

**DISPONIBILIDAD Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE CALCIO, MAGNESIO Y  
POTASIO EN SUELOS AGRÍCOLAS Y PRÍSTINOS DE LA REGIÓN PAMPEANA**

ING. AGR. GASTÓN EMILIANO LARREA

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de  
***MAGISTER SCIENTIAE***

Área de Producción Vegetal

PROGRAMA DE POSTGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

**Balcarce, Argentina.**

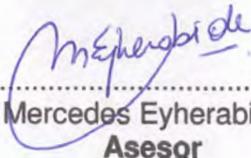
**Marzo 2019**

**DISPONIBILIDAD Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE CATIONES BÁSICOS  
EN SUELOS AGRÍCOLAS Y PRÍSTINOS DE LA REGIÓN PAMPEANA**

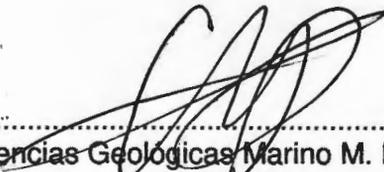
ING. AGR. GASTÓN EMILIANO LARREA



.....  
Ing. Agr. Hernán R. SAINZ ROZAS, *M.Sc.*, Dr.  
**Director de Tesis**



.....  
Biq. Mercedes Eyherabice, *M.Sc.*  
**Asesor**



.....  
Lic. en Ciencias Geológicas Marino M. Puricelli, *M.Sc.*, Dr.  
**Asesor**

.....  
Ing. Agr Nicolás Wyngaard, *M.Sc.*, *Ph.D*  
**Asesor**

# DISPONIBILIDAD Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE CATIONES BÁSICOS EN SUELOS AGRÍCOLAS Y PRÍSTINOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

ING. AGR. LARREA GASTÓN EMILIANO LARREA

Aprobada por:

P/A

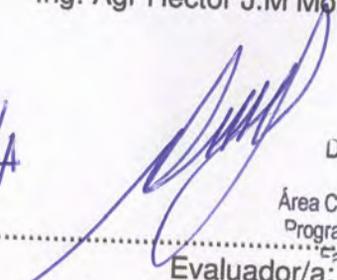


Dr. ANDRÉS D. ZAMBELLI  
DIRECTOR  
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales  
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias  
Facultad de Agronomía - UNMDP

Evaluador/a:

Ing. Agr. Hector J.M. Morras, M.Sc., Dr

P/A



Dr. ANDRÉS D. ZAMBELLI  
DIRECTOR  
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales  
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias  
Facultad de Agronomía - UNMDP

Evaluador/a:

Ing. Agr. Fernando O. García, Ph.D

P/A



Dr. ANDRÉS D. ZAMBELLI  
DIRECTOR  
Área Cs. de las Plantas y Rec. Naturales  
Programa de Posgrado en Cs. Agrarias  
Facultad de Agronomía - UNMDP

Evaluador/a:

Ing. Agr. Mónica Barbazán, Ph.D

## INDICE GENERAL

Sección	Pág.
Índice general.....	iii
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras.....	xiii
Resumen.....	xi
Abstract.....	xiii
Introducción.....	1
Materiales y métodos.....	5
1. Muestreo de suelos.....	5
2. Determinaciones analíticas.....	6
3. Análisis Estadístico y Geoestadístico.....	7
Resultados y discusión.....	12
1. Agrupación jerárquica de componentes principales.....	12
2. Capacidad de intercambio catiónico.....	15
3. Potasio intercambiable.....	16
4. Magnesio intercambiable.....	18
5. Calcio intercambiable.....	20
6. Saturación con bases.....	22
7. Calcio+ magnesio/ potasio intercambiable.....	23
8. Calcio/magnesio intercambiable.....	25
9. Puesta a punto de técnica para determinación de cationes totales.....	27
9.1. Eficiencia de recuperación.....	30
10. Potasio total.....	31
11. Calcio total.....	34
12. Magnesio total.....	35
13. Relación potasio intercambiable/ potasio total.....	37
14. Relación calcio intercambiable/ calcio total.....	39
15. Relación magnesio intercambiable/ magnesio total.....	40
16. Distribución espacial de cationes intercambiables y totales.....	43
Consideraciones finales.....	58

