

Informe de Avance de Tesis/Monografía

Alumno: Ing. Agr. Larrea Gastón Emiliano

Director: Ing. Agr. Sainz Rozas Hernán, Dr.

Comité consejero: Lic. en Cs. Geológicas Puricelli Marino M., Dr.; Ing. Agr. Wyngaard Nicolás, Dr.; Bioquímica Eyherabide Mercedes, M.Sc.

Título: Disponibilidad y variabilidad espacial de cationes básicos en suelos agrícolas y prístinos de la Región Pampeana

Introducción

Para los suelos de la Región Pampeana (RP) se han reportado los niveles de extracción de bases por los diferentes cultivos, pero aún no existe información actualizada de los contenidos totales de estas, de la relación entre las mismas ni de la relación Contenido total/Fracción intercambiable tanto en suelos prístinos como con prolongada historia agrícola. Esta información, que se genere a partir de este trabajo permitirá identificar las zonas o áreas con mayor potencial de respuesta al agregado de enmiendas básicas y/o potásicas. Por lo tanto se plantean las siguientes hipótesis:

-La actividad agrícola produjo una mayor reducción de la disponibilidad de Ki que de Cai y Mgi.

-La actividad agrícola incrementa la relación Cai+Mgi/Ki mientras que la relación Cai/Mgi se mantendría constante, particularmente al norte de la RP.

-La variabilidad espacial es en orden decreciente: $Ki > Cai > Mgi$.

-Los contenidos totales y la relación CT/FI muestran variabilidad según zonas.

Objetivos

-Determinar los contenidos totales e intercambiables de Ca, Mg, K y CIC y saturación con bases (SB) en suelos agrícolas y prístinos de la RP.

-Caracterizar la variabilidad espacial de las variables mencionadas y mapear su distribución geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras con las que se trabajaron fueron recolectadas durante el año 2010 y 2011 de suelos de aptitud agrícola de 28 zonas seleccionadas al azar de la RP Argentina (desde los 31° a los 39° S y desde los 58 ° a los 64° W). En este muestreo se abarcó un área de aproximadamente 27.000.000 ha, exceptuando la denominada Pampa deprimida del salado. Los suelos de esta región pertenecen en su gran parte al gran grupo de los Argiudoles, Hapludoles, Haplustoles, Peludert y Torripsament.

Se recogieron muestras georreferenciadas de aproximadamente tres sitios por

partido y/o departamento (n=1200). En cada lugar, para la misma serie de suelo, se tomó una muestra representativa (0-20 cm) en situación de manejo agrícola (mínimo 15 años de agricultura) y una de suelo prístino o pseudo prístina (parque, pastura o clausura y alambrados no disturbados).

El suelo fue secado en estufa a 30°C y molido con m artillo de madera para evitar contaminación. La muestra una vez cuarteada fue tamizada por 2 mm. Las variables que se analizaron en este trabajo fueron los contenidos de Ca, Mg, K intercambiables y totales (Haby et al., 1982), CIC (Schollenberger; Simon, 1945) y porcentaje de saturación con bases (SB). A su vez se calcularon las relaciones $C_{ai}+M_{gi}/K_i$, C_{ai}/M_{gi} y CT/F_i para cada uno de los cationes. Las bases intercambiables se determinaron utilizando acetato de amonio 1N a pH 7 como extractante y la relación suelo/solución utilizada fue de 2/20 (2 g de suelo/20 mL de acetato de amonio), con un tiempo de agitación de 30 minutos a 200 gpm (golpes por minuto) (Warncke y Brown, 1998). Este filtrado fue utilizado para cuantificar el Ca y Mg por absorción atómica y el K por emisión. Los resultados se expresaron en meq 100g⁻¹ y en cmol_c kg⁻¹. Las relaciones $C_{ai}+M_{gi}/K_i$ y C_{ai}/M_{gi} se estimaron a partir de los resultados expresados en cmol_c kg⁻¹.

La determinación de los cationes totales se realizó con la técnica de digestión con ácido fluorhídrico para elementos alcalinos totales (Helmke y Sparks, 2015). Se pesaron 0,5 gr de suelo en tubos de teflón, se agregó 1 ml de Agua Regia (mezcla de una parte de ácido nítrico concentrado con tres partes de ácido clorhídrico), 10 ml de ácido fluorhídrico y se pusieron a digerir a 110 °C durante 5 hs. Luego, el digesto se recogió en 2,8 gr de ácido bórico y se llevó a 100 ml de volumen con agua destilada. A este se le realizó una dilución de 3/10 y se determinó K total por emisión. Para la cuantificación de Ca y Mg, se tomó 1 ml de la dilución de 3/10, se le agregó 2,5 ml de Lantano y se realizó la lectura con un espectro absorción atómica.

