (Zárate y Tripaldi, 2012), generando un mayor espesor sobre la costra calcárea en las Planicies medanosas. A continuación, se describen con mayor detalle ambas subregiones.

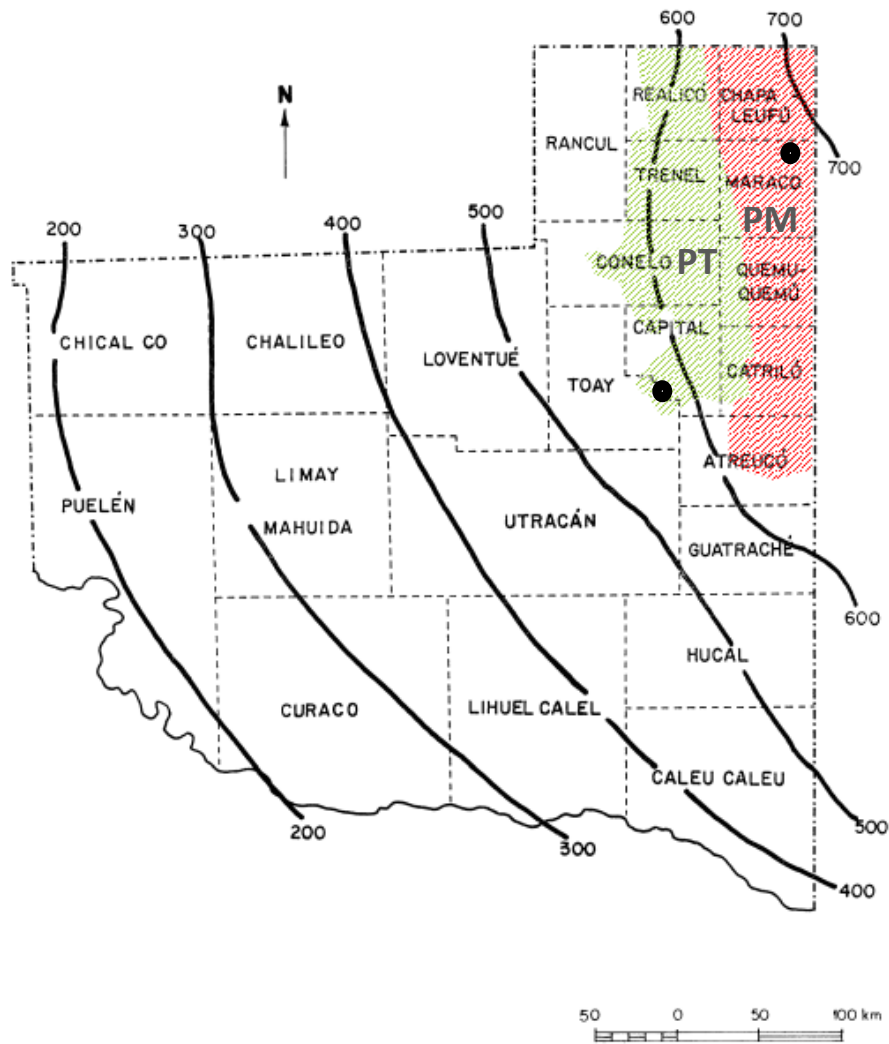


Figura 2.1. Mapa de la provincia de La Pampa con isohietas y ubicación de los puntos de muestreo en las dos subregiones (PT: Planicie con tosca; PM: Planicie medanosa). Adaptado del Inventario integrado de recursos naturales de la Provincia de La Pampa (Cano, 1980).

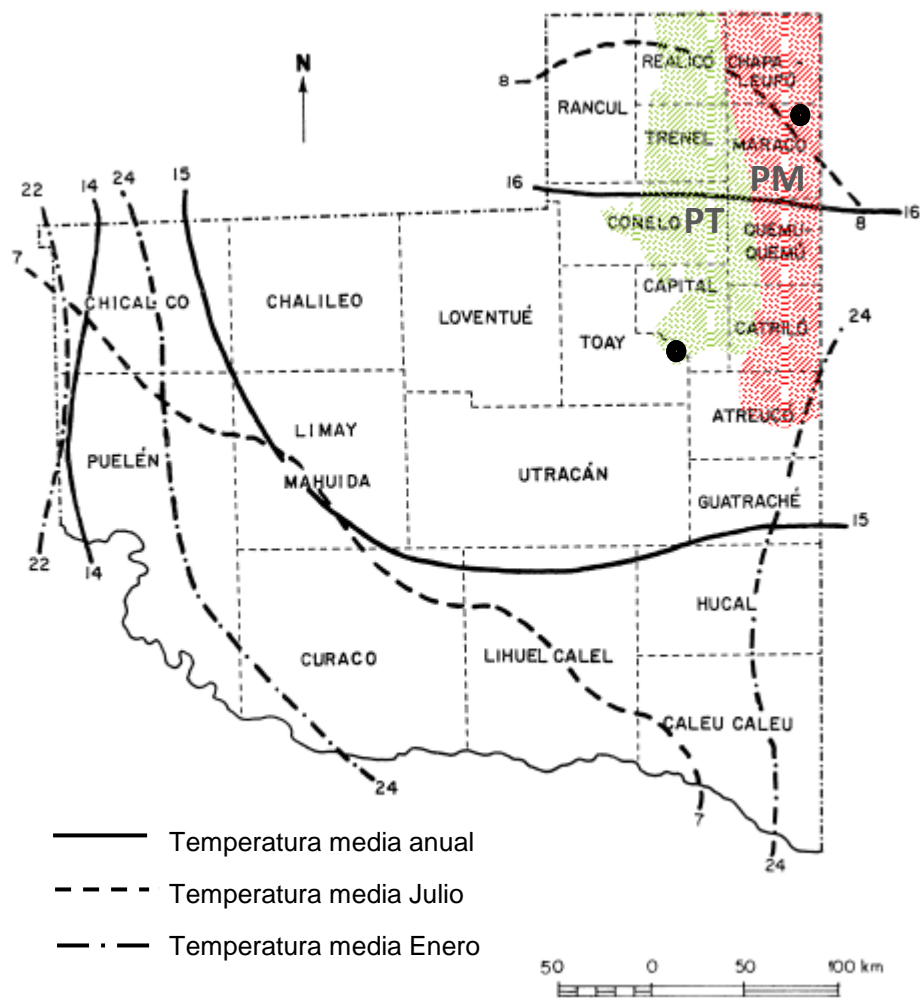


Figura 2.2. Mapa de la provincia de La Pampa con isotermas y ubicación de los puntos de muestreo en las dos subregiones (PT: Planicie con tosca; PM: Planicie medanosa). Adaptado del Inventario integrado de recursos naturales de la Provincia de La Pampa (Cano, 1980).

Subregión de las Planicies con tosca

Este sector tiene una superficie aproximada de 8.500 km². Se encuentra en la parte NE de la provincia, entre los meridianos 63°45' y 64°30' W y los paralelos 35° y 36°30' S. El área abarcada por esta subregión tiene una considerable extensión en sentido N-S lo que pone de manifiesto ciertas diferencias climáticas entre ellas. La precipitación media anual registrada en cercanías del sitio de muestreo (Toay, La Pampa) es de 615 mm, con un déficit

de agua de 200 mm (Administración Provincial del Agua). El régimen de la distribución de las lluvias a lo largo del año muestra que las mayores precipitaciones medias mensuales ocurren en el semestre más cálido (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y /o marzo (Figura 2.3). La temperatura media del mes más frío es de 8°C y la del mes más caluroso de 25°, con un periodo libre de heladas de 220 días. Los vientos predominantes son de las direcciones N-NE y S-SW, con una velocidad media anual de 10-12 km/h.

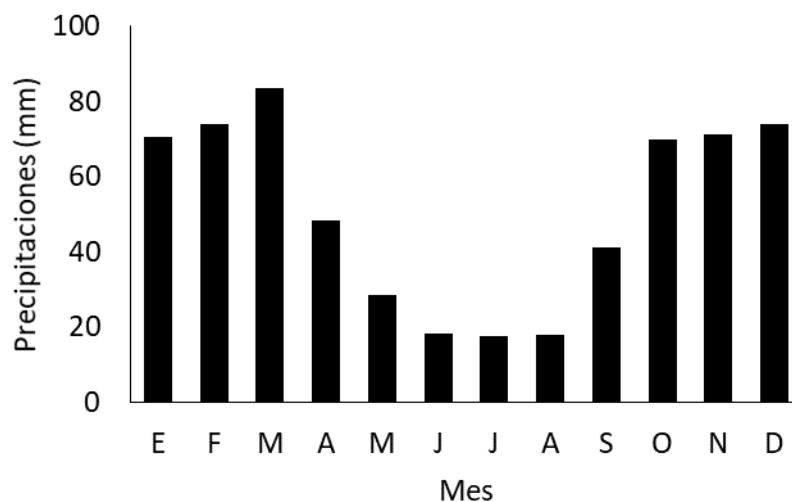


Figura 2.3. Precipitaciones medias mensuales (mm) registradas en la localidad de Toay, La Pampa. Fuente: Administración Provincial del Agua- Gobierno de la Provincia de La Pampa.

La subregión se caracteriza por la presencia de una costra calcárea (calcrete) difundida y originada por acciones acuáticas de escurrimiento difuso en épocas pasadas, sobre la cual se depositó por acción eólica un delgado manto arenoso (Mehl et al., 2018). Desde el punto de vista geomorfológico el área conforma una planicie uniforme muy suavemente ondulada con una pendiente regional SO-NE. El microrelieve está representado por pequeñas lomas y depresiones. El espesor del sedimento eólico de textura gruesa oscila entre 0,40 y 2 m. Por debajo se encuentra una costra calcárea continua y potente que descansa sobre la formación Cerro Azul. La sección sur de la subregión, donde se encuentra el sitio de muestreo, está representada por una planicie de relieve normal. El suelo dominante

corresponde taxonómicamente a un Haplustol éntico, (calcrete a más de 150 cm) y el subordinado es Paleustol petrocálcico (calcrete a menos de 150 cm) (USDA-NRCS, 2014). En general las limitaciones de estos suelos son su reducida profundidad efectiva, el drenaje natural excesivo, sequías estacionales, erosión eólica moderada y leve peligro a la erosión hídrica. El uso actual del suelo es agropecuario con predominio de la agricultura.

Subregión de las Planicies medanosas

Esta subregión tiene una superficie de aproximadamente 9.200 km². Se encuentra ubicada en el extremo NE de la provincia y se localiza entre los meridianos 63° y 64°15' W y los paralelos 35° y 37°15' S. Posee una temperatura media anual de 8.3°C en invierno y 23.6°C en verano, con un periodo libre de heladas de 220 días. La precipitación media anual registrada en cercanías al sitio de muestreo (Trebolares, La Pampa) es de 726 mm, con un déficit de agua inferior a 150 mm. Las mayores precipitaciones medias mensuales ocurren en el semestre más cálido (octubre a marzo) con picos mayores en octubre y/o marzo (Figura 2.4). Los vientos predominantes son del N-NE y SSO con un promedio anual entre 10 km/h y 14 km/h. Desde el punto de vista agroclimático es la subregión mejor dotada de toda la provincia; sus regímenes térmicos e hídricos son adecuados para obtener una buena producción agropecuaria (Cano, 1980).

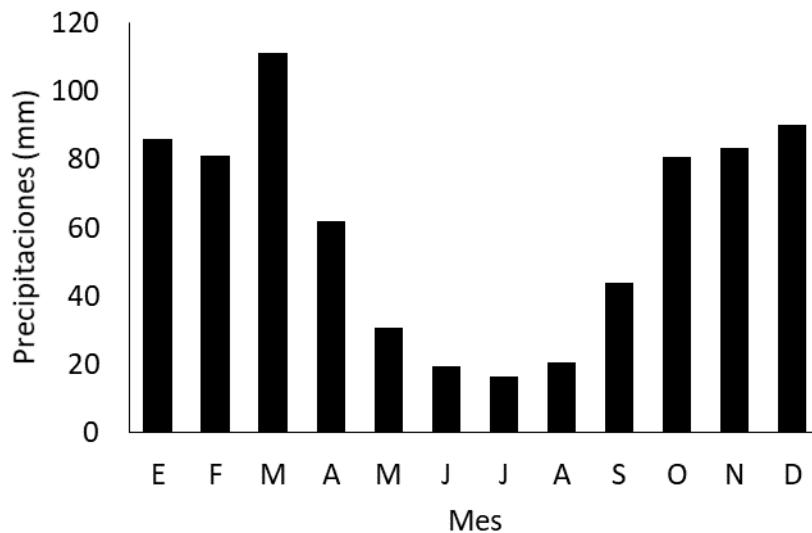


Figura 2.4. Precipitaciones medias mensuales (mm) registradas en la localidad de Trebolares, La Pampa. Fuente: Administración Provincial del Agua- Gobierno de la Provincia de La Pampa.

Los procesos morfogenéticos que actuaron en esta subregión elaboraron una superficie calcárea con pendiente regional al E, sobre la cual el viento acumuló un manto arenoso de espesor variable generando ondulaciones con sentido N-S y médanos aislados. Intercaladas entre estas ondulaciones existen planicies arenosas de aproximadamente 3 a 4 km de ancho con frecuentes áreas deprimidas que constituyen lagunas temporarias (Folguera et al., 2015).

Esta subregión presenta un sedimento arenoso cuya potencia es variable (comúnmente entre 3 y 6 m). En el O este espesor apenas alcanza el metro, mientras en el límite E de la unidad supera los 6 m. Dentro de este sedimento se encuentran acumulaciones de ceniza volcánica, suelos enterrados y paleohorizontes. En el sector central de la subregión, donde se localiza el sitio de muestreo, el relieve es suavemente ondulado a ondulado, con lomas muy alargadas. El material parental de reciente deposición tiene textura franco-arenosa fina. El suelo dominante es Hapludol éntico y no hay tosca dentro de los 2 m de profundidad, pero se suelen observar concreciones de carbonato de calcio cerca del metro y calcáreo en la masa próximo a los 2 metros de profundidad (Cano, 1980).

3. CAPÍTULO 1

FRACCIONES DE FÓSFORO EN SUELOS DE TOPOSECUENCIAS DE PLANICIE CON TOSCA Y PLANICIE MEDANOSA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los procesos involucrados en el ciclado de P y su disponibilidad en regiones subhúmedas y semiáridas están fuertemente influenciados por factores pedogenéticos como material parental, clima y relieve (Ippolito et al., 2010; Mehmood et al., 2018; Walker y Syers, 1976). En regiones semiáridas, la topografía puede ser un factor importante en la definición de los procesos relacionados con el P y su distribución en el paisaje, específicamente donde ésta determina un límite entre un régimen de humedad ústico y un údico. Por ejemplo, Akhtar et al. (2014) hallaron que la distribución de apatita y fosfatos secundarios fue diferente en planicie comparado a la pendiente, y lo explican por la aparente diferencia en el régimen de humedad en estas posiciones topográficas donde superficies planas pueden presentar un régimen údico mientras en pendiente es más probable tener propiedades ústicas. Sin embargo, la heterogeneidad espacial de la distribución de P y su relación con el drenaje del suelo ha sido poco estudiado (Agbenin y Tiessen, 1995), tal vez debido a la suposición generalizada de que el P es rápidamente inmovilizado al ligarse a las partículas de suelo. Esta podría ser la razón por la cual el conocimiento acerca de la distribución espacial horizontal y vertical de P en los perfiles de suelo y en el paisaje es aún escaso. Weihrauch y Opp (2018) reportaron que en más del 60% de las investigaciones relacionadas con P entre los años 1990 y 2016 se ha trabajado con muestras de suelo superficiales, solo el 5% consideraron el perfil de los suelos y solo el 7% estudiaron la distribución horizontal del P en el paisaje.

En regiones semiáridas, y especialmente en suelos calcáreos, hay varios procesos por los cuales el P es secuestrado de la solución quedando no disponible para las plantas. Esto es reflejado por el hecho de que en muchos casos la aplicación de P como fertilizante no produce incrementos en el rendimiento de los cultivos y que con el tiempo el P inorgánico tiene a volverse más recalcitrante (Ahmad et al., 2017; Audette et al., 2016). En estos suelos

los fosfatos son adsorbidos a la calcita o pueden precipitar como fosfatos de Ca a altas concentraciones de P (Li et al., 2017), después de la aplicación del fertilizante. Sin embargo, la distribución de calcita en el perfil del suelos en regiones semiáridas puede variar considerablemente (Kaplan et al., 2013; Sherrod et al., 2014), de acuerdo a procesos eólicos e hídricos que actúan en un paisaje en particular. Gran parte de la calcita adherida a la superficie del suelo puede provenir del polvo eólico, donde el efecto de la topografía define si un suelo en particular funciona como una fuente o un destino de este material (Eger et al., 2018; Huerta et al., 2015). Por otro lado, los niveles freáticos superficiales pueden depositar carbonatos y sulfatos de calcio en las partes más bajas del perfil del suelo por ascenso capilar (Alonso-Zarza, 2003; Wright, 2010). Por lo tanto, la capacidad del suelo de adsorber e inmovilizar P podría mostrar una fuerte heterogeneidad espacial y vertical, donde estos procesos difieren de acuerdo con la posición en el relieve y la profundidad del perfil del suelo. El efecto antrópico a través del cambio en el uso del suelo hacia la agricultura también puede generar cambios en la dinámica del P (Maranguit et al., 2017; Slazak et al., 2014; Stutter et al., 2015).

Con el objetivo de desarrollar un manejo más eficiente de la nutrición fosforada para la agricultura, y específicamente para la movilización de las formas recalcitrantes de P o para mejorar la eficiencia de los fertilizantes fosforados en suelos calcáreos, es importante expandir nuestro conocimiento acerca de la relación entre paisaje, factores pedogenéticos y sorción de P. Por este motivo, el objetivo de este capítulo fue cuantificar las fracciones de P en los perfiles de suelo a lo largo de toposecuencias en situaciones bajo agricultura y bajo vegetación natural, en diferentes regiones geomorfológicas, y relacionar las diferencias en las formas de P con las características edáficas y los factores pedogenéticos.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Toma de muestras

Se definieron cuatro toposecuencias en las principales subregiones agrícolas de la Provincia de La Pampa, Planicie Medanosa (PM) y Planicie con Tosca (PT). En cada subregión se eligió un sitio donde se hallaron suelos bajo uso agrícola y bajo vegetación natural en potreros lindantes. En PM se eligió la zona de Trebolares ($35^{\circ} 34' 575''$ Lat S; $63^{\circ} 31' 124''$ Long O) en un sitio con influencia de un nivel freático químicamente carbonatado; mientras que en PT se trabajó en un campo al Sur de la ciudad de Santa Rosa ($36^{\circ} 45' 351''$ Lat S; $64^{\circ} 20' 445''$ Long O) (Figura 3.1). Se consideraron tres posiciones en el relieve: loma (L), media loma (ML) y bajo (B); tres profundidades de muestreo: 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm; y dos tipos de uso de suelo: agrícola (A) y natural (N). En cada sitio se tomaron 2 muestras compuestas de tres submuestras de cada posición, profundidad y uso. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas por 2 mm.

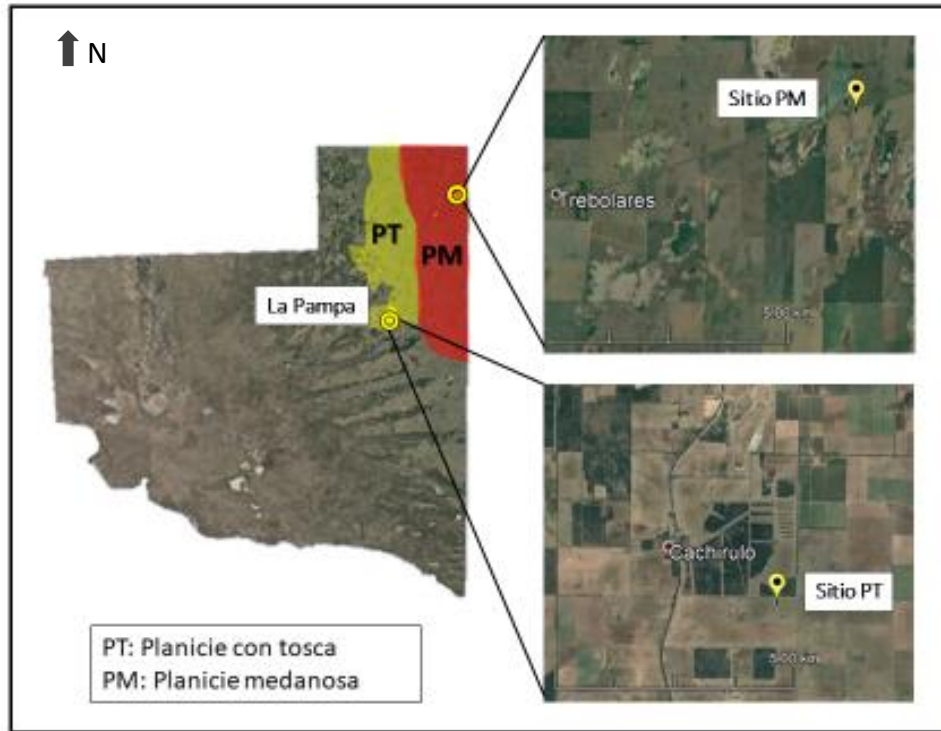


Figura 3.1. Mapa de la provincia de La Pampa con la ubicación de las subunidades geomorfológicas de Planicie con tosca (PT) y Planicie medanosa (PM) y la localización de los sitios correspondientes a las toposecuencias.

3.2.2 Determinación de propiedades físico- químicas del suelo

Se determinó CaCO_3 por el método del calcímetro presurizado (Goh y Mermut, 2006), C orgánico (COT) por digestión con dicromato de potasio y ácido sulfúrico y determinación colorimétrica (Skjemstad et al., 2003), cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de acetato de amonio pH 7,0 y acetato de sodio pH 8,2, respectivamente, y determinación colorimétrica de Ca^{2+} y Mg^{2+} , y de Na^+ y K^+ por fotometría de llama (Hendershot y Lalonde, 2006). La textura fue determinada por el método de la pipeta de Robinson (Gee y Bauder, 1986). El pH se midió potenciométricamente en suspensiones de suelo: agua de 1:2,5. Los contenidos de Fe y Al se establecieron por extracción con oxalato de amonio ácido (pH=3) en oscuridad (Fe, Al), y extracción por el mismo extractante en caliente para extraer el Fe y Al ocluido (Fe_o , Al_o) (Courchesne y Turmel, 2006), y posterior

lectura por ICP (Inductively coupled plasma). Se calculó el Índice de Materia Orgánica (IMO) (Quiroga et al., 2006) para comparar el grado de degradación del suelo agrícola respecto al suelo bajo vegetación natural.

3.2.3 Método de fraccionamiento secuencial de P

Para determinar la abundancia de las distintas formas de P, se utilizó el fraccionamiento secuencial propuesto por Hedley y Stewart (1982) modificado por Tiessen y Moir (2006). En éste, se extraen de manera secuencial con diferentes extractantes, desde las formas más lábiles de P hasta las de menor biodisponibilidad. En la primera etapa se extrae el P en solución mediante membrana de intercambio aniónico (MIA). La membrana compensa el equilibrio entre el P soluble y el P intercambiable, así como algunas de las formas de P precipitadas más solubles entran en la solución y son adsorbidas por la membrana. En la segunda etapa es extraído el P lábil mediante una solución de NaHCO_3 0,5 M (pH 8,5). Posteriormente, la solución de NaOH 0,1 M extrae P menos biodisponible, el cual es consistente con fosfatos amorfos (y algunos cristalinos) de Fe y Al. A continuación, se extrae el P ligado a Ca, mediante HCl 1M, y finalmente la solución de HCl concentrado y caliente extrae la mayoría del P residual, considerado como la fracción más estable. Posterior a cada extracción se toma una alícuota y el P inorgánico es cuantificado mediante la colorimetría de Murphy y Riley (O'Halloran and Cade-Menun, 2007). Otra alícuota es tomada para determinar el P total perteneciente a las fracciones obtenidas con NaHCO_3 , NaOH y HCl concentrado y caliente. Para esto los dos primeros son tratados con persulfato de amonio y H_2SO_4 , y el de HCl concentrado y caliente con agua destilada, y son autoclavados. Posteriormente, se ajusta el pH y se determina P por colorimetría de la misma manera que para la cuantificación de P inorgánico. El P orgánico de cada fracción es calculado por diferencia entre los correspondientes valores de P total y P inorgánico.

3.2.4 Análisis estadísticos

Se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2013). Se analizó el cumplimiento de los supuestos y se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey ($p < 0,05$) para analizar las propiedades del suelo. Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para establecer las relaciones entre fracciones de P y propiedades de los suelos. Además, se utilizaron modelos lineales generales y mixtos para analizar los efectos de la topografía y el uso de suelo en cada profundidad y subregión, y el efecto de la profundidad en cada caso. Se llevaron a cabo análisis de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Pearson y análisis de regresión lineal múltiple.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Caracterización de los suelos

Subregión de las planicies con tosca

Los suelos del sitio PT integran una toposecuencia a lo largo de una pendiente de 330 m con 3,2% de grado de pendiente y taxonómicamente corresponden a Haplustol típico en el bajo y Paleustol petrocálcico en la loma y media loma (Figura 3.2).

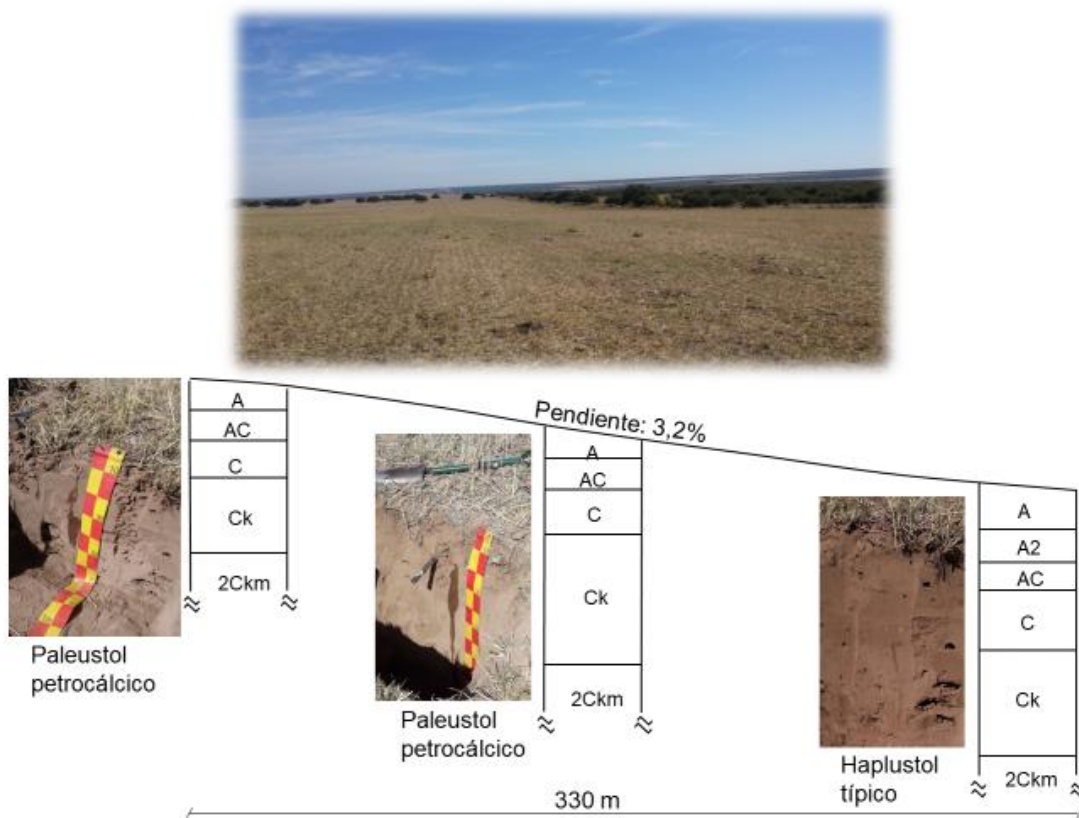


Figura 3.2. Perfiles de loma, media loma y bajo de la toposecuencia en Planicie con tosca.

Descripción morfológica de los perfiles de suelo de loma, media loma y bajo de Planicie con tosca:

Perfil de suelo de loma, Paleustol petrocálcico

A (0-13cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; escasos nódulos pequeños de carbonatos dispersos; límite claro y suave.

AC (13-25 cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, débiles; muy friable, escasos nódulos pequeños de carbonatos dispersos; límite claro y suave.

C (25-42 cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, finos, suaves; ligeramente plástico, no adhesivo; escasos nódulos pequeños de carbonatos dispersos; límite claro y suave.

Ck (42-70cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, débiles; escasos nódulos pequeños de carbonatos dispersos; fuertemente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

2Ckm (+70cm) Horizonte petrocálcico

Perfil de suelo de media loma, Paleustol petrocálcico

A (0-13cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; límite claro y suave.

AC (13-22 cm); pardo a pardo oscuro seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; límite claro y suave.

C (22-40cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, finos, débiles; escasos nódulos pequeños de carbonato; ligeramente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

Ck (40-140cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, débiles; escasos nódulos pequeños de carbonatos dispersos; fuertemente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

2Ckm (+140cm). Horizonte petrocálcico

Perfil de suelo de bajo, Haplustol típico

A (0-18cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados a fuertes; límite claro y suave.

A2 (18-30cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR4/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados a fuertes; escasos nódulos pequeños de carbonato dispersos; límite claro y suave.

AC (30-40cm); pardo grisáceo oscuro en seco (10YR4/2); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, moderados a fuertes; escasos nódulos pequeños de carbonato dispersos; fuertemente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

C (40-80cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares finos, débiles; escasos nódulos pequeños de carbonato dispersos; fuertemente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

Ck (80-190cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura en bloques subangulares, medios, débiles; escasos nódulos pequeños de carbonato dispersos; fuertemente efervescente al HCl 10%; límite claro y suave.

2Ckm (+190cm) Horizonte petrocálcico.

Todos los suelos presentaron una textura franco-arenosa en los primeros 20 cm, con un contenido promedio de limo+ arcilla de 383 g kg^{-1} (Tabla 3.1). Se observó un incremento de partículas finas (limo+arcilla) en los primeros 20 cm del suelo agrícola ($p < 0,05$) desde la loma (337 g kg^{-1}) hacia el bajo (419 g kg^{-1}), lo cual sumado al mayor espesor del horizonte A en el bajo indicaría el transporte de partículas debido a procesos de erosión eólica, mientras que en el suelo natural las diferencias no fueron significativas ($p < 0,05$). El suelo agrícola presentó un mayor contenido de COT en el bajo ($10,7 \text{ g kg}^{-1}$), respecto a la media loma ($9,6 \text{ g kg}^{-1}$) y la loma ($9,4 \text{ g kg}^{-1}$) ($p < 0,05$). En el suelo con vegetación natural se observó un incremento en COT respecto al agrícola, incrementándose además significativamente ($p < 0,05$) desde la loma ($12,0 \text{ g kg}^{-1}$) hacia la media loma ($13,7 \text{ g kg}^{-1}$) y el bajo ($15,7 \text{ g kg}^{-1}$). La disminución en el contenido de COT en el suelo agrícola indica que debido a su historia de uso éste ha sufrido procesos de degradación, lo cual además se observó en el IMO, disminuyendo de 6,2 (promedio del suelo bajo vegetación natural) a 4,5 (promedio del suelo agrícola). En las posiciones más bajas generalmente el contenido de humedad edáfica es mayor, favoreciendo la producción de biomasa y de esta manera el contenido de materia orgánica.

El pH en estos suelos no presentó grandes variaciones ya que se encontraron valores en un rango entre 7,1 y 7,6. El suelo natural presentó valores de CaCO_3 inferiores al agrícola en los primeros 20 cm de suelo, los cuales se hallaron entre $3,4 \text{ g kg}^{-1}$ (loma y bajo) y $2,1 \text{ g kg}^{-1}$ (media loma) en el caso del suelo con vegetación natural y entre $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ (loma) y $11,4 \text{ g kg}^{-1}$ (bajo) en el suelo agrícola, sin ser significativas las diferencias entre posiciones topográficas. En la profundidad de 20-40 cm el suelo agrícola ($18,9 \text{ g kg}^{-1}$ en las tres posiciones) también presentó contenidos de CaCO_3 superiores al suelo con vegetación natural, mientras que en la profundidad de 40-60 cm las diferencias fueron menos claras. Estas diferencias entre el suelo agrícola y el natural podrían deberse a que la vegetación natural aporta más biomasa radical que los cultivos anuales, favoreciendo la solubilización

de CaCO_3 a través del efecto acidificante de la actividad biológica asociada a la rizósfera del pastizal natural y del mayor contenido de materia orgánica aportado por esta cobertura vegetal.

En la profundidad de 0-20 cm del suelo agrícola el Ca intercambiable no presentó diferencias entre el bajo ($21,8 \text{ Cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y la loma ($22,2 \text{ Cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), disminuyendo en la media loma ($16,8 \text{ Cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y en el suelo con vegetación natural, donde no se hallaron diferencias significativas entre posiciones. En la profundidad de 20-40 cm el suelo con vegetación natural también presentó contenidos de Ca intercambiable menores que el suelo agrícola. En general se observó una tendencia al incremento en el contenido de Ca intercambiable en profundidad, debido a la cercanía del calcrete.

Para Al_o se encontró un valor medio de $3816,1 \text{ mg kg}^{-1}$, para Fe_o fue de $15849,5 \text{ mg kg}^{-1}$, para Al $1099,3 \text{ mg kg}^{-1}$ y $648,9 \text{ mg kg}^{-1}$ para Fe. En los primeros 20 cm, el suelo agrícola presentó en las tres posiciones mayor contenido de Fe ($p < 0,05$) que sus pares del suelo con vegetación natural. Sin embargo, en esta misma profundidad se halló mayor contenido de Al en el suelo natural ($1144,2 \text{ mg kg}^{-1}$) que en el agrícola ($856,4 \text{ mg kg}^{-1}$), sin observarse diferencias entre posiciones.

En general la saturación de bases fue de 100% e incluso la suma de bases superó al valor de CIC en la mayoría de los casos, sin embargo, en los primeros 20 cm de la media loma y del bajo con uso agrícola y de la loma bajo vegetación natural, la saturación de bases fue menor al 100%.

Tabla 3.1. Propiedades físicas y químicas de los suelos de Planicie con tosca para cada posición topográfica (L: loma, ML: media loma y B: bajo) y uso del suelo (A: agrícola y N: natural) en las tres profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm).

Profundidad (cm)	Uso del suelo	Posición	A	a+l	Clase textural	COT g kg ⁻¹	CaCO ₃	Ca	Mg	Na	K	Al	Alo	Fe	Feo	CIC Cmol _c kg ⁻¹	SB %	pH
			g kg ⁻¹	g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹											
0-20	A	L	663 a	337 c	FA	9,4 e	9,3 a	22,2 a	0,6 d	0,1 a	1,4 b	840,0 b	3156,5 c	875,4 a	14304,1 b	16,1 b	100 a	7,4 a
		ML	619 b	381 b	FA	9,6 e	10,5 a	16,8 b	1,2 c	0,1 a	1,8 a	885,1 b	2607,1 d	747,8 b	11866,3 c	23,7 a	84,1 b	7,5 a
		B	581 c	419 a	FA	10,7 d	11,4 a	21,8 a	1,4 c	0,1 a	2,1 a	844,2 b	3027,7 c	860,3 a	12778,1 c	19,4 b	92,2 b	7,3 a
	N	L	596 b	404 b	FA	12,0 c	3,4 b	17,3 b	4,1 a	0,2 a	1,3 b	1208,0 a	4293,5 a	771,0 b	17885,5 a	25,0 a	91 b	7,3 a
		ML	627 b	372 b	FA	13,7 b	2,1 b	15,2 b	1,0 c	0,1 a	1,7 a	1029,0 a	3128,5 c	622,5 c	14465,5 b	17,6 b	100 a	7,2 a
		B	617 b	383 b	FA	15,7 a	3,4 b	14,2 b	2,1 b	0,1 a	1,8 a	1195,5 a	3588 b	603,0 c	14449,5 b	17,7 b	100 a	7,1 a
20-40	A	L	580 a	420 a	FA		18,9 a	39,7 b	2,4 a	0,2 a	0,7 a	842,1 c	2550,9 d	774,4 a	11459,8 d	22,6 a	100 a	7,4 a
		ML	600 a	400 a	FA		18,9 a	43,3 a	1,8 a	0,2 a	0,8 a	881,7 c	2626,0 d	600,7 b	12552,4 d	24,1 a	100 a	7,3 a
		B	580 a	420 a	FA		18,9 a	40,7 b	2,2 a	0,1 a	0,8 a	1788,0 a	7122,7 a	647,5 b	26740,9 a	16,1 b	100 a	7,5 a
	N	L	560 a	440 a	FA		5,5 d	27,1 d	1,4 b	0,2 a	0,6 a	1114,0 b	3595,0 c	671,0 b	15525,5 c	17,0 b	100 a	7,5 a
		ML	580 a	420 a	FA		8,4 c	31,0 d	1,6 ab	0,2 a	0,7 a	1168,0 b	4819,5 b	571,0 b	19855,5 b	16,6 b	100 a	7,5 a
		B	580 a	420 a	FA		16,0 b	38,0 c	1,2 b	0,2 a	0,6 a	1210,0 b	5111,5 b	624,5 b	19694,0 b	15,5 b	100 a	7,6 a
40-60	A	L	560 a	440 a	FA		29,9 b	42,7 a	2,4 a	0,2 a	0,5 a	1161,5 b	4114,7 b	615,5 a	16833,1 b	21,3 a	100 a	7,5 a
		ML	580 a	420 a	FA		29,9 b	37,2 b	1,2 b	0,2 a	0,3 a	917,0 c	2443,9 c	537,1 b	11619,5 c	13,6 b	100 a	7,6 a
		B	580 a	420 a	FA		30,3 b	44,9 a	2,8 a	0,2 a	0,4 a	1325,0 a	4710,5 a	498,5 b	19311,0 a	22,4 a	100 a	7,6 a
	N	L	560 a	440 a	FA		18,9 d	39,5 ab	2,2 a	0,3 a	0,5 a	1135,0 b	3987,5 b	492,5 b	16414,1 b	15,5 b	100 a	7,6 a
		ML	570 a	430 a	FA		23,1 c	42,9 a	2,3 a	0,2 a	0,4 a	1277,0 a	4836,0 a	530,0 b	18292,5 a	14,5 b	100 a	7,5 a
		B	570 a	430 a	FA		34,5 a	36,3 b	2 ab	0,2 a	0,5 a	966,6 c	2970,2 c	637,9 a	11244,6 c	15,7 b	100 a	7,4 a

Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de cada profundidad para cada parámetro ($p < 0,05$).

A: arena; a+l: arcilla + limo; COT: Carbono orgánico total; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SB: saturación de bases; FA: franco arenoso.

Subregión de las planicies medanosas

En el sitio de Planicie medanosa la toposecuencia presentó una pendiente de 0,8% y los suelos de la loma y media loma corresponden a Hapludol típico thapto-frágico, equivalente a típico-abrupto en la última versión del Soil Taxonomy (Soil Survey Staff., 2014), y Natracuol típico en el bajo, el cual se encuentra influenciado por la presencia del nivel freático alcalino (Figura 3.3). Las propiedades físicas y químicas se detallan en la Tabla 3.2.