Conclusiones.....	58
Bibliografía.....	60

## ÍNDICE DE TABLAS

Sección	Pág.
Tabla 1. Matriz de correlación de parámetros de suelo.....	7
Tabla 2. Rango de valores de calcio, magnesio y potasio intercambiable ( $Ca_i$ , $Mg_i$ y $K_i$ ), según categorías de disponibilidad .....	10
Tabla 3. Rango de valores óptimos para las relaciones calcio + magnesio/ potasio intercambiable ( $Ca_i+Mg_i/K_i$ ) y calcio/ magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) según su disponibilidad relativa.....	10
Tabla 4. Rango de valores de calcio, magnesio y potasio total ( $Ca_T$ , $Mg_T$ y $K_T$ ), según categorías de disponibilidad.....	11
Tabla 5. Descomposición de la variabilidad por componente principal (CP) para las variables de suelo asociadas a las zonas.....	13
Tabla 6. Autovectores de los parámetros analizados para las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).....	14
Tabla 7. Análisis de la varianza para la evaluación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	15
Tabla 8. Análisis de la varianza para la evaluación del potasio intercambiable ( $K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	18
Tabla 9. Análisis de la varianza para la evaluación del magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) para cada situación de manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	20
Tabla 10. Análisis de la varianza para la evaluación del calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	21
Tabla 11. Análisis de la varianza para la evaluación de la saturación con bases (SB) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	23

Tabla 12. Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio + magnesio/ potasio intercambiable ( $Ca_i+Mg_i/K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores. ....	25
Tabla 13. Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio / magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.....	27
Tabla 14. Análisis de la varianza de los tiempos de digestión para potasio, calcio y magnesio total ( $K_T$ , $Ca_T$ y $Mg_T$ ).....	29
Tabla 15. Soluciones de concentraciones esperadas y determinadas con el fotómetro de llamas y espectro de absorción atómica luego de 5 horas de digestión.....	31
Tabla 16. Análisis de la varianza para la evaluación del potasio total ( $K_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	34
Tabla 17. Análisis de la varianza para la evaluación del calcio total ( $Ca_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	35
Tabla 18. Análisis de la varianza para la evaluación del magnesio total ( $Mg_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	37
Tabla 19. Análisis de la varianza para la evaluación de la relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	39
Tabla 20. Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio total/ calcio intercambiable ( $Ca_T/Ca_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), Clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	40
Tabla 21. Análisis de la varianza para la evaluación de la relación magnesio total / magnesio intercambiable ( $Mg_T/Mg_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.....	42

Tabla 22. Parámetros de los modelos ajustados para valores de potasio, calcio y magnesio (K, Ca y Mg) intercambiables y totales en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	48
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Sección	Pág.
Figura 1. Gran Grupos de Suelos de la región pampeana (RP).....	5
Figura 2. Análisis de conglomerados (CA). Los sitios dentro de cada clúster son similares entre sí.....	12
Figura 3. Mapa de la región pampeana (RP) con sitios de características edáficas similares agrupados en clústeres (1,2 y 3).....	13
Figura 4. Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	16
Figura 5. Potasio intercambiable ( $K_i$ ) en clústeres y manejos (prístino= línea discontinua, agrícola= línea llena) de suelos de la región pampeana (RP).....	18
Figura 6a. Magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en situación de manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la región pampeana (RP).....	20
Figura 6b. Magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	20
Figura 7a. Calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la región pampeana (RP).....	22
Figura 7b. Calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	22
Figura 8a. Saturación con bases (SB) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de región pampeana (RP).....	24
Figura 8a. Saturación con bases (SB) en clústeres de suelos de región pampeana (RP).....	24
Figura 9. Relación calcio + magnesio/ potasio intercambiable ( $Ca_i+Mg_i/K_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP) y manejo (prístino= línea discontinua, agrícola= línea llena).....	26
Figura 10a. Relación calcio / magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístina (2) de la región pampeana (RP).....	28
Figura 10b. Relación calcio / magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	28

Figura 11. Concentración potasio, calcio y magnesio total ( $K_T$ , $Ca_T$ y $Mg_T$ ) para muestras de suelo de la región pampeana (RP) luego de 3 hs (1), 5 hs (2) y 7 hs (3) de digestión. ....	30
Figura 12. Potasio total ( $K_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).	34
Figura 13a. Calcio total ( $Ca_T$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de la región pampeana (RP).....	36
Figura 13b. Calcio total ( $Ca_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	36
Figura 14. Magnesio total ( $Mg_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	38
Figura 15a. Relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2).....	39
Figura 15b. Relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) en clústeres de suelo de la RP.....	39
Figura 16. Relación calcio total / calcio intercambiable ( $Ca_T/Ca_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP).....	41
Figura 17a. Relación magnesio total/ magnesio intercambiable ( $Mg_T/ Mg_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la región pampeana (RP).....	43
Figura 17b. Relación magnesio total/ magnesio intercambiable ( $Mg_T/Mg_i$ ) en clústeres de suelo de la región pampeana (RP).....	43
Figura 18. Distribución de los valores de cationes intercambiables y totales de muestras de suelo agrícolas y prístinas de la región pampeana (RP).....	44
Figura 19. Variogramas correspondientes a valores potasio, magnesio y calcio intercambiable ( $K_i$ , $Mg_i$ y $Ca_i$ ) de muestras de suelo agrícola y prístinas de la región pampeana (RP).....	46
Figura 20. Variogramas correspondientes a valores potasio, magnesio y calcio total ( $K_T$ , $Mg_T$ y $Ca_T$ ) de muestras de suelo agrícolas (izquierda) y prístinas (derecha) de la región pampeana (RP).....	47
Figura 21. Mapa de distribución de potasio intercambiable ( $K_i$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	51