Análisis Estadísticos

Se utilizó un análisis multivariado (el método de Agrupación jerárquica de componentes principales (HCPC)) a través del programa R versión 3.3.1(R, 2016) para agrupar sitios de características similares del total de zonas muestreados. Para esto se utilizaron 13 variables cuantitativas por sitio de la condición agrícola, algunas determinadas en este trabajo y otras tomadas de Sainz Rozas *et al*, 2011. Esta técnica combina el análisis de componentes principales (PCA) con el análisis de conglomerados (CA). El análisis de componente principal (PCA) reduce la dimensionalidad a nuevos componentes denominados principales. Cada componente principal (PC) se describe en términos de p nuevos componentes (CPi),

que se definen como una combinación lineal de las variables originales. El primer componente explica el máximo de la varianza total, el segundo componente es la segunda combinación lineal, no correlacionada con la primera, que explica el máximo de la varianza residual, y así sucesivamente hasta que se contabilice la varianza total. Por lo general, un pequeño número de componentes explica un alto porcentaje de la varianza total.

El análisis de conglomerados (CA) coloca objetos dentro de grupos que muestran cierta similitud entre sí. La disimilitud entre ellos es una medida de distancia. La técnica de clúster jerárquico utiliza una medida de distancia euclidiana para separar un conjunto de objetos en clases de acuerdo al criterio de agregación del promedio del grupo (Ramos *et al*, 2007).

Definidos los grupos de sitios similares se analizaron los datos con modelos lineales mixtos haciendo uso del paquete nlme (Pinheiro, 2016), y se utilizó el test de Tukey ($pvalue=0,05$) para las comparaciones de medias, haciendo uso del paquete lsmeans (Fisher, 1948). Para realizar el análisis de la varianza se utilizó el programa versión 3.3.1 (R, 2016).

La distribución espacial se analizó mediante técnicas geoestadísticas (White *et al*, 1997), el principal objetivo de esta es la caracterización de la variable investigada en todas las localizaciones partiendo de la información suministrada por los puntos muestrales (García, 2013). Para su aplicación se analizaron los datos originales a fin de comprobar la normalidad en la distribución de frecuencias y la presencia de tendencia espacial, para su eliminación (Olea, 2009). Posteriormente, se elaboraron los variogramas esféricos según la dirección de máxima variabilidad y se realizó la interpolación de los datos mediante krigeado ordinario (Oliver y Webster, 2014). El variograma es una función monótona creciente, alcanzando un valor límite, denominado meseta, que es la varianza de la función aleatoria. La meseta se alcanza para un valor de distancia "h" conocido como rango o alcance. El rango determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá del cual la autocorrelación es nula. Sin embargo, no todos los variogramas alcanzan una meseta. Es posible que un variograma no tienda asintóticamente a la varianza, sino que tienda a infinito cuando así lo haga h. Para la realización de los variogramas se utilizó el programa SADA versión 5.0.78 (2014). La representación cartográfica del Ca, Mg y K intercambiables se realizó mediante la definición de categorías de disponibilidad en el suelo. Los rangos óptimos se definieron según la información internacional teniendo en cuenta la textura del suelo y los diferentes requerimientos de los cultivos. Para Cai y Mgi se asumieron rangos de valores óptimos de 600 a

1000 mg kg⁻¹ y de 50 a 100 mg kg⁻¹ según la textura del suelo (correspondiendo el valor menor a suelos arenosos y el mayor a suelos francos (Vázquez y Pagani, 2015). Para Ki se asumió como rango de valores óptimos de 120-150 mg kg⁻¹ (Sawyer et al., 2002; Havlin et al., 2005; Barbazán et al., 2011; Barbazán et al., 2015). Para las tres bases, se procedió a definir los rangos de baja concentración asumiendo porcentajes del 50 al 60% del óptimo, mientras que la categoría de muy baja concentración fue definida como la inmediata inferior a esta última (Tabla 1). Es válido destacar que estos valores son solo orientativos debido a que no existen estudios de calibración con cultivos a nivel país.

Tabla 1. Rango de valores de Cai, Mgi y Ki, según categorías de disponibilidad.