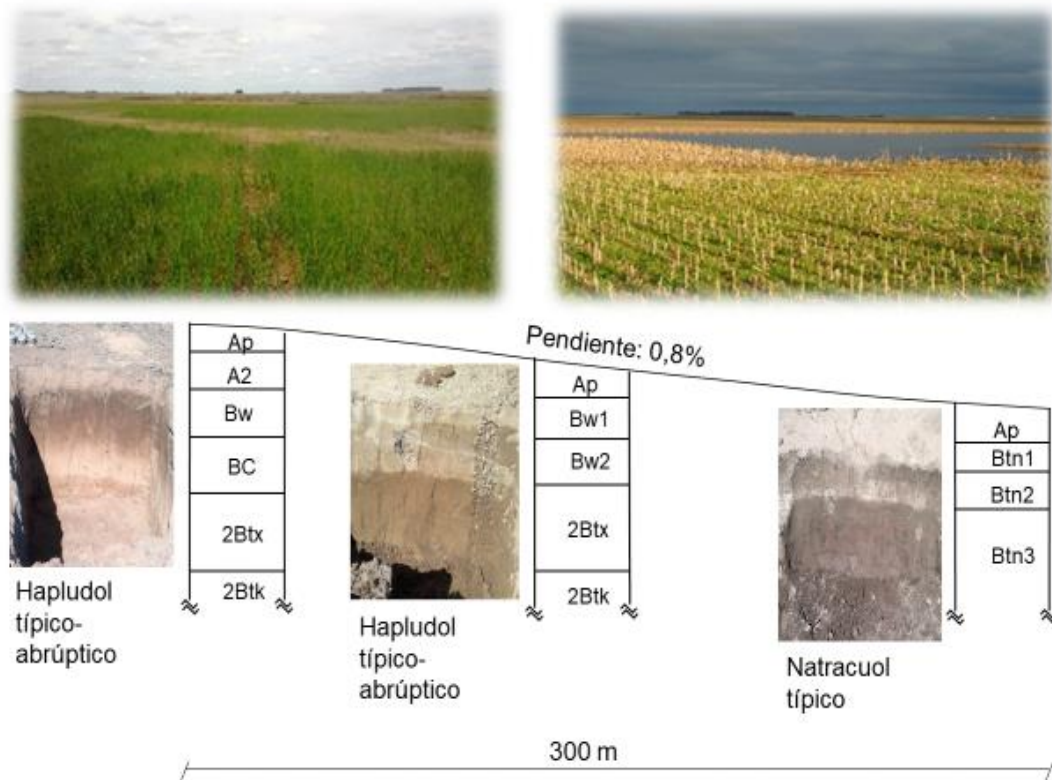


Figura 3.3. Perfiles de loma, media loma y bajo de la toposecuencia en Planicie medanosa.

Descripción morfológica de los perfiles de loma, media loma y bajo en Planicie medanosa:

Perfil de suelo de loma, Hapludol típico abrupto

Ap (0-15 cm); pardo a pardo oscuro en seco (10YR 4/3); franco arenoso; estructura masiva, rompe en laminar gruesa, muy dura, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, límite claro y suave.

A2 (15-32 cm); pardo grisáceo oscuro en seco (10YR 4/2); franco a franco limoso; estructura en bloques angulares, medios, fuertes; ligeramente duro, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; límite claro y suave.

Bw (32-50 cm); pardo en seco (10YR 5/3); franco arenoso; estructura en bloques angulares, medios, fuertes; duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de los agregados; límite claro y suave.

BC (50-68 cm); pardo grisáceo en seco (10YR 5/2); franco arenoso; estructura masiva; duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; muy escasos barnices arcillosos, muy finos; límite claro y suave.

2Btx (68-100 cm); pardo claro en seco (10YR 7/3); franco arenoso; estructura masiva; muy duro; ligeramente adhesivo, ligeramente plástico; escasos barnices arcillosos, muy finos; límite claro y suave.

2Btk (100 cm +); pardo amarillento claro en seco (10YR 7/3); franco arenoso; estructura masiva; muy duro; no adhesivo, no plástico.

Perfil de suelo de media loma, Hapludol típico abruptico

Ap (0-20 cm); pardo en seco (10YR5/3); franco arenoso; estructura laminar, fina, fuerte; ligeramente duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo, límite abrupto y suave.

Bw1 (20-38 cm); pardo en seco (10YR 5/3); franco arenoso; estructura en bloques angulares, medios, muy fuertes; muy duro; muy plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillo-húmicos, finos; límite claro y suave.

Bw2 (38-57 cm); pardo en seco (10YR 5/3); franco arenoso; estructura en bloques angulares, finos, fuertes; duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; límite claro y suave.

2Btx (57-80 cm); pardo grisáceo claro en seco (10YR 6/2); franco arenoso; estructura masiva; duro; no a ligeramente adhesivo; límite claro y suave.

2Btk (+100 cm); pardo amarillento claro en seco (10YR 7/3); franco arenoso; estructura masiva; muy duro; no adhesivo, no plástico.

Perfil de Suelo de bajo, Natracuol típico

Ap (0-24 cm); pardo grisáceo claro en seco (10YR 6/2); arenoso franco; estructura en bloques subangulares, medios, débiles; blando; no a ligeramente adhesivo, moteados de hierro, medios, precisos, comunes; límite abrupto.

Btn1 (24-39 cm); pardo grisáceo oscuro en seco (10YR 4/2); franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares que rompen en bloques fuertes medios a finos fuertes; muy duro; ligeramente adhesivo; abundantes barnices arcillo-húmicos; moteados de hierro, precisos, abundantes, gruesos, límite claro y suave.

Btn2 (33-54 cm); pardo grisáceo en seco (10YR 5/2); franco arenoso; estructura en prismas que rompen a bloques subangulares medios fuertes; muy duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de los agregados; moteados de hierro, precisos, gruesos, límite claro y suave.

Btn3 (+54 cm); pardo amarillento en seco (10YR 5/4); franco arenoso; estructura en prismas que rompen a bloques subangulares finos muy fuertes; extremadamente duro; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; escasos barnices arcillosos, muy finos; moteados de hierro, precisos, gruesos; límite claro y suave.

La mayoría de los suelos presentaron en los primeros 20 cm una textura franco-arenosa con un contenido medio de arcilla+ limo de $346,7 \text{ g kg}^{-1}$, a excepción del suelo del bajo agrícola cuya textura fue arenosa franca en las tres profundidades (Tabla 3.2). El contenido de COT (0-20 cm) en el suelo agrícola varió entre $9,3 \text{ g kg}^{-1}$ y $9,8 \text{ g kg}^{-1}$ entre loma y bajo, mientras que en el suelo con vegetación natural el suelo presentó un incremento en los contenidos medios de COT los cuales se hallaron entre $12,6 \text{ g kg}^{-1}$ y $18,6 \text{ g kg}^{-1}$ en las posiciones de loma y bajo respectivamente, siendo significativamente superior en el bajo. El IMO resultó de 4,1 en el suelo agrícola y 7,0 en su par natural, indicando nuevamente que los suelos bajo uso agrícola han experimentado una pérdida de materia orgánica debido a prácticas de manejo que tienden a un balance de carbono negativo.

El pH en este caso presentó un rango más amplio que en PT, ya que en la posición de loma el suelo fue ácido mientras que en el bajo prevalecieron las condiciones de alcalinidad, hallándose un valor mínimo de 5,1 en los primeros 20 cm de la loma agrícola y un máximo de 8,6 a mayor profundidad (40-60 cm)

del bajo agrícola. En la profundidad de 0-20 cm el pH se incrementó significativamente ($p < 0,05$) desde la loma (5,1) hacia la media loma (7,5) y el bajo (7,7) en el suelo agrícola y en el suelo natural el bajo (6,5) presentó un pH más alto ($p < 0,05$) que la loma (5,8) y la media loma (5,9) que no se diferenciaron entre sí. De manera similar, en la profundidad de 20-40 cm del suelo agrícola el bajo tuvo un pH más alto (8,3) que la media loma (7,8) y la loma (5,1) que también se diferenciaron entre sí, observándose también en el suelo con vegetación natural una disminución en la loma (6,1) y media loma (6,4), respecto al bajo (7,9). Por último, en la profundidad de 40-60 se encontraron diferencias entre posiciones en el suelo agrícola, aumentando significativamente ($p < 0,05$) de la loma (5,8) hacia el bajo (8,1), observándose lo mismo en el suelo con vegetación natural (5,9 en la loma y 8,6 en el bajo). Como se mencionó anteriormente, en este sitio el bajo se encontraba influenciado por el nivel freático alcalino, lo cual generó un pH alcalino en el suelo de esta posición, sobre todo por debajo de los primeros 20 cm, coincidiendo con los mayores contenidos de Na. En el suelo agrícola por debajo de los primeros 20 cm se encontró un porcentaje de Na intercambiable superior al 15%, mientras que en el suelo natural esto se observó sólo en la profundidad de 40-60 cm.

En el suelo del bajo agrícola se observaron los mayores ($p < 0,05$) contenidos de CaCO_3 en las tres profundidades de suelo. En los primeros 20 cm, el bajo agrícola presentó $4,2 \text{ g kg}^{-1}$ de CaCO_3 , seguido por la media loma ($1,5 \text{ g kg}^{-1}$) y la loma ($0,2 \text{ g kg}^{-1}$). En la profundidad de 20-40 cm el bajo tuvo $1,26$ de CaCO_3 y en la media loma y la loma no se detectó presencia de CaCO_3 . En la profundidad de 40-60 cm el bajo agrícola presentó $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ de CaCO_3 , disminuyendo en la loma a $0,9 \text{ g kg}^{-1}$. En los suelos con vegetación natural se

detectó presencia de CaCO_3 sólo en el caso del bajo ($0,4 \text{ g kg}^{-1}$) en la profundidad de 0-20 cm. Esto indicaría que la influencia del nivel freático alcalino es mayor en el suelo agrícola ya que al atravesar periodos de tiempo sin vegetación se produce un ascenso de la misma, mientras que con vegetación natural este proceso se ve reducido.

Para Al_o se encontró un valor medio de $2125,2 \text{ mg kg}^{-1}$, para Fe_o fue de $10373,6 \text{ mg kg}^{-1}$, para Al $430,1 \text{ mg kg}^{-1}$ y $797,7 \text{ mg kg}^{-1}$ para Fe . En la profundidad de 0-20 cm la loma ($1154,3 \text{ mg kg}^{-1}$) y la media loma ($1226,5 \text{ mg kg}^{-1}$) agrícola presentaron mayor ($p < 0,05$) contenido de Fe respecto al bajo ($675,0 \text{ mg kg}^{-1}$). En el suelo natural también se observó un contenido más alto de Fe en la loma ($987,8 \text{ mg kg}^{-1}$) y la media loma ($1183,7 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto al bajo ($650,0 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 20-40 cm no se hallaron diferencias significativas entre posiciones y entre usos de suelo. En la profundidad de 40-60 cm en el suelo agrícola la loma ($589,4 \text{ mg kg}^{-1}$) tuvo un contenido de Fe más alto que la media loma ($406,4 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($460,5 \text{ mg kg}^{-1}$), mientras que en el suelo natural se hallaron diferencias entre las tres posiciones, presentando la loma un contenido de Fe de $1226,5 \text{ mg kg}^{-1}$ y el bajo $404,6 \text{ mg kg}^{-1}$.

La saturación de bases promedio fue $84,3\%$, sin embargo, se observó una variación importante entre posiciones topográficas. En la profundidad de 0-20 cm del suelo agrícola de la loma la saturación de bases fue $67,8 \%$ aumentado en la media loma a $90,6 \%$ y en el bajo a $97,6 \%$, mientras que en el suelo natural el bajo ($83,9 \%$) y la media loma ($81,2 \%$) se diferenciaron de la loma ($77,0 \%$). En la profundidad de 40-60 cm el suelo agrícola tuvo también una saturación de bases más baja en la loma ($78,8 \%$), respecto a la media loma (100%) y el bajo ($87,8 \%$), similar a lo observado en el suelo natural donde el bajo ($95,5 \%$)

presentó una saturación de bases más alta que la loma (79,2 %). El aumento en la saturación de bases en las posiciones de bajo se debió principalmente al Na aportado por el nivel freático alcalino, como además pudo observarse en el pH.

Tabla 3.2. Propiedades físicas y químicas de los suelos de Planicie medanosa para cada posición topográfica (L: loma, ML: media loma y B: bajo) y uso del suelo (A: agrícola y N: natural) en las tres profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm).

Profundidad (cm)	Uso del suelo	Posición	A	a+l	Clase textural	COT g kg ⁻¹	CaCO ₃ g kg ⁻¹	Ca	Mg	Na	K	Al	Al _o	Fe	Fe _o	CIC Cmol _c kg ⁻¹	SB %	pH
			g kg ⁻¹															
0-20	A	L	561 d	439 a	FA	9,3 c	0,2 c	5,4 b	1,9 b	0,1 c	1,6 bc	414,3 b	2171,7 b	1154,3 a	10716,6 a	13,1 a	67,8 e	5,1 c
		ML	688 b	312 c	FA	9,4 c	1,5 b	4,7 c	1,6 b	0,5 b	1,3 c	238,0 c	1261,3 c	1226,5 a	8874,6 b	9,0 b	90,6 b	7,5 a
		B	780 a	220 d	AF	9,8 c	4,2 a	6,2 a	1,8 b	0,7 a	1,3 c	555,5 a	2769,9 a	675,0 b	9844,6 b	9,0 b	97,6 a	7,7 a
	N	L	674 b	326 c	FA	12,6 b	-	5,8 b	2,0 b	0,1 c	2,0 b	394,1 b	1659,7 c	987,8 a	8702,6 b	12,8 a	77,0 d	5,8 c
		ML	661 b	339 c	FA	11,1 b	-	4,9 c	2,5 a	0,1 c	1,9 b	596,8 a	2982,2 a	1183,7 a	11884,2 a	11,6 a	81,2 c	5,9 c
		B	630 c	370 b	FA	18,6 a	0,4 c	6,2 a	2,9 a	0,4 b	2,4 a	594, a	3184,0 a	650,0 b	11763,0 a	14,1 a	83,9 c	6,5 b
20-40	A	L	590 c	410 a	FA	-	-	6,0 a	2,9 a	0,2 d	1,3 b	442,3 b	2188,0 b	781,6 a	10484,3 a	13,0 ab	79,5 b	5,1 d
		ML	670 b	340 b	FA	-	-	3,7 b	1,4 b	1,6 b	1,1 b	289,4 c	1708,3 b	777,5 a	12563,8 a	8,8 b	89,2 a	7,8 b
		B	710 a	290 c	AF	1,3	1,3	5,3 a	2,5 a	2,8 a	1,3 b	618, a	2874,0 a	750,0 a	11053,0 a	16,4 a	72,4b	8,3 a
	N	L	600 c	400 a	FA	-	-	5,3 a	1,0 b	0,2 d	1,1 b	335,2 c	1404,3 c	733,0 a	8151,5 b	9,6 b	79,7 b	6,1 c
		ML	620 c	380 a	FA	-	-	4,7 ab	2,0 a	0,2 d	2,0 a	349,1 c	1709,7 b	813,9 a	9658,2 b	11,1 b	80,7 b	6,4 c
		B	600 c	400 a	FA	-	-	4,7 ab	2,3 a	0,9 c	2,0 a	337,2 c	1167,0 c	814,2 a	6847,6 c	10,4 b	94,1 a	7,9 b
40-60	A	L	670 a	330 b	FA	-	0,9 b	8,2 a	0,6 d	0,2 d	1,0 b	492,5 b	2446,0 b	589,4 c	10939,2 b	12,7 b	78,8 c	5,8 c
		ML	700 a	300 b	AF	-	-	8,0 a	1,8 c	2,4 a	2,0 a	381,0 b	1999,2 b	406,4 d	9713,9 b	12,7 b	100 a	8,4 a
		B	730 a	270 b	AF	2,3 a	2,3 a	6,6 b	3,3 a	0,6 c	2,0 a	641,5 a	3332,5 a	460,5 d	13390,5 a	16,4 a	87,8 b	8,1 a
	N	L	620 b	380 a	FA	-	-	5,8 c	2,5 b	0,1 d	1,1 b	411,6 b	2019,3 b	1026,7 a	11805,5 b	12 b	79,2 c	5,9 c
		ML	600 b	400 a	FA	-	-	6,0 c	2,3 b	0,1 d	2,0 a	429,6 b	2216,6 b	760,4 b	11084,2 b	12,5 b	82,9 c	6,4 b
		B	610 b	390 a	AF	-	-	3,5 d	1,6 c	1,6 b	1,6 a	221,9 c	1159,2 c	404,6 d	9247,1 b	8,8 c	95,5 a	8,6 a

Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de cada profundidad para cada parámetro ($p < 0,05$).

A: arena; a+l: arcilla + limo; COT: Carbono orgánico total; CIC: capacidad de intercambio catiónico; SB: saturación de bases; FA: franco arenoso; AF: arenoso franco.

Las principales diferencias entre los suelos de PT y PM estuvieron dadas por el contenido de CaCO_3 y el Ca intercambiable (Tabla 3.3), los cuales fueron marcadamente superiores en PT. La textura en el promedio no presentó diferencias entre las subregiones sin embargo como se detalló anteriormente, en PM la textura fue más gruesa en algunas posiciones y profundidades. El pH si bien fue más ácido en PM, presentó una mayor variación dentro de la toposecuencia que en PT. En general no hubo diferencias en el contenido de Fe de ambas toposecuencias en tanto que el contenido de Al fue superior en PT y la relación Ca:Fe+Al resultó mayor en PT.

Tabla 3.3. Propiedades físico- químicas en los suelos de Planicie con tosca y Planicie medanosa (promedio de las tres profundidades en cada sitio).

Subregión	a+l g kg ⁻¹	COT g kg ⁻¹	pH	CIC Cmolc kg ⁻¹	Ca	Fe mg kg ⁻¹	Al	CaCO ₃ g kg ⁻¹	Ca:Fe+Al
PT	382 a	11,9 a	7,4 a	18,7 a	29,7 a	748,9 a	1099,3 a	16,3 a	0,02 a
PM	347 a	12,4 a	6,8 b	12,0 b	5,6 b	839,4 a	430,1 b	0,6 b	4,70E-3 b

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

3.3.2 Distribución de fracciones de P en Planicie con tosca y Planicie medanosa

El análisis de componentes principales (Figura 3.4) muestra una separación entre PT y PM. Se puede observar que en PM los valores de P- solución, P lábil y P-Fe/Al son más altos y que PT está caracterizada por un mayor contenido de P-Ca, Ca, CaCO_3 y mayor valor Ca:Fe+Al y de pH. La componente principal 1 explicó el 58,0% de la variabilidad y estuvo representada por el P lábil, el P- Ca, el Ca intercambiable y el contenido de CaCO_3 . La componente principal 2 explicó

el 19,1% y estuvo representada por P- Fe/Al y pH. Ambas componentes explicaron en conjunto el 77,1% de la varianza.

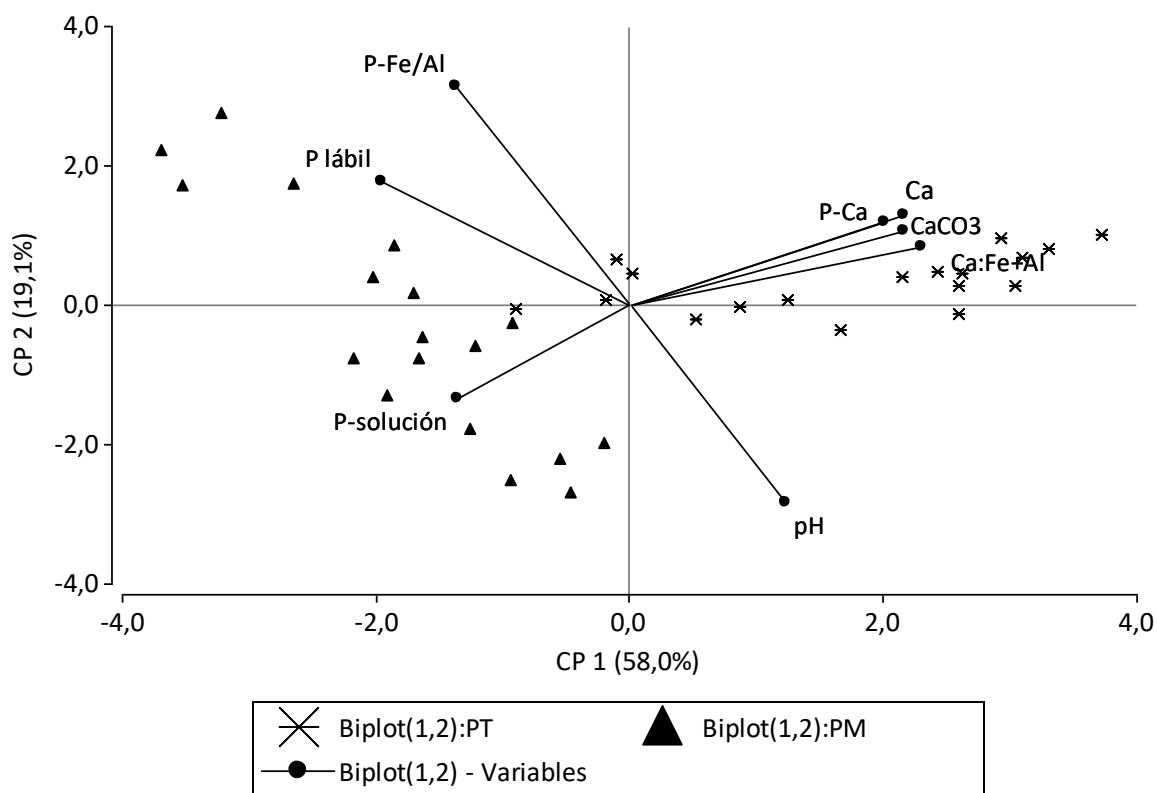


Figura 3.4. Análisis de Componente Principales (ACP) de las fracciones de P (P- solución, P lábil, P-Ca, P-Fe/Al) y de algunas propiedades de los suelos (Ca, CaCO₃, Ca:Fe+Al, pH) en Planicie con tosca (PT) y Planicie medanosa (PM).

A continuación se analizan a modo descriptivo los contenidos promedio de P de cada fracción para cada subregión y su proporción respecto al contenido de P total. Si bien las fracciones de P presentaron algunas diferencias entre subregiones, se observó un patrón similar en la distribución de las mismas (Figura 3.5) (Anexo Tabla 3.4). En ambos sitios la fracción más importante fue el P-Ca, en PT presentó una media de 241,14 mg kg⁻¹ mientras que en PM la media fue 144,14 mg kg⁻¹, lo cual representó el 63% y 47% del P total, respectivamente. La segunda en importancia fue la fracción de P estable, la cual tuvo un contenido

medio de 64,18 mg kg⁻¹ en PM y 79,06 mg kg⁻¹ en PT, representando el 21% del P total en ambos casos. La fracción de P-Fe/Al en PM, presentó una media de 56,37 mg kg⁻¹ mientras que en PT fue de 47,43 mg kg⁻¹, siendo el 19% y 12% del P total. El contenido medio de P en solución fue de 19,33 mg kg⁻¹ en PM y 5,22 mg kg⁻¹ en PT y el P lábil presentó una media de 19,45 mg kg⁻¹ y 10,57 mg kg⁻¹, en PM y PT respectivamente. El P-solución y el P lábil en conjunto representaron el 13% en PM, mientras que en PT sólo llegaron al 4% del P total. El contenido medio de P total en PT fue 383,42 mg kg⁻¹ y en PM 303,27 mg kg⁻¹.

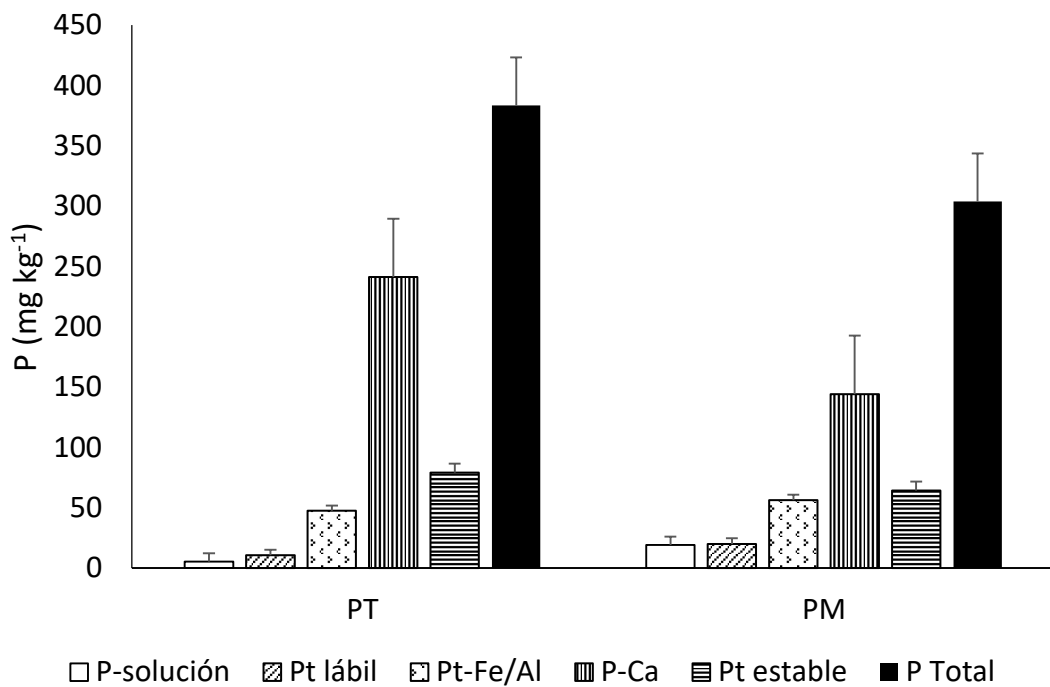


Figura 3.5. Distribución del P total de cada fracción y P total en las subregiones Planicie con tosca (PT) y Planicie medanosa (PM). *Barras indican error estándar.*

La variación entre subregiones en el contenido de Pt-Fe/Al pudo ser explicada ($R^2:0,89$) a través del Ca y del contenido de Fe y Al, de la siguiente manera:

$$Pt-Fe/Al = -1,28 Ca + 0,05 Fe + Al$$

$$R^2 = 0,89 \quad p < 0,0001$$

La variación en P ligado a Ca entre subregiones fue explicada ($R^2= 0,76$) por el contenido de Ca y de CaCO_3 , a través del siguiente modelo:

$$\text{P-Ca} = 107,86 + 27,09 \text{ CaCO}_3 + 7,06 \text{ Ca} - 0,12 \text{ Ca}^2 \quad R^2 = 0,76 \text{ p} < 0,0001$$

En PT el P lábil estuvo constituido por 44% de Po y 56% de Pi , mientras que en PM el 52% fue Po y el 48% Pi . La fracción de P ligado a Fe y Al estuvo compuesta principalmente por Po , el cual en PM representó el 62% de la fracción y en PT el 84% en PT. Por último, la fracción de P estable estuvo conformada principalmente por Pi , siendo este el 70% en PM y el 65% en PT.

3.3.3 Formas de P inorgánicas

El P inorgánico representó el 81% (311 mg kg^{-1}) del P total en PT y el 79% (240 mg kg^{-1}) en PM, representando una proporción similar sobre el P total en ambas subregiones (Figura 3.6) (Anexo Tabla 3.5). La fracción inorgánica del P lábil (Pi-lábil) presentó un contenido medio de $10,81 \text{ mg kg}^{-1}$ en PM el cual representó el 4% del P total, mientras que en PT la media fue $4,86 \text{ mg kg}^{-1}$, lo cual sólo alcanzó el 1% del P total. La fracción inorgánica del P ligado a Fe y Al (Pi-Fe/Al) presentó una media de $21,78 \text{ mg kg}^{-1}$ en PM, la cual representó el 7% del P total, mientras que en PT fue de $7,71 \text{ mg kg}^{-1}$, donde sólo llegó al 2% del P total. Las formas inorgánicas de P estable (Pi estable) presentaron una media de $5,37 \text{ mg kg}^{-1}$ en PT y de $44,65 \text{ mg kg}^{-1}$ en PM, constituyendo respectivamente el 13% y el 14% del P total. Tanto el P- solución como el P-Ca son considerados en su totalidad como P inorgánico, habiendo sido analizados en la sección 3.3.2.

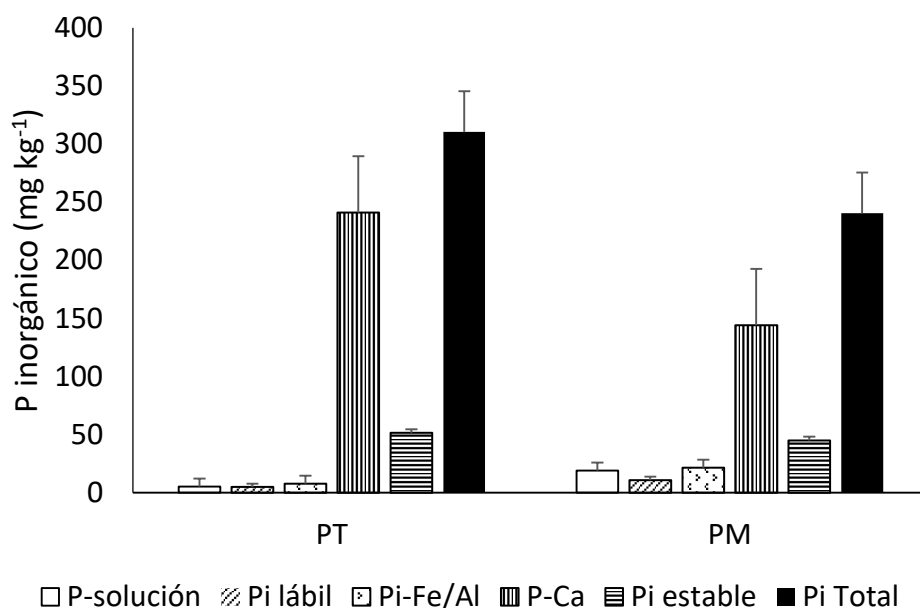


Figura 3.6. Distribución del P inorgánico de cada fracción y P inorgánico total en las subregiones Planicie con tosca (PT) y Planicie medanosa (PM). *Barras indican error estándar.*

3.3.4 Formas de P orgánico

El método de Hedley determina tres fracciones de P orgánico: el P orgánico lábil, el P orgánico ligado a Fe y Al y el P orgánico estable. La proporción de P orgánico con respecto al P total estuvo entre el 19% (73 mg kg^{-1}) para PT y el 21% (63 mg kg^{-1}) para PM (Figura 3.7). (Anexo Tabla 3.6). En PT el Po lábil ($5,55 \text{ mg kg}^{-1}$) representó el 7% del P orgánico total (Po total) y en PM ($9,19 \text{ mg kg}^{-1}$) este valor ascendió a 15%. El Po ligado a Fe y Al (Po-Fe/Al) constituyó el 55% del Po total en PM ($34,88 \text{ mg kg}^{-1}$) mientras que en PT ($39,72 \text{ mg kg}^{-1}$) fue el 55%. Por último, el Po estable en PT ($27,62 \text{ mg kg}^{-1}$) fue el 38% del Po total y en PM ($19,23 \text{ mg kg}^{-1}$) representó el 30%. Es decir que las formas lábiles y moderadamente lábiles tendieron a encontrarse en mayor proporción en PM, mientras que las formas estables tendieron a ser superiores en PT.

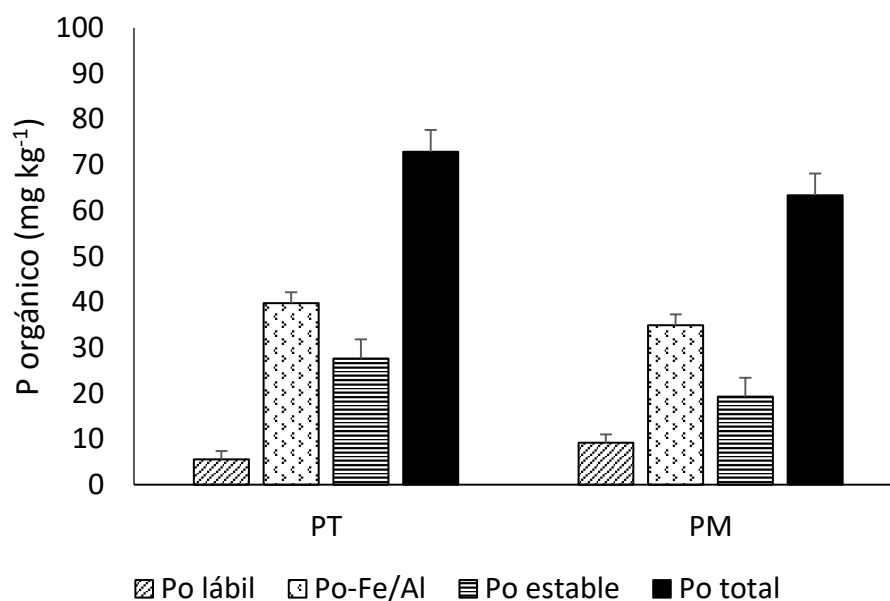


Figura 3.7. Distribución del P orgánico de cada fracción y P orgánico total en las subregiones Planicie con tosca (PT) y Planicie medanosa (PM). *Barras indican error estándar.*

Como se observó anteriormente, existieron diferencias en la distribución de las fracciones de P orgánico e inorgánico entre PT y PM y algunas propiedades edáficas como pH, cationes intercambiables y contenido de CaCO_3 de la misma manera presentaron variaciones entre los dos sitios. Considerando esto, se analizaron por separado las particularidades del ciclo del P y el efecto de los distintos factores que lo regulan en cada sitio.

3.3.5 Relación entre fracciones de P orgánico e inorgánico

Planicie con Tosca

En PT el P en solución estuvo asociado principalmente al P_i lábil ($r=0,85$) y al ligado a Fe y Al ($r=0,83$) y en menor medida con el P orgánico de estas fracciones. Sin embargo, se observó una asociación negativa con el P-Ca ($r= -0,41$). A su vez, el incremento de P_i lábil estuvo asociado con el incremento en

Po lábil ($r= 0,51$), Pi y Po ligado a Fe y Al ($r= 0,70$). Al igual que el P en solución, este fue afectado negativamente por el P-Ca ($r= -0,54$) (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Coeficiente de correlación de Pearson y probabilidad asociada entre las fracciones orgánicas e inorgánicas de P en PT.

Coef/Prob	P- solución	Pi lábil	Po lábil	Pi-Fe/Al	Po-Fe/Al	P-Ca	Pi estable
Pi lábil	0,85 **	1					
Po lábil	0,54 *	0,51 *	1				
Pi-Fe/Al	0,83 **	0,70 **	ns	1			
Po-Fe/Al	0,78 **	0,70 **	ns	0,88 **	1		
P-Ca	-0,41 *	-0,54 *	ns	ns	ns	1	
Pi estable	ns	ns	ns	ns	ns	ns	1
Po estable	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

* $p<0,05$ ** $p<0,01$ ns: no significativo

La variación de P en solución en la profundidad de 0-20cm pudo ser explicada ($R^2= 0,77$) a través del P inorgánico lábil y el P inorgánico ligado a Fe y Al, a través del siguiente modelo:

$$P\text{-solución} = -9,85 + 0,62 \text{ Pi lábil} + 1,19 \text{ Pi-Fe/Al} \quad R^2 = 0,77 \quad p = 0,0059$$

Planicie Medanosa

El aumento de P en solución estuvo asociado con el incremento en el P-Ca ($r= 0,77$) y en menor medida con el Pi lábil ($r= 0,42$), sin embargo, no mostró una correlación significativa con el P ligado a Fe/Al. Además, el Pi lábil se asoció con el P orgánico de esta misma fracción ($r= 0,48$), y con el P inorgánico y orgánico ligado a Fe/Al ($r= 0,79$ y $r= 0,62$ respectivamente). El incremento en el P orgánico lábil se vio asociado con las formas orgánicas ($r= 0,65$) e inorgánicas ($r= 0,84$) de P ligado a Fe/Al (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidad asociada entre fracciones orgánicas e inorgánicas de P en PM.

Coef/Prob	P- solución	Pi lábil	Po lábil	Pi-Fe/Al	Po-Fe/Al	P-Ca	Pi estable
Pi lábil	0,42 *	1					
Po lábil	ns	0,48 *	1				
Pi-Fe/Al	ns	0,79 **	0,65 **	1			
Po-Fe/Al	ns	0,62 **	0,84 **	0,70 **	1		
P-Ca	0,77 **	ns	ns	ns	ns	1	
Pi estable	ns	-0,46 *	ns	ns	-0,47 *	ns	1
Po estable	ns	ns	ns	ns	-0,57 **	ns	0,87 **

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

La variación en el P en solución pudo ser explicado ($R^2 = 0,94$) por el P inorgánico lábil y el P ligado a Ca, con los cuales se observó una relación positiva, y con el P inorgánico ligado a Fe y Al, el cual tuvo un efecto negativo sobre éste. El modelo propuesto para explicar estas relaciones es el siguiente:

$$P\text{-solución} = 0,18P\text{-Ca} + 2,45 \text{ Pi lábil} - 1,29 \text{ Pi-Fe/Al} \quad R^2 = 0,94 \quad p < 0,0001$$

3.3.6 Relación de las fracciones de P con los componentes del suelo en Planicie con Tosca

P inorgánico

El P en solución se asoció de manera positiva únicamente con el carbono orgánico ($r = 0,89$). Varios factores presentaron una correlación negativa con el P en solución, entre ellos los más importantes fueron el CaCO_3 ($r = -0,75$), la relación Ca:Fe+Al ($r = -0,74$) y el pH ($r = -0,79$). El Ca por sí sólo presentó un coeficiente de correlación inferior al hallado cuando se tiene en cuenta la relación Ca:Fe+Al. El Pi lábil mostró un comportamiento similar, asociándose negativamente con pH ($r = -0,65$), con la relación Ca:Fe+Al ($r = -0,63$) y CaCO_3 ($r = -0,49$) principalmente. El incremento en P inorgánico ligado a Fe y Al estuvo relacionado con la disminución de pH ($r = -0,78$), del Ca intercambiable ($r = -0,46$)

y de CaCO₃ (r= -0,70). Si bien esta fracción no estuvo directamente asociada con Fe y Al, como era de esperarse, sí presentó una asociación negativa con la relación Ca:Fe+Al (r=-0,72). El P ligado a Ca presentó correlaciones positivas con el Ca (r=0,47) y el CaCO₃ (r=0,57), mientras que con el contenido de Fe la relación fue negativa (r=-0,48). El P inorgánico estable sólo una asociación negativa con el Ca intercambiable (r=-0,48). (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Coeficientes de correlación de correlación de Pearson y probabilidad asociada entre las fracciones de P inorgánico y otras propiedades edáficas en Planicie con tosca.

Coef/Prob	P-solución	Pi lábil	Pi-Fe/Al	P-Ca	Pi estable
CO	0,89**	ns	0,87*	ns	ns
a+l	ns	ns	ns	ns	ns
pH	-0,79**	-0,65**	-0,78**	ns	ns
CIC	ns	ns	ns	ns	ns
Ca	-0,58*	-0,48*	-0,46*	0,47*	-0,48*
Mg	ns	ns	ns	ns	ns
Na	-0,57*	ns	-0,60**	ns	ns
K	ns	ns	ns	ns	ns
Al	ns	ns	ns	ns	ns
Fe	ns	ns	ns	-0,48*	ns
Al _o	ns	ns	ns	ns	ns
Fe _o	ns	ns	ns	ns	ns
Fe+Al	ns	ns	ns	ns	ns
Ca:Fe+Al	-0,74**	-0,63**	-0,72**	0,56*	ns
CaCO ₃	-0,75**	-0,49*	-0,70**	0,57*	ns

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

La variación de P en solución en 0-20 cm pudo ser explicada ($R^2 = 0,99$) por el contenido de carbono orgánico y de Ca, a través del siguiente modelo:

$$P\text{-solución} = 52,30 + 12,85 \text{ CO} - 6,19 \text{ Ca} + 0,16 \text{ Ca}^2 \quad R^2 = 0,99 \quad p = 0,0048$$

P orgánico

Dentro de planicie con tosca, el incremento en P orgánico lábil estuvo asociado principalmente con aumentos en el carbono orgánico ($r= 0,69$) y en menor medida con la disminución en el contenido de CaCO_3 ($r= -0,40$). Por otro lado, el P orgánico ligado a Fe y Al se incrementó con la disminución del pH ($r= -0,70$), del contenido de CaCO_3 ($r=-0,69$) y de Ca ($r=-0,52$) y aumentó con el incremento en el contenido de Fe ($r=0,56$). Al considerar la relación Ca:Fe+Al, en lugar de los cationes por separado, el coeficiente de correlación se incrementó ($r=-0,73$). El contenido de Al no mostró un efecto sobre esta fracción (Tabla 3.10). El Po estable no mostró correlaciones significativas con ninguna de variables analizadas.

Tabla 3.10. Coeficientes de correlación de Pearson entre las fracciones de P orgánico y otras propiedades del suelo en Planicie con tosca (0-20cm).

Coef/prob	Po lábil	Po-Fe/Al	Po estable	Po total
CO	0,69*	ns	ns	ns
a+l	ns	ns	ns	ns
pH	ns	-0,70**	ns	-0,57*
CIC	ns	ns	ns	ns
Ca	ns	-0,52*	ns	-0,49*
Mg	ns	ns	ns	ns
Na	ns	ns	ns	-0,56*
K	ns	ns	ns	ns
Al	ns	ns	ns	ns
Fe	ns	0,56**	ns	0,51*
Al _o	ns	ns	ns	ns
Fe _o	ns	ns	ns	ns
Fe+Al	ns	ns	ns	ns
Ca:Fe+Al	ns	-0,73**	ns	-0,69**
CaCO ₃	-0,40*	-0,69**	ns	-0,72**

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

3.3.7 Relación de las fracciones de P con los componentes del suelo en Planicie Medanosa

P inorgánico

El P en solución sólo se asoció de manera positiva con el contenido de CaCO_3 ($r= 0,76$). El P inorgánico lábil presentó una alta correlación con el carbono orgánico ($r:=0,89$) y también se asoció al incremento en Fe y Al ($r=0,75$). El incremento en P inorgánico ligado a Fe y Al se asoció con la disminución de pH ($r=-0,60$). El contenido de Fe se asoció a esta fracción ($r=0,46$), sin embargo, cuando se considera la sumatoria de Fe y Al, el coeficiente de correlación se eleva ($r=0,78$). El P ligado a Ca en este caso no mostró relación con el Ca pero sí con el CaCO_3 ($r=0,65$). El P inorgánico estable estuvo asociado con el Ca ($r:0,48$) y con la relación Ca:Fe+Al ($r:0,51$). (Tabla 3.11)

Tabla 3.11. Coeficientes de correlación de correlación de Pearson y probabilidad asociada entre las fracciones de P inorgánico y otras propiedades edáficas en Planicie medanosa.

Coef/Prob	P-solución	Pi lábil	Pi-Fe/Al	P-Ca	Pi estable
CO	ns	0,89*	ns	ns	ns
a+l	ns	ns	ns	ns	ns
pH	ns	ns	-0,60**	ns	ns
CIC	ns	ns	ns	0,58*	ns
Ca	ns	ns	ns	ns	0,48*
Mg	ns	ns	ns	ns	ns
Na	ns	ns	-0,60**	ns	ns
K	ns	ns	ns	ns	ns
Al	ns	ns	ns	ns	ns
Fe	ns	ns	0,46*	ns	ns
Al _o	ns	ns	ns	ns	ns
Fe _o	ns	ns	ns	ns	ns
Fe+Al	ns	0,75**	0,78**	ns	ns
Ca:Fe+Al	ns	-0,51*	ns	ns	0,51*
CaCO_3	0,76**	ns	ns	0,65**	ns

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

P orgánico

En planicie medanosa el P orgánico lábil estuvo asociado con el contenido de limo+ arcilla ($r=0,91$) y con el Fe ($r=0,49$) de manera positiva, mientras que con el pH ($r=-0,58$) y la relación Ca:Fe+Al ($r=-0,56$) se asoció de manera negativa. La fracción de P orgánico ligado a Fe y Al también estuvo asociada con la proporción de partículas minerales finas ($r=0,84$). Es importante resaltar que esta fracción estuvo relacionada con el Fe ($r=0,57$) pero no con el Al. El P orgánico estable, sin embargo, presentó una correlación negativa con el Fe ($r=-0,47$) y se vio incrementada con el aumento de la relación Ca:Fe+Al ($r=0,43$). (Tabla 3.12).

Tabla 3.12. Coeficientes de correlación de Pearson entre las fracciones de P orgánico y otras propiedades del suelo en Planicie medanosa (0-20cm).

Coef/prob	Po lábil	Po-Fe/Al	Po estable	Po total
CO	ns	ns	ns	ns
a+l	0,91**	0,84*	ns	0,81*
pH	-0,58*	-0,53*	ns	-0,67**
CIC	ns	ns	ns	ns
Ca	ns	ns	ns	ns
Mg	ns	ns	ns	ns
Na	-0,54*	-0,49*	ns	-0,60**
K	ns	ns	ns	ns
Al	ns	ns	ns	ns
Fe	0,49*	0,57*	-0,47*	0,51*
Al _o	ns	ns	ns	ns
Fe _o	ns	ns	ns	ns
Fe+Al	0,78**	0,77**	ns	0,78**
Ca:Fe+Al	ns	-0,57*	ns	-0,51*
CaCO ₃	ns	ns	ns	ns

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

3.3.8 Efecto de la topografía sobre las fracciones de P

Suelo agrícola en Planicie con tosca

Se encontraron interacciones significativas ($p < 0,05$) entre los factores posición topográfica y uso del suelo para cada profundidad en todas las fracciones excepto en el Pi estable en la profundidad de 0-20 cm. En el suelo agrícola de Planicie con tosca el P en solución fue significativamente superior en el bajo, donde presentó un contenido de $7,9 \text{ mg kg}^{-1}$, respecto a la media loma y la loma ($4,8 \text{ mg kg}^{-1}$ y $4,4 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) en la profundidad de 0-20 cm. Sin embargo, en los estratos inferiores no se observó un efecto significativo de la topografía sobre el P en solución, con contenidos medios entre $2,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $3,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) en la profundidad de 20-40 cm y entre $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $2,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) en la profundidad de 40-60 cm (Figura 3.8).

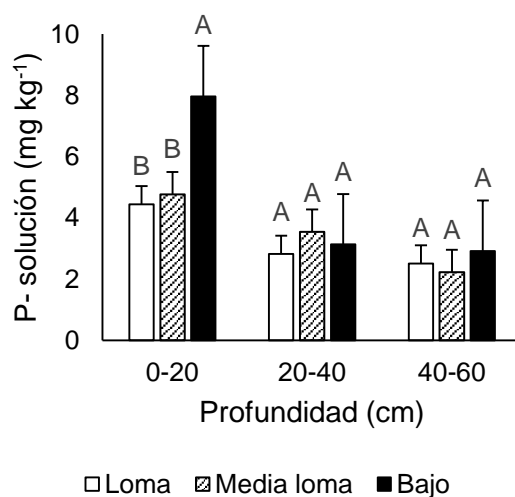


Figura 3.8. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P en solución en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. *Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

El Pi lábil presentó un comportamiento similar al P en solución ya que la topográfica tuvo efecto solamente en la profundidad de 0-20 cm, hallándose en el bajo un contenido medio de $10,0 \text{ mg kg}^{-1}$, superior a lo observado en la media loma ($4,8 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($3,5 \text{ mg kg}^{-1}$), las cuales no se diferenciaron entre sí. En el estrato de 20-40 cm se encontraron contenidos medios de Pi lábil entre $4,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $2,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma), mientras que en el estrato de 40-60 cm estos valores variaron entre $2,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $5,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma). El Po lábil siguió una tendencia similar, hallándose diferencias sólo en la profundidad de 0-20 cm. En este caso el bajo y la media loma no se diferenciaron entre sí, con contenidos medios de $7,4 \text{ mg kg}^{-1}$ y $6,6 \text{ mg kg}^{-1}$ respectivamente, pero fueron superiores a los encontrados en la loma, donde el contenido medio fue $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$. En el estrato de 20-40 cm el contenido de Po lábil se halló entre $4,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $6,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma), mientras que en el estrato de 40-60 cm estuvo entre $3,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) (Figura 3.9).

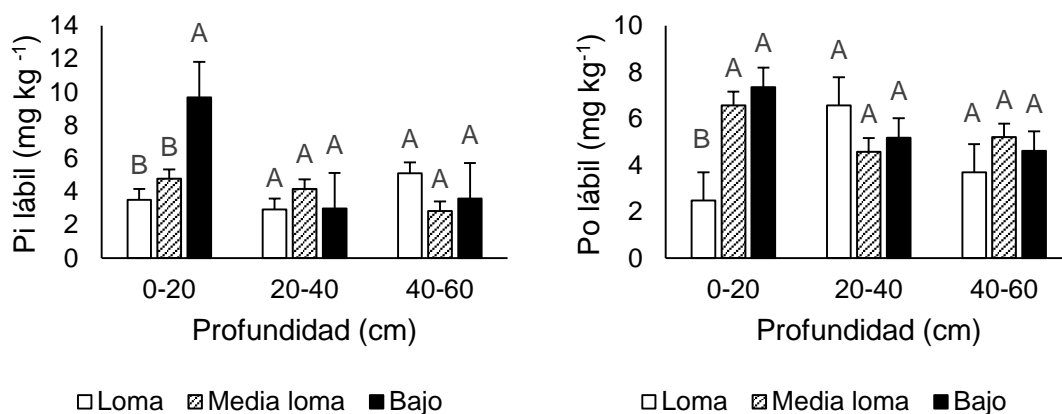


Figura 3.9. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi lábil y Po lábil en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

La topografía no mostró un efecto significativo sobre el Pi- Fe/Al en ninguna de las tres profundidades. En la profundidad de 0-20 el contenido medio de esta fracción se halló entre 7,5 mg kg⁻¹ (loma) y 10,1 mg kg⁻¹ (bajo), en 20-40 cm estuvo entre 4,8 mg kg⁻¹ (bajo y loma) y 9,2 mg kg⁻¹ (media loma), y entre 3,1 mg kg⁻¹ (media loma) y 6,4 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 40-60 cm. El Po- Fe/Al tampoco manifestó un efecto de la topografía en ninguna de las tres profundidades, con contenidos medios entre 41,2 mg kg⁻¹ (media loma) y 62,0 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 0-20 cm, entre 31,5 mg kg⁻¹ (bajo) y 41,4 mg kg⁻¹ (media loma) de 20-40 cm y entre 22,9 mg kg⁻¹ (loma) y 37,9 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 40-60 cm (Figura 3.10).

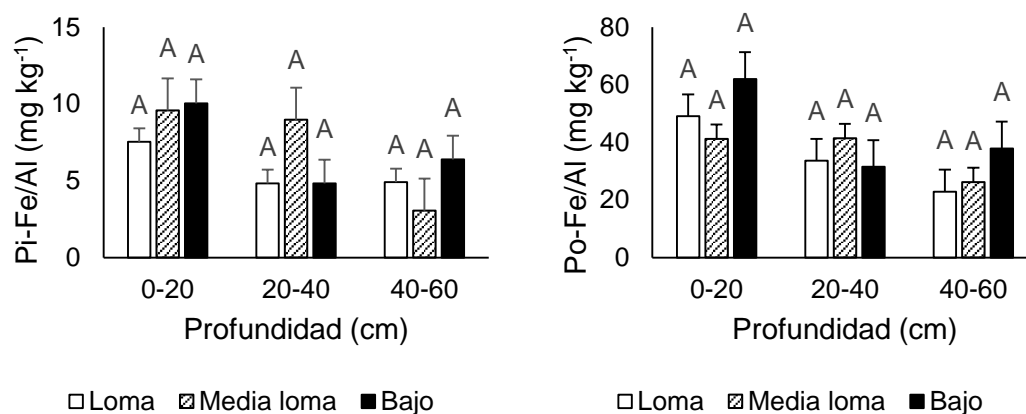


Figura 3.10. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi- Fe/Al y Po- Fe/Al en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

Las formas de P- Ca no presentaron un efecto significativo de la topografía en las profundidades de 0-20 y de 20-40 cm. En el primero caso los contenidos medios de P- Ca se hallaron entre 210,4 mg kg⁻¹ (loma) y 228,6 mg kg⁻¹ (bajo), mientras que en el estrato de 20-40 cm se encontraron entre 238,4 mg kg⁻¹ (loma) y 272,7 mg kg⁻¹ (bajo). En el estrato inferior de 40-60 cm se hallaron diferencias

significativas entre el bajo, donde el contenido medio fue 312,0 mg kg⁻¹ y la loma donde fue 206,1 mg kg⁻¹ (Figura 3.11).

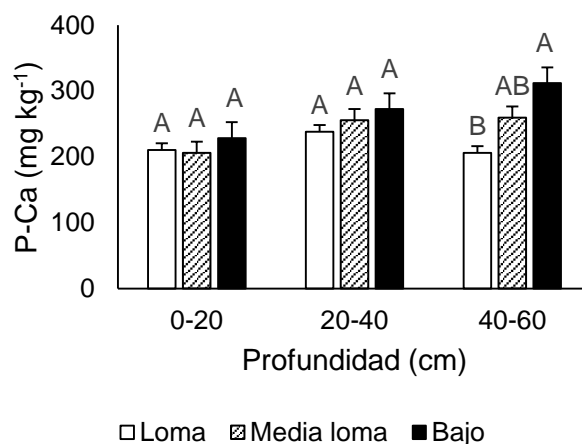


Figura 3.11. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- Ca en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

En el caso del Pi estable no se observó un efecto significativo de la topografía en el estrato de 0-20 cm y el contenido de P de esta fracción se halló entre 56,9 mg kg⁻¹ (loma) y 65,5 mg kg⁻¹ (bajo). En la profundidad de 20-40 cm se encontró un contenido de Pi estable más alto en el bajo (63,8 mg kg⁻¹), seguido por la loma (53,9 mg kg⁻¹) y la media loma (42,2 mg kg⁻¹). En la profundidad de 40-60 cm no se encontraron diferencias significativas entre las tres posiciones topográficas, hallándose contenido de Pi estable entre 48,0 mg kg⁻¹ (bajo) y 56,0 mg kg⁻¹ (loma). En el caso del Po estable, en la profundidad de 0-20 cm se observó un contenido más alto en la loma (38,3 mg kg⁻¹) y el bajo (37,4 mg kg⁻¹), respecto a la media loma (19,2 mg kg⁻¹). En la profundidad de 20-40 cm se observó la misma tendencia, hallándose un contenido de Po estable de 32,4 mg kg⁻¹ en la loma, 34,5 mg kg⁻¹ en el bajo y 19,6 mg kg⁻¹ en la media loma. En el estrato inferior de 40-60 cm no se observó un efecto significativo de la topografía, y el contenido

medio de P de esta fracción estuvo entre 49,3 mg kg⁻¹ (loma) y 63,2 mg kg⁻¹ (bajo) (bajo) (Figura 3.12).

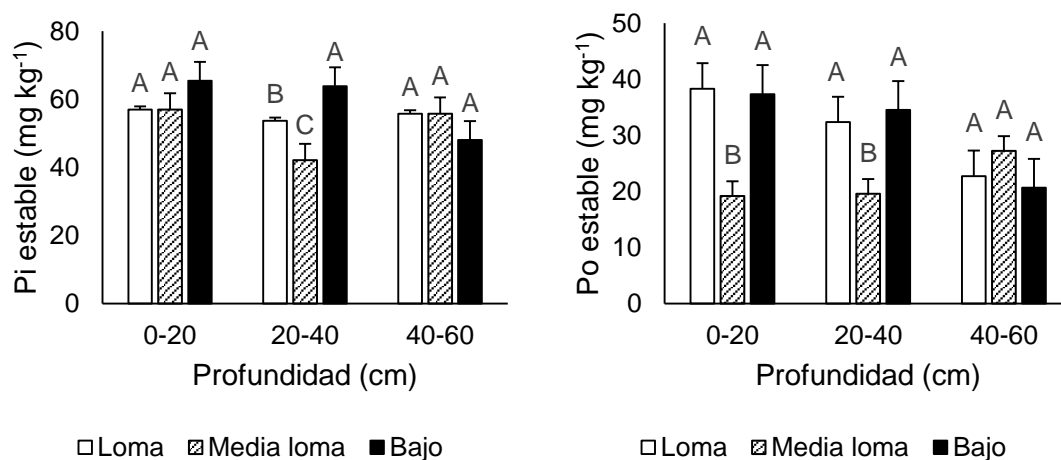


Figura 3.12. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi estable y Po estable en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

La topografía presentó un efecto significativo sobre el P total, hallándose un contenido más alto de P en el bajo en las tres profundidades, mientras que entre la loma y la media loma las diferencias no fueron significativas. En la profundidad de 0-20 cm el bajo presentó un contenido de P total de 422,1 mg kg⁻¹, la media loma de 352,5 mg kg⁻¹ y la loma de 372,3 mg kg⁻¹. En la profundidad de 20-40 cm se halló un contenido de 418,7 mg kg⁻¹ en el bajo, 380,1 mg kg⁻¹ en la media loma y 375,2 mg kg⁻¹ en la loma, mientras que en la profundidad de 40-60 cm estos valores fueron de 436,1 mg kg⁻¹ en el bajo, 382,1 mg kg⁻¹ en la media loma y 323,9 mg kg⁻¹ en la loma (Figura 3.13).

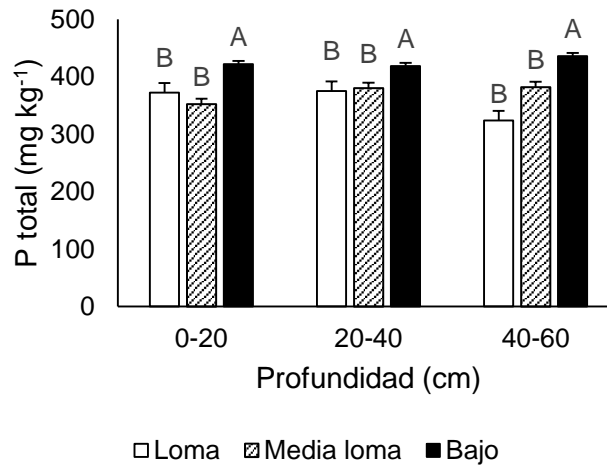


Figura 3.13. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P total en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo bajo uso agrícola en Planicie con tosca. *Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

Suelo con vegetación natural en planicie con tosca

El P en solución, similar a lo observado en el suelo agrícola, manifestó un efecto significativo de la topografía sólo en la profundidad de 0-20 cm. En este caso el bajo (12,3 mg kg⁻¹) y la media loma (12,1 mg kg⁻¹) presentaron un incremento respecto a loma (8,1 mg kg⁻¹). En la profundidad de 20-40 cm el contenido de P en solución se encontró entre 4,5 mg kg⁻¹ (loma) y 5,4 mg kg⁻¹ (media loma) y en la profundidad de 40-60 cm estuvo entre 3,0 mg kg⁻¹ (bajo) y 4,4 mg kg⁻¹ (loma) (Figura 3.14).

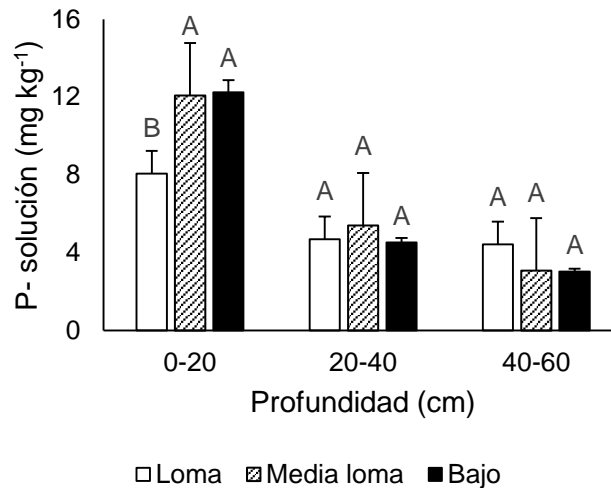


Figura 3.14. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- solución en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

El P lábil tanto orgánico como inorgánico, no manifestó un efecto significativo de la topografía, a diferencia del suelo agrícola donde sí se observaron variaciones en la profundidad de 0-20 cm. El contenido de Pi lábil se halló entre 7,2 mg kg⁻¹ (loma) y 7,9 mg kg⁻¹ (media loma) en la profundidad de 0-20 cm; entre 2,9 mg kg⁻¹ (loma) y 5,1 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 20-40 cm; y 3,3 mg kg⁻¹ (media loma) y 6,2 mg kg⁻¹ (bajo). El Po lábil presentó contenidos medios entre 5,5 mg kg⁻¹ (media loma) y 9,4 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 0-20 cm; entre 4,6 mg kg⁻¹ (bajo) y 6,2 mg kg⁻¹ (media loma) de 20-40 cm; y entre 4,9 mg kg⁻¹ (bajo) y 9,3 mg kg⁻¹ (loma) de 40-60 cm (Figura 3.15).

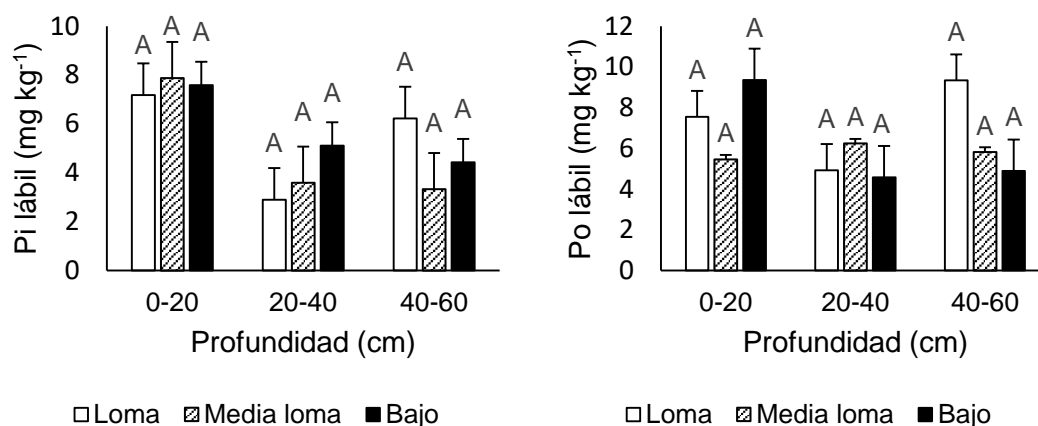


Figura 3.15. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi lábil y Po lábil en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

En el suelo con vegetación natural no se observó un efecto significativo de la topografía sobre las formas de Pi- Fe/Al en ninguna de las tres profundidades, siguiendo la misma tendencia que en el suelo agrícola. El contenido medio de esta fracción se halló entre 13,3 mg kg⁻¹ (loma) y 13,6 mg kg⁻¹ (media loma) en la profundidad de 0-20 cm; entre 3,9 mg kg⁻¹ (media loma) y 8,8 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 20-40 cm; y 4,7 mg kg⁻¹ (loma) 6,6 mg kg⁻¹ (bajo) en la profundidad de 40-60 cm. Las formas de Po- Fe/Al no estuvieron afectadas por la topografía en el caso de la profundidad de 0-20 cm, donde el contenido de P se encontró entre 49,5 mg kg⁻¹ (media loma) y 59,0 mg kg⁻¹ (bajo); tampoco se hallaron diferencias significativas en la profundidad de 40-60 cm y los valores de Po- Fe/Al se encontraron entre 30,5 mg kg⁻¹ (bajo) y 33,3 mg kg⁻¹ (media loma). En la profundidad de 20-40 cm se hallaron diferencias significativas entre la loma (46,2 mg kg⁻¹), la media loma (23,3 mg kg⁻¹) y el bajo (38,3 mg kg⁻¹) (Figura 3.16).

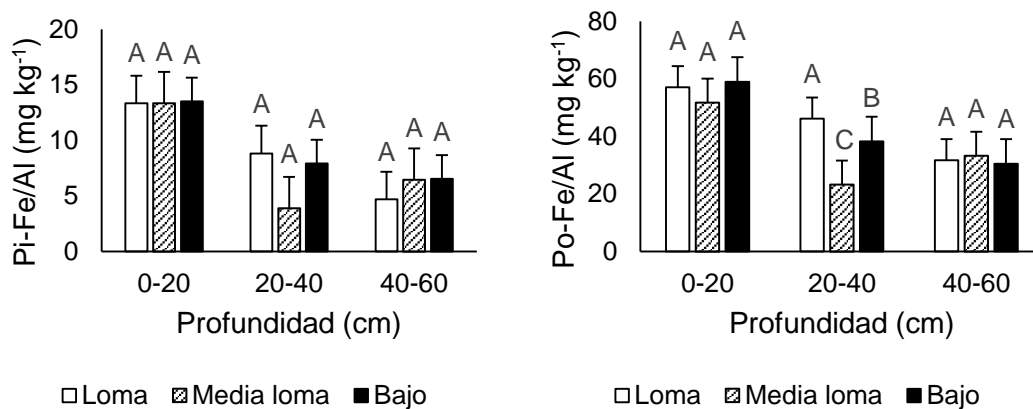


Figura 3.16. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi- Fe/Al y Po- Fe/Al en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad (p<0,05).*

El P- Ca no presentó variaciones en función de la topografía en los primeros 40 cm de suelo. En la profundidad de 0-20 cm el contenido de P de esta fracción estuvo entre 169,3 mg kg⁻¹ (loma) y 229,6 mg kg⁻¹ (media loma); mientras que en la profundidad de 20-40 cm estos valores se hallaron entre 233,6 mg kg⁻¹ (media loma) y 275,8 mg kg⁻¹ (bajo). En la profundidad de 40-60 cm, similar a lo observado en el suelo agrícola, se encontraron diferencias significativas entre posiciones, en este caso el bajo (282,0 mg kg⁻¹) y la media loma (277,0 mg kg⁻¹) presentaron un contenido de P- Ca más alto que en la loma (207,4 mg kg⁻¹) (Figura 3.17).

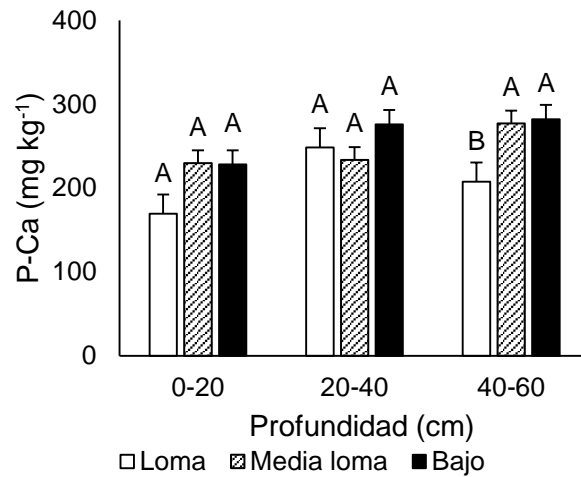


Figura 3.17. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- Ca en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

El Pi estable no estuvo afectado por la topografía en los primeros 20 cm de suelo, hallándose contenidos medios de $50,6 \text{ mg kg}^{-1}$ en la loma y $65,4 \text{ mg kg}^{-1}$ en el bajo. En los estratos inferiores tampoco se encontró una influencia significativa de la topografía, en la profundidad de 20-40 cm el contenido de P de esta fracción se encontró entre $34,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $46,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma), mientras que de 40 a 60 cm estos valores se hallaron entre $39,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $43,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma). El Po estable no presentó diferencias entre posiciones topográficas en los primeros 20 cm de suelo y el contenido de P de esta fracción se halló entre $21,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $26,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma). En la profundidad de 20-40 cm la media loma presentó un contenido más alto de Po estable ($42,9 \text{ mg kg}^{-1}$), respecto a la loma ($21,2 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($20,8 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de suelo de 40-60 cm el contenido más alto de Po estable se observó en la loma ($42,8 \text{ mg kg}^{-1}$) y no se hallaron diferencias significativas entre la media loma ($22,0 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($21,2 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 3.18).

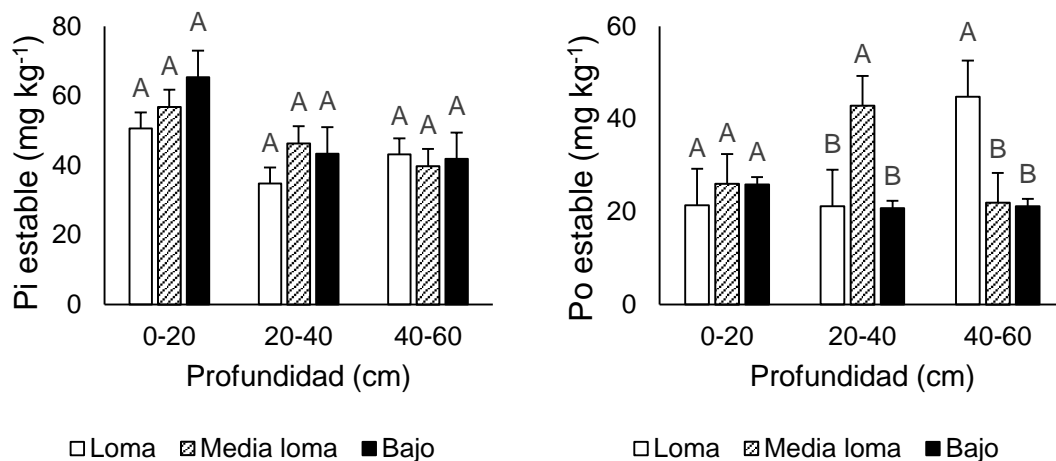


Figura 3.18. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi estable y Po estable en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

El contenido de P total, similar a lo observado en el suelo agrícola, presentó diferencias entre posiciones topográficas en los primeros 20 cm, en este caso el bajo ($421,2 \text{ mg kg}^{-1}$) y la media loma ($400,8 \text{ mg kg}^{-1}$) tuvieron contenidos de P más altos que la loma ($334,6 \text{ mg kg}^{-1}$). La profundidad de 20-40 cm el bajo ($400,5 \text{ mg kg}^{-1}$) tuvo un contenido más alto de P total, respecto a la media loma ($365,3 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($372,0 \text{ mg kg}^{-1}$), las cuales no se diferenciaron entre sí. En la profundidad de 40-60 cm no se observaron diferencias significativas entre las tres posiciones topográficas, y el contenido de P total se encontró entre $395,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) y $351,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) (Figura 3.19).

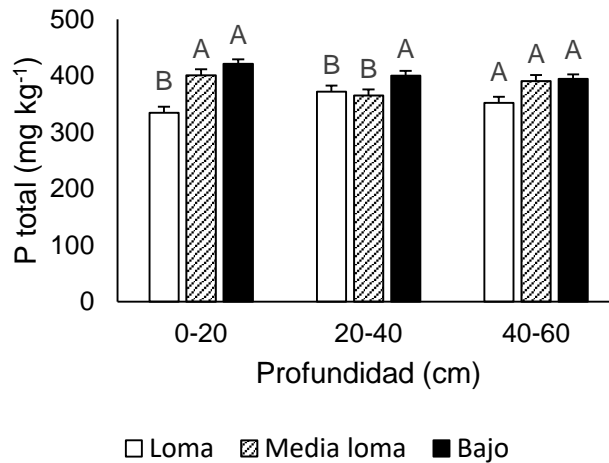


Figura 3.19. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P total en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie con tosca. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

Suelo agrícola en Planicie medanosa

En el suelo agrícola de Planicie medanosa la topografía tuvo un importante efecto sobre el P en solución y esto fue similar en las tres profundidades, siendo significativamente más alto en el bajo, seguido por la media loma y la loma. En los primeros 20 cm, el P en solución en la loma fue de $9,7 \text{ mg kg}^{-1}$, en la media loma $29,8 \text{ mg kg}^{-1}$ y en el bajo $47,56 \text{ mg kg}^{-1}$. En la profundidad de 20-40 cm el suelo de la loma presentó $4,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de P en solución, la media loma $8,9 \text{ mg kg}^{-1}$ y el bajo $49,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 3.20).

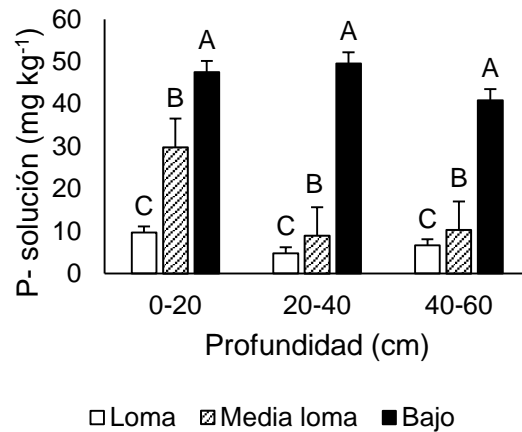


Figura 3.20. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- solución en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

El Pi lábil presentó en los primeros 20 cm del suelo agrícola un comportamiento similar al P en solución, sin embargo, en este caso las diferencias entre loma y bajo no fueron tan pronunciadas. En la profundidad de 0-20 cm de suelo de la loma se encontró un contenido de Pi lábil de 8,8 mg kg⁻¹, incrementándose a 12,6 mg kg⁻¹ en la media loma y a 15,6 mg kg⁻¹ en el bajo. En la profundidad de 20-40 cm sólo se observó un incremento significativo en el bajo (10,4 mg kg⁻¹), mientras que la media loma (5,7 mg kg⁻¹) y la loma (6,1 mg kg⁻¹) no se diferenciaron entre sí. En la profundidad de 40-60 cm ya no se observaron diferencias significativas entre posiciones topográficas y el contenido medio de Pi lábil estuvo entre 4,6 mg kg⁻¹ (loma) y 8,1 mg kg⁻¹ (media loma). Las formas orgánicas de esta fracción (Po lábil) manifestaron un efecto significativo de la topografía en las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm. En el primer caso el suelo de la loma (20,8 mg kg⁻¹) presentó un contenido de Po lábil más alto que el bajo (8,8 mg kg⁻¹) y la media loma (6,7 mg kg⁻¹). En la profundidad de 20-40 cm de suelo la loma también presentó un contenido más alto de Po lábil (11,6

mg kg⁻¹) que el bajo (3,4 mg kg⁻¹) y la media loma (2,0 mg kg⁻¹). En la profundidad de 40-60 cm no se observó un efecto significativo de la topografía, y el contenido medio de Po lábil se halló entre 3,0 mg kg⁻¹ (bajo) y 7,6 mg kg⁻¹ (loma) (Figura 3.21).

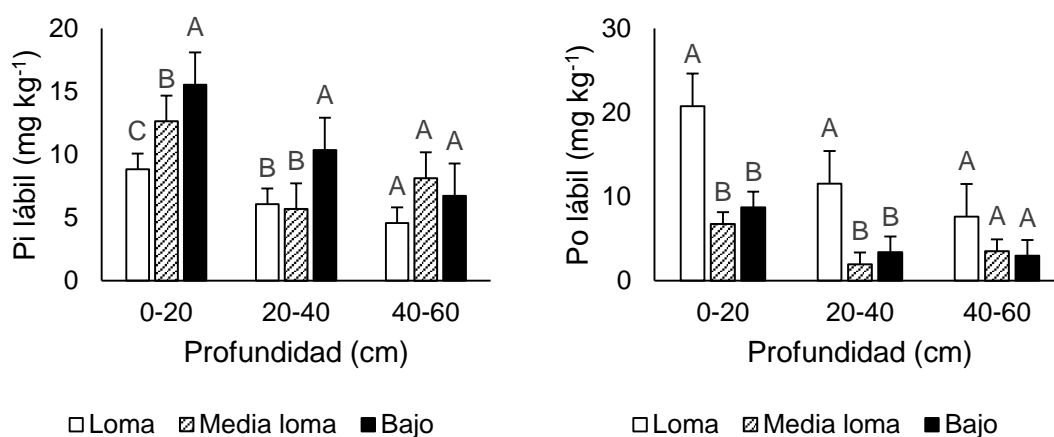


Figura 3.21. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi lábil y Po lábil en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

La topografía tuvo un efecto significativo sobre el contenido de Pi- Fe/Al en las tres profundidades. En los primeros 20 cm de suelo la loma (28,5 mg kg⁻¹) mostró un incremento respecto a la media loma (19,0 mg kg⁻¹) y el bajo (20,6 mg kg⁻¹), los cuales no se diferenciaron entre sí. En la profundidad de 20-40 cm la loma continuó presentando el contenido más alto de Pi- Fe/Al de esta fracción (24,8 mg kg⁻¹), seguido por el bajo (18,5 mg kg⁻¹) y la media loma (5,2 mg kg⁻¹). En la profundidad de 40-60 cm nuevamente se observó que la loma presentaba un contenido más alto de Pi- Fe(Al) (20,8 mg kg⁻¹) que la media loma (6,6 mg kg⁻¹) y el bajo (7,7 mg kg⁻¹). Las formas orgánicas ligadas a Fe y Al (Po- Fe/Al) también fueron más abundantes en la loma en los primeros 40 cm de suelo. Particularmente en la profundidad de 0-20 cm el bajo (47,8 mg kg⁻¹) y la media

loma ($26,6 \text{ mg kg}^{-1}$) no se diferenciaron entre sí, mientras que la loma mostró un incremento significativo ($94,7 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 20-40 cm se encontraron diferencias entre las tres posiciones, hallándose un menor contenido de Po-Fe/Al en el bajo ($6,8 \text{ mg kg}^{-1}$), seguido por la media loma ($17,7 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($28,8 \text{ mg kg}^{-1}$). Por último, en la profundidad de 40-60 cm de suelo no se observó un efecto significativo de la topografía y el contenido medio de P esta fracción se halló entre $6,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $20,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) (Figura 3.22).

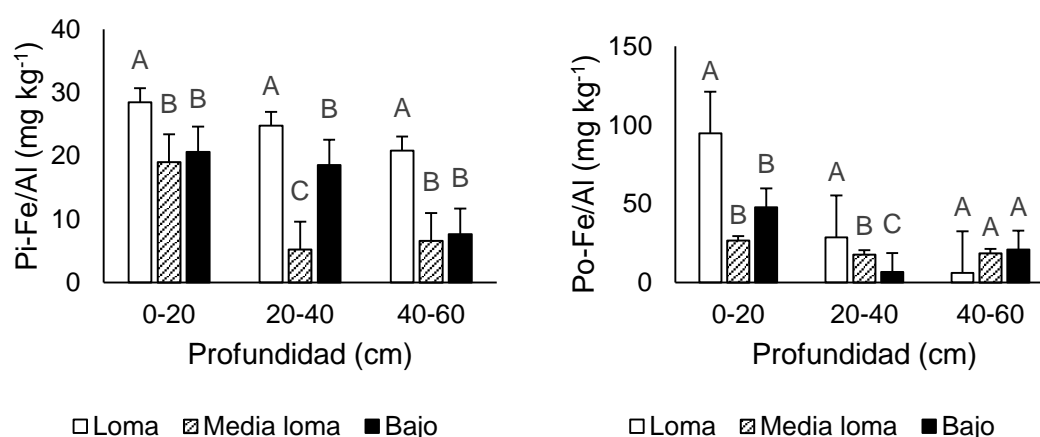


Figura 3.22. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi- Fe/Al y Po- Fe/Al en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

El contenido de P- Ca se incrementó en el suelo del bajo en las tres profundidades, mientras que entre la media loma y la loma no se hallaron diferencias significativas. En los primeros 20 cm de suelo el contenido de P- Ca fue de $194,3 \text{ mg kg}^{-1}$ en el bajo, disminuyendo a $116,6 \text{ mg kg}^{-1}$ en la media loma y $140,0 \text{ mg kg}^{-1}$ en la loma. En la profundidad de 20-40 cm el suelo del bajo presentó un contenido de P de $183,3 \text{ mg kg}^{-1}$, mientras que en la media loma y la loma fue de $99,9 \text{ mg kg}^{-1}$ y $135,3 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente. Por último, en la profundidad de 40-60 cm el bajo tuvo un contenido de P- Ca de $211,5 \text{ mg kg}^{-1}$,

disminuyendo en la media loma y la loma a $140,2 \text{ mg kg}^{-1}$ y $144,2 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 3.23).

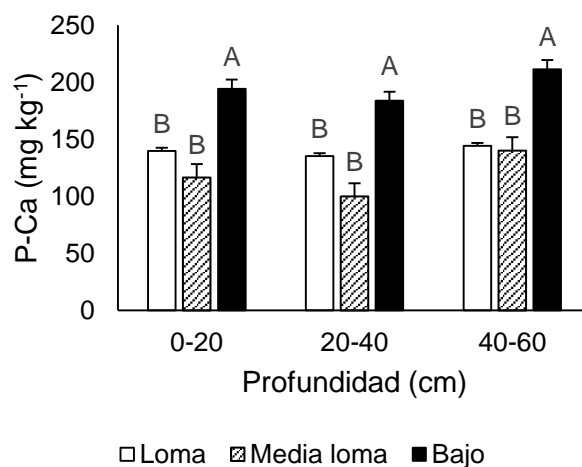


Figura 3.23. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- Ca en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

El Pi estable no presentó diferencias significativas entre posiciones topográficas en los primeros 20 cm de suelo, y el contenido de P de esta fracción se halló entre $28,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $39,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma). Sin embargo, en la profundidad de 20-40 cm se hallaron diferencias entre las tres posiciones y el valor más alto se observó en la loma ($73,8 \text{ mg kg}^{-1}$), seguido por el bajo ($53,3 \text{ mg kg}^{-1}$) y la media loma ($36,4 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 40-60 cm también se halló un contenido más alto de Pi estable ($69,8 \text{ mg kg}^{-1}$), respecto a la media loma ($46,5 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($49,8 \text{ mg kg}^{-1}$) que no se diferenciaron entre sí. En el caso del Po estable no se hallaron diferencias significativas entre las tres posiciones topográficas en los primeros 20 cm de suelo y los valores de P estuvieron entre $9,3 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $16,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo). En la profundidad de 20-40 cm la loma ($34,4 \text{ mg kg}^{-1}$) tuvo un contenido de Po estable más alto que la media loma ($21,3 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($22,1 \text{ mg kg}^{-1}$). Por último, en la profundidad

de 40-60 cm no se hallaron diferencias significativas entre las tres posiciones y el contenido de P de esta fracción se encontró entre 39,8 mg kg⁻¹ (bajo) y 46,9 mg kg⁻¹ (media loma) (Figura 3.24).