Disponibilidad	Ca	Mg	K
	-----mg kg ⁻¹ -----		
Muy baja	<301	<25	<70
Baja	302-600	26-50	71-110
Optima	600-1000	50-100	110-170
Elevada	1001-1400	101-200	171-400
Muy elevada	1401-5400	201-620	401-1560

La representación cartográfica de las relaciones Cai+Mgi/Ki y Cai/Mgi se realizó mediante la definición de categorías que indican la disponibilidad relativa del nutriente que está en el denominador. Una alta relación indica deficiencia para el nutriente que está en el denominador. Para esto se tomaron los valores informados por Vázquez y Pagani (2015) y de Havlin et al. (2005) (Tabla 2).

Tabla 2. Rango de valores óptimos de K y Mg según su disponibilidad relativa.

Disponibilidad	Ca+Mg/K	Ca/Mg
Baja	≥11/1	≥15/1
Optima	7-11/1	3-15/1
Alta	≤7	<3

Para la representación cartográfica de los cationes totales (Ca, Mg y K) se definieron rangos de disponibilidad. Las categorías de K se determinaron según la informado por Moscatelli et al (2001) y se consideraron valores elevados a aquellos que superaban los 234 mg kg⁻¹ de suelo, valores medios los que se encontraban entre 234 mg kg⁻¹ y 117 mg kg⁻¹ y bajos a aquellos inferiores a este último valor (Tabla 3). Para Ca se asumieron rangos de contenidos normales a aquellos de entre 5000 a 15000 mg kg⁻¹ para suelos no calcáreos, contenidos altos a aquellos

superiores a 15000 mg kg⁻¹ y bajas a aquellos inferiores a 5000 mg kg⁻¹ (Tabla 3) (Vázquez y Pagani , 2015). Para Mg los rangos se determinaron según lo informado por Havlin et al. (2005) (Tabla 3).

Tabla 3. Rango de valores de Ca, Mg y K totales, según categorías de disponibilidad.

Disponibilidad	Ca	K	Mg
.....mg/kg.....			
Bajo	<5000	<117	<1000
Medio	500-15000	117-234	1000-4000
Alto	>15000	>234	>4000

RESULTADOS

Como se puede observar en la figura 2, en función de los resultados obtenidos de la Agrupación jerárquica de componentes principales quedaron definidos 4 clústeres de sitios similares. Dentro de los mismos se realizó la comparación entre las situaciones agrícolas y prístinas.

El clúster 1 está conformado por las zonas de Noreste (NELP), Sureste (SELP), Este (ELP) de la provincia de La Pampa; Oeste (OBsAs) y Noroeste (NOBsAs) de la provincia de Buenos Aires; Oeste (OCBA), Sur (SCBA), Suroeste (SOCBA) y Este (ECBA) de la provincia de Córdoba. El clúster 2 está formado por sitios de las zonas de Sureste (SECBA) de la provincia de Córdoba; Suroeste (SOSF), Centro (CSF), Sur (SSF), Este (ESF), Oeste (OSF), Sureste (SESF) de la provincia de Santa Fe; Norte (NBsAs) y Noreste (NEBsAs) de la provincia de Buenos Aires. El clúster 3 agrupa las zonas de Suroeste (SOBsAs), Centro (CBsAs), Sur (SBsAs) y Sureste (SEBsAs) de la provincia de Buenos Aires; Este (EER), Oeste (OER) y Sur (SER) de la provincia de Entre Ríos. El clúster 4 está conformado únicamente por sitios de la zona Centro (CER) de la provincia de Entre Ríos.

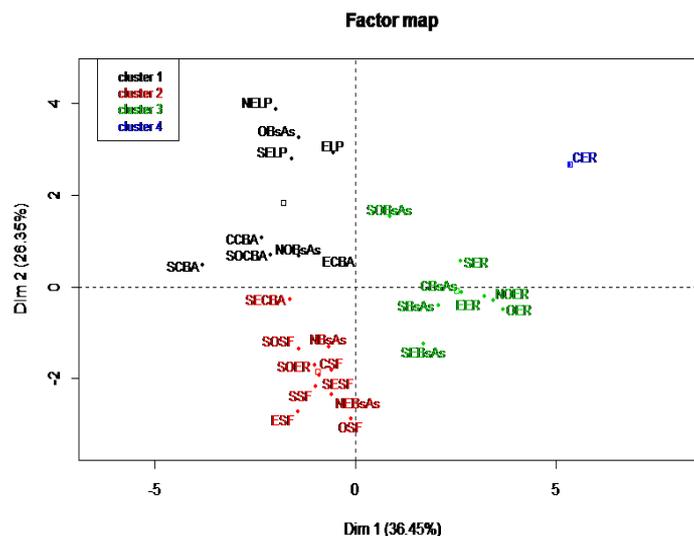


Figura 1. Análisis de conglomerados (CA). Los sitios dentro de cada clúster son similares entre sí.