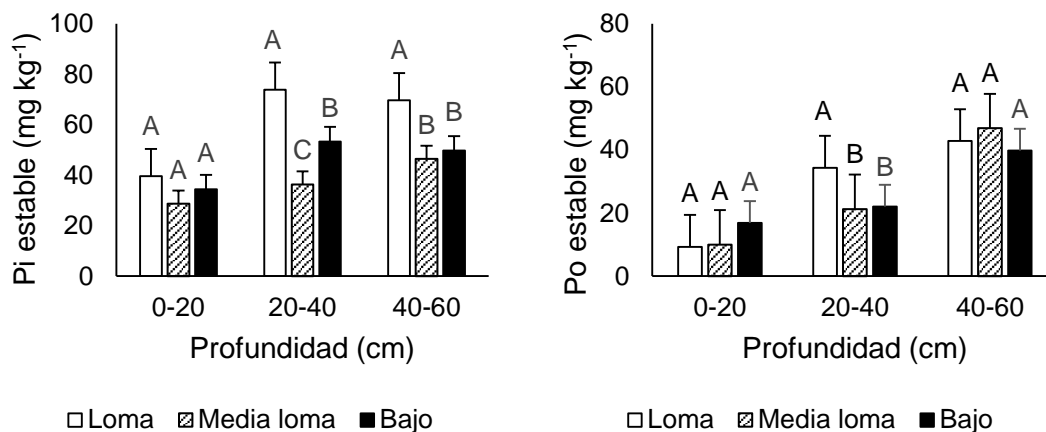


Figura 3.24. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi estable y Po estable en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

El contenido de P total presentó algunas diferencias de acuerdo a la topografía, hallándose en los primeros 40 cm de suelo un contenido inferior de P total en la media loma, respecto a la loma y el bajo. En el caso de la profundidad de 0-20 cm en la loma este fue de 385,9 mg kg⁻¹, en el bajo de 351,4 mg kg⁻¹ y en la media loma descendió a 250,3 mg kg⁻¹. En la profundidad de 20-40 cm el contenido de P total fue de 347,9 mg kg⁻¹ en el bajo, 319,5 mg kg⁻¹ en la loma y disminuyó a 197,1 mg kg⁻¹ en la media loma. Por último, en la profundidad de 40-60 cm el bajo (356,3 mg kg⁻¹) mostró un contenido de P total superior a la media loma (258,6 mg kg⁻¹) y la loma (259,0 mg kg⁻¹), donde no se observaron diferencias significativas (Figura 3.25).

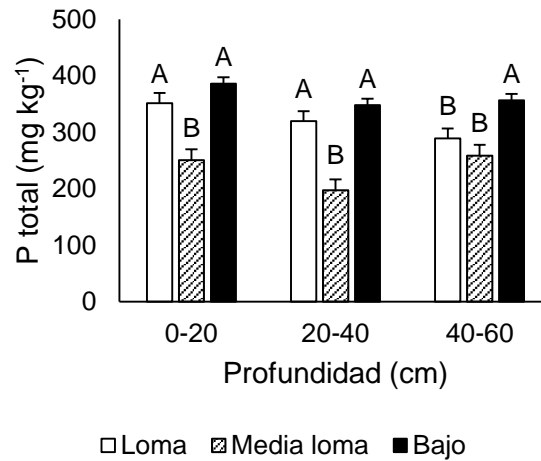


Figura 3.25. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P total en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo agrícola en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

Suelo con vegetación natural en planicie medanosa

En el suelo con vegetación natural de planicie medanosa la topografía tuvo un efecto significativo sobre el P en solución solamente en los primeros 20 cm de suelo, donde la media loma tuvo un contenido más alto de P de esta fracción ($35,6 \text{ mg kg}^{-1}$) que el bajo ($19,9 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($15,0 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 20-40 cm no se hallaron diferencias significativas entre posiciones topográficas y el contenido medio en este caso estuvo entre $11,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) y $16,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma). En la profundidad de 40-60 cm la topografía tampoco tuvo un efecto significativo sobre esta fracción, hallándose un contenido de P entre $4,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) $5,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) (Figura 3.26).

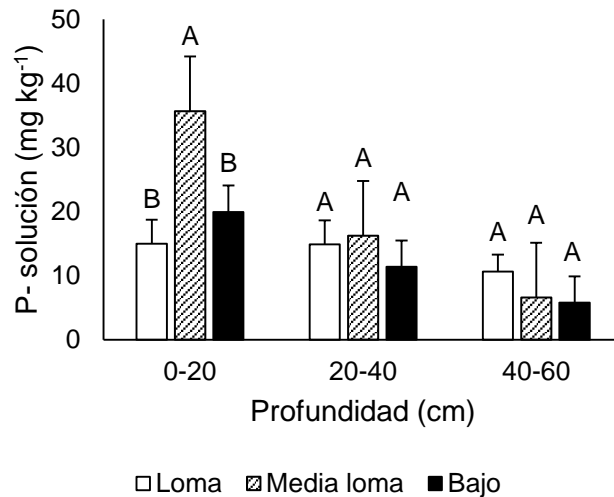


Figura 3.26. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- solución en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

La topografía tuvo un efecto significativo sobre el Pi lábil en los primeros 20 cm de suelo, donde éste disminuyó desde el bajo ($25,1 \text{ mg kg}^{-1}$) hacia la media loma ($21,6 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($14,7 \text{ mg kg}^{-1}$). Sin embargo, en la profundidad de 20-40 cm no se observaron diferencias significativas entre la loma ($9,5 \text{ mg kg}^{-1}$), la media loma ($11,1 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($10,0 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 40-60 cm tampoco se observaron diferencias significativas y el contenido de Pi lábil estuvo entre $9,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $6,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo). Por otro lado, el Po lábil manifestó un efecto significativo de la topografía en los primeros 20 cm de suelo, y su contenido en el bajo fue $19,6 \text{ mg kg}^{-1}$ disminuyendo significativamente en la media loma ($12,9 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($11,3 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 20-40 cm el bajo presentó un contenido más alto de Po lábil ($11,3 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto a la loma ($6,4 \text{ mg kg}^{-1}$), mientras que en la profundidad de 40-60 cm no se encontraron diferencias significativas entre posiciones topográficas, hallándose

un contenido de Po lábil entre 4,0 mg kg⁻¹ (bajo) y 9,2 mg kg⁻¹ (loma) (Figura 3.27).

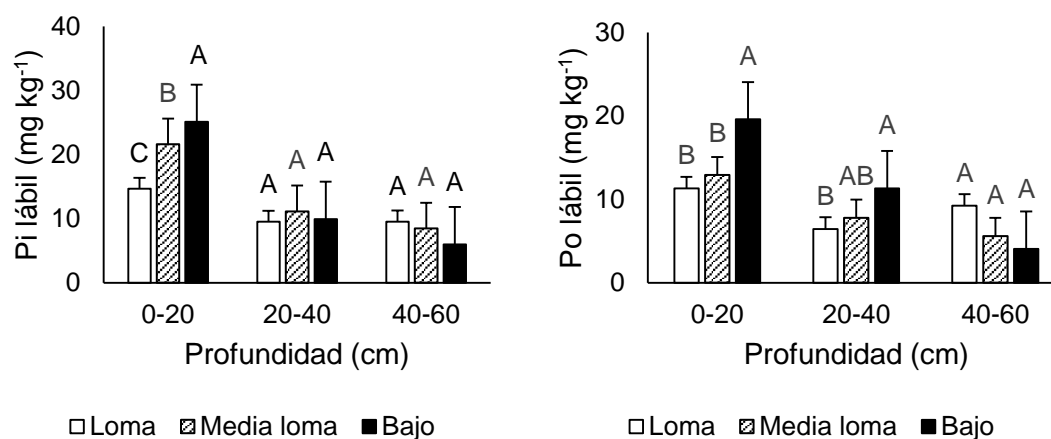


Figura 3.27. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi lábil y Po lábil en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

La topografía no presentó un efecto significativo sobre el Pi- Fe/Al en los primeros 20 cm de suelo, con contenidos de P que se encontraron entre 34,9 mg kg⁻¹ (loma) y 47,2 mg kg⁻¹ (bajo). Sin embargo, en la profundidad de 20-40 cm el suelo de la loma (25,2 mg kg⁻¹) tuvo un contenido de Pi- Fe/Al significativamente más alto que la media loma (12,2 mg kg⁻¹) y el bajo (18,0 v) que no se diferenciaron entre sí. En la profundidad de 40-0 cm se observó que la loma (18,5 mg kg⁻¹) y la media loma (22,7 mg kg⁻¹) presentaban un contenido de P de esta fracción mayor al bajo (11,4 mg kg⁻¹). El Po- Fe/Al no presentó diferencias significativas entre posiciones topográficas en los primeros 20 cm de suelo y el contenido medio estuvo entre 64,3 mg kg⁻¹ (media loma) y 71,5 mg kg⁻¹ (bajo). En la profundidad de 20-40 cm tampoco se observó un efecto significativo de la topografía sobre esta fracción y el contenido de P se halló entre 24,6 mg kg⁻¹

(media loma) y $42,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo). Por otro lado, en la profundidad de 40-60 cm se observó un incremento significativo en el suelo de la loma ($42,2 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto a la media loma ($9,5 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($5,4 \text{ mg kg}^{-1}$), que no se diferenciaron entre sí (Figura 3.28).

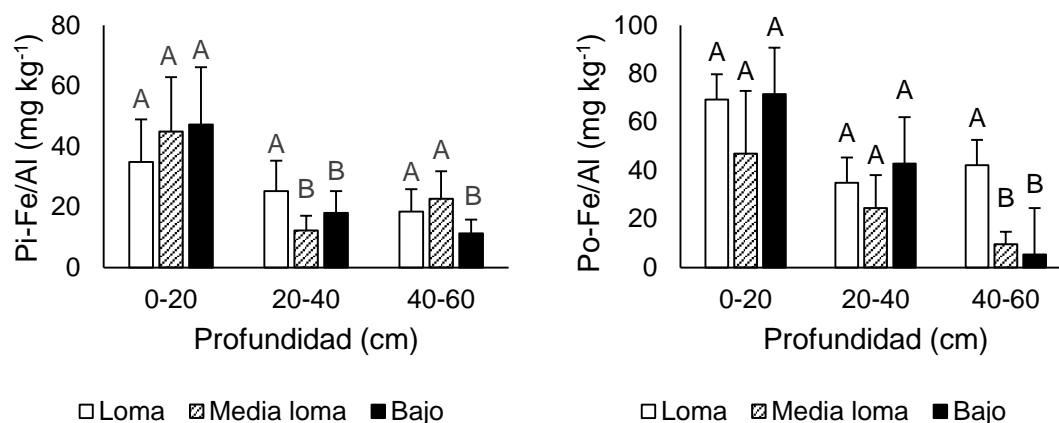


Figura 3.28. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi- Fe/Al y Po- Fe/Al en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

El P- Ca en este caso no manifestó un efecto significativo de la topografía en ninguna de las tres profundidades. En los primeros 20 cm el contenido de P de esta fracción se encontró entre $140,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) y $162,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma); en la profundidad de 40-60 estuvo entre $119,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) y $148,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma); y entre $99,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo) y $129,5 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) para la profundidad de 40-60 cm (Figura 3.29).

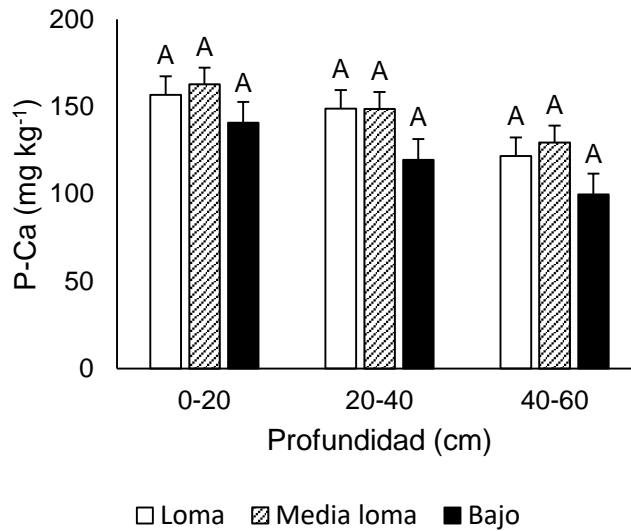


Figura 3.29. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P- Ca en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

La topografía no tuvo un efecto significativo sobre la fracción de P_i estable en los primeros 20 cm, donde el contenido medio se halló entre $38,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (loma) y $35,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma). En la profundidad de 20-40 cm el bajo ($33,1 \text{ mg kg}^{-1}$) presentó un contenido de P_i estable inferior a la media loma ($43,7 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($39,2 \text{ mg kg}^{-1}$). En la profundidad de 40-60 cm la media loma tuvo un contenido de P más alto ($68,7 \text{ mg kg}^{-1}$) que el bajo ($41,1 \text{ mg kg}^{-1}$) y la loma ($33,5 \text{ mg kg}^{-1}$). El P_o estable en los primeros 20 cm no presentó diferencias entre posiciones topográficas y el contenido medio se encontró entre $10,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (media loma) y $16,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (bajo). En la profundidad de 20-40 cm la loma y la media loma presentaron un contenido de P_o estable más alto ($23,0 \text{ mg kg}^{-1}$ y $29,0 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente) que el bajo ($13,9 \text{ mg kg}^{-1}$). Por último, en la profundidad de 40-60 cm la media loma ($33,1 \text{ mg kg}^{-1}$) presentó un contenido de P superior a la loma ($10,4 \text{ mg kg}^{-1}$) y el bajo ($16,3 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 3.30).

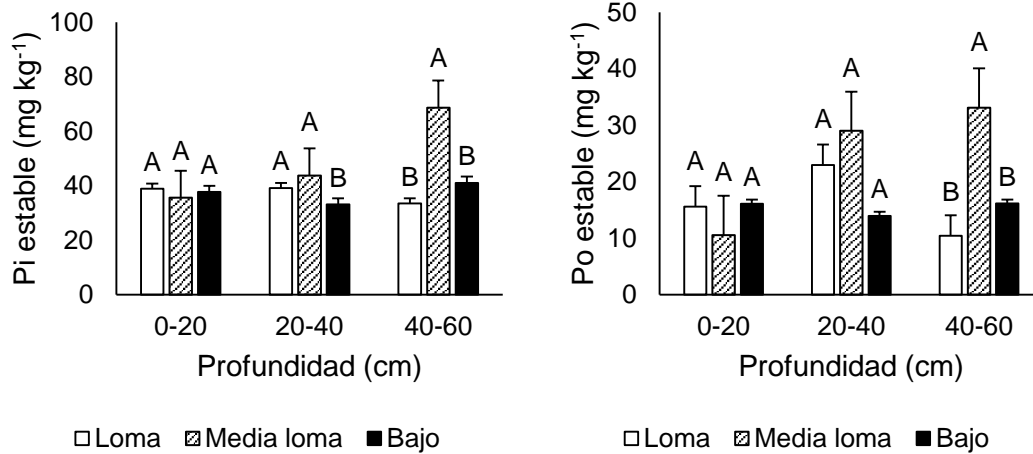


Figura 3.30. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el Pi estable y Po estable en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).

En los primeros 20 cm de suelo el contenido de P total no presentó variaciones en función de la topografía y el contenido medio de P se halló entre 356,4 mg kg⁻¹ (loma) y 388,3 mg kg⁻¹ (media loma). En la profundidad de 20-40 cm la loma (302,0 mg kg⁻¹) tuvo un contenido de P total más alto que el bajo (260,0 mg kg⁻¹), mientras que la media loma no se diferenció de ninguno de los dos (293,4 mg kg⁻¹). En la profundidad de 40-60 cm el bajo tuvo un menor contenido de P (184,7 mg kg⁻¹) respecto a la media loma (284,2 mg kg⁻¹) y la loma (255,8 mg kg⁻¹) que no se diferenciaron entre sí (Figura 3.31).

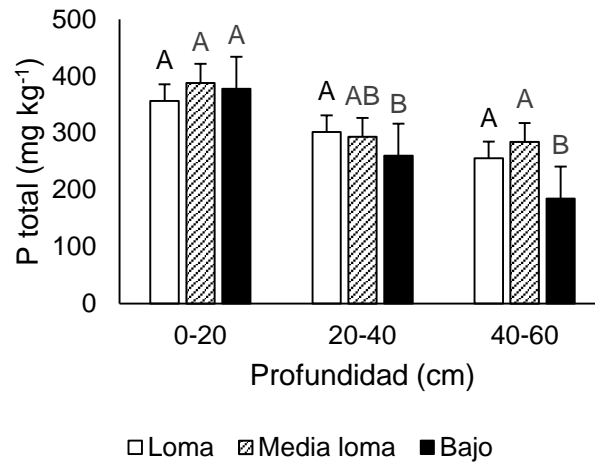


Figura 3.31. Efecto de la topografía (loma, media loma, bajo) sobre el P total en tres profundidades (0-20, 20-40, 40-60 cm) del suelo con vegetación natural en Planicie medanosa. *Barras indican error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada profundidad ($p < 0,05$).*

3.3.9 Efecto de la profundidad del suelo sobre la distribución de las fracciones de P

Se encontraron interacciones significativas entre uso del suelo, posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$) en cada subregión.

Planicie con tosca

Se observó una disminución del P en solución en profundidad en las tres posiciones topográficas y los dos usos de suelo. En el suelo agrícola el P en solución fue mayor en los primeros 20 cm de suelo respecto a las profundidades inferiores que no se diferenciaron entre sí, mientras que en el suelo con vegetación natural las tres profundidades se diferenciaron significativamente, mostrando una estratificación más evidente. El P inorgánico lábil mostró un descenso en profundidad en ambos usos de suelo en el bajo y la media loma, mientras que en la loma agrícola no se observaron diferencias. El P orgánico lábil siguió una tendencia similar en los dos usos de suelo del bajo y en la media loma agrícola. El contenido de P- Fe/Al tanto orgánico como inorgánico también siguió esta tendencia a disminuir en profundidad. A diferencia de estas fracciones, el P- Ca fue la única fracción que se incrementó a mayor profundidad (excepto en la loma agrícola donde no se hallaron diferencias significativas), encontrándose en algunos casos como en bajo agrícola, diferencias entre las tres profundidades, mientras que por ejemplo en la media loma agrícola sólo la profundidad de 0-20 cm se diferenció de las restantes. Por su parte, el contenido de Pi estable disminuyó en profundidad, excepto en la media loma y la loma con uso agrícola donde las diferencias no llegaron a ser significativas. El Po estable, sin embargo, no presentó una tendencia clara, ya que en algunos casos se incrementó en profundidad y en otros se observó una disminución o no hubo

diferencias significativas. Por último, el contenido de P total en general no presentó variaciones en profundidad (Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Efecto de la profundidad (A: agrícola; N: natural) sobre las fracciones de P para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) y los dos usos de suelo (A: agrícola; N: natural) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	Prof (cm)	P (mg kg ⁻¹)								P total
			P solución	P _i	P lábil P _o	P- Fe/Al		P-Ca	P estable		
						P _i	P _o		P _i	P _o	
B	A	0-20	7,9 A	10,0 A	7,4 A	10,1 A	62,0 A	228,7 C	65,5 A	37,4 A	422,1 A
		20-40	3,1 B	3,0 B	5,2 B	4,8 B	31,5 B	272,7 B	63,8 A	34,5 A	418,7 A
		40-60	2,9 B	3,6 B	4,6 B	6,4 B	37,9 B	312,0 A	48,1 B	20,7 B	436,1 A
	N	0-20	12,3 A	7,6 A	9,4 A	13,5 A	59,0 A	228,0 B	65,4 A	25,9 A	421,0 A
		20-40	4,5 B	5,1 B	4,6 B	7,9 B	38,3 B	275,8 A	43,4 B	20,8 A	400,5 A
		40-60	3,0 C	4,4 B	4,9 B	6,5 B	30,5 B	282,0 A	41,9 B	21,2 A	394,5 A
ML	A	0-20	4,8 A	4,8 A	6,6 A	9,6 A	41,2 A	205,9 B	57,0 A	19,2 B	352,5 B
		20-40	3,5 B	4,2 A	4,6 B	9,0 A	41,4 A	255,7 A	42,2 A	19,6 B	380,1 A
		40-60	2,2 B	2,8 B	5,2 B	3,1 B	26,2 B	259,6 A	55,8 A	27,2 A	382,1 A
	N	0-20	12,1 A	7,9 A	5,5 A	13,3 A	51,7 A	229,6 B	56,8 A	26,1 B	400,8 A
		20-40	5,4 B	3,6 B	6,2 A	3,9 B	23,3 C	233,6 B	46,3 B	42,9 A	365,3 B
		40-60	3,1 C	3,3 B	5,8 A	6,5 B	33,3 B	277,0 A	39,8 C	22,0 B	390,8 A
L	A	0-20	4,4 A	3,5 A	2,5 B	7,5 A	49,1 A	210,4 A	56,9 A	38,3 A	372,7 A
		20-40	2,8 B	2,3 A	6,55A	4,8 A	33,7 B	238,4 A	53,7 A	32,3 A	375,2 A
		40-60	2,5 B	5,1 A	3,7 B	4,9 A	22,9 C	206,1 A	55,8 A	22,7 B	323,9 A
	N	0-20	8,1 A	7,2 A	7,5 A	13,3 A	57,1 A	169,3 B	50,6 A	21,4 B	334,6 A
		20-40	4,7 B	2,9 B	4,9 B	8,8 B	46,2 B	248,4 A	34,8 B	21,2 B	372,0 A
		40-60	3,4 C	6,2 A	9,3 A	4,7 C	31,8 C	207,4 A	43,2 B	44,8 A	351,9 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre profundidades para cada posición topográfica y uso de suelo (p < 0,05).

Planicie medanosa

En Planicie medanosa el P en solución disminuyó en profundidad, similar a lo observado en los suelos de Planicie con tosca. En los suelos con vegetación natural en las posiciones de bajo y media loma se hallaron diferencias entre las tres profundidades indicando una estratificación más marcada que en sus pares

con uso agrícola. Las formas de P lábil, tanto orgánica como inorgánica también mostraron un descenso en profundidad y en todos los casos se observó un contenido más alto en los primeros 20 cm, diferenciándose en algunas situaciones los dos estratos inferiores y en otras no. El Pi- Fe/Al disminuyó en profundidad en todos los casos excepto en la loma con uso agrícola y el contenido de Po de esta fracción fue más alto en todas las situaciones en los primeros 20 cm, disminuyendo en profundidad. El P- Ca presentó variaciones en profundidad solamente en el bajo y la media loma agrícola, donde hubo un incremento en la profundidad de 40-60 cm. El Pi estable no presentó diferencias entre profundidades en la loma y el bajo con vegetación natural, sin embargo, en el resto de los suelos se observó un incremento en profundidad. El Po estable disminuyó en profundidad en la loma con vegetación natural, mientras que en la loma y la media loma agrícola y la media loma con vegetación natural se observó un incremento en profundidad, no hallándose diferencias en ninguno de los dos usos de suelo del bajo. Con respecto al contenido de P total, en general se encontró un descenso en profundidad (Tabla 3.14).

Tabla 3.14. Efecto de la profundidad (A: agrícola; N: natural) sobre las fracciones de P para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) y los dos usos de suelo (A: agrícola; N: natural) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	Prof (cm)	P (mg kg ⁻¹)								P total
			P solución	P lábil		P- Fe/Al		P-Ca	P estable		
			P _i	P _o	P _i	P _o	P _i	P _o	P _i	P _o	
B	A	0-20	47,6 A	15,6 A	8,7 A	20,6 A	47,8 A	194,3 B	34,4 B	16,9 A	385,9 A
		20-40	49,6 A	10,4 B	3,4 B	18,5 A	6,8 C	183,8 B	53,3 A	22,0 A	347,9 B
		40-60	40,9 B	6,7 C	3,0 B	7,7 B	20,9 B	211,5 A	49,8 A	15,8 A	356,3 B
	N	0-20	19,9 A	25,1 A	19,6 A	47,2 A	71,5 A	140,8 A	37,7 A	16,1 A	378,0 A
		20-40	11,4 B	10,0 B	11,3 B	18,0 B	42,8 B	119,5 A	33,1 A	13,9 A	260,0 B
		40-60	5,8 C	6,0 C	4,0 C	11,3 C	5,3 C	99,8 A	41,1 A	16,1 A	184,7 C
ML	A	0-20	29,8 A	12,6 A	6,7 A	19,0 A	26,6 A	116,6 B	28,8 C	10,0 B	250,3 A
		20-40	8,9 B	5,7 C	2,0 B	5,2 B	17,7 B	99,9 B	36,4 B	21,3 A	197,0 B
		40-60	10,3 B	8,1 B	3,5 B	6,6 B	18,6 B	140,2 A	46,5 A	24,7 A	258,6 A
	N	0-20	35,6 A	21,6 A	12,9 A	44,8 A	47,0 A	162,8 A	35,6 C	10,6 B	388,3 A
		20-40	16,6 B	11,1 B	7,8 B	12,2 C	24,6 B	148,8 A	43,7 B	29,0 A	293,4 B
		40-60	6,6 C	8,5 B	5,6 B	22,7 B	9,5 C	129,5 A	68,7 A	33,1 A	284,2 B
L	A	0-20	9,7 A	8,8 A	20,7 A	28,5 A	94,7 A	139,9 A	39,6 B	9,3 B	351,4 A
		20-40	4,8 B	6,1 AB	11,5 B	24,8 A	28,8 B	135,3 A	73,8 A	34,4 A	319,5 B
		40-60	6,6 B	4,6 B	7,6 C	20,8 A	6,1 C	144,2 A	69,7 A	29,1 A	289,0 C
	N	0-20	15,0 A	14,7 A	11,3 A	34,9 A	69,3 A	156,8 A	38,9 A	15,6 A	356,4 A
		20-40	14,9 A	9,5 B	6,4 B	25,2 B	34,9 B	148,9 A	39,2 A	22,9 A	302,0 B
		40-60	10,6 B	9,6 B	9,2 B	18,5 C	42,2 B	121,7 A	33,5 A	10,4 B	255,8 C

Letras diferentes indican diferencias significativas entre profundidades para cada posición topográfica y uso de suelo ($p < 0,05$).

3.3.10 Efecto del uso del suelo sobre la distribución de las fracciones de P

Suelo de Planicie con tosca

En los primeros 20 cm de suelo en Planicie con tosca se observó una diferencia significativa del P en solución en el suelo agrícola respecto al suelo con vegetación natural en las tres posiciones topográficas (Tabla 3.15). En el suelo del bajo el P en solución fue de 12,3 mg kg⁻¹ en el suelo natural (N) y 7,9 mg kg⁻¹ en el suelo agrícola (A), en la media loma estos valores fueron de 12,1 mg kg⁻¹ (N) y 4,8 mg kg⁻¹ (A) y en la loma de 8,1 mg kg⁻¹ (N) y 4,4 mg kg⁻¹ (A). En la profundidad de 20-40 cm el efecto del uso del suelo fue similar ya que en las tres posiciones el suelo agrícola manifestó un valor menor del P en solución, en el caso los valores fueron de 4,5 mg kg⁻¹ (N) y 3,1 mg kg⁻¹ (A), en la media loma de 5,4 mg kg⁻¹ (N) y 3,5 mg kg⁻¹ (A) y en la loma de 4,7 mg kg⁻¹ (N) y 2,8 mg kg⁻¹ (A). Sin embargo, en la profundidad de 40-60 cm sólo se observaron diferencias en la loma, donde el suelo con vegetación natural presentó 4,4 mg kg⁻¹ de P en solución y el agrícola 2,5 mg kg⁻¹.

Tabla 3.15. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P- solución para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	P- solución (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	7,9 B	3,1 B	2,9 A
	N	12,3 A	4,5 A	3,0 A
ML	A	4,8 B	3,5 B	2,2 A
	N	12,1 A	5,4 A	3,1 A
L	A	4,4 B	2,8 B	2,5 B
	N	8,1 A	4,7 A	4,4 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El Pi lábil presentó un comportamiento similar al P en solución en el suelo de la media loma y la loma en los primeros 20 cm, donde los contenidos fueron de 7,9 mg kg⁻¹ (N) y 4,8 mg kg⁻¹ (A) y de 7,2 mg kg⁻¹ (N) y 3,5 mg kg⁻¹ (A), respectivamente, mientras que en el bajo no se observaron diferencias significativas del uso del suelo. En la profundidad de 20-40 cm el uso del suelo no tuvo un efecto significativo sobre esta fracción y lo mismo se observó en la profundidad de 40-60 cm. Por otro lado, en los primeros 20 cm de suelo, el Po lábil se diferenció significativamente (7,6 mg kg⁻¹ (N) y 2,5 mg kg⁻¹ (A)) en la loma, mientras que en la media loma y el bajo las diferencias no fueron significativas. En la profundidad de 0-20 cm no se hallaron diferencias significativas entre usos de suelo en ninguna de las tres posiciones topográficas y para la profundidad de 40-60 cm sólo se observaron diferencias significativas en la loma, encontrándose un contenido de Po lábil de 9,3 mg kg⁻¹ (N) y 3,7 mg kg⁻¹ (A) (Tabla 3.16).

Tabla 3.16. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi lábil y Po lábil para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	Pi lábil (mg kg ⁻¹)			Po lábil (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	10,0 A	3,0 A	3,6 A	7,4 A	5,2 A	4,6 A
	N	7,6 A	5,1 A	4,4 A	9,4 A	4,6 A	4,9 A
ML	A	4,8 B	4,2 A	2,8 A	6,6 A	4,6 A	5,2 A
	N	7,9 A	3,6 A	3,3 A	5,5 A	6,2 A	5,8 A
L	A	3,5 B	2,3 A	5,1 A	2,5 B	6,6 A	3,7 B
	N	7,2 A	2,9 A	6,2 A	7,6 A	5,0 A	9,3 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

En los primeros 20 cm de suelo el Pi- Fe/Al sólo mostró diferencias entre usos de suelo en la loma, donde los valores fueron de 13,3 mg kg⁻¹ (N) y 7,5 mg kg⁻¹ (A), mientras que en la media loma y el bajo las diferencias no fueron significativas. En la profundidad de 20-40 cm y de 40-60 cm no se observó un efecto significativo del uso del suelo en ninguna de las tres posiciones topográficas. El Po-Fe/Al no manifestó un efecto significativo del uso del suelo en las profundidades de 0-20 cm y de 40-60 cm y en la profundidad de 20-40 cm se observó un mayor contenido de P en el suelo con vegetación natural en media loma respecto al suelo agrícola, mientras que en la loma se observó lo contrario (Tabla 3.17).

Tabla 3.17. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi- Fe/Al y Po- Fe/Al para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	Pi- Fe/Al (mg kg ⁻¹)			Po- Fe/Al (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	10,1 A	4,8 A	6,4 A	62,0 A	31,5 A	37,9 A
	N	13,5 A	7,9 A	6,6 A	59,0 A	38,3 A	30,5 A
ML	A	9,6 A	9,0 A	3,1 A	41,2 A	41,4 A	26,2 A
	N	13,6 A	3,9 A	6,5 A	49,5 A	23,3 B	33,3 A
L	A	7,5 B	4,8 A	4,9 A	49,1 A	33,7 B	22,9 A
	N	13,3 A	8,8 A	4,7 A	57,1 A	46,2 A	31,8 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El P- Ca presentó diferencias entre usos de suelo sólo en la loma en la profundidad de 0-20 cm, donde se observó una diferencia significativa con un mayor valor en el suelo agrícola (210,4 mg kg⁻¹) respecto al suelo con vegetación natural (169,3 mg kg⁻¹) (Tabla 3.18).

Tabla 3.18. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P- Ca para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	P- Ca (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	228,6 A	272,7 A	312,0 A
	N	228,0 A	275,8 A	282,0 A
ML	A	205,9 A	255,7 A	259,6 A
	N	229,6 A	233,6 A	277,0 A
L	A	210,4 A	238,4 A	206,1 A
	N	169,3 B	248,4 A	207,4 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

En la profundidad de 0-20 cm no se halló una interacción significativa entre subregión, posición topográfica y uso del suelo para el Pi estable, aunque la interacción entre subregión y uso fue significativa, encontrándose un contenido más alto de P de esta fracción en el suelo agrícola (61,0 mg kg⁻¹) respecto al suelo con vegetación natural (57,6 mg kg⁻¹). En la profundidad de 20-40 cm el Pi estable fue mayor en el suelo agrícola tanto en el bajo como en la loma, mientras que en la media loma no se hallaron diferencias significativas. En la profundidad de 40-60 cm el bajo no presentó diferencias significativas entre usos de suelo y en la media loma y la loma el suelo agrícola tuvo un contenido de Pi estable más alto que el suelo con vegetación natural. Por otro lado, el Po estable en la profundidad de 0-20 cm sólo mostró diferencias entre usos en la loma, donde el contenido de Po estable fue 38,3 mg kg⁻¹ (A) y 21,5 mg kg⁻¹ (N). En la profundidad de 20-40 cm sólo se hallaron diferencias en el suelo de la media loma donde el suelo natural presentó un contenido más alto que el agrícola, mientras que en la profundidad de 40-60 cm se observaron diferencias en el bajo, donde el suelo

natural también tuvo un contenido más alto de Po estable que el suelo agrícola.

(Tabla 3.19).

Tabla 3.19. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi estable y Po estable para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Uso	Pi estable (mg kg ⁻¹)	Posición	Uso	Pi estable (mg kg ⁻¹)		Po estable (mg kg ⁻¹)		
				20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
	0-20 cm							
A	61,0 A	B	A	63,8 A	48,0 A	37,4 A	34,5 A	20,68 A
N	57,6 B		N	43,4 B	41,9 A	25,9 A	20,8 A	21,19 A
		ML	A	42,2 A	55,8 A	19,2 A	19,6 B	27,24 A
			N	46,3 A	39,8 B	26,1 A	42,9 A	22,00 A
		L	A	53,9 A	56,0 A	38,3 A	32,4 A	22,73 B
			N	34,8 B	43,2 B	21,5 B	21,2 A	44,82 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El contenido de P total no manifestó un efecto significativo del uso del suelo en ninguna de las tres profundidades y esto fue así tanto para el suelo de loma, como de media loma y bajo (Tabla 3.20).

Tabla 3.20. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P total para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie con tosca.

Posición	Uso	P total (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	422,1 A	418,7 A	436,1 A
	N	421,0 A	400,5 A	395,5 A
ML	A	352,5 A	380,1 A	382,1 A
	N	400,8 A	365,3 A	390,8 A
L	A	372,7 A	375,2 A	323,9 A
	N	334,6 A	372,0 A	351,9 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

Suelo de Planicie medanosa

En los primeros 20 cm de suelo, en el bajo se halló un contenido más alto de P en solución en el suelo agrícola ($47,6 \text{ mg kg}^{-1}$) respecto al suelo natural ($19,9 \text{ mg kg}^{-1}$), sin embargo, en la loma se observaron valores de $9,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (A) a $15,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (N), mientras que en la media loma las diferencias no fueron significativas. En la profundidad de 20-40 cm, excepto en el caso del bajo donde el suelo agrícola presentó un mayor valor de P en solución respecto al natural, en la media loma y la loma se observaron valores más altos en el suelo con vegetación natural. En la profundidad de 40-60 cm en el bajo el P en solución continuó siendo superior en el suelo agrícola, mientras que en la media loma y la loma las diferencias entre usos de suelo no fueron significativas (Tabla 3.21).

Tabla 3.21. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P- solución para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	P- solución (mg kg^{-1})		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	47,6 A	49,6 A	40,9 A
	N	19,9 B	11,4 B	5,8 B
ML	A	29,8 A	8,9 B	10,3 A
	N	35,6 A	16,2 A	6,6 A
L	A	9,7 B	4,8 B	6,6 A
	N	15,0 A	14,9 A	10,6 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El Pi lábil en los primeros 20 cm fue más alto en el suelo con vegetación natural, en el bajo el valor más alto se encontró en el suelo agrícola ($15,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (A) a $25,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (N)), en la media loma del mayor valor fue de suelo natural ($12,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (A) a $21,6 \text{ mg kg}^{-1}$ (N)) al igual que en la loma ($8,8 \text{ mg kg}^{-1}$ (A) a $14,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (N)).

kg⁻¹ (N)). En la profundidad de 20-40 cm estas diferencias se mantuvieron sólo en la media loma, donde el Pi lábil fue de 11,1 mg kg⁻¹ (N) y 5,7 mg kg⁻¹ (A) y en la loma donde estos valores fueron de 9,5 mg kg⁻¹ (N) y 6,1 mg kg⁻¹ (A). En la profundidad de 40-60 cm el efecto del uso del suelo solamente se observó en la loma, con un valor más alto en el suelo natural (9,6 mg kg⁻¹ (N) y 4,6 mg kg⁻¹ (A)). El Po lábil, en los primeros 20 cm también tuvo un valor menor en el suelo agrícola en el bajo (19,6 mg kg⁻¹ (N) y 8,8 mg kg⁻¹ (A)) y la media loma (12,9 mg kg⁻¹ (N) y 6,7 mg kg⁻¹ (A)), mientras que en la loma no se hallaron diferencias significativas. En la profundidad de 20-40 cm en el bajo y la media loma también se observó un menor valor del Po lábil en el suelo agrícola (3,4 mg kg⁻¹ y 2,0 mg kg⁻¹, respectivamente), respecto al natural (11,3 mg kg⁻¹ y 7,8 mg kg⁻¹), sin embargo, en la loma el suelo agrícola mostró un mayor valor. En la profundidad de 40-60 cm el uso del suelo ya no tuvo un efecto significativo sobre esta fracción (Tabla 3.22).

Tabla 3.22. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi lábil y Po lábil para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	Pi lábil (mg kg ⁻¹)			Po lábil (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	15,6 B	10,4 A	6,7 A	8,8 B	3,4 B	3,0 A
	N	25,1 A	10,0 A	6,0 A	19,6 A	11,3 A	4,0 A
ML	A	12,6 B	5,7 B	8,1 A	6,7 B	2,0 B	3,5 A
	N	21,6 A	11,1 A	8,5 A	12,9 A	7,8 A	5,6 A
L	A	8,8 B	6,1 B	4,6 B	20,8 A	11,6 A	7,6 A
	N	14,7 A	9,5 A	9,6 A	11,3 A	6,4 B	9,2 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El uso del suelo tuvo un efecto significativo sobre el Pi-Fe/Al en los primeros 20 cm de suelo, donde se observó un mayor valor en el suelo natural en el bajo (20,6 mg kg⁻¹ (A) a 47,2 mg kg⁻¹ (N)) y la media loma (19,0 mg kg⁻¹ (A) a 44,8 mg kg⁻¹ (N)). En la profundidad de 20-40 cm esto se observó sólo en la media loma, donde el Pi-Fe/Al fue mayor en el suelo natural (5,2 mg kg⁻¹ (A) a 12,2 mg kg⁻¹ (N)), mientras que el bajo y la loma no presentaron diferencias significativas entre usos de suelo. En la profundidad de 40-60 se observó lo mismo y en este caso en la media loma se hallaron valores de 6,6 mg kg⁻¹ (A) y 22,7 mg kg⁻¹ (N). El Po-Fe/Al, en la profundidad de 0-20 cm fue más alto en el suelo natural en el caso del bajo (47,8 mg kg⁻¹ (A) y 71,5 mg kg⁻¹ (N)), y la media loma (26,6 mg kg⁻¹ (A) a 64,3 mg kg⁻¹ (N)). Por otro lado, en la loma se encontró un mayor contenido de Po-Fe/Al en el suelo agrícola (94,7 mg kg⁻¹), respecto al natural (69,3 mg kg⁻¹). En la profundidad de 20-40 sólo se observaron diferencias significativas entre usos de suelo en el bajo, (6,8 mg kg⁻¹ (A) y 42,8 mg kg⁻¹ (N)). En la profundidad de 40-60 cm no se halló un patrón claro ya que en el bajo el suelo agrícola presentó un contenido más alto de Po-Fe/Al, en la media loma no se hallaron diferencias significativas y en la loma el suelo natural tuvo un valor más alto de Po-Fe/Al (Tabla 3.23).

Tabla 3.23. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi- Fe/Al y Po-Fe/Al para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	Pi- Fe/Al (mg kg ⁻¹)			Po- Fe/Al (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	20,6 B	18,5 A	7,7 A	47,8 B	6,8 B	20,9 A
	N	47,2 A	18,0 A	11,4 A	71,5 A	42,8 A	5,4 B
ML	A	19,0 B	5,2 B	6,6 B	26,6 B	17,7 A	18,7 A
	N	44,8 A	12,2 A	22,7 A	64,3 A	24,6 A	9,5 A
L	A	28,5 A	24,8 A	20,8 A	94,7 A	28,8 A	16,1 B
	N	34,9 A	25,2 A	18,5 A	69,3 B	34,9 A	42,2 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El contenido de P-Ca en el caso del bajo fue superior en el suelo agrícola, en la profundidad de 0-20 cm (140,8 mg kg⁻¹ (N) y 194,3 mg kg⁻¹ (A)), en la profundidad de 20-40 cm (119,8 mg kg⁻¹ (N) y 183,8 mg kg⁻¹ (A)) y en la profundidad de 40-60 cm (99,8 mg kg⁻¹ (N) y 211,5 mg kg⁻¹ (A)). Por otro lado, en la media loma y la loma no se hallaron diferencias significativas entre usos de suelo en ninguna de las tres profundidades (Tabla 3.24).

Tabla 3.24. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P- Ca para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	P- Ca (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	194,3 A	183,8 A	211,5 A
	N	140,8 B	119,5 B	99,8 B
ML	A	116,6 A	130,5 A	140,2 A
	N	162,8 A	148,8 A	129,5 A
L	A	140,0 A	135,3 A	144,2 A
	N	156,8 A	148,9 A	121,7 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

El Pi estable en la profundidad de 0-20 cm no presentó interacción entre los factores subregión, uso y posición topográfica a diferencia de las demás fracciones, sin embargo, se encontró una interacción significativa entre subregión y uso, sin hallarse diferencias significativas entre usos para esta subregión. En la profundidad de 20-40 cm se observaron mayores valores de Pi estable en los suelos agrícolas del bajo (53,3 mg kg⁻¹) y la loma (73,8 mg kg⁻¹) respecto a los suelos con vegetación natural (33,1 mg kg⁻¹ y 39,2 mg kg⁻¹, respectivamente). En la profundidad de 40-60 cm estas diferencias sólo pudieron observarse en la loma (33,5 mg kg⁻¹ (N) y 69,8 mg kg⁻¹ (A)). El Po estable no tuvo diferencias significativas entre usos de suelo en ninguna de las tres posiciones para las profundidades de 0-20 y 20-40 cm, mientras que en la profundidad de 40-60 cm se observaron diferencias entre usos sólo en el suelo de la loma (Tabla 3.25).

Tabla 3.25. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el Pi estable y Po estable para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Uso	Pi estable (mg kg ⁻¹) 0-20 cm	Posición	Uso	Pi estable (mg kg ⁻¹)		Po estable (mg kg ⁻¹)		
				20-40 (cm)	40-60 (cm)	0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
A	34,3 A	B	A	53,3 A	49,8 A	16,9 A	22,1 A	39,8 A
			N	33,1 B	41,1 A	16,1 A	13,9 A	20,4 A
N	37,4 A	ML	A	36,4 A	46,5 A	10,0 A	21,3 A	46,9 A
			N	43,7 A	68,7 A	10,6 A	29,0 A	48,3 A
		L	A	73,8 A	69,8 A	9,3 A	34,4 A	42,9 B
			N	39,2 B	33,5 B	15,6 A	23,0 A	61,9 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

En los primeros 20 cm de suelo el contenido de P total sólo se diferenció entre usos de suelo en la media loma (388,3 mg kg⁻¹ (N) y 250,0 mg kg⁻¹ (A)). Mientras

que en las profundidades de 20-40 y de 40-60 cm en el bajo se observó una tendencia inversa con mayor valor en el suelo agrícola, mientras que en la media loma se observó un contenido más alto en el suelo natural (293,4 mg kg⁻¹) respecto al agrícola (197,1 mg kg⁻¹) y en la loma no se hallaron diferencias significativas. (Tabla 3.26).

Tabla 3.26. Efecto del uso del suelo (A: agrícola; N: natural) sobre el P total para cada posición topográfica (B: bajo; ML: media loma; L: loma) en las tres profundidades (0-20; 20-40; 40-60 cm) para Planicie medanosa.

Posición	Uso	P total (mg kg ⁻¹)		
		0-20 (cm)	20-40 (cm)	40-60 (cm)
B	A	385,9 A	347,9 A	356,3 A
	N	378,0 A	260,0 B	184,7 B
ML	A	250,0 B	197,1 B	258,6 A
	N	388,3 A	293,4 A	284,2 A
L	A	351,4 A	319,5 A	259,0 A
	N	356,4 A	302,0 A	255,8 A

Letras diferentes indican diferencias significativas entre A y N para cada posición topográfica y profundidad ($p < 0,05$).

3.4 DISCUSIÓN

3.4.1 Efecto de geomorfología- subregión

La geomorfología de la región fue uno de los principales factores que afectó la distribución de las fracciones de P originando las diferencias observadas entre PM y PT. La pendiente regional de la costra calcárea hacia el Este ha generado una acumulación diferencial de sedimentos eólicos (Zárate y Tripaldi, 2012) y en PT la proximidad de la costra calcárea ha promovido la abundancia de Ca en el perfil del suelo, favoreciendo la formación de minerales secundarios de P ligado a Ca. Por otro lado, en PM, donde el espesor de los depósitos eólicos sobre el manto calcáreo es considerablemente mayor, disminuye el contenido de Ca intercambiable, encontrándose una menor proporción de P ligado a Ca.

El régimen de humedad es uno de los factores que controla la evolución y el desarrollo de los suelos, siendo capaz de afectar de manera diferencial las propiedades edáficas y particularmente las características del P (Ippolito et al., 2010). Al comparar las dos unidades geomorfológicas, las precipitaciones se incrementan hacia el Este, lo cual se ve reflejado en el régimen de humedad descrito en los perfiles de suelo, el cual cambia de ústico en PT a údico y ácuico en PM. Si bien estos suelos pertenecen a una región subhúmeda- seca y son poco desarrollados, se observaron diferencias en el grado de evolución entre ambas unidades geomorfológicas. En PM, el régimen más húmedo ha favorecido la intensidad de los procesos de meteorización, lo cual puede relacionarse con el menor contenido de P total hallado en esta subregión. Esto coincide con el modelo conceptual de Yang y Post (2011), que sostiene que el P total disminuye conforme al grado de evolución del suelo. La diferencia en el régimen de humedad también podría ser otro factor que explique el menor contenido de P

ligado a Ca en PM, donde por un lado la meteorización de la apatita ha sido mayor, y por otro lado la lixiviación de cationes básicos como el Ca ha sido más intensa. Esto reduce el efecto del Ca sobre la disponibilidad de P, lo cual es característico de la mayoría de las regiones semiáridas (Cross y Schlesinger, 2001).

Los fosfatos de Ca pueden estar presentes como fosfato monocálcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), brushita ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), monetita (CaHPO_4), fosfato octocálcico ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), hidroxiapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), y fluoroapatita ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$). Los resultados mostraron que la fracción de P ligado a Ca aumentó con el contenido de CaCO_3 y de Ca intercambiable. En PM, particularmente, la fracción de P ligada a Ca estuvo asociada con el contenido de CaCO_3 pero no con el Ca intercambiable, mientras que en PT esta fracción se asoció principalmente con el contenido de CaCO_3 y con la relación Ca:FeAl. Esto indicaría que los procesos de formación de minerales de P-Ca presentan diferencias entre ambas unidades geomorfológicas. Tunesi et al. (1999) sugirieron que, en suelos con concentraciones significativas de Ca intercambiable, como en PT, el mecanismo dominante es la precipitación de fosfatos de Ca. Mientras en PM el P estaría principalmente adsorbido sobre las partículas de CaCO_3 , conservando mayor solubilidad debido a que el P adsorbido aparentemente no es incorporado en la red cristalina de la calcita (Sørensen et al., 2011). En PT el régimen de humedad más seco favorecería la transformación de fosfato de Ca en formas termodinámicamente más estables (Carreira et al., 2006). Además, en PT la asociación entre la fracción de P ligado a Ca y la relación Ca:FeAl indicaría una competencia entre Ca, Fe y Al por la adsorción de P.

Varios autores han descrito una relación entre el P y el Fe y Al en suelos no calcáreos (Brennan et al., 1994; Nwoke et al., 2003), y en algunos casos solo con Al (Daly et al., 2015). En PM, la presencia de Fe podría ser producto de la meteorización de la ceniza volcánica (Buschiazzo et al., 1998), y podría conferir a estos suelos una alta capacidad de retención de P (Wisawapipat et al., 2009). Esto se confirmó por el mayor contenido de P inorgánico ligado a Fe y Al en PM, indicando que en este suelo el mecanismo de sorción de P sobre hidróxidos de Fe y Al sería más relevante que en PT. Además, el hecho de que el P en solución estuvo relacionado positivamente a P-Ca, mientras que el P-Fe/Al tuvo una influencia negativa sobre la disponibilidad de P confirmaría la importancia de hierro y aluminio en esta región.

Daly et al. (2015) hallaron una relación negativa entre P-Ca y P-Fe/Al, lo cual sugiere que estas fracciones tienen un rol antagónico en el control de la disponibilidad de P. Los resultados mostraron que la fracción de P ligado a Fe y Al tuvo un efecto negativo del Ca y positivo del Fe y Al, y que, si bien el contenido de Fe y Al no fue superior en PM, la fracción de P ligado a Fe y Al resultó mayor en esta región que en PT. Esto implica que en PT el alto contenido de Ca desplazaría el equilibrio hacia la formación de fosfatos de Ca mientras que en PM predominaría la adsorción de P sobre minerales amorfos de Fe y Al. Esto además fue evidenciado por el hecho de que, en PT, el P ligado a Fe y Al estuvo afectado negativamente por el contenido de Ca y CaCO_3 , pero no mostró una relación con el contenido de Fe y Al, como sí lo hizo en PM. Además, en PT el P ligado a Fe y Al estuvo relacionado con el pH y se observó un aumento en esta fracción con aumentos de pH entre 7,0 y 7,6.

En estos suelos el P en solución puede encontrarse principalmente como H_2PO_4^- a pH menores a 7,2 y por encima de este valor su forma predominante es HPO_4^{2-} . El contenido de P en solución fue significativamente superior en PM, así como también el de P lábil. En ambas regiones, el P en solución estuvo afectado positivamente por el P lábil, similar a resultados de un meta-análisis de data de fraccionamiento de P de un amplio rango de condiciones edáficas (Hou et al., 2016). Además, en PM hubo un efecto positivo del P-Ca y negativo del P-Fe/Al, mientras que en PT el efecto adicional fue solo del P-Fe/Al, teniendo en ambos casos una fuerte influencia del P lábil. Esto refleja la importancia del P lábil para el mantenimiento de una adecuada biodisponibilidad de P en suelos de diferente mineralogía, o como en este caso, diferente grado de meteorización. La comparación entre las dos subregiones indica que, en los suelos más meteorizados de PM, tanto el P en solución como el P lábil son mayores que en PT, revelando que los suelos calcáreos tienen menor biodisponibilidad de este elemento.

Klotzbücher et al.(2019) analizaron los diferentes pasos de extracción del método de Hedley con el objetivo de comprender los mecanismos subyacentes que determinan su biodisponibilidad y encontraron que, desde la tercera fracción en adelante, aquí llamada P-Fe/Al, las fases minerales disuelven y liberan P en forma conjunta, haciendo imposible la identificación de la fuente exacta de P y si es liberada por desorción o disolución. Sin embargo, las dos primeras fracciones minerales simulan los mecanismos de la raíz para la adquisición de P, y por lo tanto deberían ser considerados para estimar la biodisponibilidad de P en diferentes suelos.

Por otro lado, los resultados mostraron que suelos desarrollados en áreas de diferente geomorfología y con distintas condiciones de meteorización, difieren en las fracciones más recalcitrantes y estas diferencias pudieron ser explicadas principalmente por el estado de meteorización de los suelos, determinado por el régimen de humedad, el pH y el contenido de Ca intercambiable.

Como se describió anteriormente, los mecanismos tendientes a la fijación de P ejercen un efecto más importante en PT y esto, consecuentemente, afecta su inmediata disponibilidad para las plantas. En este sitio, el P en solución fue afectado de manera negativa por el Ca intercambiable, el contenido de CaCO_3 y la relación $\text{Ca}/\text{Fe}+\text{Al}$, y aumentó su disponibilidad con descensos de pH entre 7,6 y 7,1. El P lábil presentó un comportamiento similar y estuvo afectado por los mismos factores que el P en solución. La fracción más abundante, el P-Ca, en PT no mostró relación con el P en solución y sumado a esto presentó una relación negativa con el P inorgánico lábil. Es decir que, en PT, se ven favorecidos los procesos de fijación de P con Ca, y que posteriormente este “pool” de P ligado a Ca no aporta cantidades significativas de P a la solución ya que los procesos de solubilización no se encuentran beneficiados.

3.4.2 Fracciones orgánicas de P

Si bien en los últimos años se ha dado un avance en el conocimiento sobre el P orgánico, sigue habiendo muchas incógnitas (Arenberg y Arai, 2019). En general, los métodos de fraccionamiento son un tanto arbitrarios y artificiales, y sobre todo en el caso del P orgánico es más difícil reflejar la relevancia ecológica, es decir la biodisponibilidad de las distintas fracciones (Recena et al., 2017; Weihrauch and Opp, 2018). La cantidad de P orgánico de cada fracción depende entre otros

factores de cuán mineralizable son. Es importante mencionar que se han encontrado evidencias de P orgánico en la solución del suelo y su uso como fuente de P para los cultivos (Belinque et al., 2015), aunque aún no se sabe claramente cómo las plantas pueden tomarlo directamente. Números estudios y trabajos de revisión recientes han dado cuenta de la naturaleza química de los compuestos orgánicos del suelo (Haygarth et al., 2018; Jarosch et al., 2015; McLaren et al., 2017; Tiecher et al., 2012). El P orgánico comprende compuestos de distinta solubilidad, los cuales pueden ser ésteres de P, fosfonatos y ácidos fosfóricos. Los ésteres de P pueden ser monoésteres o diésteres, dependiendo si contienen uno o dos grupos éster por ion fosfato. La mayor parte del P orgánico se encuentra como P monoéster, el cual es ligeramente soluble. Los ácidos húmicos pueden contener entre 40 y 89% de P monoéster. El P orgánico también se puede encontrar como inositol fosfato, el cual puede ligarse a arcillas o a iones presentes en el suelo. Estos pueden ligarse a Fe y Al, formando compuestos insolubles en ácido o formar fitatos de Ca, insolubles en bases. Además, pueden hallarse azúcares fosfato o mononucleótidos. Dentro de los P- diésteres se pueden incluir fosfoproteínas, fosfolípidos, ácidos teicoicos, ácidos nucleicos (ADN, ARN) y aminoácidos fosfatados. Los P- diésteres son relativamente lábiles y en general pueden encontrarse formando menos del 10% del P orgánico, ya que son más susceptibles de ser mineralizados. En general los más abundantes dentro de estos últimos son los ácidos nucleicos. Según estudios que combinan el fraccionamiento de Hedley con la aplicación de espectroscopia de resonancia magnética nuclear de ^{31}P los diésteres de P podrían ser representados por la fracción extraída con NaHCO_3 , mientras que los monoésteres estarían asociados al P orgánico más estable extraído con NaOH (Negassa y Leinweber, 2009). La

biomasa microbiana es considerada P orgánico lábil después de que muere y su ciclado es rápido, por lo cual es considerada de importancia para la nutrición de las plantas (Bol et al., 2016), ya que la mineralización del P microbiano puede tardar menos de 37 días (Turan et al., 2012). Los microorganismos juegan un rol importante participando por un lado de los procesos de inmovilización y por otro del aporte de P inorgánico a la solución a través de la mineralización. Igualmente, las plantas se ven beneficiadas por la presencia de microorganismos porque liberan más P por mineralización que el que inmovilizan. Los microorganismos liberan enzimas fosfatasas, las cuales convierten el P orgánico en inorgánico (ortofosfatos) haciéndolo disponible para las raíces (Wang et al., 2015). Además, la presencia de materia orgánica tiene efectos positivos sobre la estructura del suelo, lo cual contribuye a una mejor aireación y a la retención de humedad, favoreciendo la mineralización. La alternancia de ciclos secos y húmedos afecta también a los microorganismos en detrimento de los procesos de mineralización y esto puede verse agravado cuando los suelos están desprovistos de cobertura vegetal, ya que esta disminuye la evaporación de agua desde el suelo. Tanto la presencia de microorganismos como de raíces modifican variables como el pH contribuyendo a la biodisponibilidad de P. En el presente trabajo se encontró una relación positiva entre el P orgánico lábil y el carbono orgánico, reflejando la importancia de la materia orgánica y por consiguiente el adecuado manejo de los suelos.

Las formas orgánicas representaron el 20% del P total, sin diferenciarse esto entre subregiones. En PM el P orgánico total estuvo asociado con la textura del suelo, tal como se ha observado para la relación entre los contenidos de materia orgánica y la textura en estos suelos.

La composición del P orgánico presentó variaciones entre subregiones, principalmente en el P orgánico lábil y el estable. En PM hubo una mayor proporción de P orgánico lábil, que puede estar disponible para las plantas a través de procesos de mineralización debido a su labilidad, lo cual contribuye a que haya más P en solución como se describió anteriormente. Por otro lado, en PT hay una mayor proporción de P orgánico muy estable que difícilmente llegue a estar disponible. Es decir, que hay características diferenciales entre estos suelos las cuales hacen que en uno el P orgánico pueda contribuir más a la biodisponibilidad de este nutriente, mientras en el otro se dan procesos que tienden a fijarlos en mayor medida. En PT el P orgánico lábil estuvo relacionado negativamente con el P ligado a Ca, y además presentó una asociación negativa con el contenido de CaCO_3 . Es decir, que, en este caso, parte del P mineralizado es posteriormente retenido. El P orgánico ligado a Fe y Al fue el más abundante, aunque esto también podría estar asociado a la alcalinidad del extractante correspondiente a esta fracción.

3.4.3 Efecto de la profundidad del suelo

La distribución de las fracciones de P en el perfil del suelo fue similar en las dos subregiones. La mayoría de las fracciones presentaron contenidos más altos en los primeros 20 cm y disminuyeron con la profundidad. La disponibilidad de P fue superior en el suelo superficial, decreciendo en profundidad. Esta distribución arroja dudas sobre la suposición de que los cultivos pueden obtener cantidades sustanciales de P del subsuelo, por ejemplo, por debajo del horizonte A. Sin embargo, ha sido demostrado que arbustos perennes extraen P del subsuelo enriqueciendo los horizontes superficiales en fracciones de P orgánicas y disponibles (Bol et al., 2016; Gao et al., 2019). En la mayoría de los suelos el P

orgánico es encontrado principalmente en el horizonte superficial, lo cual se relaciona con la presencia de MO. Como se mencionó anteriormente, el P orgánico lábil es principalmente P microbiano y este genera un importante aporte de P a la solución, encontrándose localizado en la rizósfera donde la actividad edáfica de las raíces es alta (Achat et al., 2012; Kruse et al., 2015). El aporte de MO al suelo incrementa la actividad microbiana y por lo tanto la biomasa microbiana (Krey et al., 2011). Esto favorece los procesos de mineralización, y por otro lado genera una leve disminución de pH que contribuye a la solubilidad del P. La actividad radicular, por medio de la liberación de ácidos carboxílicos y la deposición de residuos en superficie también contribuye a esto. Por otro lado, particularmente en PT, en profundidad se observó una tendencia al incremento del contenido de Ca y CaCO_3 y por lo tanto el pH. Las formas lábiles de P pueden reaccionar con el Ca y el CaCO_3 formando compuestos de distinto grado de solubilidad y quedando difícilmente disponible para las plantas, siendo estos procesos más intensos en profundidad e incrementándose con el contenido de P-Ca. El P ligado a Fe y Al, orgánico e inorgánico, disminuyó en profundidad en ambas subregiones, coincidiendo con el incremento de la Ca:FeAl en profundidad. En PM particularmente, se encontró un mayor contenido de Fe y Al en superficie, y no se observó variación importante de los contenidos de Ca, lo cual podría indicar que el Fe y Al tendría como fuente aportes eólicos recientes en esta región, como por ejemplo las cenizas volcánicas. En cambio, en PT, se observó una tendencia al incremento de Ca en profundidad y poca variación en el contenido de Fe y Al, indicando que esta fracción podría estar controlada por el contenido de Ca, como se mencionó anteriormente. En PT el contenido de P total en la mayoría de los casos no varió con la profundidad, ya que la

disminución de las formas lábiles fue compensada por el aumento en el P ligado a Ca. Sin embargo, en PM se observó una disminución, ya que, excepto el P estable, las demás fracciones también decrecieron con la profundidad.

3.4.4 Efecto del uso del suelo

La conversión del uso del suelo a la agricultura puede generar una disminución en las formas orgánicas e inorgánicas lábiles de P afectando su disponibilidad (Slazak et al., 2014; Solomon et al., 2002), aunque el ingreso de P al suelo por fertilización puede generar un incremento en las formas lábiles, dependiendo de la fuente y la tasa de fertilización (Zheng et al., 2004, 2002). Suelos bajo pastizales han mostrado una mayor concentración de P orgánico lábil como monoésteres en comparación con suelos cultivados (Stutter et al., 2015; Turner et al., 2003). El incremento en la concentración de P disponible en los suelos bajo vegetación natural puede ser atribuido al mayor contenido de materia orgánica. Por un lado, los suelos bajo vegetación natural reciben un mayor aporte de biomasa vegetal y al no ser removidos, como los suelos bajo labranza, la mineralización es menor, contribuyendo a la acumulación de materia orgánica. Además, muchas veces las tasas de aplicación de fertilizante fosforado son menores a las tasas de extracción de P por cosecha, por lo que el contenido de P tiende a disminuir en los suelos cultivados (Rubio et al., 2012). El P microbiano, relacionado con el P orgánico lábil, depende del uso del suelo, siendo menor en los suelos agrícolas que en sistemas bajo vegetación natural (Boitt et al., 2018). Además de la importancia del ciclo de P, la presencia de compuestos orgánicos tiene otros efectos que benefician la disponibilidad de P. Comparando el Índice de Materia Orgánica (IMO) se pudo determinar que los suelos agrícolas se encontraban degradados respecto a los suelos bajo vegetación natural. La

materia orgánica favorece la disponibilidad de P a través de la liberación de fosfatos adsorbidos (Yang et al., 2019) y además puede afectar propiedades físicas del suelo con efecto en la dinámica del P. Suelos con bajos contenidos de materia orgánica son más susceptibles a la compactación, afectando la infiltración de agua y la exploración radical. La sorción del ortofosfato depende en parte de la accesibilidad a los sitios de adsorción de la matriz del suelo (Fink et al., 2016). Cuanto más tiempo se encuentre la solución del suelo en contacto con los sitios de adsorción mayor es la probabilidad de que el P reaccione con los cationes presentes, formando compuestos de menor labilidad. Suelos degradados, con poca materia orgánica y estructura desfavorable pueden favorecer este proceso. La biomasa radical de la vegetación natural, en contraste con los suelos destinados a cultivos anuales con menor aporte de raíces, también favorece la disponibilidad de P. Las raíces, además de los microorganismos, liberan ácidos carboxílicos, como citrato y oxalato, que pueden modificar levemente el pH de la rizósfera y contribuir a la disponibilidad de P. Esta acidificación es importante principalmente en suelos calcáreos, donde una disminución de pH puede aumentar la solubilidad de fosfatos. Los ácidos orgánicos de bajo peso molecular exudados por las raíces, además de favorecer la solubilización y la desorción de P de superficies minerales, pueden competir con los fosfatos por los sitios de sorción, formando con cationes como Ca, Fe y Al complejos más fuertes que los que estos forman con los fosfatos (Moradi et al., 2014). Wang et al. (2015) hallaron que en suelos calcáreos los ácidos orgánicos de bajo peso molecular favorecían la liberación del P de la fracción de P-Ca. Con relación a todos estos procesos que afectan la disponibilidad en el suelo agrícola, en PT el P ligado a Ca mostró un incremento en el suelo de la

loma agrícola en los primeros 20 cm, lo cual podría indicar que la degradación de estos suelos destinados principalmente a cultivos anuales podría ir en este sentido. La formación de fosfatos de Ca en el suelo agrícola de este sitio se ve también favorecido por el incremento en el contenido de Ca y CaCO_3 . En otros trabajos se han encontrado evidencias de que la alternancia de ciclos secos y húmedos en regiones con marcado déficit estacional de precipitaciones favorece la formación de calcitas pedogenéticas de distintos tamaños y formas, en suelos ricos en Ca. Breecker et al. (2009) y Robins et al. (2015) proponen que los ciclos secos/ húmedos, impulsan la precipitación simultánea de carbonatos y filosilicatos de las películas de agua que se evaporan y que con cada ciclo seco se va dando una cristalización formando calcitas en forma de oidio. Esta alternancia puede verse intensificada en los suelos agrícolas debido a que muchas veces se encuentran desprovistos de cobertura vegetal y que por la pérdida de materia orgánica disminuye la capacidad de retención de agua, sobre todo en la posición de loma. Es decir que la degradación de los suelos producto del uso agrícola y el manejo no conservacionista, además de afectar el ciclado de P orgánico, podría favorecer los procesos de fijación en suelos calcáreos, disminuyendo la disponibilidad de P. Por otro lado, en general se halló un mayor contenido de P inorgánico estable en el suelo agrícola, confirmando que bajo este uso hay una tendencia a la fijación de P.

En PM, el mayor contenido de P ligado a Ca en el suelo agrícola del bajo puede atribuirse a que durante los periodos donde el suelo se encuentra desprovisto de cobertura, hay una mayor tasa de evaporación lo que conlleva el ascenso del nivel freático en esta posición topográfica, y consecuentemente de sales y de pH. De esta manera el P presenta condiciones más propicias para reaccionar

CaCO₃, pudiendo ser adsorbido sobre éste (Sø et al., 2011). Sin embargo, en el suelo con vegetación natural, la cobertura vegetal disminuye la tasa de evaporación y por ende el ascenso de la napa. En el caso del suelo de la media loma y la loma, donde no hay influencia del nivel freático no se observó un efecto del uso del suelo sobre el P ligado al Ca, reforzando la idea de que el proceso de reacción entre el P y el Ca está relacionado con la presencia del nivel freático alcalino. Por otro lado, los ácidos orgánicos de bajo peso molecular generados por la actividad radical y el mayor contenido de materia orgánica pueden favorecer la liberación de P de la fracción de P inorgánico ligado a Fe y Al. En esta subregión, al igual que en PT, el P inorgánico estable en los casos que hubo diferencias también fue superior en el suelo agrícola, lo cual podría indicar que se ven favorecidos los procesos de fijación.

Pese a que las fracciones presentaron diferencias entre tipos de uso de suelo, el P total no presentó diferencias significativas entre usos en PT en concordancia con lo hallado por Slazak et al. (2014), mientras que en PM no se observaron diferencias claras.

3.4.5 Efecto de la topografía

Los perfiles de suelo de las tres posiciones topográficas mostraron que los procesos erosivos pueden haber causado una translocación de material desde la loma hacia el bajo, ya que el horizonte A y el perfil del suelo fueron de menor espesor en la loma, indicando posibles pérdidas por erosión y procesos de transferencia de material a lo largo del paisaje (Minasny et al., 2015). Especialmente en áreas semiáridas o subhúmedas la redistribución de fosfatos secundarios a lo largo de la toposecuencia por erosión y depósito de polvo es un

proceso importante (Eger et al., 2018). Además, en las posiciones topográficas más bajas, el contenido de humedad tiende a ser mayor, favoreciendo la producción de biomasa vegetal y consecuentemente la acumulación de materia orgánica en el suelo. La combinación de estos procesos además contribuye al mayor contenido de la mayoría de las fracciones en las posiciones de bajo en ambas subregiones. La excepción a esto fue el mayor contenido de Pi-Fe/Al y Pi estable en la loma de PM, el cual parece confirmar que los suelos de esta subregión están más meteorizados que los de PT, ya que generalmente el P ligado a Fe y Al aparece en estados pedogenéticos más avanzados y siempre en los horizontes A (Mehmood et al., 2018).

Los contenidos más altos de P disponible (P solución y P lábil) en general fueron observados en los primeros 20 cm del perfil de los bajos en ambas subregiones. Sin embargo, en PT, las diferencias entre posiciones topográficas fueron considerablemente más pequeñas que en PM, indicando que en estos suelos los factores que contribuyen a la transformación de fosfatos primarios en formas más solubles han actuado en menor grado que PM, confirmando que estos suelos se encuentran en un estadio pedogenético más temprano y que, por lo tanto, hay menos diferencias entre posiciones topográficas. La explicación del mayor nivel de P disponible en el bajo de PT puede ser el mayor contenido de materia orgánica y su relación con el P en solución y el P lábil. En PM, el alto contenido de P-Fe/Al en la loma interfiere con la disponibilidad de P en esta posición, incrementando las diferencias a lo largo de la toposecuencia.

En PM, la fracción de P-Ca se incrementó en el bajo agrícola debido a la presencia de un nivel freático de característica alcalina que aporta CaCO_3 , donde el P puede ser adsorbido a la superficie de las partículas de calcita depositadas

por ascenso capilar (Espejo et al., 2008). En posiciones altas, en años normales no hay influencia del nivel freático, lo cual queda evidenciado por el bajo pH en el horizonte A del perfil de la loma. Por lo que se infiere que el Fe y Al controlan la disponibilidad de P en la loma mientras que en el bajo los fosfatos interactúan con el CaCO_3 . La disponibilidad de P en las partes altas del paisaje es condicionada por la sorción sobre compuestos amorfos de Fe y Al, cuyo efecto aumenta a pH ácidos (Frossard et al., 2000). En los valles interdunales, la disponibilidad de P es limitada por el pH alcalino y la adsorción sobre calcita proveniente de la capa freática. Sin embargo, incluso bajo estas condiciones, se halló una relación positiva entre el P en solución y la fracción de P-Ca, indicando que esta fracción contribuye a la disponibilidad de P. Esto puede estar relacionado con el hecho de que, en PM, el proceso que controla la formación de minerales de P-Ca es la adsorción sobre CaCO_3 aportado por el nivel freático en la posición de bajo. La relativamente alta disponibilidad de P en el horizonte A de este suelo puede ser explicada por el efecto de la materia orgánica conteniendo P orgánico lábil, pero también por la reducción en la adsorción de fosfatos sobre calcita debido al efecto de las sustancias húmicas (Yang et al., 2019), especialmente ya que este efecto puede ser incrementado por la alta concentración de materia orgánica soluble en este suelo debido al pH alcalino (Weyers et al., 2017).

En PT, el efecto de la topografía sobre las fracciones de P estuvo más relacionado a los procesos erosivos que han producido la diferenciación de los perfiles de suelo. A diferencia de PM, los factores que determinaron el tamaño de las fracciones fueron los mismos a lo largo de la toposecuencia. Principalmente el Ca intercambiable, CaCO_3 y la materia orgánica fueron las

propiedades de suelo claves que influenciaron la disponibilidad de P en el paisaje. La materia orgánica es de gran importancia para la disponibilidad de P, no solo por liberar fosfatos solubles, sino también por promover los procesos de desorción (Yang et al., 2019) y, especialmente en este tipo de ambientes, contrarrestando el efecto negativo del Ca y el CaCO_3 sobre la disponibilidad de P para los cultivos (Du et al., 2013; Y. Wang et al., 2015). Las sustancias orgánicas como los ácidos húmicos pueden inhibir la transformación de fosfatos de Ca en compuestos termodinámicamente más estables con mayor grado de cristalización (Alvarez et al., 2004).

3.5 CONCLUSIONES

La geomorfología de la región fue uno de los principales factores que incidió en la distribución de las fracciones de P en el suelo, ya que la pendiente regional del calcrete ha generado una acumulación diferencial de los sedimentos eólicos sobre este. Como resultado, en PT el calcrete se encuentra más cercano a la superficie promoviendo la abundancia de Ca y de CaCO_3 . Sumado a esto, el régimen de humedad ústico en esta subregión ha limitado la lixiviación de bases, mientras que este proceso ha sido más intenso en PM donde el régimen de humedad es principalmente údico. Esto contribuyó a que en PT el contenido de P-Ca fuera superior y a que la disponibilidad de P se hallara principalmente limitada por el contenido de Ca y CaCO_3 , producto de reacciones de precipitación de fosfatos de Ca y adsorción de P sobre partículas de CaCO_3 , los cuales se vieron potenciados en el ambiente de loma y media loma. Por otro lado, en PM la disponibilidad de P presentó menos limitaciones, y en los casos que se vio limitado como en la loma y media loma esto fue principalmente debido al bajo pH

y a la formación de compuestos P-Fe/Al. Es importante considerar las diferencias en el ciclo de P entre subregiones e incluso entre posiciones topográficas dentro de las mismas, ya que esto permitirá diseñar estrategias de manejo de fertilización fosforada que permitan un uso más eficiente de los fertilizantes y de este nutriente. Además, se ha evidenciado que la agricultura ha generado cambios en la distribución de las formas de P, los cuales van en detrimento de la disponibilidad de P, principalmente debido a la pérdida de materia orgánica. Mantener adecuados niveles de materia orgánica en el suelo favorecería los procesos que contribuyen a la disponibilidad de P.

4. CAPÍTULO 2

ENSAYOS DE DISPONIBILIDAD DE P PROVENIENTE DE DOS FUENTES DE FERTILIZANTE FOSFORADO

4.1 INTRODUCCIÓN

La eficiencia de uso del fósforo aplicado como fertilizante generalmente es muy baja debido a diferentes procesos físico-químicos que fijan este elemento en el suelo. En términos generales la respuesta no supera 200 kg ha⁻¹ de trigo por cada kg de P aplicado (Syers et al., 2008), y solo entre el 10-20% del P aplicado es absorbido por las plantas (Holford, 1997). Esto se debe a que el P reacciona con los constituyentes del suelo produciendo compuestos de distinto grado de solubilidad, pudiendo quedar adsorbido a la superficie de partículas minerales, incorporarse dentro de las estructuras minerales (formando variscitas o apatitas) o precipitar para formar nuevos sólidos (Hedley y McLaughlin, 2005). Estos procesos dependen de las características físico-químicas edáficas y condicionan la disponibilidad de P para los cultivos en los distintos tipos de suelo (Jalali y Ranjbar, 2010). En suelos con problemas de fijación de P, en los últimos años, se ha incrementado la utilización de fertilizante fosforado en formulaciones líquidas como una alternativa a este problema. El tipo de formulación del fertilizante condiciona el comportamiento de este en el suelo, afectando la disponibilidad de P para la planta. Varios autores han comparado formulaciones líquidas y granulares en distintos tipos de suelos, encontrando una mejora en la disponibilidad y difusión de las fuentes líquidas solamente en suelos calcáreos (Holloway et al., 2001; Khatiwada et al., 2014; Lombi et al., 2004a, 2004b). En los suelos dominantes de PT de la Región Semiárida Central, las formulaciones líquidas de fertilizante fosforado podrían presentar un mejor comportamiento que las formulaciones granulares, ya que las condiciones edáficas y climáticas son similares a las de los suelos calcáreos estudiados en el sur de Australia en los trabajos citados. Por otro lado, en suelos no calcáreos como los de PM,

podrían no detectarse diferencias entre formulaciones líquidas y sólidas. Sin embargo, no existen estudios comparativos de distintas fuentes de fertilizantes fosforados en los suelos de la Región Semiárida Central. El objetivo de este capítulo fue evaluar el comportamiento de una formulación líquida de fertilizante fosforado (polifosfato líquido) y de una formulación sólida (superfosfato triple de calcio) en los suelos de distintas posiciones topográficas a lo largo de las toposecuencias en PT y PM y comprender los procesos y factores que afectan la disponibilidad de P- fertilizante en estos suelos.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de 0- 20 cm de profundidad de suelo bajo uso agrícola de las posiciones de bajo, media loma y loma de las toposecuencias de PT y PM que fueron estudiadas en el capítulo 1. El suelo fue secado al aire y tamizado por 2 mm. Se determinó el porcentaje de agua retenido a capacidad de campo mediante el modelo de Saxton y Rawls (2006), utilizando los datos de textura y materia orgánica para llevar los suelos de los ensayos a un contenido hídrico de 80% de capacidad de campo. Se colocaron 78 g de suelo (más humedad correspondiente) en cada caja de Petri y se compactó a una densidad aparente de $1,25 \text{ g cm}^{-3}$. Para los suelos de cada ambiente se realizaron los siguientes tratamientos, con cuatro repeticiones de cada uno de acuerdo al procedimiento adaptado de Lombi et al. (2004):

Tratamientos:

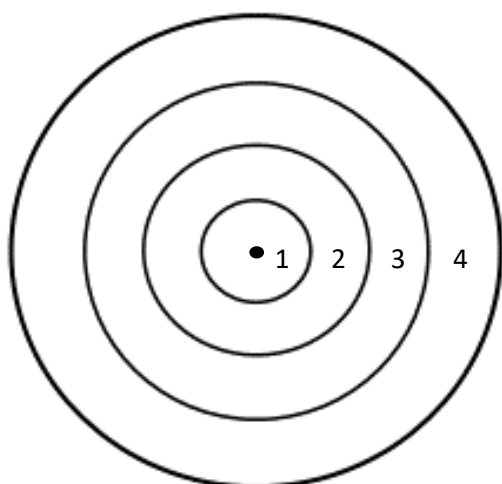
- Testigo sin aplicación de P.
- Fertilizado con superfosfato triple de Ca (SPT) grado equivalente 0-46-0 con 14% de Ca. Presentación en gránulos. Se colocó un gránulo de

fertilizante (20,5 mg \pm 0,2, equivalente a 9,43 mg de P) en un hoyo en el suelo en el centro de la caja de Petri.

- Fertilizado con P₂O₅ (polifosfato líquido) (PL) grado equivalente 11-37-0. Presentación líquida de densidad 1,41 g cm⁻³. Se aplicó una gota de 17,6 μ l (equivalente a 9,43 mg P) sobre el suelo en el centro de la caja de Petri.

Los ensayos se dejaron incubar por cinco semanas manteniendo el nivel de humedad. Transcurrido este tiempo se tomaron cuatro secciones de suelo concéntricas de las cajas de Petri tratadas con fertilizante (Figura 4.1) y en cada una se determinó la concentración de P extraíble mediante membranas de intercambio aniónico. Para esto se tomaron 0,5 g de suelo de cada sección y repetición y se colocaron dos membranas de 6,25 cm² en 30 ml de agua destilada en tubos de 50 ml, los cuales posteriormente fueron agitados por 18 hs. Posteriormente las membranas fueron colocadas en tubos con 20 ml de NaCl 0,5 M y agitadas por espacio de una hora para desorber el P (Tiessen y Moir, 2006). La determinación de P se llevó a cabo mediante colorimetría por el método de Murphy y Riley (1962). En las mismas muestras se midió potenciométricamente el pH en una suspensión 1:2,5 suelo: agua.

La eficiencia de recuperación de P (ER, %) fue calculada como $(\sum P \text{ final en cada sección (mg)} - P \text{ testigo (mg)}) / P \text{ aplicado (mg)} * 100$.



Secciones:

1. 0,0 mm- 7,5 mm
2. 7,5 mm- 13,5 mm
3. 13,5 mm- 25,5 mm
4. 25,5mm- 43,0 mm

Figura 4.1. Esquema de muestreo de suelo por anillos concéntricos de las secciones en el ensayo de difusión.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2013). Se verificó el cumplimiento de los supuestos (normalidad, independencia y homocedasticidad) y se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey (nivel de significancia: $\alpha=0,05$) para “posición topográfica” x “tratamiento fertilizante” dentro de cada sitio. Se llevaron a cabo análisis de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Efecto de la aplicación de los fertilizantes en el suelo y disponibilidad de P

La ER promedio de todos los tratamientos fue 31% en PT y 29% en PM, es decir que fue similar en ambas subregiones. Al analizar cada fuente por separado sin particionar en posiciones topográficas, lo cual podría representar el promedio del lote, no se observaron diferencias significativas ($p<0,05$) en ER entre PL y SPT

en ninguno de los dos sitios. Sin embargo, cada sitio presentó particularidades en el comportamiento de los fertilizantes en las distintas posiciones topográficas.