Ki, Cai, Mgi, CIC, Cai+Mg/Ki, Cai/Mgi

Para estas variables hubo interacción entre clúster y situación de manejo, por lo que se compararon las medias de situación mediante el test de Tukey.

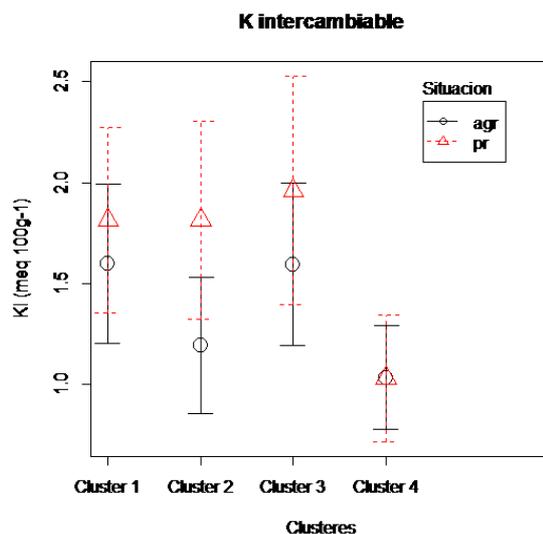


Figura 2. *Ki* en Clústeres de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre condición de suelo, según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la

media.

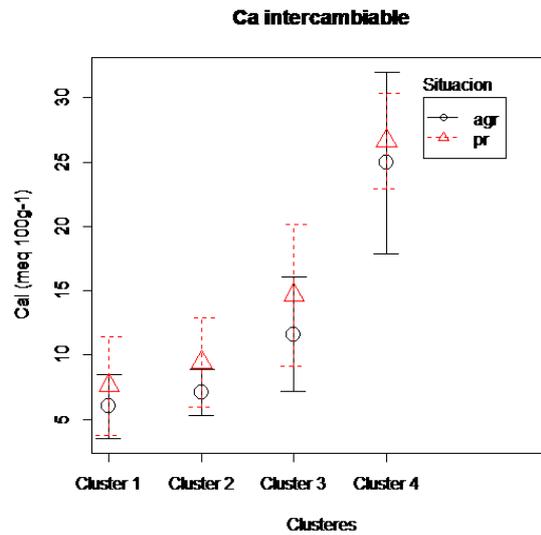


Figura 3. Cai en Clústeres de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre condición de suelo, según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

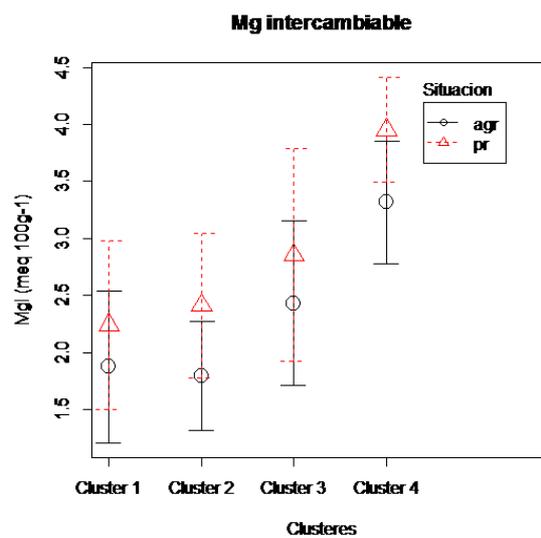


Figura 4. Mgi en Clústeres de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre condición de suelo,

según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

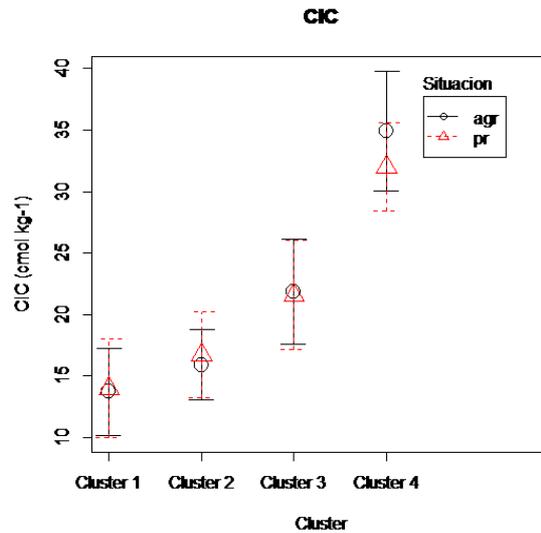


Figura 5. CIC en Clústeres de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