4.3.2 Planicie Medanosa

Se halló una interacción significativa ($p < 0,0001$) entre posición topográfica y tratamiento. En el suelo de la loma no se hallaron diferencias entre fuentes fosforadas y la ER (eficiencia de recuperación) promedio de ambas fuentes sólo llegó al 16% (15,57% PL y 16,56% SPT). En el suelo de media loma la ER promedio de ambos tratamientos fue de 28,5 %. En este caso el PL (31%) tuvo una mejor eficiencia de recuperación que el SPT (26%) ($p < 0,05$). En el suelo del bajo se alcanzaron las máximas eficiencias, cercana al 50% en el caso del SPT, y 37% en el PL ($p < 0,05$). Se pudo observar una marcada variación entre posiciones topográficas, incrementándose la ER promedio de ambas fuentes desde la loma (16%) hacia el bajo (43,5%) (Figura 4.2) (Anexo Tabla 4.1).

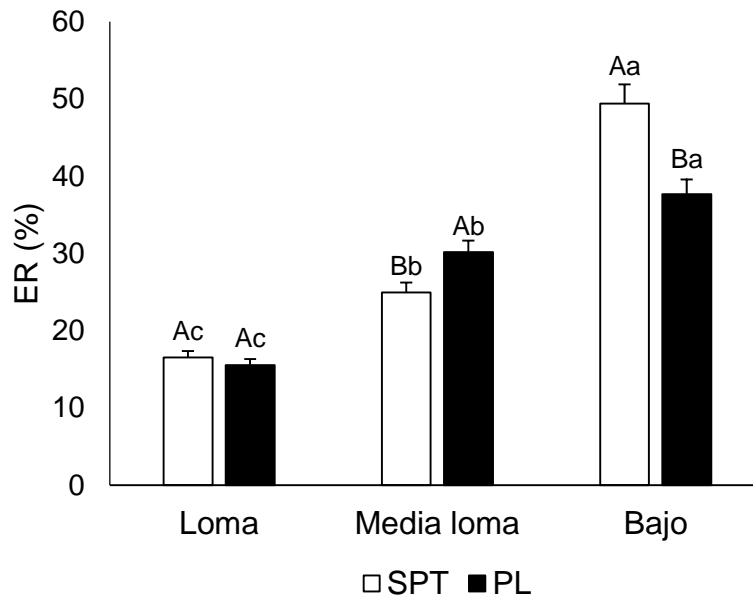


Figura 4.2. Eficiencia de recuperación (ER, %) en suelo de loma, media loma y bajo para superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en Planicie medanosa. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre SPT y PL en cada posición, y letras minúsculas entre loma, media loma y bajo para cada tratamiento fertilizante ($p < 0,05$).

La eficiencia de recuperación en PM estuvo asociada principalmente con el contenido de Fe y Al y con el pH inicial del suelo (Tabla 4.2). En este sitio, el aumento de pH y la disminución de Fe y Al extractable se relacionaron con aumentos en la eficiencia de recuperación de P. Esto es consistente con lo hallado en la posición de loma que presentó pH ácido y un mayor contenido de Fe y Al extractable (respecto al bajo), siendo esta la posición donde se hallaron los valores más bajos de la ER.

Tabla 4.2. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidad asociada entre eficiencia de recuperación (ER) y propiedades edáficas (concentraciones de hierro más aluminio (Fe+Al), calcio intercambiable (Ca), carbono orgánico total (COT) y pH), en suelos de la Planicie Medanososa.

Coef/Prob	ER
Fe+Al	-0,93**
pH inicial	0,91**
COT	ns
Ca	0,59**

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

Se encontró interacción significativa ($p < 0,0001$) entre posición topográfica y tratamiento dentro de cada sección. En el suelo de la loma el SPT sólo presentó mayor ER en la primera sección, y en los puntos más alejados no se observaron diferencias con el PL. En la sección de 25,5-43 mm la ER fue nula en los dos tratamientos. Incluso se observó una reducción en el P extraíble respecto al testigo ($11,1 \text{ mg kg}^{-1}$), la cual fue más marcada en PL ($5,3 \text{ mg kg}^{-1}$) que en SPT ($7,2 \text{ mg kg}^{-1}$) (Figura 4.3 y Tabla 4.3).

En el suelo de la media loma se observó una mayor concentración de P alrededor del gránulo de SPT, sin embargo, entre 7,5 mm y 25,5 mm se halló una ER más alta en el tratamiento con PL. En la última sección no hubo diferencias entre fuentes y tampoco un incremento significativo respecto al testigo. En este caso, la disponibilidad de P en el testigo fue $28,3 \text{ mg kg}^{-1}$.

En el suelo del bajo el P aplicado como SPT mostró mayor ER que el PL en todas las secciones (excepto en 7,5-13,5 mm donde no hubo diferencias significativas entre tratamientos). En la última sección el P extraíble llegó a incrementarse 5,2% (PL) y 24,3% (SPT) respecto al testigo. La disponibilidad de P en el bajo en el tratamiento testigo fue 42 mg kg^{-1} . (Anexo Tabla 4.4).

Tabla 4.3. Contenido de P (mg kg^{-1}) en cada sección en los tratamientos con superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie medanosa.

Posición topográfica	Distancia (mm)	P (mg kg^{-1})	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	428,6 a	562,2 b
	7,5-13,5	156,2 a	128,6 a
	13,5-25,5	14,5 a	11,4 a
	25,5-43	5,3 a	7,2 b
	Testigo	11,1	
Media Loma	0-7,5	599,6 b	802,6 a
	7,5-13,5	235,7 a	191,2 b
	13,5-25,5	81,9 a	37,6 b
	25,5-43	28,8 a	29,2 a
	Testigo	28,3	
Bajo	0-7,5	1146,1 b	1478,3 a
	7,5-13,5	343,5 a	327,5 a
	13,5-25,5	45,9 b	55,6 a
	25,5-43	44,2 b	52,2 a
	Testigo	42,0	

Letras diferentes indican diferencias entre columnas dentro de cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

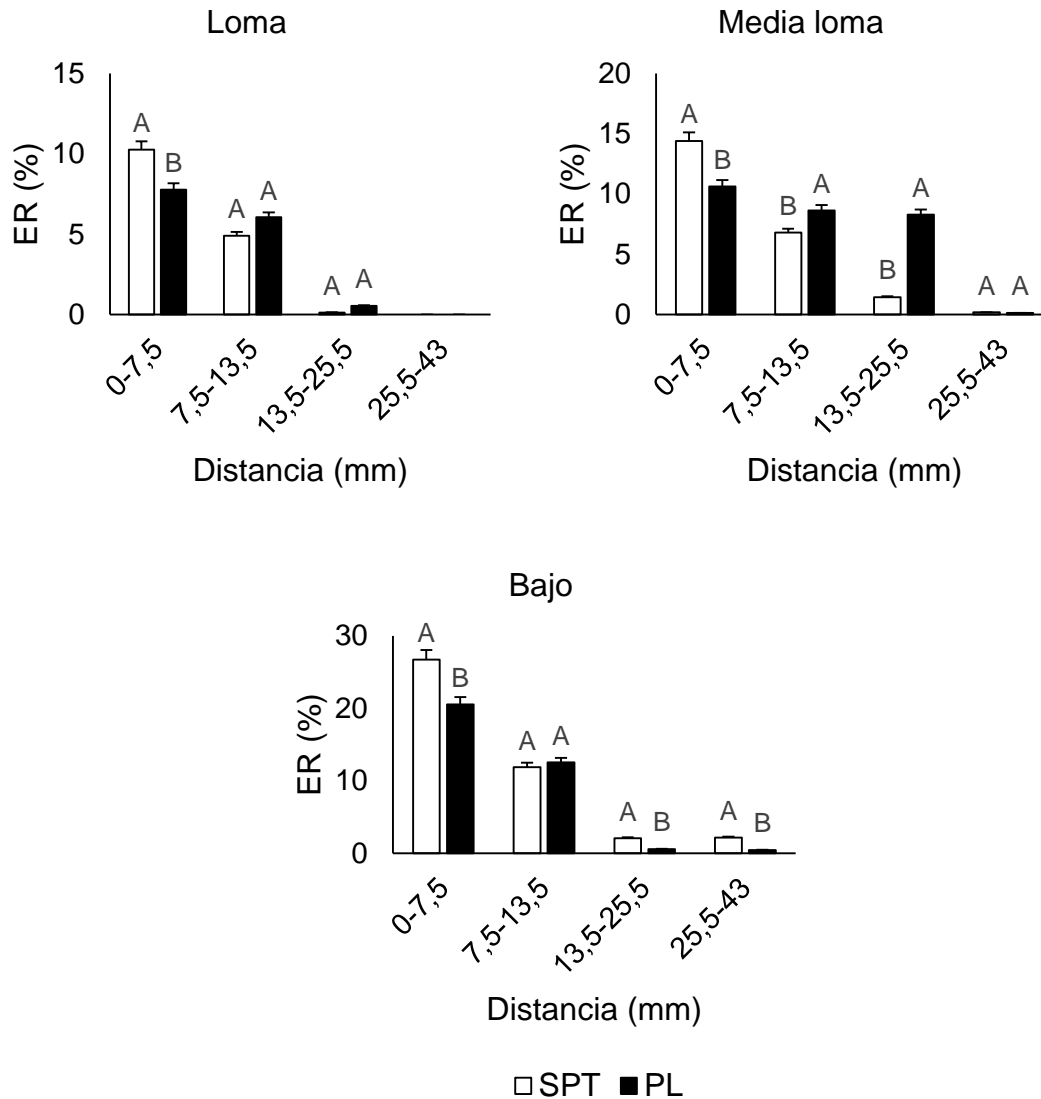


Figura 4.3. Eficiencia de recuperación (ER) en cada sección para las dos fuentes (SPT, superfosfato triple y PL, fosfato líquido) en suelo de loma, media loma y bajo en Planicie medanosa. Letras diferentes indican diferencias significativas entre fuentes dentro de cada sección ($p < 0,05$).

Se analizó la correlación entre algunas propiedades edáficas y el P recuperado en la última sección (25,5 a 43 mm), como indicador de la tasa de difusión del fertilizante en el suelo. Se encontró que el porcentaje de P recuperado en esta sección de suelo presentó correlaciones negativas con el contenido de Fe y Al, con la proporción de partículas finas (arcilla y limo), con el COT y con la CIC. Por

otro lado, se asoció positivamente con el pH, el contenido CaCO_3 y sólo en el caso del SPT con el Ca intercambiable (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Correlación entre ER (eficiencia de recuperación) de superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en la sección de 25,5-43 mm y propiedades edáficas en Planicie medanosa.

Coef/Prob	ER	
	SPT	PL
Fe+Al	-0,99**	-0,58*
pH	0,91**	0,74**
a+l	-0,76**	-0,82**
COT	-0,81**	-0,80**
CIC	-0,70*	-0,85**
Ca	0,75**	ns
CaCO_3	0,98**	0,59*
Al	ns	ns
Fe	-0,70**	-0,73**

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

El pH de los testigos presentó variaciones entre posiciones topográficas, con valores entre 5,78 (loma) y 7,81 (bajo). En el suelo de la loma la aplicación de PL provocó un descenso en el pH alcanzando un valor mínimo de 5,27 ($p < 0,05$). Por otro lado, la aplicación de SPT generó un incremento de pH alrededor del gránulo, pero no se observaron diferencias significativas, respecto al testigo, al considerar el promedio de todo el suelo contenido en la caja de Petri. En el suelo de media loma, la aplicación de SPT generó mayor acidez que el PL hasta los 13,5 mm, sin embargo, el PL provocó una disminución de pH más marcada en el promedio de todo el suelo del ensayo. En el suelo del bajo, ambas fuentes fosforadas generaron una disminución de pH hasta los 25,5 mm, la cual fue más marcada en el tratamiento PL, el cual además presentó un pH menor al

considerar el promedio de todo el suelo. No obstante, las variaciones de pH en general fueron pequeñas y en su mayoría las diferencias no llegaron a una unidad (Figura 4.4) (Anexo Tabla 4.6).

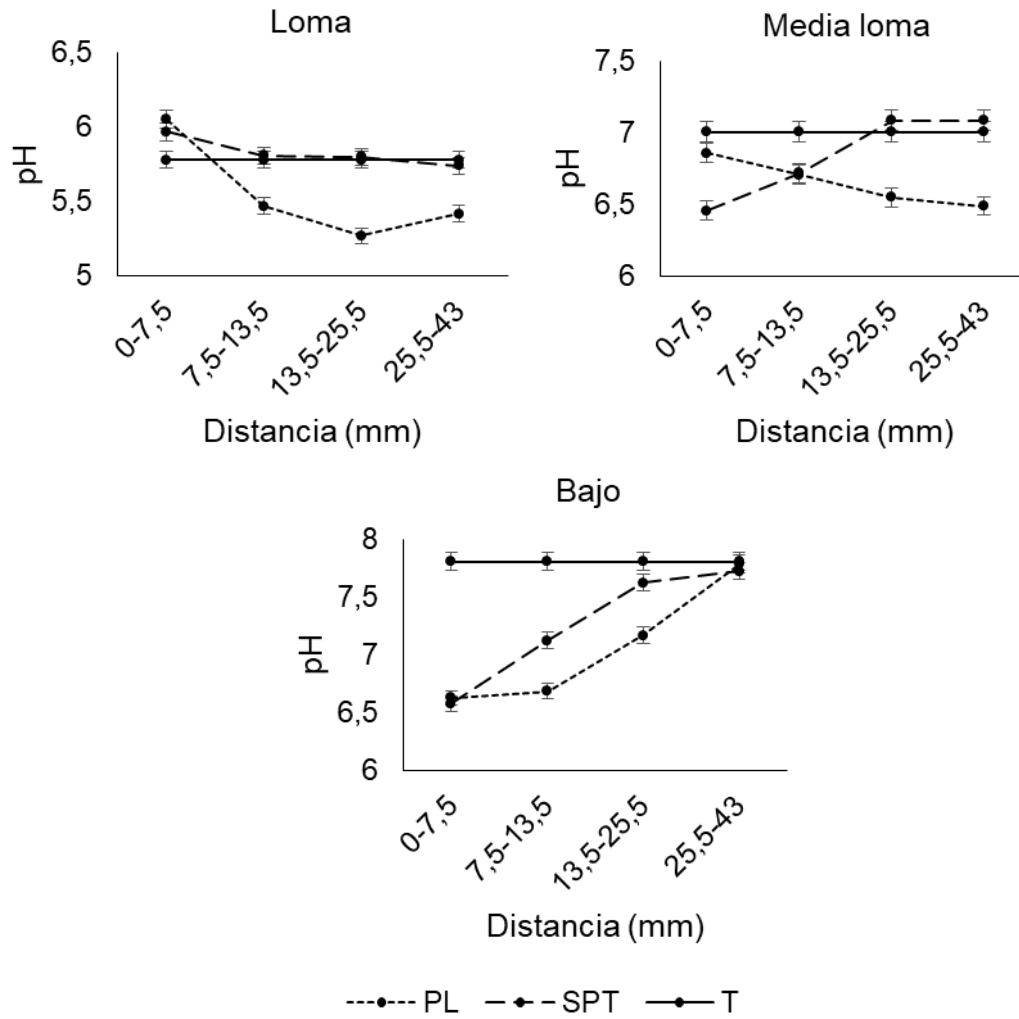


Figura 4.4. Valores de pH en cada sección en los tratamientos con superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie medanosa.

4.3.3 Planicie con tosca

Se encontró una interacción significativa ($p < 0,0001$) entre posición topográfica y tratamiento fertilizante. En el suelo del bajo no se observaron diferencias entre las fuentes fosforadas. En el suelo de media loma el P aplicado como SPT mostró una mejora en la disponibilidad respecto a PL. En el suelo de la loma el tratamiento con PL fue superior al SPT ($p < 0,05$), con valores de ER de 28,8% y 25,3%, respectivamente (Figura 4.5) (Anexo Tabla 4.7).

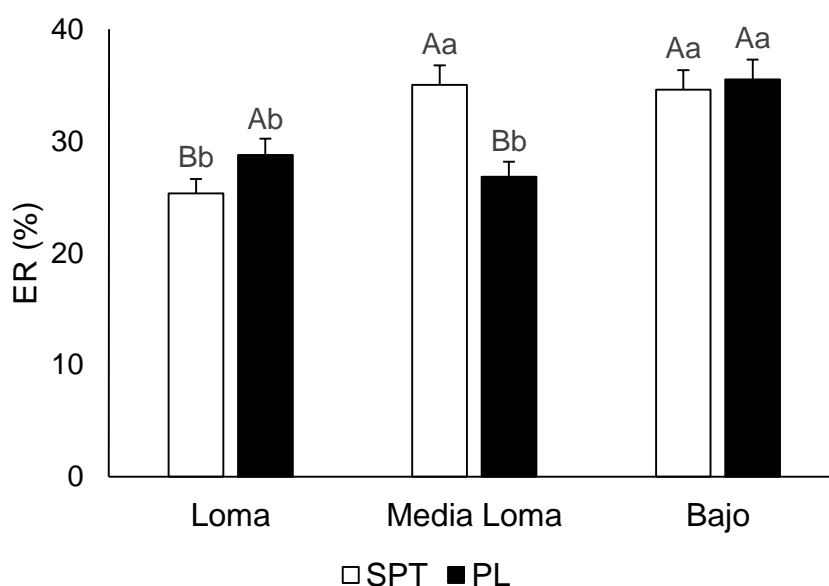


Figura 4.5. Eficiencia de recuperación (ER) en suelo de loma, media loma y bajo para superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en Planicie con tosca. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre SPT y PL en cada posición, y letras minúsculas entre loma, media loma y bajo para cada tratamiento fertilizante ($p < 0,05$).

La ER de P estuvo relacionada principalmente con el Ca y el COT. El contenido de Ca se asoció negativamente con la eficiencia de recuperación de P, mientras que el COT mostró un efecto positivo sobre esta (Tabla 4.8).

Tabla 4.8. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidad asociada en Planicie con tosca entre ER (eficiencia de recuperación) de P y propiedades edáficas.

Coef/Prob	ER
Fe+Al	ns
pH inicial	-0,42*
COT	0,66**
Ca	-0,69**

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

Se encontró interacción significativa ($p < 0,0001$) entre posición topográfica y tratamiento fertilizante dentro de cada sección. En el suelo de la loma, la ER en la sección central de SPT fue superior a la hallada en el tratamiento PL, indicando una mayor concentración de P alrededor del gránulo. A partir de allí, la ER comenzó a ser mayor con la aplicación de PL. En la última sección el SPT produjo un incremento del 13,8% en P extraíble mientras que el PL generó un aumento de 124,6% respecto al testigo. Es decir que en este ambiente el fertilizante líquido presentó una mejora altamente significativa en la difusión de P (Figura. 4.6) (Tabla 4.9). En el suelo de la media loma de PT, el tratamiento con SPT mostró también mayor ER en la sección alrededor al gránulo, pero en las secciones más alejadas el PL fue superior, indicando mayor tasa de difusión. Estas diferencias fueron menos marcadas que en el caso de la loma. En la última sección las diferencias no fueron significativas entre tratamientos, pero sí respecto al testigo, logrando un incremento sobre éste entre 44% (PL) y 48,6% (SPT). En el suelo del bajo sólo se observaron diferencias significativas en la sección de 7,5-13,5 donde el tratamiento con PL mostró mayor disponibilidad de P. Más allá de este punto la disponibilidad de P no mostró diferencias entre

fuentes, y en ambos casos en la última sección se superó el 100% de incremento en la disponibilidad respecto al testigo (Anexo Tabla 4.10).

Tabla 4.9. Contenido de P (mg kg^{-1}) en cada sección en los tratamientos superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie con tosca.

Posición topográfica	Distancia (mm)	P (mg kg^{-1})	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	909,8 b	1142,4 a
	7,5-13,5	111,2 a	45,4 b
	13,5-25,5	16,6 a	7,9 b
	25,5-43	14,6 a	7,4 b
	Testigo	6,5	
Media Loma	0-7,5	857,5 b	1356,3 a
	7,5-13,5	139,9 a	104,5 b
	13,5-25,5	19,6 a	16,6 b
	25,5-43	15,7 a	16,2 a
	Testigo	10,9	
Bajo	0-7,5	1039,4 a	1162,5 a
	7,5-13,5	171,9 a	91,9 b
	13,5-25,5	25,4 a	26,8 a
	25,5-43	23,8 a	23,1 a
	Testigo	11,2	

Letras diferentes indican diferencias entre columnas dentro de cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

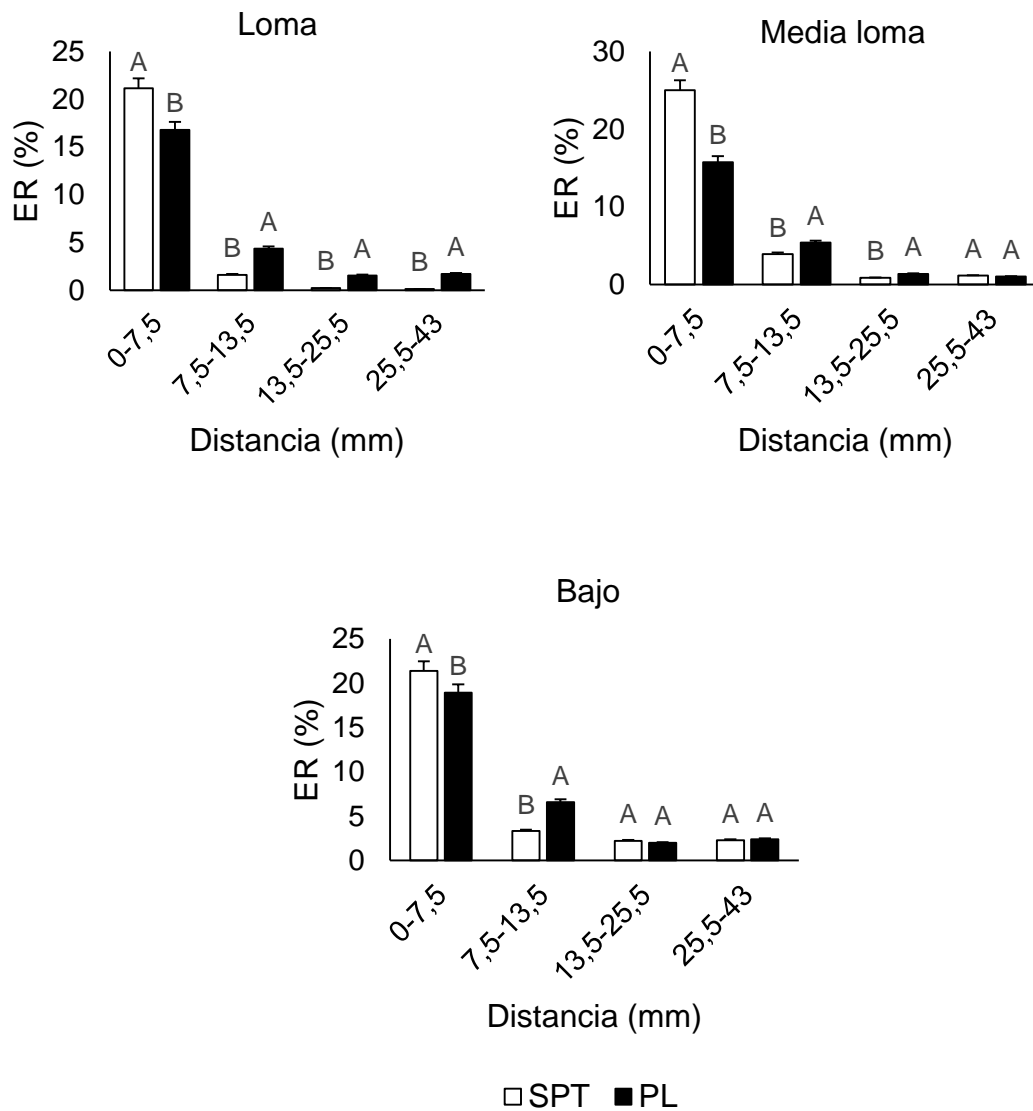


Figura 4.6. Eficiencia de recuperación (ER) en cada sección para dos fuentes fosforadas, superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en suelo de loma, media loma y bajo en Planicie con tosca. Letras diferentes indican diferencias significativas entre fuentes dentro de cada sección ($p < 0,05$).

Al igual que en Planicie medanosa se analizó la correlación entre algunas propiedades edáficas y el P recuperado en la última sección como indicador de la tasa de difusión del fertilizante en el suelo. El P recuperado en la última sección tuvo una relación negativa con el pH inicial del suelo y positiva con el COT, tanto en el tratamiento SPT como en el PL. Sin embargo, cuando se aplicó SPT, el

incremento de P recuperado estuvo asociado con el aumento en el contenido de limo y arcilla y de COT, con el cual presentó un coeficiente de correlación más alto que en el tratamiento con PL. A su vez, el contenido de Ca afectó negativamente la difusión del SPT, mostrando un alto coeficiente de correlación (Tabla 4.10).

Tabla 4.10. Correlación entre ER (eficiencia de recuperación) en la sección de 25,5-43 mm y propiedades edáficas en Planicie con tosca.

Coef/Prob	ER	
	SPT	PL
Fe+Al	ns	ns
pH	-0,60*	-0,88**
a+l	0,98**	ns
COT	0,93**	0,69**
CIC	ns	ns
Ca	-0,95**	ns
CaCO ₃	ns	ns
Al	ns	ns
Fe	ns	ns

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$ ns: no significativo

En general, se observó una disminución de pH alrededor del punto de aplicación del fertilizante. En la loma, si bien se observó una acidificación en la sección central, el pH en SPT se vio incrementado respecto al testigo en las secciones más alejadas (13,5-43 mm) y en el caso de PL sólo en la última sección ($p < 0,05$). En el suelo de media loma ambos fertilizantes provocaron una disminución de pH en todas las secciones y si bien las diferencias fueron pequeñas, el SPT generó mayor acidez. Por otro lado, en el suelo del bajo, se observó una acidificación hasta los 25,5 mm con ambas fuentes y en la última sección el pH

aumentó levemente respecto al testigo. El efecto de acidificación de los tratamientos con SPT estuvo más concentrado en la sección central, alcanzado en general pH más bajos en esta sección respecto a PL (Figura 4.7) (Anexo Tabla 4.11).

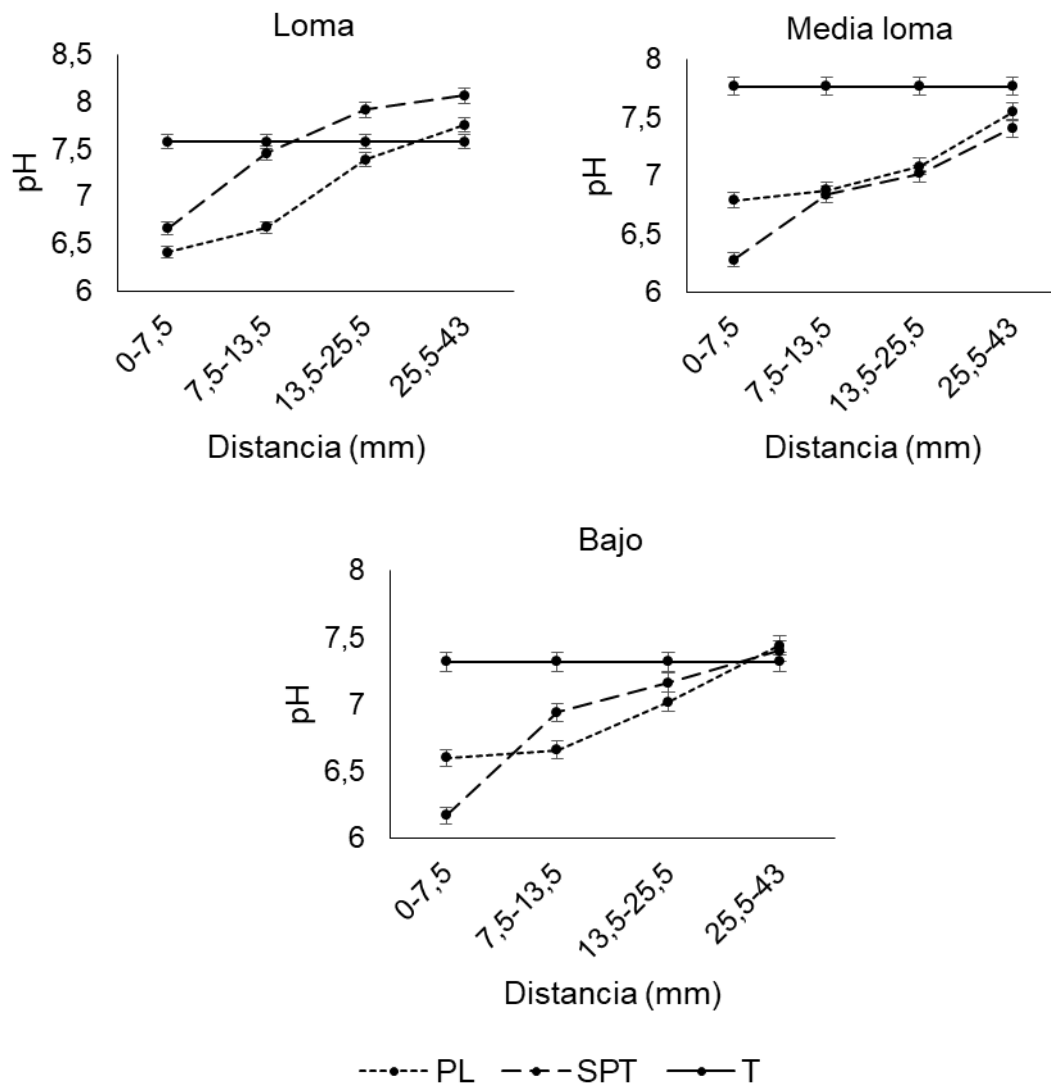


Figura 4.7. Valores de pH en cada sección en los tratamientos superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie con tosca.

4.4 DISCUSIÓN

En general la eficiencia de recuperación de P fue baja para todos los suelos, manteniéndose alrededor del 30% al considerar el promedio de todos los tratamientos correspondientes tanto a Planicie medanosa como a Planicie con tosca. Además, al analizar las tres posiciones en conjunto para cada sitio no se observaron ventajas claras de la fuente líquida sobre el SPT granulado en cuanto a disponibilidad en ninguno de los dos suelos. Estos resultados difieren de lo reportado en varios estudios para suelos calcáreos en Australia, dónde se observaron mayores disponibilidades de P en tratamientos con fuentes líquidas del nutriente (Bertrand et al., 2006; McBeath et al., 2007). Esto puede deberse a que los suelos estudiados en estos trabajos presentaron mayor proporción de CaCO_3 que los suelos de Planicie con tosca. En suelos con menor poder de retención de P se ha encontrado que el comportamiento del P es más independiente de su formulación (Lombi et al., 2004). En general cerca del 90% del P recuperado luego del periodo de incubación se encontró dentro los primeros 13,5 mm del punto de aplicación, similar a lo hallado por Degryse y McLaughlin (2014) en Oxisoles y suelos calcáreos donde no observaron incrementos respecto al testigo después de los 13,5 mm del punto de aplicación. Sin embargo, existieron variaciones en el comportamiento de los fertilizantes en los suelos de las distintas posiciones topográficas dentro de cada sitio. Los fertilizantes además provocaron un descenso de pH en la zona más cercana al punto de aplicación en todos los tratamientos, que en general estuvo alrededor de una unidad de pH. El efecto de acidificación alrededor del punto de aplicación de fertilizantes ha sido reportado por varios autores, mientras algunos han registrado caídas por encima de dos unidades de pH (Sample et al., 1980),

aunque en suelos con mayor capacidad buffer las variaciones han sido leves (Lombi et al., 2004). En suelos con pH por encima de 7 como los de Planicie con tosca la acidificación podría favorecer además la solubilización de fosfatos de Ca presentes en el suelo, aportando fosfatos a la solución y adicionándose estos al aporte del P-fertilizante. En este trabajo es importante considerar estos posibles procesos ya que no se ha discriminado el P proveniente del fertilizante del P nativo del suelo.

4.4.1 Planicie medanosa

En Planicie Medanosa la topografía tuvo un importante efecto sobre la disponibilidad de P proveniente del fertilizante. Se observaron marcadas diferencias de pH entre la loma y el bajo, estando este último influenciado por la presencia de un nivel freático alcalino. La disponibilidad de P estuvo fuertemente afectada en la posición de loma, donde la recuperación de P fue menos del 50% de la hallada en el bajo. Esto puede relacionarse con el mayor contenido de Fe y Al y el pH ácido en el suelo de la loma donde el P incorporado como fertilizante podría reaccionar con los cationes del suelo formando compuestos amorfos de Fe y Al y quedar adsorbido u ocluido, constituyendo formas de baja solubilidad (Devau et al., 2009; Fink et al., 2016). El suelo del perfil de la loma en Planicie medanosa mostró un incremento del contenido de P ligado a Fe y Al, tanto orgánico como inorgánico, en los primeros 20 cm respecto de los suelos de media loma y bajo de la misma toposecuencia (Capítulo 1. Sección 3.3.8) y la aplicación de los fertilizantes en este suelo tuvo además un efecto acidificante, agravando los procesos de fijación de P. Independientemente de la fuente fosforada utilizada en este caso, tanto la disponibilidad de P como la difusión

estuvieron limitadas, incluso la recuperación de P en la última sección fue inferior al testigo. Esto fue más evidente al aplicar PL, probablemente debido a una mayor disminución del pH respecto a SPT, contribuyendo con los procesos de sorción de P por los óxidos e hidróxidos de Fe y Al (Daly et al., 2015). Degryse y McLaughlin (2014) hallaron que en suelos con pH menor a 7 la zona de difusión de P aplicado como fertilizante decrece con el aumento en el contenido de Fe y Al, ya que en suelos ácidos predomina la formación de compuestos P-Fe (Khatiwada et al., 2014). En la media loma la disponibilidad de P luego del ensayo fue significativamente superior a la hallada en la loma, asociado principalmente a que en este ambiente donde el pH fue neutro la disponibilidad de P se vio favorecida. En el bajo se dieron las mejores condiciones para la disponibilidad de P antes de la aplicación de fertilizante y luego del ensayo, alcanzándose las máximas eficiencias de recuperación de P. Además, la aplicación de fertilizante generó una leve disminución de pH lo cual puede favorecer aún más la disponibilidad de P, ya que en el suelo de esta posición el pH fue levemente alcalino. Degryse y McLaughlin (2014) hallaron que en suelos con pH menor a 7 la zona de difusión de P aplicado como fertilizante decrece con el aumento en el contenido de Fe y Al, ya que en suelos ácidos predomina la formación de compuestos P-Fe (Khatiwada et al., 2014). En suelos con pH mayor a 7 no observaron una clara relación entre la zona de difusión y el contenido de Fe y Al, mientras que en suelos alcalinos la zona de difusión fue menor con presencia de CaCO_3 , sugiriendo procesos de adsorción del P sobre carbonatos (Bertrand et al., 2003), disminuyendo su disponibilidad.

4.4.2 Planicie con tosca

En este sitio el efecto de la posición topográfica fue menor que en Planicie medanosa. El suelo del bajo, además de tener una mayor disponibilidad inicial, la recuperación de P aplicado como fertilizante también fue superior. El mayor contenido de COT en el suelo del bajo habría beneficiado la disponibilidad de P, ya que los ácidos orgánicos de bajo peso molecular pueden favorecer la liberación de P a la solución del suelo debido a que las sustancias húmicas reducen la adsorción de fosfatos sobre calcita (Moradi et al., 2014; Taghipour y Jalali, 2012; Yang et al., 2019), e inhiben la transformación de fosfatos de Ca en compuestos termodinámicamente más estables (Alvarez et al., 2004). Esto podría contribuir a que, bajo estas condiciones, la formulación líquida no haya presentado ventajas sobre el SPT granulado. Sin embargo, el menor contenido de COT y la mayor abundancia de Ca intercambiable en la loma limitarían la difusión y la disponibilidad de P al aplicar SPT, mostrando el PL un mejor comportamiento. Varios estudios han mostrado que la presencia de polifosfatos inhibe la precipitación de los fosfatos de calcio en suelos alcalinos calcáreos (Bertrand et al., 2006). Estas variables (COT y Ca intercambiable) fueron las más relevantes para determinar la disponibilidad de P en los suelos de Planicie con tosca (Capítulo 1. Sección 3.1.6) y los resultados del ensayo de difusión confirmaron esto. En este caso, la aplicación de PL presentó ventajas sobre el SPT, similar a lo hallado por otros autores que comparan fuentes fosforadas líquidas y sólidas en suelos calcáreos. Varios estudios han mostrado que la presencia de polifosfatos inhibe la precipitación de ortofosfatos y sobre todo los fosfatos de calcio en suelos alcalinos calcáreos (Bertrand et al., 2006). La menor difusión de P aplicado como SPT podría deberse a que la alta concentración de

P alrededor del gránulo favorece la precipitación de fosfatos de calcio. Lombi et al. (2004) encontraron que, al aplicar una formulación granulada de fosfato mono amónico, la mayor parte del P quedó en cercanías del gránulo, mientras que con la formulación líquida el P difundió mejor, disminuyendo o evitando la precipitación. Sin embargo, las diferencias halladas entre la formulación líquida y la granular en este trabajo son pequeñas, encontrándose por ejemplo en la sección central en la media loma 857 mg kg⁻¹ P en PL y 1356 mg kg⁻¹ en SPT. En el suelo de la loma el 87% del P recuperado se halló en los primeros 13,5 mm cuando fue aplicado como PL, mientras que al ser aplicado como SPT el 98% del P se concentró en esta sección. Sin embargo, en el suelo del bajo el P recuperado hasta los 13,5 mm alcanzó el 85% para ambas fuentes. Esto coincide con lo hallado en varios trabajos donde la difusión de P aplicado en forma granular queda confinada en un radio de 13,5 mm del punto de aplicación (Lombi et al., 2004a). Las condiciones de los suelos de la Planicie con tosca resultaron en una incompleta disolución del gránulo de SPT aplicado, similar a lo hallado por Lombi et al. (2005) en fertilizantes como fosfato mono y di amónico y SPT. Estos autores sugieren que las diferencias entre suelos se deben a procesos de fijación y no tanto a la incompleta disolución del gránulo (Lombi et al., 2004b). Holloway et al. (2001) postularon que es más probable que el proceso de precipitación de P con calcio ocurra alrededor del gránulo de fertilizante que al aplicar fertilizante fluido, donde la concentración de P en cualquier punto de la banda de aplicación es menor. Esto está relacionado con que hay un flujo de agua hacia los gránulos de fosfato, los cuales son altamente higroscópicos, y este flujo iría en la dirección opuesta a la difusión de P desde el gránulo (Hettiarahchci et al., 2006). En cambio, cuando se aplican fertilizantes líquidos,

el agua de la solución fertilizante puede disminuir el flujo osmótico del agua del suelo en dirección opuesta a la difusión del P (Khatiwada et al., 2014). A altos valores de pH, inicialmente los productos de la reacción de P y Ca son formas más solubles, como brushita, monetita y fosfato dicálcico, y con el tiempo pueden transformarse en formas estables de P-Ca, análogas a la apatita (Perassi y Borgnino, 2014). También se ha encontrado un incremento en Ca en el gránulo del fertilizante, indicando que el Ca puede migrar hacia el mismo y producir así la precipitación de P-Ca alrededor del gránulo, disminuyendo aún más la posibilidad de disolución del mismo (Lombi et al., 2004a). Khatiwada et al. (2014) hallaron un enriquecimiento en Al, Fe y Ca en el remanente de los gránulos de fertilizante extraídos a cinco semanas de incubación, indicando indirectamente que estos cationes entran o quedan en el gránulo y empiezan a reaccionar antes de que los gránulos se disuelvan completamente. Lombi et al. (2004) encontraron que luego de cinco semanas de incubación el remanente del gránulo de fertilizante presentaba Ca y Fe concentrado principalmente en su parte más externa, indicando un movimiento de cationes desde el suelo hacia el gránulo. Mengel (2018) también observó mayor formación de P-Ca en formulaciones granuladas respecto a líquidas. Suñer y Galantini (2013) describieron que suelos con menores contenidos de P extraíble terminaron formando más P-Ca cuando se le aplicó fertilizante granulado. En suelos no calcáreos la zona de difusión del fertilizante granular crece con el tiempo, mientras que en suelos calcáreos se observó una disminución de la zona de difusión entre el día 1 y el 7, sugiriendo que actúan procesos de precipitación sobre carbonatos de calcio (Degryse y McLaughlin, 2014).