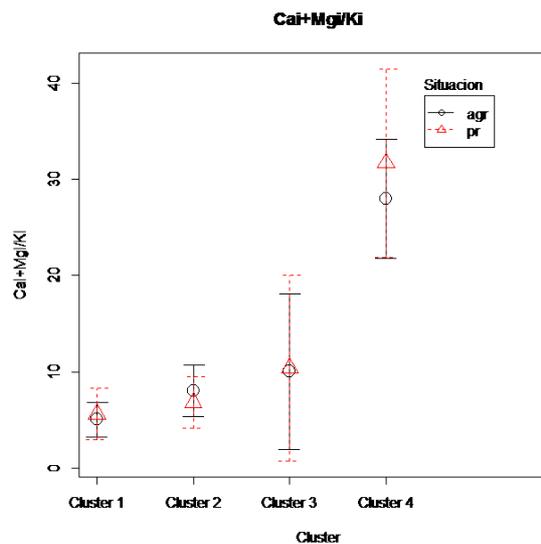


Figura 6. Cai+Mgi/Ki en Clúster de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

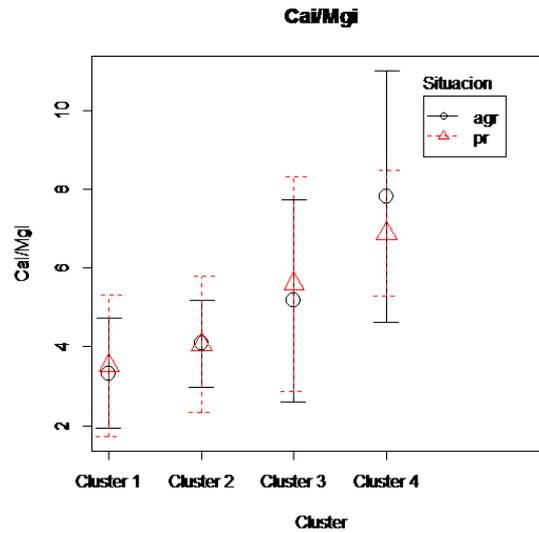


Figura 7. Cai/Mgi en Clúster de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

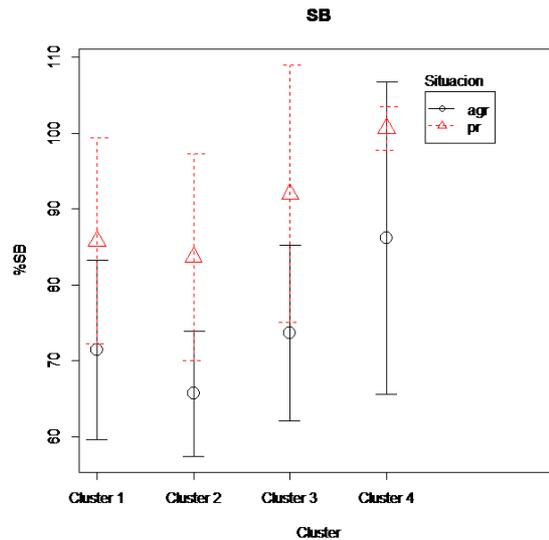


Figura 8. %SB en Clústeres de la RP y condición de manejo. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre condición de suelo, según el test de Tukey. Barras verticales indican el desvío estándar respecto a la media.

Para la variable Ki se encontraron diferencias significativas entre condición (Figura 2), dado que la agricultura redujo significativamente el contenido del mismo para el Clúster 2 y 3 pero no para el 1 y 4. Sin embargo, los valores de este nutriente para los clústeres y las condiciones están en el rango de alto a muy alto, y superan al umbral de respuesta a la fertilización para alfalfa, uno de los cultivos con más alto requerimiento (Hoeft; Peck, 2001). La mayor reducción en Ki en el clúster 2 en comparación con la condición prístina (Figura 2), podría ser consecuencia de la mayor exportación de bases en general y de K en particular debido a una mayor frecuencia del cultivo de soja en las rotaciones (Cruzate; Casas, 2003), cultivo que más extrae respecto a los típicos de la zona. Por otra parte, la caída del nivel de Ki en los primeros 20 cm de suelo no solo depende del balance del nutriente, sino también de la interacción con otras propiedades del suelo, como la dinámica de intercambio entre las fracciones de K (Wang et al., 2004; Öborn et al., 2005; Johnston, 2007; Fernández et al., 2008) y/o de la interacción con las capas más profundas del perfil, la que dependiendo de su riqueza podría o no conducir a la de estratificación superficial de Ki (Bordoli; Mallarino, 1998; Jobbagy ; Jackson, 2001; Amado et al., 2006; Mallarino ; Borges, 2006).