4.4.3 Comparación entre fuentes de P

Los resultados de los ensayos de difusión no mostraron ventajas claras de la fuente líquida sobre el SPT granulado. Si bien en Planicie Medanosa se observó una mayor recuperación de P en el tratamiento PL en el suelo de media loma, y en Planicie con tosca en el suelo de loma la fuente líquida superó al SPT granulado, en general, los porcentajes de recuperación fueron similares entre ambas fuentes. Los factores que determinaron el grado de recuperación fueron distintos entre las dos subregiones, ya que en Planicie con tosca la materia orgánica tuvo un efecto positivo sobre la disponibilidad de P mientras que el contenido de Ca intercambiable disminuyó su solubilidad, en cambio, en los suelos de Planicie medanosa el incremento del pH y el contenido de CaCO_3 favorecieron la recuperación.

Los valores de recuperación del P aplicado fueron muy bajos, no superando el 50% en un radio de 43 mm alrededor del punto de aplicación. En Planicie con tosca el resultado fue similar en todas las posiciones topográficas, con eficiencias de recuperación alrededor del 30%, mientras que el porcentaje más bajo de ER se halló en la posición loma de Planicie medanosa con menos de 20%. En todos los casos más de la mitad del P fue recuperado en las inmediaciones del punto o granulo de aplicación (hasta los 7,5 mm). A pesar de las bajas ER, en el suelo de la posición de loma de Planicie con tosca, se observó una mejora en la difusión cuando se utilizó la fuente líquida.

4.5 CONCLUSIONES

Los procesos que afectan la disponibilidad de P difieren entre las regiones geomorfológicas, y entre posiciones topográficas. La variabilidad espacial en función del paisaje fue mayor en Planicie medanosa, donde en el suelo de la loma el pH ácido y el contenido de Fe y Al disminuyeron la eficiencia de recuperación y la tasa de difusión del fosfato, mientras que en el suelo del bajo éstas no presentaron limitantes. En cambio, en Planicie con tosca no se observó la misma magnitud en la variabilidad espacial en estos parámetros. La única situación donde la aplicación del formulado líquido de P presentó ventaja sobre la formulación granulada fue en la loma de Planicie con tosca. Por esta razón se considera que en condiciones de suelo con alto contenido de calcio y bajo contenido de materia orgánica, podría ser recomendable la elección de fuentes líquidas. Sin embargo, habría que considerar la proporción de la superficie del lote que presenta estas condiciones y evaluar si la logística y el costo del fertilizante y su aplicación representan un beneficio que supere al tradicional uso de fertilizante granular. Es importante destacar el rol de la materia orgánica sobre todo en los suelos de Planicie con tosca. Una estrategia a mediano- largo plazo para aumentar la eficiencia de recuperación del fertilizante y su tasa de difusión en el suelo, es la implementación de prácticas de manejo tendientes a incrementar el nivel de materia orgánica.

5. CAPÍTULO 3

RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN CON DOS FUENTES FOSFORADAS DE DISTINTA SOLUBILIDAD

5.1 INTRODUCCIÓN

La fertilización fosforada en suelos con bajos contenidos de P extraíble ha sido una práctica común en la agricultura moderna. La fertilidad fosforada y la disponibilidad de P para las plantas se pueden ver reflejadas en respuestas en la calidad y el rendimiento del cultivo, con aportes variables a los distintos componentes del mismo, mejorando la absorción de otros nutrientes, y contribuyendo a la tolerancia a sequía (Rubio et al., 2012). Suñer y Galantini (2012) demostraron que la fertilización fosforada en el cultivo de trigo produjo un aumento en la materia seca y en la concentración de P en la planta e incrementó la absorción de N, K y S y mejoró el balance de nutrientes. Zheng et al. (2015) estudiaron el efecto de la fertilización fosforada en el rendimiento de soja en la región noreste de China donde los cultivos experimentaron un estrés hídrico continuo durante la etapa reproductiva, y encontraron que la disponibilidad de P fue la principal variable del suelo en determinar el rendimiento. Por otra parte, los resultados de varios estudios indicarían que parte de los aportes de P-fertilizante se han acumulado en los suelos (Renneson et al., 2015; B. Wang et al., 2015), sugiriendo una baja eficiencia en el uso de este fertilizante y poca respuesta en términos de rendimiento por parte de los cultivos (Daroub et al., 2003). Similares resultados también han sido observados en la región pampeana por Picone et al. (2007) quienes realizaron ensayos de fertilización en Argiudoles y Paleudoles de la zona de Balcarce. Estos autores encontraron que sólo el 2% a 7% del P aplicado se exportó con el grano, lo que implicaría que gran parte del fertilizante no pudo ser absorbido por los cultivos. En estos suelos el P se acumuló en formas de diferente labilidad, en promedio el 81% del P agregado se recuperó en las fracciones orgánicas e inorgánicas de P extraídas con membrana de

intercambio aniónico (MIA) y NaHCO_3 , (formas lábiles), y extractables con NaOH y HCl , (moderadamente lábiles), y no se hallaron evidencias de P fijado como $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ de baja solubilidad. Esto podría ser beneficioso desde el punto de vista de eficiencia de uso del fertilizante ya que son fuentes de P rápidamente disponibles para las plantas en subsecuentes campañas. Aunque con el tiempo, aún las formas más lábiles de P maduran a formas menos disponibles, especialmente en suelos que contienen altas proporciones de Ca (Jalali y Ranjbar, 2010). La eficiencia en el uso del P depende entre otros factores, de las condiciones ambientales y del suelo en las que se desarrolla el cultivo. De modo que en suelos con altas proporciones de Ca, tanto como Ca intercambiable o de carbonatos de calcio, se ha observado que los aportes de P mediante los fertilizantes solubles granulares resultaron en muy bajas eficiencias de uso del elemento por parte de los cultivos (Khan et al., 2018; Lombi et al., 2006). Algunos estudios, sobre todo en suelos muy alcalinos y de regiones semiáridas, encontraron ventajas en la disponibilidad de P para los cultivos cuando se utilizaron fuentes líquidas en vez de las formulaciones granuladas (Bertrand et al., 2006; Hettiarachchi et al., 2008; McBeath et al., 2007). El mecanismo a través del cual se produce esta diferencia aparentemente está determinado por el gradiente de concentración de P que sería mucho mayor en el caso de los fertilizantes granulares (McBeath et al., 2012, 2008). Holloway et al. (2001) sugirieron que es más probable que la precipitación de P-Ca ocurra alrededor del gránulo de fertilizante que, al aplicar fertilizante fluido, donde la concentración de P en cualquier punto de la banda de aplicación es menor. Al aplicar el gránulo de fertilizante fosforado podría darse un flujo de agua hacia los gránulos de fosfato, los cuales son altamente higroscópicos, y este flujo iría en la dirección

opuesta a la difusión de P desde el gránulo (Hettiarahchci et al., 2006). Esto genera un gradiente de concentración de P alrededor del gránulo que favorece la precipitación de P-Ca. Este proceso podría verse intensificado en suelos que experimentan periodos de sequía, donde por un lado la difusión del P se ve afectada por la falta de agua, y por otro, durante estos periodos los fosfatos de Ca podrían ir evolucionando a formas más estables. En cambio, cuando se aplican fertilizantes líquidos, el agua de la solución fertilizante puede disminuir el flujo osmótico del agua del suelo en dirección opuesta a la difusión del P (Khawwaja et al., 2014). De esta manera podría disminuir la precipitación de P-Ca y a su vez la difusión del P podría ser menos dependiente de la humedad del suelo.

Considerando los resultados analizados y discutidos en los capítulos anteriores, en suelos de Planicie con tosca la probabilidad de la transformación de los fosfatos aplicados como fertilizante a fosfatos de calcio con muy baja solubilidad, o su adsorción a las calcitas presentes en la masa de suelos calcáreos sería muy alta, sobre todo en suelos agrícolas con bajos contenidos de materia orgánica (Achat et al., 2016; Harrell y Wang, 2006). A su vez, los bajos contenidos de humedad en estos suelos también favorecerían la fijación de los fosfatos formando compuestos de muy baja biodisponibilidad (Du et al., 2013). En estas condiciones edáficas y climáticas, la aplicación de fertilizantes líquidos, como el polifosfato, podría resultar en mejor disponibilidad y eficiencia de uso de P, dando como resultado una mayor producción de materia seca y rendimiento de los cultivos. El objetivo del presente capítulo fue comparar la eficiencia de uso de una formulación líquida (polifosfato líquido) y de una formulación sólida (superfosfato triple de calcio) en suelos bajo agricultura de loma, media loma y

bajo en el sitio de Planicie con tosca, a través de ensayos en macetas con plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) en invernáculo bajo dos condiciones contrastantes de humedad edáfica.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevaron a cabo ensayos en macetas con suelo (3,5 kg) de los primeros 20 cm de loma, media loma y bajo del sitio ubicado en PT, descrito en el Capítulo 1. Como cultivo se utilizó trigo (*Triticum aestivum* L.) variedad ACA 315. Se determinó el poder germinativo del mismo para sembrar la cantidad de semillas necesarias, las cuales fueron previamente tratadas con curasemillas para prevenir posibles apariciones de hongos. Posterior a la emergencia se procedió a hacer un raleo para dejar tres plántulas. Durante el ensayo se controló la aparición de malezas y enfermedades.

Previo a la siembra se humedeció el suelo a capacidad de campo y se aplicó una dosis de Nitrógeno (N) a razón de 30 kg ha⁻¹ por tonelada de rendimiento de grano esperado. El fertilizante fosforado también fue aplicado previo a la siembra utilizando una dosis de suficiencia a razón de 5 kg ha⁻¹ de P por tonelada de rendimiento de grano. Se estimó un rinde de 4000 kg ha⁻¹. A continuación, se describen los tratamientos fertilizante realizados en este ensayo.

1. Testigo sin agregado de fertilizante fosforado. **(T)**
2. Fertilizado con formulación líquida de fertilizante fosforado (polifosfato, formulación comercial SolFOS, grado equivalente 11-37-0, densidad 1,41 g cm³). Se aplicó superficialmente en forma de gotas. **(PL)**

- Fertilizado con formulación sólida de fertilizante fosforado (Superfosfato triple de Calcio, grado equivalente 0-46-0, 14 % de Ca). Se ubicó el gránulo de fertilizante por debajo y al costado de la semilla a una distancia de 5 cm de ésta. **(SPT)**

Además, para cada uno se mantuvieron dos condiciones de humedad:

- Humedad 1: condición “ideal” a 80 % capacidad de campo, manteniéndola constante en el tiempo. Se controló la humedad por peso de la maceta. **(H1)**
- Humedad 2: periodos de secado y humedecimiento para simular las condiciones medias de humedad del suelo durante el periodo del cultivo en la región semiárida pampeana, teniendo en cuenta las frecuencias de precipitaciones. **(H2)**

Los tratamientos son resumidos en la figura 5.1. Se realizaron 4 repeticiones de cada tratamiento, dando como resultado un total de 72 macetas.

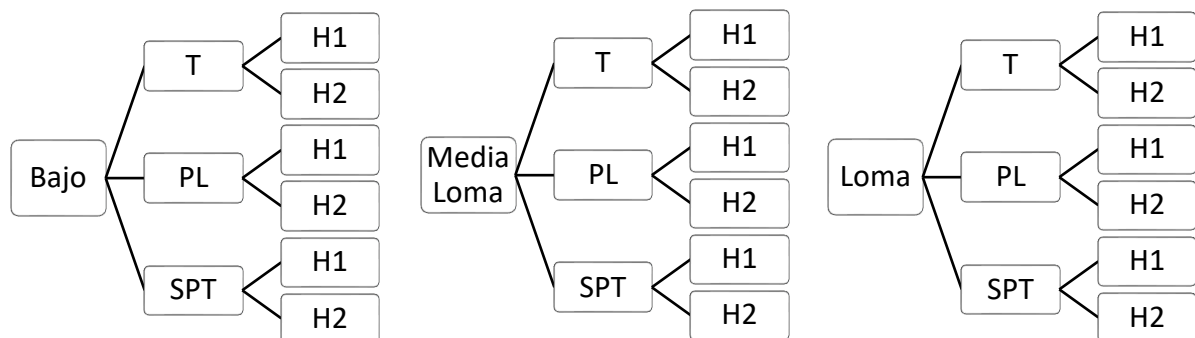


Figura 5.1. Esquema de los tratamientos realizados.

Sobre las muestras de material vegetal se determinó peso seco de raíces por lavado y tamizado, y de la biomasa aérea por corte al ras del suelo. Además,

sobre los ensayos realizados en el suelo de la loma se determinó el contenido de P y N total de la parte aérea por espectrometría ICP (Inductively Coupled Plasma).

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2013). Se analizó el cumplimiento de los supuestos y se realizaron análisis de la varianza (ANOVA) con la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Materia seca aérea

En general, con adecuada provisión de agua (H1) la materia seca aérea promedio de loma, media loma y bajo fue de 2,88 g en el testigo, 4,03 g en SPT y 3,77 g en PL. En cambio, en los tratamientos con restricciones hídricas (H2), el testigo presentó un promedio de materia seca aérea de 0,24 g, el fertilizado con SPT 0,25 g y el fertilizado con PL 0,62 g (Figura 5.2). Se encontró interacción significativa ($p < 0,01$) entre humedad, posición topográfica y tratamiento fertilizante.

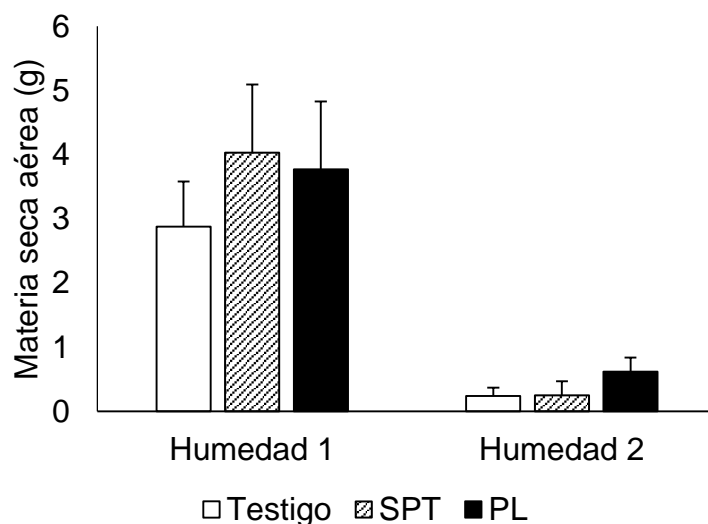


Figura 5.2. Materia seca aérea (g) promedio de las tres posiciones topográficas (loma, media loma y bajo) bajo dos condiciones de humedad (sin estrés hídrico, H1 y con estrés hídrico, H2) en el testigo, fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL).

En los tratamientos testigos sin limitación de humedad (H1) la menor producción de materia seca fue hallada en el suelo de la loma, mientras que en el bajo se observó el máximo de producción. La fertilización con SPT mostró una mejora en la producción de materia seca en el suelo de media loma y bajo, respecto a la loma. El tratamiento fertilizado con PL generó mayor materia seca en la media loma, seguida por el bajo y la loma, donde más se vio afectada la producción de materia seca. En el suelo de la loma y de la media loma, ambos tratamientos fertilizados fueron superiores al testigo. En el suelo del bajo no hubo diferencias significativas en la producción de MS entre testigo y fertilizados, y tampoco entre fertilizantes (Figura 5.3).

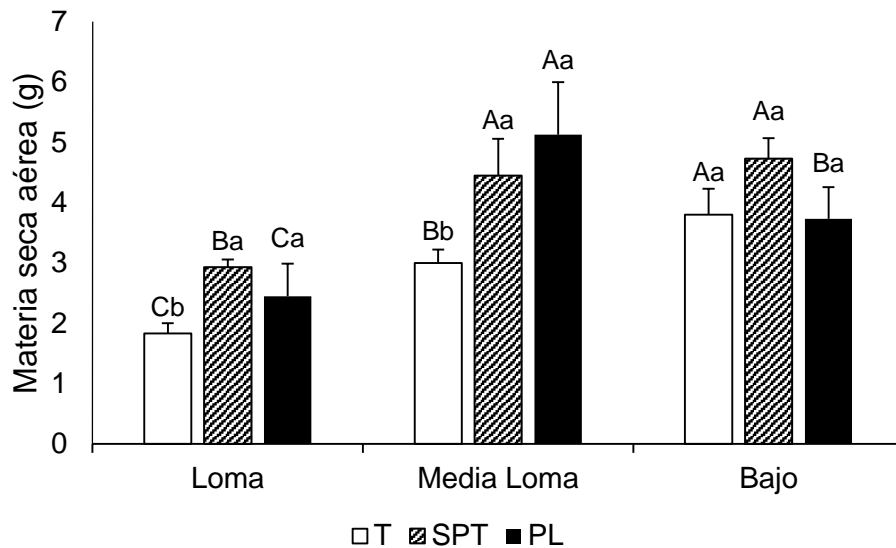


Figura 5.3. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H1) en suelo de loma, media loma y bajo. *Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición ($p < 0,05$).*

Bajo la condición de humedad restrictiva (H2), en los tratamientos testigo, la producción de materia seca se incrementó significativamente desde la loma hacia el bajo. En los tratamientos fertilizados con SPT el bajo presentó mayor producción, mientras que entre loma y media loma no hubo diferencias. Al aplicar PL, la producción de materia seca no presentó diferencias significativas entre posiciones topográficas. Los suelos de loma y media loma no presentaron diferencias entre testigo y SPT, y se observó mayor producción de MS con la aplicación de PL. Por otro lado, en el suelo del bajo no se observaron diferencias significativas entre los tres tratamientos (Figura 5.4).

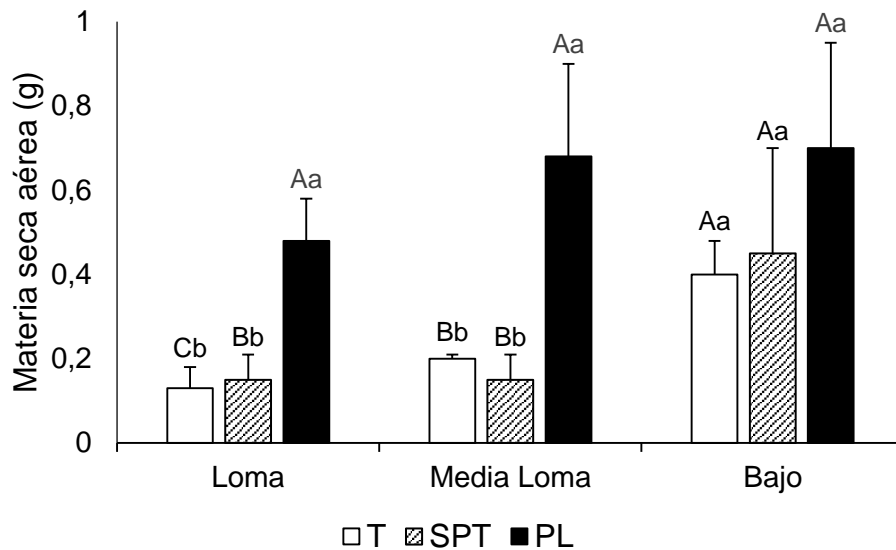


Figura 5.4. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo. *Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición (p<0,05).*

5.3.2 Biomasa radicular

La producción de biomasa radicular presentó menor variación entre tratamientos y entre posiciones topográficas que la producción de biomasa aérea. Mientras la biomasa radicular presentó valores medios de 2,58 g para H2 y 4,36 g para H1, la materia seca aérea tuvo valores medios de 0,37 g y 3,56 g, respectivamente. Se encontró interacción significativa entre tratamiento, humedad y posición (p<0,05). Las plantas desarrolladas sin limitación de humedad presentaron valores promedio de biomasa radicular (4,36 g) superiores a los hallados en los tratamientos con limitación hídrica (2,58 g). En condiciones de humedad no limitantes (H1) el peso seco de la biomasa radicular no presentó diferencias entre posiciones topográficas en los tratamientos testigos, con valores de 3,20 g en la loma, 5,20 g en media loma y 3,17 g en el bajo. El tratamiento fertilizado con SPT

diferenció la loma (3,35 g), de la media loma (6,88 g) y el bajo (5,63 g), mientras que el fertilizado con PL diferenció la loma (3,33 g) y el bajo (3,85 g) de la media loma (6,07 g) donde la producción de biomasa radicular fue mayor. En los tratamientos de loma y media loma no se hallaron diferencias significativas entre los testigos y los fertilizados y tampoco entre las dos fuentes fosforadas. En el suelo del bajo, los tratamientos fertilizados no se diferenciaron entre sí, pero el fertilizado con SPT presentó mayor biomasa radicular que el testigo (Figura 5.5)

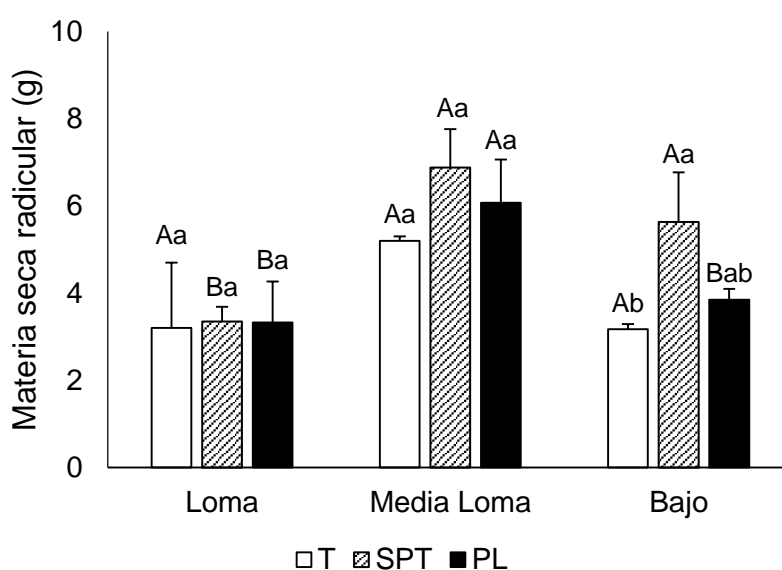


Figura 5.5. Materia seca radicular (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H1) en suelo de loma, media loma y bajo. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición ($p < 0,05$).

En condiciones de humedad limitantes, al igual que cuando esta no fue limitante, los tratamientos testigos no se diferenciaron en biomasa radicular entre posiciones topográficas. En este caso la biomasa radicular en la loma fue 2,53 g, en la media loma 2,95 g y en el bajo 2,40 g. El tratamiento fertilizado con SPT generó mayor biomasa radicular en la media loma (3,10 g) y el bajo (2,50 g) respecto de la loma (0,98 g). Al fertilizar con PL no se encontraron diferencias

significativas en biomasa radicular entre las tres posiciones topográficas, las cuales presentaron valores medios de 2,17 g en la loma, 4,40 g en la media loma y 2,55 g en el bajo. En el suelo de la loma el tratamiento fertilizado con SPT fue el que presentó menor producción de biomasa radicular, mientras que el PL y el testigo no se diferenciaron entre sí. En los suelos de media loma y bajo no se hallaron diferencias entre tratamientos testigos y fertilizados y tampoco entre las dos fuentes (Figura 5.6).

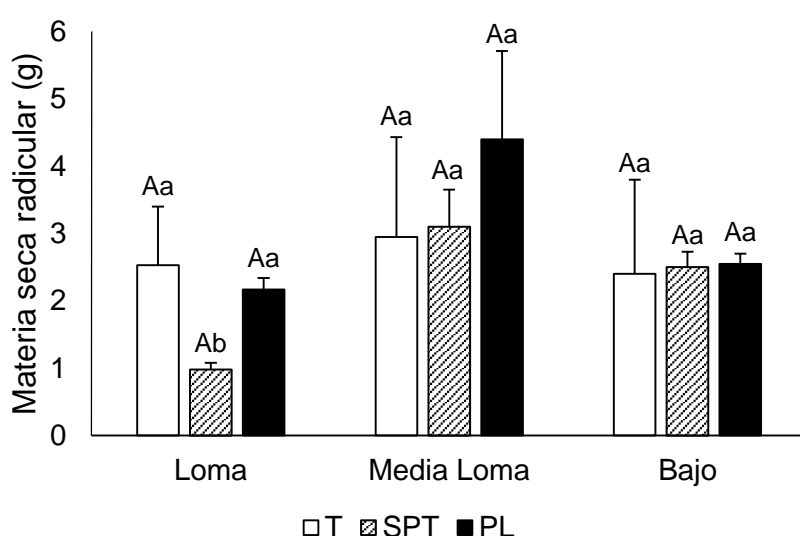


Figura 5.6. Materia seca radicular (g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre posiciones topográficas para cada tratamiento fertilizante, letras minúsculas entre tratamientos dentro de cada posición ($p < 0,05$).

5.3.3 Relación tallo: raíz

Se encontró una interacción significativa entre la condición de humedad, la posición topográfica y el tratamiento fertilizante ($p < 0,05$). En condiciones de humedad no limitantes la relación tallo: raíz se mantuvo constante en los tres tratamientos, testigo y fertilizado con las dos fuentes, tanto en el suelo de loma,

como media loma y bajo. Sin embargo, dentro de los testigos, el bajo presentó mayor relación tallo: raíz (1,27), que media loma (0,63) y loma (0,69). En el caso del tratamiento fertilizado con SPT, no se hallaron diferencias entre las tres posiciones, mientras que en el fertilizado con PL la loma presentó menor relación tallo: raíz (0,75) que el bajo (1,03), representando la media loma un valor intermedio (0,83).

En condiciones de humedad limitantes se encontraron más variaciones en la relación tallo: raíz, entre posiciones y entre tratamientos. En el testigo, las plantas del suelo del bajo presentaron mayor relación tallo: raíz (0,30) que en la media loma (0,08) y la loma (0,07). En los tratamientos fertilizados con SPT, en el suelo de media loma se observó un menor valor de esta variable (0,05), respecto a la loma (0,16) y el bajo (0,19). Los tratamientos fertilizados con PL no generaron una diferencia en la relación tallo: raíz entre loma (0,23), media loma (0,19) y bajo (0,26). Las plantas desarrolladas en el suelo del bajo no presentaron efecto de los fertilizantes sobre la relación tallo: raíz. En las plantas de la media loma, la fertilización con PL presentó una mayor relación tallo: raíz que al fertilizar con SPT y que el testigo. En el caso de loma, el testigo fue el que menor relación tallo: raíz tuvo, y dentro de los tratamientos fertilizados, el PL mostró una mayor relación que el SPT.

Tabla 5.2. Relación tallo: raíz en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y fosfato líquido (PL) en suelo de loma, media loma y bajo, con y sin limitación de humedad (H1 y H2, respectivamente).

Posición	Relación tallo: raíz					
	H1			H2		
	T	SPT	PL	T	SPT	PL
Loma	0,69 Ba	0,90 Aa	0,75 Ba	0,07 Bc	0,16 Ab	0,23 Aa
Media Loma	0,63 Ba	0,69 Aa	0,83 ABa	0,08 Bb	0,05 Bb	0,19 Aa
Bajo	1,27 Aa	0,88 Aa	1,03 Aa	0,30 Aa	0,19 Aa	0,26 Aa

Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre filas para cada condición de humedad y tratamiento, letras minúsculas entre columnas para cada condición de humedad y posición. Nivel de significancia $p < 0,05$.

5.3.4 Relación N: P

La determinación de los contenidos de P y N del material vegetal se realizó solamente sobre los ensayos con suelo de loma ya que fue en este suelo donde se observaron mayores variaciones entre tratamientos, y además sería el ambiente más limitante para la disponibilidad de P. Se encontró una interacción significativa entre tratamiento y humedad ($p < 0,05$). El material vegetal presentó menor relación N:P bajo la condición de humedad 1 en el caso de los tratamientos testigo y SPT, mientras que al fertilizar con PL no se hallaron diferencias significativas en la relación N:P entre las dos condiciones de humedad. Particularmente bajo la condición de humedad 1 el testigo presentó mayor relación N:P (19,1) que los tratamientos fertilizados, pero no se observaron diferencias significativas entre la aplicación de PL (16,6) y SPT (16,5). Sin embargo, bajo la condición de humedad 2 los tratamientos testigo (24,0) y SPT (23,8) presentaron un comportamiento similar, mientras que el tratamiento fertilizado con PL mostró una disminución de la relación N:P en el material vegetal (18,7).

Tabla 5.3. Concentración de N (g kg^{-1}) y P (mg kg^{-1}) y relación N:P en el material vegetal aéreo bajo dos condiciones de humedad (sin estrés hídrico, H1 y con estrés hídrico, H2) en tratamientos Testigo (T), superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido PL en suelo de loma.

Tratamiento	N (g kg^{-1})		P (mg kg^{-1})		N:P	
	H1	H2	H1	H2	H1	H2
T	16,9 B	31,4 A	885,0 B	1308,5 A	19,1 Ab	24,0 Aa
SPT	19,7 A	28,6 B	1193,2 A	1201,7 B	16,5 Bb	23,8 Aa
PL	15,1 B	17,5 C	908,0 B	937,5 C	16,6 Ba	18,7 Ba

Letras mayúsculas diferencias entre filas para cada condición de humedad, minúsculas entre columnas para cada tratamiento. Nivel de significancia $p < 0,05$.

5.4 DISCUSIÓN

La relación N:P del material vegetal puede ser usada como diagnóstico para detectar deficiencias de N y P. Relaciones N:P menores a 14 sugieren deficiencias de N mientras que valores por encima de 16 muestran deficiencia de P (Prado y Silva, 2017). La relación N:P hallada en el tejido vegetal en los tratamientos fertilizados y sin restricción de humedad (medido en plantas desarrolladas en suelo de loma) fue cercana al límite por encima del cual habría una deficiencia de P (16,51 en SPT y 16,63 en PL). Otros autores mencionan una relación N:P ideal entre 10 y 20 (Koerselman y Meuleman, 1996). Bajo condiciones de humedad no limitantes (H1), en general, la producción de materia seca respondió a la fertilización, independientemente del tipo de formulación de los fertilizantes fosforados utilizados en este trabajo. Esto indicaría que el proceso de difusión del P desde el gránulo de SPT hacia las raíces no sería limitante para el desarrollo del cultivo.

Sin embargo, en la región semiárida los suelos generalmente atraviesan periodos con déficit de humedad durante el desarrollo de los cultivos. La escasez

de humedad en el suelo puede afectar la difusión de P desde el fertilizante hacia las raíces, sobre todo en el caso del gránulo de SPT. En concordancia con esto, se observó una marcada deficiencia de P en los tratamientos testigo y fertilizado con SPT en el tratamiento con limitaciones en la humedad. Considerando el límite por encima del cual se sugiere deficiencia de P, este fue superado en el testigo (24,01) y en el fertilizado con SPT (23,81), indicando que fertilizar con SPT con contenidos limitantes de humedad no incrementaría el P absorbido por el cultivo. En el caso del tratamiento fertilizado con PL, si bien la relación N:P fue superior a 16, fue significativamente menor que en los otros tratamientos y no se diferenció del tratamiento fertilizado con la misma fuente, pero sin restricción de humedad, indicando que la utilización de esta fuente podría atenuar el efecto de la falta de humedad en el suelo.

La mejora en la absorción de P por la planta al aplicar la fuente líquida respecto al gránulo de SPT bajo condiciones de humedad restrictivas estaría relacionada con las condiciones de difusión (Menezes-Blackburn et al., 2018). Cuando el suelo presenta buenas condiciones de humedad y la tasa de difusión del P no se ve limitada por este factor, el PL no presenta una ventaja sobre el SPT. Sin embargo, cuando el suelo atraviesa condiciones de sequía la difusión se ve limitada y esto además contribuye a que la mayor parte del P quede concentrada alrededor del gránulo de fertilizante. De esta manera se favorece la precipitación de fosfatos de Ca que podrían ir convirtiéndose en formas más estables con el tiempo (Perassi y Borgnino, 2014). Esta situación puede verse además propiciada en suelos como los del ambiente de loma y eventualmente media loma en Planicie con tosca, donde puede haber una mayor concentración de Ca y CaCO_3 . En suelos con mayor contenido de materia orgánica, tal como el del

bajo, este efecto podría verse atenuado debido al efecto supresor de los compuestos húmicos sobre la precipitación de P-Ca y la adsorción de P sobre calcita (Sindelar et al., 2015).

La deficiencia de P además fue acompañada con una menor producción de materia seca aérea. En plantas deficientes en P hay una reducción de la expansión de hojas y del número de hojas porque se reduce la tasa de producción y división celular. La expansión de hojas está relacionada con la expansión de células epidérmicas y este proceso puede verse afectado bajo condiciones de deficiencia de P (Hawkesford et al., 2012).

Las plantas de los tratamientos testigo y fertilizado con SPT del suelo de loma, en condiciones limitantes de humedad, fueron las que menor relación tallo: raíz presentaron, coincidiendo con las deficiencias de P más pronunciadas, de acuerdo a los valores de N:P. Bajo deficiencia de P, el crecimiento radicular puede ser menos inhibido que el crecimiento del tallo, llevando a una disminución en la relación tallo: raíz (Lamber et al., 2006; Steingrobe et al., 2001). Esta disminución es debida a un aumento en la partición de carbohidratos hacia las raíces (Hawkesford et al., 2012). Bajas tasas de aplicación o de disponibilidad de P en condiciones de estrés hídrico pueden generar una gran reducción en el crecimiento de la planta y por ende en el rendimiento del cultivo, mientras que un adecuado suministro de P puede compensar el efecto del estrés hídrico (Jones et al., 2005; Mumtaz et al., 2014). El mejor comportamiento del PL bajo condiciones limitantes de humedad, las cuales son características de Planicie con tosca, podría traducirse posteriormente en un mayor rendimiento del cultivo en los suelos de ambiente de loma y media loma. Bajo condiciones de deficiencia de P, como las que fueron detectadas en el tratamiento testigo y en el fertilizado

con SPT con restricción de humedad, puede verse inhibida además de la tasa de crecimiento de la planta, la formación de órganos reproductivos, retrasarse la iniciación floral, y restringirse la formación de granos. La senescencia prematura de las hojas es otro factor que limitaría el rendimiento del cultivo (Hawkesford et al., 2012). Por otro lado, la fertilización con PL podría generar una mayor homogeneidad en el crecimiento de las plantas dentro de un lote, ya que como se observó en este tratamiento no se hallaron diferencias entre los ensayos con suelos de los tres ambientes.

5.5 CONCLUSIONES

La aplicación de P como polifosfato líquido puede mejorar la disponibilidad edáfica de este nutriente respecto a la aplicación de superfosfato triple en condiciones de humedad limitantes y en suelos calcáreos con bajo nivel de materia orgánica, como en los ambientes de loma y media loma analizados en este trabajo en Planicie con tosca. La mejora en la disponibilidad de P contribuye a un incremento en la absorción de P lo cual se ve reflejado en un aumento en la producción de materia seca y por lo tanto incrementaría el rendimiento de grano del cultivo. Sin embargo, al mejorar las condiciones de disponibilidad de agua y el nivel de materia orgánica, no habría diferencias entre el uso de fertilizantes granulares como superfosfato triple y líquidos como polifosfato. Además, en condiciones de sequía, la aplicación de fertilizante líquido disminuye las diferencias en el crecimiento de las plantas entre los suelos de loma, media loma y bajo.

6. CAPÍTULO INTEGRADOR

La geomorfología de la región fue uno de los principales factores que afectó la distribución de las fracciones de P originando las diferencias observadas entre PM y PT. La pendiente regional de la costra calcárea (calcrete) hacia el Este ha generado una acumulación diferencial de sedimentos eólicos (Zárate y Tripaldi, 2012) y en PT la proximidad del calcrete ha promovido la abundancia de Ca en el perfil del suelo. Otro factor que ha incidido sobre la distribución de las distintas fracciones de P es el régimen de humedad del suelo, siendo clasificados como ustoles en PT y, udoles y acuoles en PM. Esto ha contribuido a que en PM la meteorización del material parental haya sido más intensa y la lixiviación de bases como el Ca, también haya sido de mayor magnitud.

La distribución de las formas de P siguió un patrón similar en ambas subregiones y la forma dominante fue la ligada a Ca en ambos casos. Sin embargo, se observaron diferencias en la abundancia de las formas de P, en las relaciones entre estas y en los factores y procesos que limitan la disponibilidad de P en cada subregión. En PT los procesos de fijación de P relacionados al Ca son más intensos que en PM, por lo cual esta fracción es mayor en los suelos de esta región. El P reacciona con el Ca formando precipitados de distinto grado de solubilidad y además puede ser adsorbido sobre partículas de CaCO_3 , proceso que es favorecido por el pH neutro a alcalino en estos suelos.

Con el tiempo, estos compuestos pueden convertirse en formas termodinámicamente más estables, afectando la disponibilidad de P. Estos procesos en PM son de menor magnitud, sin embargo, en este sitio hay una mayor proporción de P ligado a Fe y Al que en PT. La disminución en la relación $\text{Ca}:\text{Fe}+\text{Al}$ favorece la formación de compuestos de P ligados a Fe y Al. Es decir que, mientras en PT el alto contenido de Ca libre desplazaría el equilibrio

favoreciendo la formación de minerales de P-Ca sobre la formación de minerales de P-Fe/Al, en PM, donde la proporción de Ca en relación con el Fe y Al es menor, el equilibrio estaría más desplazado a la formación de minerales de P-Fe/Al. En PM, además, el pH en los ambientes sin influencia del nivel freático alcalino, como la loma, favorece la formación de estos compuestos.

Las formas de P de mayor disponibilidad como el P en solución y el P lábil se encontraron en mayor proporción en PM, indicando que los procesos de fijación de P se darían con menor intensidad. Sumado a esto, el mayor grado de meteorización en esta subregión puede contribuir a la disponibilidad de P. Sin embargo, en PT, como se mencionó anteriormente, las formas disponibles pueden reaccionar Ca y CaCO_3 , disminuyendo su disponibilidad para las plantas. Las formas orgánicas representaron aproximadamente un 20% del P total en ambas subregiones, sin embargo, se observaron variaciones en su composición. En PT se observó menor proporción de P orgánico lábil y mayor proporción de P orgánico estable, respecto a PM. De manera similar a las formas inorgánicas, la labilidad del P orgánico se encuentra más limitada en PT.

Otro factor que incidió sobre los procesos que afectan las formas de P fue la posición topográfica. En general en los ambientes de bajo se encontró mayor contenido de P total y de la mayoría de las fracciones, por un lado, debido al efecto de procesos erosivos por medio de los cuales se deposita material en estas posiciones y por otro lado a que en los bajos la producción de biomasa es beneficiada por el mayor contenido de humedad, favoreciendo la acumulación de materia orgánica en el suelo. Sin embargo, el efecto de la topografía presentó variaciones entre subregiones, además, en PM las diferencias entre posiciones fueron más marcadas que en PT. En PM las diferencias estuvieron dadas

principalmente por las diferencias de pH, ya que en la loma el pH al ser ácido ha favorecido la formación de compuestos de P ligados a Fe y Al afectando la disponibilidad de P, mientras que en el bajo el aporte de CaCO_3 por parte del nivel freático promovió la adsorción de P, pero aun así en esta posición la disponibilidad de P fue considerablemente mayor que en la loma. Por otro lado, en PT las variaciones entre posiciones fueron más sutiles y estuvieron relacionadas con los procesos erosivos y con la acumulación de materia orgánica que favoreció la disponibilidad de P en el bajo.

El efecto de la profundidad sobre las formas de mayor disponibilidad de P fue similar en ambas subregiones, ya que la disponibilidad de P se encuentra asociada a la MO. La presencia de MO predominantemente en los primeros centímetros del perfil contribuye a través de distintos mecanismos a una mayor concentración de P disponible. El aporte de MO al suelo incrementa la actividad microbiana y por lo tanto la biomasa microbiana. El P orgánico lábil es principalmente P microbiano y este genera un importante aporte de P a la solución. Este se encuentra localizado en la rizósfera donde la actividad edáfica microbiana es mayor, favoreciendo los procesos de mineralización, y por otro lado genera una leve disminución de pH que contribuye a la solubilidad del P. La actividad radical, por medio de la liberación de ácidos carboxílicos, y la deposición de residuos en superficie también contribuyen a esto. Sin embargo, en PT, en profundidad predominan los procesos de fijación de P con Ca, favorecidos por el alto contenido de Ca y carbonato de Ca y el aumento de pH debido a la cercanía del calcrete. Estos factores, además contribuyen a la disminución de P ligado a Fe y Al en profundidad.

El uso agrícola del suelo tiene efecto sobre la dinámica del P en el suelo y la abundancia de algunas fracciones varía, aunque el contenido de P total no presente diferencias entre usos o estas sean mínimas. En general, en los suelos bajo vegetación natural, los procesos que benefician la disponibilidad de P se dan en mayor magnitud que en los suelos bajo uso agrícola. Esto está relacionado principalmente con el mejor estado de conservación del suelo, ya que la MO y la actividad radicular favorecen la disponibilidad de P, resaltando la importancia de mantener adecuados niveles de materia orgánica en el suelo.