La actividad agrícola redujo significativamente los niveles de Cai y Mgi en esta condición, para el clúster 1, 2, 3 pero no para el 4 (Figura 3 y 4). En la Argentina, la producción de granos se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años, pasando de 60.000.000 Mg en el año 2000 a 115.000.000 en el 2015. Por lo tanto, es de esperar que una alta exportación de nutrientes y una baja reposición vía fertilizantes nos lleven a disminuciones en los valores disponibles de estos cationes. La no diferencia encontrada para el clúster 4 podría a ser consecuencia de la reducida cantidad de datos con las que se contó para esta zona.

Para la variable CIC no se observaron diferencias significativas entre la condición prístina y agrícola (Figura 5). Sainz Rozas et al. (2013), utilizando las muestras de este trabajo, informaron que la agricultura produjo una disminución del 30 al 50% del contenido de MO según zonas. Esta caída sería principalmente de la fracción activa y lenta de MO, las cuales no están relacionadas estrechamente con la CIC (Brady; Weil, 2008).

Para la relación Cai+Mgi/Ki se determinaron diferencias significativas entre condición para el clúster 1 y 2 (Figura 6). Esta mayor relación mostrada para la condición agrícola en el clúster 2 sugiere una mayor extracción de K respecto a las otras dos bases. Esto podría deberse a que dicha región presenta una mayor historia agrícola con alta frecuencia de soja en las rotaciones (y en muchos casos con monocultivos). Para rendimientos promedios de soja, maíz, trigo y girasol, la soja exportaría de 0,58 a 4,45 veces más de K que los otros cultivos.

Para la relación Cai/Mgi no se determinaron diferencias significativas entre condición de manejo (Figura 7) para ningún clúster. El escaso efecto de la agricultura sobre la relación Ca/Mg no fue lo esperado, debido a que todos los cultivos exportan más Mg que Ca y a que el primero podría estar expuesto a mayores pérdidas por lavado al ser retenido con menor fuerza que el Ca en el complejo de intercambio (Havlin et al., 2005b). Esto podría ser explicado por una mayor velocidad reposición de Mg por parte de fracciones no intercambiables.

La SB mostró diferencias significativas entre condición para el clúster 1, 2, 3 (Figura 8) lo que se debe a la escasa o nula reposición de bases vía fertilizantes (Sainz Rozas et al., 2013). El promedio de SB para los suelos agrícolas fue del 69%, y en ninguna de las áreas relevadas se determinaron valores inferiores al 60% de SB. Estos resultados sugieren que en la mayor parte del área relevada la SB sería adecuada para la mayoría de los cultivos excepto para la alfalfa (Havlin et al., 2005a). La diferencia no encontrada entre las situaciones de manejo para el clúster 4 podría deberse el bajo número de datos en con los que se cuenta del mismo en

comparación con el resto.

Distribución espacial de cationes intercambiables y de las relaciones entre los mismos.

En suelos prístinos, los variogramas muestran en general una clara continuidad espacial, con rangos de entre 150 a 300 km (Figura 9). En ambientes agrícolas, la distribución espacial de los valores mostró menor continuidad, ya que los rangos variaron de 70 a 250 km, correspondiendo al K_i el menor valor (Figura 9). Esto indicaría que el efecto antrópico aumentó la variabilidad espacial del K_i , disminuyendo la distancia a la cual dos valores muestrales están relacionados entre sí. El K presenta mayores niveles de exportación que Ca y Mg dado que, por ejemplo, un cultivo de maíz exporta 3,4, 0,22 y 0,89 kg Mg^{-1} en grano de K, Ca y Mg respectivamente; mientras que un cultivo de soja exporta 16,8, 3 y 2,7 kg ha^{-1} de K, Ca y Mg Mg^{-1} de grano, respectivamente (Barbazán et al., 2015; Vázquez y Pagani, 2015). Por lo tanto, es factible que cambios zonales de las prácticas de manejo de suelo y cultivo (labranzas, rotaciones, fertilización, riego, etc) afecten en mayor medida a nutrientes de elevada extracción como el K, aumentando así su variabilidad espacial.

De la misma forma, las relaciones $(Ca+Mg)/K$ y Ca/Mg muestran en general valores altos de continuidad espacial. No obstante, en suelos bajo agricultura el rango se acortó para la relación $Cai+Mgi/K_i$, mientras que se mantuvo constante para la relación Cai/Mgi , lo que se explicaría por el aumento de la variabilidad espacial del K_i en suelos bajo agricultura (Figura 9). En esta condición, los resultados sugieren que para el análisis regional de la distribución de Cai , Mgi y K_i y de sus relaciones, una adecuada red muestreo debería considerar que la distancia máxima debería ser de 70 km.

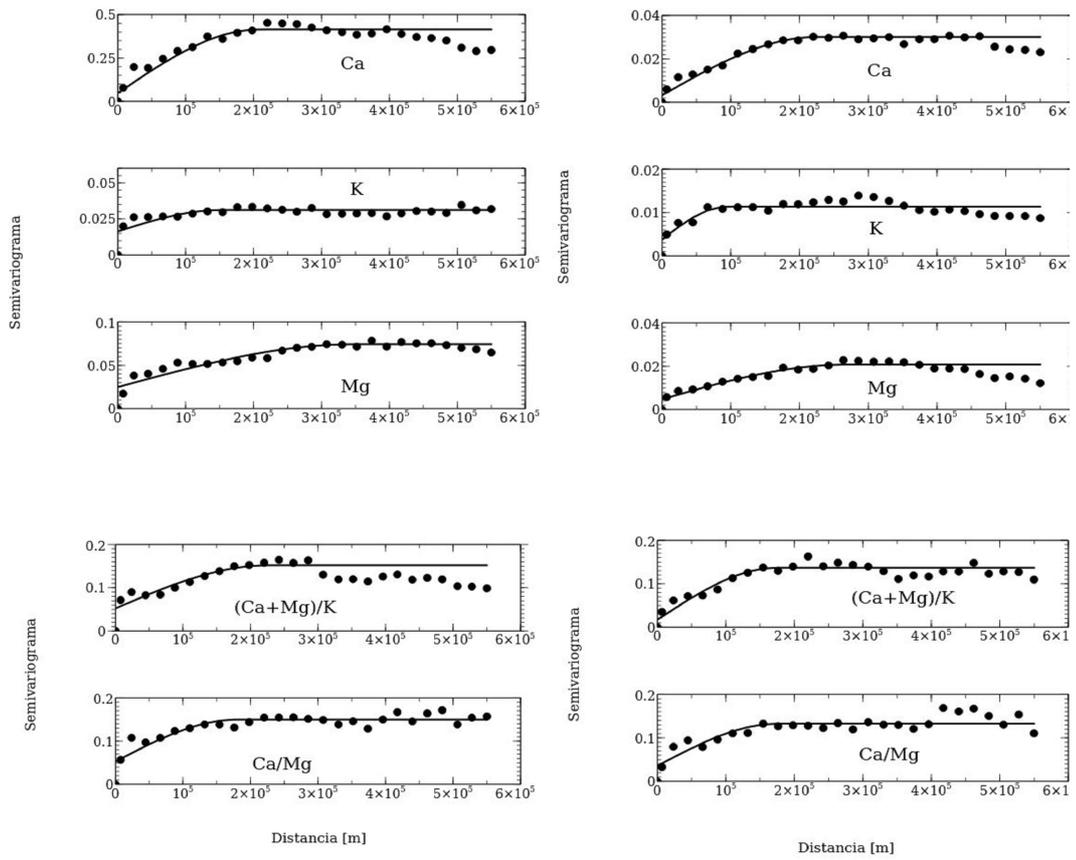


Figura 9. Variogramas indicadores de cationes intercambiables y de las relaciones entre los mismos de suelos prístinos (Izquierda) y agrícolas (derecha) de RP.

Puesta a punto de técnica para determinación de cationes totales

Tiempos de Digestión.

El objetivo de esta puesta a punto se debió a que no se contaba con los mismos materiales instrumentales que los citados por Helmke y Sparks, 2015. En la técnica descrita por los autores, el tiempo de digestión utilizado era de 3 horas, por lo que a su vez se probaron otros tiempos (5 y 7 horas). Para lo mismo se tomaron 4 muestras (2 prístinas y 2 agrícolas) pertenecientes a diferentes clústeres y se pusieron a digerir. Como no se encontró interacción entre la muestra y los tiempos de digestión se realizaron comparaciones múltiples para este factor mediante el test de Tukey ($pvalue=0,05$) para cada uno de los cationes.