Los suelos de los ambientes de loma y media loma de ambas subregiones fueron los que presentaron más limitaciones para la disponibilidad de P y esto fue corroborado con las bajas eficiencias de recuperación de P halladas luego de la aplicación de fertilizantes fosforados. Los factores y procesos que limitaron la disponibilidad del fertilizante en cada subregión fueron distintos. En PM las diferencias entre los suelos de la toposecuencia fueron más marcadas que en PT, debido a la gran variación de pH entre el suelo de los ambientes de loma y bajo. La recuperación de P-fertilizante, se vio afectada principalmente en la loma y esta limitación estuvo relacionada con el bajo valor de pH y el alto contenido de Fe y Al, respecto al bajo donde las condiciones edáficas para la disponibilidad de P fueron mejores. En este caso, no se observó una ventaja clara de la formulación líquida.

En PT, la principal limitación fue el contenido de Ca, mientras que el carbono orgánico favoreció la disponibilidad de P- fertilizante. En este caso, tanto la difusión como la disponibilidad estuvieron afectadas principalmente en la loma y media loma. Sin embargo, esto mejoró al aplicar una formulación líquida de fertilizante fosforado en lugar de la formulación granular. Por otro lado, en el bajo,

el mayor contenido de MO benefició el comportamiento de ambos tipos de formulación de manera similar. El contenido de humedad del suelo es otro factor que afecta el comportamiento de los fertilizantes. En condiciones de humedad óptimas el uso de fertilizante líquido puede no representar una ventaja frente a la formulación granular, ya que la difusión del P desde el gránulo no estaría tan afectada. Sin embargo, cuando el suelo atraviesa condiciones de sequía la difusión desde el gránulo de fertilizante se ve limitada y esto además contribuye a que la mayor parte del P quede concentrada alrededor del mismo. Podría darse un flujo de agua hacia los gránulos de fosfato, los cuales son altamente higroscópicos, y este flujo iría en la dirección opuesta a la difusión de P desde el gránulo. Esto genera un gradiente de concentración de P alrededor del gránulo que favorece la precipitación de compuestos de P-Ca, los cuales podrían ir convirtiéndose en formas más estables con el tiempo.

La mejora en la difusión de P en el suelo cuando se aplica fertilizante líquido ante condiciones de sequía puede traducirse en un aumento en la absorción de este nutriente por parte de la planta y por lo tanto en una tasa de crecimiento mayor y en rendimientos superiores. Además, el adecuado suministro de P a las plantas puede compensar el efecto del estrés hídrico, mientras que bajas disponibilidades en estas condiciones pueden generar una gran reducción en el crecimiento de la planta y por ende en el rendimiento del cultivo.

Esto se corroboró en el ensayo del cultivo de trigo en macetas, donde se observó que en condiciones donde el agua fue limitante, la fertilización con fósforo líquido en el suelo de la loma produjo una disminución en la relación N:P respecto al testigo y al fertilizado con la formulación granular, indicando una mayor absorción de P. La mejora en la absorción de P se tradujo en un incremento en la

producción de biomasa, lo cual posteriormente contribuiría al rendimiento en grano. Por otro lado, la fertilización con superfosfato triple no se diferenció del testigo en cuanto a absorción de P y tampoco en la producción de biomasa. Para el manejo de la fertilización fosforada es importante tener en cuenta que los procesos que controlan la disponibilidad de P dentro de la región pueden variar de acuerdo con las características particulares de cada subregión y de la posición en el paisaje. Esto lleva a la necesidad de diseñar estrategias que incrementen la eficiencia en el uso de los fertilizantes en cada caso en particular. En PM no habría una ventaja en el uso de fertilizantes líquidos, pero sería importante considerar las diferencias entre ambientes de loma con pH ácido, donde la disponibilidad de P es afectada y bajos con influencia del nivel freático. Bajo régimen de humedad ústico sería recomendable la aplicación de fertilizantes fosforados de formulación líquida sobre todo en Paleustoles petrocálcicos donde se encuentran importantes cantidades de Ca, como los ambientes de loma y media loma de PT. En estos suelos, además, la MO cumple un rol fundamental favoreciendo los procesos que aportan a la disponibilidad de P y reduciendo el efecto de los que favorecen su fijación, motivo por el cual es de suma importancia implementar prácticas de manejo que aseguren adecuados niveles de MO.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Achat, D.L., Augusto, L., Bakker, M.R., Gallet-Budynek, A., Morel, C., 2012. Microbial processes controlling P availability in forest spodosols as affected by soil depth and soil properties. *Soil Biol. Biochem.* 44, 39–48. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2011.09.007>
- Achat, D.L., Pousse, N., Nicolas, M., Brédoire, F., Augusto, L., 2016. Soil properties controlling inorganic phosphorus availability: general results from a national forest network and a global compilation of the literature. *Biogeochemistry* 127, 255–272. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0178-0>
- Agbenin, J.O., Tiessen, H., 1995. Phosphorus Forms in Particle-Size Fractions of a Toposequence from Northeast Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J. Soc. Am. J.* 59, 1687–1693.
- Ahmad, Munir, Ahmad, Mahtab, El-Naggar, A.H., Usman, A.R.A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., Elfaki, J., Al-Faraj, A., Al-Wabel, M.I., 2017. Aging effect of organic and inorganic fertilizers on phosphorus fractionation in a calcareous sandy loam soil. *Pedosphere*. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60363-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60363-1)
- Akhtar, M.S., Imran, M., Mehmood, a., Memon, M., Rukh, S., Kiani, G.S., 2014. Apatite Loss in Pothwar Loess Plain (Pakistan) Fits a Simple Linear Reservoir Model. *Pedosphere* 24, 763–775. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60063-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60063-1)
- Alonso-Zarza, A.M., 2003. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Rev.* 60, 261–298. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00106-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00106-X)
- Alvarez, R., Evans, L.A., Milham, P.J., Wilson, M.A., 2004. Effects of humic material on the precipitation of calcium phosphate. *Geoderma* 118, 245–260. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00207-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00207-6)

- Araújo, M.S.B., Schaefer, C.E.R., Sampaio, E.V.S.B., 2004. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma* 119, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.07.002>
- Arenberg, M.R., Arai, Y., 2019. Chapter Three – Uncertainties in soil physicochemical factors controlling phosphorus mineralization and immobilization processes, in: *Advances in Agronomy*. pp. 153–200. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.11.005>
- Ashley, K., Cordell, D., Mavinic, D., 2011. A brief history of phosphorus: From the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. *Chemosphere* 84, 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.001>
- Audette, Y., O'Halloran, I.P., Paul Voroney, R., 2016. Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil. *Geoderma* 262, 119–124. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.08.021>
- Belinque, H., Pucheu, N., Kerber, N., Rubio, G., 2015. Utilization of organic phosphorus sources by oilseed rape, sunflower, and soybean. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178, 339–344. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400301>
- Bertrand, I., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., McLaughlin, M.J., 2003. Chemical characteristics of phosphorus in alkaline soils from southern Australia. *Aust. J. Soil Res.* 41, 61. <https://doi.org/10.1071/SR02021>
- Bertrand, I., McLaughlin, M.J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., McBeath, T., 2006. Changes in P Bioavailability Induced by the Application of Liquid and Powder Sources of P, N and Zn Fertilizers in Alkaline Soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 74, 27–40. <https://doi.org/10.1007/s10705-005-4404-3>
- Boitt, G., Simpson, Z.P., Tian, J., Black, A., Wakelin, S.A., Condrón, L.M., 2018. Plant biomass management impacts on short-term soil phosphorus dynamics in a

temperate grassland. *Biol. Fertil. Soils* 54, 397–409.
<https://doi.org/10.1007/s00374-018-1269-6>

Bol, R., Julich, D., Brödlin, D., Siemens, J., Kaiser, K., Dippold, M.A., Spielvogel, S., Zilla, T., Mewes, D., von Blanckenburg, F., Puhmann, H., Holzmann, S., Weiler, M., Amelung, W., Lang, F., Kuzyakov, Y., Feger, K.-H., Gottselig, N., Klumpp, E., Missong, A., Winkelmann, C., Uhlig, D., Sohr, J., von Wilpert, K., Wu, B., Hagedorn, F., 2016. Dissolved and colloidal phosphorus fluxes in forest ecosystems-an almost blind spot in ecosystem research. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 425–438.
<https://doi.org/10.1002/jpln.201600079>

Breecker, D.O., Sharp, Z.D., McFadden, L.D., 2009. Seasonal bias in the formation and stable isotopic composition of pedogenic carbonate in modern soils from central New Mexico, USA. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121, 630–640.
<https://doi.org/10.1130/B26413.1>

Brennan, R.F., Bolland, M.D.A., Jeffery, R.C., Allen, D.G., 1994. Phosphorus adsorption by a range of western Australian soils related to soil properties. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25, 2785–2795. <https://doi.org/10.1080/00103629409369225>

Buschiazzo, D.E., Hevia, G.G., Hepper, E.N., Stahr, K., Papenfuß, K.H., 1998. Contents and weathering state of volcanic ashes and their effects on phosphate sorption in soils of the semiarid pampa of Argentina. *Arid Soil Res. Rehabil.* 12, 15–27.
<https://doi.org/10.1080/15324989809381494>

Cakmak, I., 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in. *Plant Soil* 247, 3–24. <https://doi.org/10.1023/a:1021194511492>

Cano, E. et al, 1980. *Inventario de los recursos naturales de la Provincia de La Pampa.* Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Universidad Nacional de La Pampa, Buenos Aires.

- Carreira, J.A., Viñegla, B., Lajtha, K., 2006. Secondary CaCO₃ and precipitation of P–Ca compounds control the retention of soil P in arid ecosystems. *J. Arid Environ.* 64, 460–473. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2005.06.003>
- Chowdhury, R.B., Moore, G.A., Weatherley, A.J., Arora, M., 2017. Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. *J. Clean. Prod.* 140, 945–963. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.012>
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Glob. Environ. Chang.* 19, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Courchesne, F., Turmel, M., 2006. Chapter 26: Extractable Al, Fe, Mn, and Si, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Cross, A.F., Schlesinger, W.H., 2001. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry* 52, 155–172. <https://doi.org/10.1023/A:1006437504494>
- Daly, K., Styles, D., Lalor, S., Wall, D.P., 2015. Phosphorus sorption, supply potential and availability in soils with contrasting parent material and soil chemical properties. *Eur. J. Soil Sci.* 66, 792–801. <https://doi.org/10.1111/ejss.12260>
- Daroub, S.H., Gerakis, A., Ritchie, J.T., Friesen, D.K., Ryan, J., 2003. Development of a soil-plant phosphorus simulation model for calcareous and weathered tropical soils. *Agric. Syst.* 76, 1157–1181. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(02\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00082-3)
- Degryse, F., McLaughlin, M.J., 2014. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78, 832. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.07.0293>

- Devau, N., Cadre, E. Le, Hinsinger, P., Jaillard, B., Gérard, F., 2009. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: Experimental and mechanistic modelling approaches. *Appl. Geochemistry* 24, 2163–2174. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2009.09.020>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C., 2013. Infostat - Software estadístico. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina [WWW Document]. Univ. Nac. Córdoba, Argentina.
- Divito, G.A., Saiz Rozas, H., Echeverría, H., 2002. Estrategias de fertilización fosforada en una rotación de cultivos en el sudeste bonaerense. *Cienc. del Suelo, Arg.* 28, 1–7.
- Du, Z.Y., Wang, Q.H., Liu, F.C., Ma, H.L., Ma, B.Y., Malhi, S.S., 2013. Movement of Phosphorus in a Calcareous Soil as Affected by Humic Acid. *Pedosphere* 23, 229–235.
- Eger, A., Yoo, K., Almond, P.C., Boitt, G., Larsen, I.J., Condrón, L.M., Wang, X., Mudd, S.M., 2018. Does soil erosion rejuvenate the soil phosphorus inventory? *Geoderma* 332, 45–59. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.06.021>
- Espejo, J.M.R., Faust, D., Granados, M.Á.N., Zielhofer, C., 2008. Accumulation of secondary carbonate evidence by ascending capillary in Mediterranean argillic horizons (Cordoba, Andalusia, Spain). *Soil Sci.* 173, 350–358.
- Fink, J.R., Inda, A. V., Bavaresco, J., Barrón, V., Torrent, J., Bayer, C., 2016. Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 179, 198–205. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500017>
- Folguera, A., Zárata, M., Tedesco, A., Dávila, F., 2015. Evolution of the Neogene Andean foreland basins of the Southern Pampas and Northern Patagonia (34°–41°S),

- Argentina. *J. South Am. Earth Sci.* 64, 452–466.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.05.010>
- Frossard, E., Condrón, L.M., Oberson, A., Sinaj, S., Fardeau, J.C., 2000. Processes Governing Phosphorus Availability in Temperate Soils. *J. Environ. Qual.* 29, 15–23.
<https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900010003x>
- Gao, X.-L., Li, X.G., Zhao, L., Kuzyakov, Y., 2019. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs. *Soil Biol. Biochem.* 133, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2019.02.012>
- Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size Analysis, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 383–411.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Goh, T.B., Mermut, A.R., 2006. Chapter 20 Carbonates, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Harrell, D.L., Wang, J.J., 2006. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. *Soil Sci.* 171.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Skrumsager, I., White, P., 2012. *Functions of Macronutrients, Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Haygarth, P.M., Harrison, A.F., Turner, B.L., 2018. On the history and future of soil organic phosphorus research: a critique across three generations. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 86–94. <https://doi.org/10.1111/ejss.12517>
- Heckenmüller, M., Narita, D., Klepper, G., 2014. Global Availability of Phosphorus and Its Implications for Global Food Supply: An Economic Overview. *Kiel Work. Pap.* 26.

- Hedley, M., McLaughlin, M., 2005. Reactions of Phosphate Fertilizers and By-Products in Soils, in: Sims, J.T., Sharpley, A.N. (Eds.), Phosphorus: Agriculture and the Environment. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c7>
- Hedley, M., Stewart, J., Chauhan, B., 1982. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J* 46, 970–976.
- Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., 1982. Method to measure microbial phosphate in soils. *Soil Biol. Biochem.* 14, 377–385. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90009-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90009-8)
- Hendershot, W.H., Lalonde, H., 2006. Chapter 18 Ion Exchange and Exchangeable Cations, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. CRC Press, Inc.
- Herrera-Estrella, L., López-Arredondo, D., 2016. Phosphorus: The Underrated Element for Feeding the World. *Trends Plant Sci.* 21, 461–463. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2016.04.010>
- Hettiarachchi, G.M., McLaughlin, M.J., Scheckel, K.G., Chittleborough, D.J., Newville, M., Sutton, S., Lombi, E., 2008. Evidence for Different Reaction Pathways for Liquid and Granular Micronutrients in a Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 98. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0058>
- Hettiarachchi, G.M., Lombi, E., McLaughlin, M.J., Chittleborough, D., Self, P., 2006. Density Changes around Phosphorus Granules and Fluid Bands in a Calcareous Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 960. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0296>
- Holford, I.C.R., 1997. Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* 35, 227–239. <https://doi.org/10.1071/S96047>
- Holloway, R., Bertrand, I., Frischke, A., Brace, D., 2001. Improving fertiliser efficiency on

- calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant Soil* 209–219.
- Hou, E., Chen, C., Kuang, Y., Zhang, Y., Heenan, M., Wen, D., 2016. A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils. *Global Biogeochem. Cycles* 30, 1300–1309. <https://doi.org/10.1002/2016GB005371>
- Huerta, P., Rodríguez-Berriguete, Á., Martín-García, R., Martín-Pérez, A., La Iglesia Fernández, Á., Alonso-Zarza, A.M., 2015. The role of climate and aeolian dust input in calcrete formation in volcanic islands (Lanzarote and Fuerteventura, Spain). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 417, 66–79. <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2014.10.008>
- Inda, A.V., Tiecher, T., 2016. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability 40, 369–379.
- Ippolito, J.A., Blecker, S.W., Freeman, C.L., McCulley, R.L., Blair, J.M., Kelly, E.F., 2010. Phosphorus biogeochemistry across a precipitation gradient in grasslands of central North America. *J. Arid Environ.* 74, 954–961. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.01.003>
- Iturri, L.A., Buschiazzo, D.E., 2014. Cation exchange capacity and mineralogy of loess soils with different amounts of volcanic ashes. *Catena* 121, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.021>
- Jalali, M., Ranjbar, F., 2010. Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma* 155, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>
- Jamil, S., Mehmood, A., Akhtar, M.S., Memon, M., Imran, M., Rukh, S., Qayyum, A., Jenks, M.A., 2016. Changes in soil phosphorus fractions across a toposequence in the estuary plains of Pakistan. *Arch. Agron. Soil Sci.* 62, 1567–1577.

<https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1155701>

Jarosch, K.A., Doolette, A.L., Smernik, R.J., Tamburini, F., Frossard, E., Bünemann, E.K., 2015. Characterisation of soil organic phosphorus in NaOH-EDTA extracts: A comparison of ³¹P NMR spectroscopy and enzyme addition assays. *Soil Biol. Biochem.* 91, 298–309. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2015.09.010>

Jones, D.L., Healey, J.R., Willett, V.B., Farrar, J.F., Hodge, A., 2005. Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? *Soil Biol. Biochem.* 37, 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.008>

Kaplan, M.Y., Eren, M., Kadir, S., Kapur, S., 2013. Mineralogical, geochemical and isotopic characteristics of Quaternary calcretes in the Adana region, southern Turkey: Implications on their origin. *Catena* 101, 164–177. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2012.09.004>

Khan, A., Lu, G., Ayaz, M., Zhang, H., Wang, R., Lv, F., Yang, X., Sun, B., Zhang, S., 2018. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.006>

Khaliwada, R., Hettiarachchi, G.M., Mengel, D.B., Fei, M., 2014. Placement and Source Effects of Phosphate Fertilizers on Phosphorus Availability and Reaction Products in Two Reduced-Till Soils: A Greenhouse Study. *Soil Sci.* 179.

Khaliwada, R., Hettiarachchi, G.M., Mengel, D.B., Fei, M., 2012. Speciation of phosphorus in a fertilized, reduced-till soil system: In-field treatment incubation study. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 2006–2018. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0299>

Klotzbücher, A., Kaiser, K., Klotzbücher, T., Wolff, M., Mikutta, R., 2019. Testing mechanisms underlying the Hedley sequential phosphorus extraction of soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 182, 570–577. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800652>

- Koerselman, W., Meuleman, A., 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *J. Appl. Ecol.* (United Kingdom).
- Krey, T., Caus, M., Baum, C., Ruppel, S., Eichler-Löbermann, B., 2011. Interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and organic fertilization on P nutrition of *Zea mays* L. and *Brassica napus* L. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 602–613. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900349>
- Kruse, J., Kanwischer, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rüger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., Leinweber, P., 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review.
- Lamber, H., Shane, M.W., Cramer, M.D., Pearse, S.J., Veneklaas, E.J., 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits 693–713. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
- Li, Z., Sun, X., Huang, L., Liu, D., Yu, L., Wu, H., Wei, D., 2017. Phosphate adsorption and precipitation on calcite under calco-carbonic equilibrium condition. *Chemosphere* 183, 419–428. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.05.139>
- Lombi, E., Johnston, C., Armstrong, R., Holloway, R., 2004a. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Sci. Soc.* 682–689.
- Lombi, E., McLaughlin, M.J., Johnston, C., Armstrong, R.D., Holloway, R.E., 2004b. Mobility, solubility and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant Soil* 269, 25–34. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0558-z>

- Lombi, E., Scheckel, K.G., Armstrong, R.D., Forrester, S., Cutler, J.N., Paterson, D., 2006. Speciation and Distribution of Phosphorus in a Fertilized Soil: A Synchrotron-Based Investigation 2038–2048. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0051>
- Maranguit, D., Guillaume, T., Kuzyakov, Y., 2017. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena* 149, 385–393. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.10.010>
- McBeath, T.M., Lombi, E., McLaughlin, M.J., Bünemann, E.K., 2008. Isotopic Exchangeability, Hydrolysis and Mobilization Reactions of Pyrophosphate in Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1337. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0395>
- McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Armstrong, R.D., Bell, M., Bolland, M.D. a., Conyers, M.K., Holloway, R.E., Mason, S.D., 2007. Predicting the response of wheat (*Triticum aestivum* L.) to liquid and granular phosphorus fertilisers in Australian soils. *Aust. J. Soil Res.* 45, 448. <https://doi.org/10.1071/SR07044>
- McBeath, T.M., McLaughlin, M.J., Kirby, J.K., Armstrong, R.D., 2012. Dry Soil Reduces Fertilizer Phosphorus and Zinc Diffusion but Not Bioavailability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76, 1301. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0431>
- McLaren, T.I., Smernik, R.J., Simpson, R.J., McLaughlin, M.J., McBeath, T.M., Guppy, C.N., Richardson, A.E., 2017. The chemical nature of organic phosphorus that accumulates in fertilized soils of a temperate pasture as determined by solution ³¹P NMR spectroscopy. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 180, 27–38. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600076>
- Mehl, A., Tripaldi, A., Zárata, M., 2018. Late Quaternary aeolian and fluvial-aeolian deposits from southwestern Pampas of Argentina, southern South America. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* <https://doi.org/10.1016/J.PALAEO.2018.08.014>

- Mehmood, A., Akhtar, M.S., Imran, M., Rukh, S., 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma* 310, 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.036>
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T.S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D.S., Wearing, C., Zhang, H., Haygarth, P.M., 2018. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil* 427, 5–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>
- Minasny, B., Finke, P., Stockmann, U., Vanwalleghem, T., McBratney, A.B., 2015. Resolving the integral connection between pedogenesis and landscape evolution. *Earth-Science Rev.* 150, 102–120. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.004>
- Moradi, N., Hassan, M., Sadaghiani, R., Sepehr, E., 2014. Effects of low-molecular-weight organic acids on phosphorus sorption characteristics in some calcareous soils. *Turk J Agric.* <https://doi.org/10.3906/tar-1106-38>
- Mumtaz, M., Jamil, M., Ahmad, M., 2014. Effect of Different Phosphorus Levels on Growth and Yield of Wheat under Water Stress Conditions. *J. Environ. Earth Sci.* 4, 23–30.
- Murphy, J., Riley, J.P., 1962. a Single Solution Method for the Determination of Phosphate in in Natural Waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31–36.
- Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 305–325. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800223>

- Nwoke, O., Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., Osonubi, O., Merckx, R., 2003. Assessment of labile phosphorus fractions and adsorption characteristics in relation to soil properties of West African savanna soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 100, 285–294. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00186-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00186-5)
- O'Halloran, I.P., Cade-Menun, B.J., 2007. Total and Organic Phosphorus, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science. CRC Press, Toronto.
- Perassi, I., Borgnino, L., 2014. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃–montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. *Geoderma* 232–234, 600–608. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2014.06.017>
- Picone, L., Capozzi, I., Zamuner, E., Echeverría, H., Rozas, H.S., 2007. Transformaciones de fósforo en un molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Cienc. del suelo* 25, 99–107.
- Prado, R.D.M., Pereira da Silva, G., 2007. Ecological Response to Global Change: Changes in C : N : P Stoichiometry in Environmental Adaptations of Plants. *Plant Ecol. - Tradit. Approaches to Recent Trends* 147–163.
- Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., Peinemann, N., 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 90, 63–68. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2005.08.019>
- Recena, R., Díaz, I., Delgado, A., 2017. Estimation of total plant available phosphorus in representative soils from Mediterranean areas. *Geoderma* 297, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.016>
- Renneson, M., Vandenberghe, C., Dufey, J., Marcoen, J.M., Bock, L., Colinet, G., 2015. Degree of phosphorus saturation in agricultural loamy soils with a near-neutral pH.

Eur. J. Soil Sci. 66, 33–41. <https://doi.org/10.1111/ejss.12207>

Robins, C.R., Deurlington, A., Buck, B.J., Brock-Hon, A.L., 2015. Micromorphology and formation of pedogenic ooids in calcic soils and petrocalcic horizons. *Geoderma* 251–252, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.009>

Rubio, G., Faggioli, V., Scheiner, J.D., Gutiérrez-Boem, F.H., 2012. Rhizosphere phosphorus depletion by three crops differing in their phosphorus critical levels. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 810–871. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200307>

Sample, E.C., Soper, R.J., Racz, G.J., 1980. Reactions of Phosphate Fertilizers in Soils. *Role Phosphorus Agric., Wiley Online Books.* <https://doi.org/doi:10.2134/1980.roleofphosphorus.c12>

Saxton, K.E., Rawls, W.J., 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

Schoumans, O.F., 2014. Description of the Phosphorus Sorption and Desorption Processes in Coarse Calcareous Sandy Soils. *Soil Sci.* 179, 221–229.

Schröder, J.J., Smit, A.L., Cordell, D., Rosemarin, A., 2011. Improved phosphorus use efficiency in agriculture: A key requirement for its sustainable use. *Chemosphere* 84, 822–831. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.065>

Shariatmadari, H., Shirvani, M., Jafari, a., 2006. Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid toposequences. *Geoderma* 132, 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.05.011>

Sherrod, L.A., Erskine, R.H., Green, T.R., 2014. Spatial Patterns and Cross-Correlations of Temporal Changes in Soil Carbonates and Surface Elevation in a Winter Wheat–Fallow Cropping System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* <https://doi.org/doi:10.2136/sssaj2014.05.0222>

- Sindelar, H.R., Brown, M.T., Boyer, T.H., 2015. Effects of natural organic matter on calcium and phosphorus co-precipitation. *Chemosphere* 138, 218–224. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2015.05.008>
- Skjemstad, J.O., Baldock, J.A., Sjemstad, J.O., Baldock, J.A., 2003. Chapter 21 Total and Organic Carbon, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Slazak, a, Freese, D., Matos, E.S., Nii-Annang, S., Hüttl, R.F., 2014. Phosphorus pools in soil after land conversion from silvopasture to arable and grassland use. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 159–167. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200334>
- Smil, V., 2002. Phosphorus : Global Transfers. Causes Consequences *Glob. Environ. Chang.* 3, 536–542.
- Sø, H.U., Postma, D., Jakobsen, R., Larsen, F., 2011. Sorption of phosphate onto calcite; results from batch experiments and surface complexation modeling. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 2911–2923. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2011.02.031>
- Soil Survey Staff., 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA NRCS.
- Solomon, D., Lehmann, J., Mamo, T., Fritzsche, F., Zech, W., 2002. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. *Geoderma*. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00090-8)
- Sposito, G., 2008. *The Chemistry of Soils*, 2nd ed. Oxford University Press.
- Springer, N.P., 2017. Physical, technical, and economic accessibility of resources and reserves need to be distinguished by grade: Application to the case of phosphorus. *Sci. Total Environ.* 577, 319–328. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.10.190>
- Steingrobe, B., Schmid, H., Claassen, N., 2001. Root production and root mortality of

winter barley and its implication with regard to Phosphate acquisition. *Plant Soil* 237, 239–248. <https://doi.org/10.1023/A:1013345718414>

Stephens, E.C., Jones, A.D., Parsons, D., 2017. Agricultural systems research and global food security in the 21st century: An overview and roadmap for future opportunities. *Agric. Syst.* <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.01.011>

Stutter, M.I., Shand, C. a., George, T.S., Blackwell, M.S. a., Dixon, L., Bol, R., MacKay, R.L., Richardson, A.E., Condon, L.M., Haygarth, P.M., 2015. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma* 257–258, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.020>

Suñer, L.G., Galantini, J.A., 2013. Dinámica de las formas del P en suelos de la región sudoeste pampeana. *Cienc. del Suelo, Arg.* 31, 33–44.

Suñer, L.G., Galantini, J.A., 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la Región Sudoeste pampeana. *Cienc. del suelo, Arg.* 30, 57–66.

Syers, J.K., Johnston, A.E., Curtin, D., 2008. Efficiency of Soil and Fertilizer Phosphorus: Reconciling Changing Concepts of Soil Phosphorus Chemistry with Agronomic Information.

Taghipour, M., Jalali, M., 2012. Effect of low-molecular-weight organic acids on kinetics release and fractionation of phosphorus in some calcareous soils of western Iran. *Environ. Monit. Assess.* 185. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2960-y>

Tiecher, T., dos Santos, D.R., Calegari, A., 2012. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. *Soil Tillage Res.* 124, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.001>

Tiessen, H., Moir, J., 2006. Chapter 25 Characterization of Available P by Sequential Extraction, in: Carter, M., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.

- Tiessen, H., Stewart, J., Cole, C. V, 1984. Pathways of Phosphorus Transformations in Soils of Differing Pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J* 48, 853–858.
- Tunesi, S., Poggi, V., Gessa, C., 1999. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils: The role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 53, 219–227. <https://doi.org/10.1023/A:1009709005147>
- Turan, M., Gulluce, M., von Wirén, N., Sahin, F., 2012. Yield promotion and phosphorus solubilization by plant growth-promoting rhizobacteria in extensive wheat production in Turkey. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 818–826. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200054>
- Turner, B.L., Cade-Menun, B.J., Westermann, D.T., 2003. Organic Phosphorus Composition and Potential Bioavailability in Semi-Arid Arable Soils of the Western United States. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 1168–1179. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1168>
- USDA-NRCS, 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos.
- Vázquez, S., Morales, L.A., López, C.F., Dalurzo, H.C., 2011. Fertilización fosfatada y fracciones de fósforo en alfisoles, ultisoles y oxisoles. *Cienc. del Suelo* 29, 161–171.
- Walker, T.W., Syers, J.K., 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15, 1–19. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(76\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5)
- Wang, B., Li, J., Ren, Y., Xin, J., Hao, X., Ma, Y., Ma, X., 2015. Validation of a soil phosphorus accumulation model in the wheat–maize rotation production areas of China. *F. Crop. Res.* 178, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.007>
- Wang, Y., Chen, X., Whalen, J.K., Cao, Y., Quan, Z., Lu, C., Shi, Y., 2015. Kinetics of inorganic and organic phosphorus release influenced by low molecular weight organic acids in calcareous, neutral and acidic soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178,

555–566. <https://doi.org/10.1002/jpln.201500047>

Weihrauch, C., Opp, C., 2018. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. *Geoderma* 325, 183–194.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.047>

Weyers, E., Strawn, D.G., Peak, D., Baker, L.L., 2017. Inhibition of phosphorus sorption on calcite by dairy manure-sourced DOC. *Chemosphere* 184, 99–105.

<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.05.141>

Wisawapipat, W., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., Gilkes, R.J., 2009. Phosphate sorption and desorption by Thai upland soils. *Geoderma* 153, 408–415.

<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.09.005>

Wright, V.P., 2010. Chapter 5 Calcretes. *Dev. Sedimentol.* 61, 225–267.

[https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(09\)06105-6](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)06105-6)

Yang, X., Post, W.M., 2011. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences* 8, 2907–2916.

<https://doi.org/10.5194/bg-8-2907-2011>

Yang, Xiaoyan, Chen, X., Yang, Xitian, 2019. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. *Soil Tillage Res.*

187, 85–91. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2018.11.016>

Zárate, M. a., Tripaldi, A., 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Res.*

3, 401–417. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.08.002>

Zheng, H.F., Chen, L.D., Yu, X.Y., Zhao, X.F., Ma, Y., Ren, Z.B., 2015. Phosphorus control as an effective strategy to adapt soybean to drought at the reproductive stage: evidence from field experiments across northeast China. *Soil Use Manag.*

31, 19–28. <https://doi.org/10.1111/sum.12166>

Zheng, Z., MacLeod, J., Sanderson, J., Lafond, J., 2004. Soil Phosphorus Dynamics After Ten Annual Applications of Mineral Fertilizers and Liquid Dairy Manure: Fractionation and Path Analyses. *Soil Sci.* 169, 449–456. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000131225.05485.25>

Zheng, Z., Simard, R.R., Lafond, J., Parent, L.E., 2002. Pathways of soil phosphorus transformations after 8 years of cultivation under contrasting cropping practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 999–1007. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9990>

8. ANEXO

Tabla 3.4. Media de concentración de P en cada fracción y P total en PM y PT.

Subregión	P- solución	Pt lábil	Pt- Fe/Al	P- Ca	Pt estable	P Total
PM	19,13 a	19,45 a	56,37 a	144,14 b	64,18 b	303,27 b
PT	5,22 b	10,57 b	47,43 b	241,14 a	79,06 a	383,42 a

Letras diferentes indican diferencias entre filas. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 3.5. Medias de concentración de formas de P inorgánico en PM y PT.

Subregión	P- solución	Pi lábil	Pi- Fe/Al	P- Ca	Pi estable	Pi total
PM	19,13 a	10,81 a	21,78 a	144,14 b	44,65 b	240,26 b
PT	5,22 b	4,86 b	7,71 b	241,14 a	51,37 a	310,53 a

Letras diferentes indican diferencias entre filas. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 3.6. Medias de concentración de formas de P orgánico en PM y PT.

Subregión	Po lábil	Po- Fe/Al	Po estable	Po total
PM	9,19 a	34,88 a	19,23 b	63,01 a
PT	5,55 b	39,72 a	27,62 a	72,89 a

Letras diferentes indican diferencias entre filas. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.1. ER (eficiencia de recuperación) (%) de P aplicado como Polifosfato líquido (PL) y Superfosfato triple (SPT) en loma, media loma y bajo de Planicie medanosa. ER calculado como $(P \text{ final} - P \text{ testigo (mg)} * 100) / P \text{ aplicado (mg)}$.

Posición	Eficiencia de recuperación (%)		
	PL	SPT	Media
Loma	15,57 Ac	16,56 Ac	16,06
Media Loma	31,51 Ab	26,33 Bb	27,57
Bajo	37,68 Ba	49,41 Aa	43,55
Media	28,25	30,76	29,06

Letras mayúsculas indican diferencias entre columnas (entre PL y SPT para cada posición topográfica y para el promedio de las tres posiciones); letras minúsculas indican diferencias entre filas (entre Loma, Media Loma y Bajo para cada fertilizante). Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.4. ER (eficiencia de recuperación) (%) de P aplicado como Polifosfato líquido (PL) y Superfosfato triple (SPT) en loma, media loma y bajo de Planicie medanosa en las cuatro secciones. ER calculado como $(P \text{ final} - P \text{ testigo (mg)} * 100) / P \text{ aplicado (mg)}$.

Posición topográfica	Distancia (mm)	P (mg kg ⁻¹)	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	10,26 a	7,77 b
	7,5-13,5	4,90 a	6,05 a
	13,5-25,5	0,12 a	0,54 a
	25,5-43	-	-
Media loma	0-7,5	14,41 a	10,63 b
	7,5-13,5	6,79 b	8,75 a
	13,5-25,5	1,44 b	8,30 a
	25,5-43	0,18 a	0,11 a
Bajo	0-7,5	26,73 a	20,55 b
	7,5-13,5	11,90 a	12,57 a
	13,5-25,5	0,61 b	2,10 a
	25,5-43	0,47 b	2,18 a

Letras diferentes indican diferencias entre columnas (PL y SPT) para cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.6. Valores de pH en cada sección en los tratamientos con PL, SPT y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie medanosa.

Posición topográfica	Distancia (mm)	pH		
		PL	SPT	T
Loma	0-7,5	6,05 a	5,97 b	5,78 c
	7,5-13,5	5,47 b	5,81 a	5,78 a
	13,5-25,5	5,27 b	5,80 a	5,78 a
	25,5-43	5,42 b	5,74 a	5,78 a
Media Loma	Media	5,55 b	5,83 a	5,78 a
	0-7,5	6,86 b	6,46 c	7,01 a
	7,5-13,5	6,71 b	6,72 b	7,01 a
	13,5-25,5	6,55 b	7,09 a	7,01 a
	25,5-43	6,49 b	7,09 a	7,01 a
Bajo	Media	6,65 c	6,84 b	7,01 a
	0-7,5	6,63 b	6,58 b	7,81 a
	7,5-13,5	6,69 c	7,13 b	7,81 a
	13,5-25,5	7,17 c	7,63 b	7,81 a
	25,5-43	7,79 a	7,73 b	7,81 ab
	Media	7,07 c	7,27 b	7,81 a

Letras diferentes indican diferencias entre columnas (PL, SPT y T) para cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.7. ER (eficiencia de recuperación) (%) de P aplicado como Polifosfato líquido (PL) y Superfosfato triple (SPT) en loma, media loma y bajo de Planicie con tosca. ER calculado como $(P \text{ final} - P \text{ testigo (mg)} * 100) / P \text{ aplicado (mg)}$.

Posición	ER (%)		
	PL	SPT	Media
Loma	28,78 Ab	25,34 Bb	27,06
Media Loma	26,83 Bb	35,02 Aa	30,92
Bajo	35,52 Aa	34,61 Aa	35,06
Media	30,38	31,66	31,02

Letras mayúsculas indican diferencias entre columnas (entre PL y SPT para cada posición topográfica y para el promedio de las tres posiciones); letras minúsculas indican diferencias entre filas (entre Loma, Media Loma y Bajo para cada fertilizante). Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.10. ER (eficiencia de recuperación) (%) de P aplicado como Polifosfato líquido (PL) y Superfosfato triple (SPT) en loma, media loma y bajo de Planicie con tosca en las cuatro secciones. ER calculado como $(P \text{ final} - P \text{ testigo (mg)} * 100) / P \text{ aplicado (mg)}$.

Posición topográfica	Distancia (mm)	P (mg kg ⁻¹)	
		PL	SPT
Loma	0-7,5	21,14 a	16,81 b
	7,5-13,5	1,62 b	4,36 a
	13,5-25,5	0,24 b	1,56 a
	25,5-43	0,15 b	1,72 a
Media loma	0-7,5	25,04 a	15,76 b
	7,5-13,5	3,90 b	5,38 a
	13,5-25,5	0,87 b	1,35 a
	25,5-43	1,13 a	1,02 a
Bajo	0-7,5	21,40 a	18,94 b
	7,5-13,5	3,31 b	6,58 a
	13,5-25,5	2,21 a	1,97 a
	25,5-43	2,26 a	2,38 a

Letras diferentes indican diferencias entre columnas (PL y SPT) para cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 4.11. Valores de pH en cada sección en los tratamientos con PL, SPT y en el testigo, en suelo de loma, media loma y bajo de Planicie con tosca.

Posición topográfica	Distancia (mm)	pH		
		PL	SPT	T
Loma	0-7,5	6,41 c	6,66 b	7,58 a
	7,5-13,5	6,67 b	7,46 a	7,58 a
	13,5-25,5	7,39 b	7,92 a	7,58 b
	25,5-43	7,76 b	8,07 a	7,58 c
	Media	7,06 b	7,53 a	7,58 a
Media loma	0-7,5	6,79 b	6,28 c	7,77 a
	7,5-13,5	6,88 c	6,84 b	7,77 a
	13,5-25,5	7,08 b	7,02 c	7,77 a
	25,5-43	7,55 b	7,41 c	7,77 a
	Media	7,07 b	6,89 c	7,77 a
Bajo	0-7,5	6,60 b	6,17 c	7,32 a
	7,5-13,5	6,66 c	6,94 b	7,32 a
	13,5-25,5	7,02 c	7,16 b	7,32 a
	25,5-43	7,44 a	7,40 a	7,32 b
	Media	6,93 a	6,92 a	7,32 b

Letras diferentes indican diferencias entre columnas (PL, SPT y T) para cada posición topográfica y distancia. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 5.2. Materia seca aérea (MS, g) en los tratamientos testigo (T), fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento sin limitación de humedad (H1) en suelo de loma, media loma y bajo.

Posición	T	SPT	PL
	Materia seca aérea (g)		
Loma	1,83 Cb	2,93 Ba	2,45 Cab
Media loma	3,00 Bb	4,45 Aa	5,13 Aa
Bajo	3,80 Aa	4,73 Aa	3,73 Ba

Letras mayúsculas indican diferencias entre filas para cada tratamiento; letras minúsculas indican diferencias entre columnas para cada posición. Nivel de significancia $p < 0,05$.

Tabla 5.3. Materia seca aérea (g) en los tratamientos testigo, fertilizado con superfosfato triple (SPT) y con fosfato líquido (PL) en el tratamiento con limitación de humedad (H2) en suelo de loma, media loma y bajo.

Posición	T	SPT	PL
	Materia seca aérea (g)		
Loma	0,13 Cb	0,15 Bb	0,48 Aa
Media loma	0,20 Bb	0,15 Bb	0,68 Aa
Bajo	0,40 Aa	0,45 Aa	0,70 Aa

Letras mayúsculas indican diferencias entre filas para cada tratamiento; letras minúsculas indican diferencias entre columnas para cada posición. Nivel de significancia $p < 0,05$.