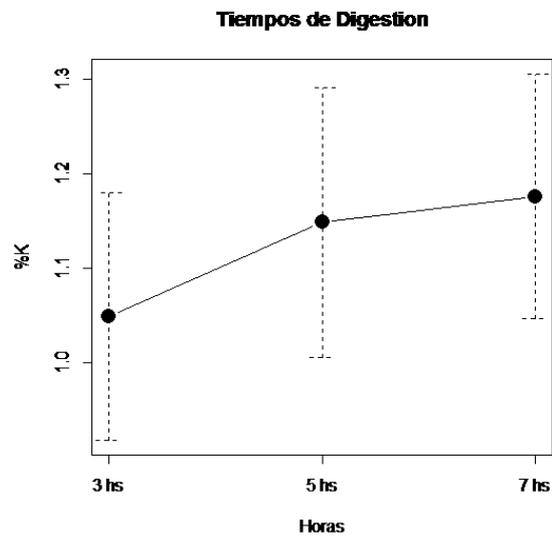


Figura 10.Contenido de K total luego de diferentes tiempos de digestión.

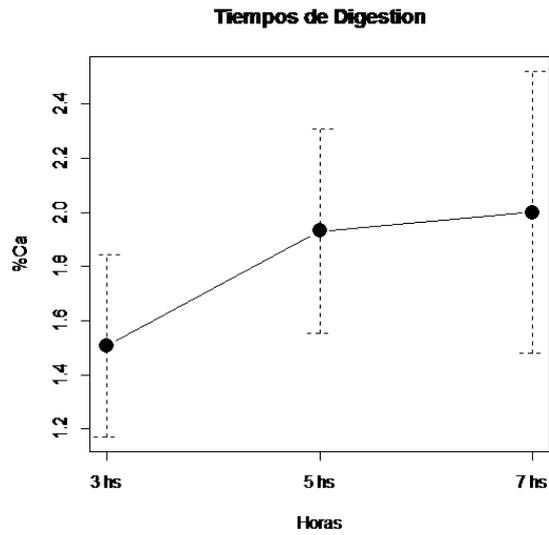


Figura 11. Contenido de Ca total luego de diferentes tiempos de digestión.

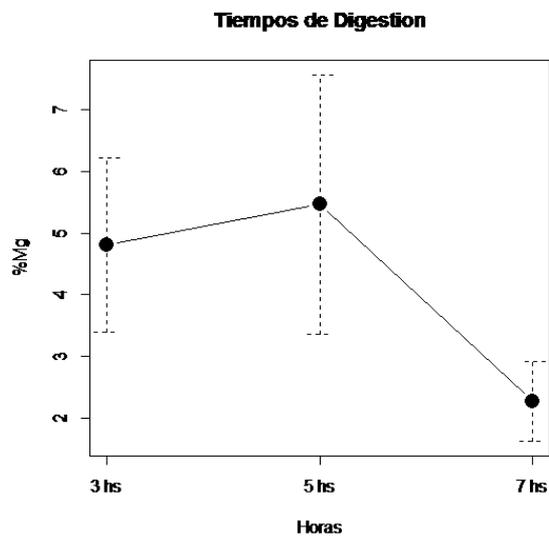


Figura 12. Contenido de Mg total luego de diferentes tiempos de digestión.

Lo que se observó para K y Ca fue que no hubo diferencias significativas entre 5 y 7 horas de digestión en los porcentajes determinados y que con 3 horas la digestión era incompleta (Figura 10 y 11). El Mg en cambio, no mostró diferencias

significativas entre 3 y 5 horas pero si respecto a 7 horas (Figura 12). Con este último tiempo teníamos caídas en valores.

Dado lo antes mencionado el tiempo de digestión seleccionado para las determinaciones fue de 5 horas. Además se realizaron las recuperaciones correspondientes y se lograron valores cercano al 100% (datos no mostrados).

Estos datos mostrados de contenidos de cationes totales son inéditos para la RP.

2. Principales dificultades para la ejecución del trabajo.

El tiempo requerido para la puesta a punto de técnica de determinación de cationes totales.

3. Grado de cumplimiento del proyecto original.

Con lo realizado hasta el momento se podrían responder las 2 primeras hipótesis y los objetivos asociados a las mismas.

4. Cronograma para cumplir las tareas a completar dentro del plazo (24 meses para maestría/ 12 meses para especialización).

De ahora en adelante se procederá a continuar con las determinaciones de los contenidos totales del resto de muestras.

5. Publicaciones relacionadas con el proyecto de tesis.

Ninguna hasta el momento

6. Grado de avance en la redacción del manuscrito de tesis/monografía

Aproximadamente un 40% de la misma