Figura 22. Mapa de distribución de potasio total ( $K_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	52
Figura 23. Mapa de distribución de magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	53
Figura 24. Mapa de distribución de magnesio total ( $Mg_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	54
Figura 25. Mapa de distribución de calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	55
Figura 26. Mapa de distribución de calcio total ( $Ca_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).....	56
Figura 27. Distribución de frecuencia de los residuales en función de la distribución normal con media nula para las variables potasio, magnesio y calcio (K, Mg y Ca) intercambiable y total en manejo prístino y agrícola.....	57

## RESUMEN

En Argentina, la producción de granos ha incrementado durante los últimos años y la reposición de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) ha sido nula o escasa. Los procesos y atributos de suelo que afectan el crecimiento y desarrollo de los cultivos y a la extracción de nutrientes varían en el espacio y tiempo. El material original de los suelos de la región pampeana (RP) es mineralógicamente homogéneo. Sin embargo, hay evidencias que sugieren que los sedimentos loésicos de Pampa Ondulada podrían tener diferente composición según su procedencia. Esto sugiere diferencias en el contenido total de bases y en la relación entre contenido total y la fracción intercambiable. Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con dicha información. Los objetivos de este trabajo fueron: determinar el contenido total e intercambiable de Ca, Mg, K, la capacidad de intercambio catiónico, la saturación con bases (SB) y a su vez caracterizar la variabilidad espacial de dichas variables para mapear su distribución geográfica. Para esto se trabajó con muestras ( $n=1200$ ) recolectadas durante el año 2010 y 2011 de suelos de aptitud agrícola. En cada lugar, se tomó una muestra (0-20 cm) en situación de manejo agrícola y prístino. A las mismas se les determinó CIC, Ca, Mg y K intercambiable y total ( $Ca_i$ ,  $Mg_i$ ,  $K_i$ ,  $Ca_T$ ,  $Mg_T$  y  $K_T$ ).

Para analizar los datos se utilizó un análisis multivariado (HCPC) para agrupar en clústeres sitios similares. Definidos estos se analizaron los datos con modelos lineales mixtos. La distribución espacial fue estudiada mediante semivariogramas empíricos. Posteriormente, se realizó la interpolación a través de krigeado ordinario y se obtuvieron los mapas correspondientes. Se observó que la actividad agrícola originó cambios en la disponibilidad y variabilidad espacial de  $K_i$ ,  $Ca_i$ ,  $Mg_i$ , SB y  $Ca_T$ . Se redujo en mayor medida el  $K_i$  (-34%) y, en menor medida, el  $Mg_i$  (-19%). Los variogramas en ambos manejos mostraron continuidad espacial, con rangos de entre 140 a 300 km para suelos prístinos y 92 a 250 km en manejo agrícola. El  $K_i$  y el  $Ca_T$  fueron los que mostraron la mayor reducción en el alcance. El  $K_i$  fue el que presentó la mayor variación espacial (92 km) y la mayor reducción en la concentración, lo que demuestra que su comportamiento está muy asociado a prácticas de manejo zonales. Sin embargo, las concentraciones de todos los cationes se encuentran en el rango de alto a muy alto según lo reportado internacionalmente. A su vez, los resultados sugieren que la capacidad de reposición de Ca y Mg (promedio de manejo) sería menor para la zona norte de la RP dado que mostró

menor relación total/intercambiable (8/1 y 12/1, respectivamente). No así para el K, dado que la región sudeste fue la que mostró la menor relación (21/1). Estos resultados indican que ante potenciales problemas de deficiencia de Ca, Mg y K estos diferirán según zona y que esta diferencia está dada por la variación de los contenidos totales y tipo de cultivo por su influencia en la extracción de cada nutriente.

**Palabras clave:** variabilidad espacial, loess, cationes.

## ABSTRACT

### AVAILABILITY AND SPATIAL VARIABILITY OF CALCIUM, MAGNESIUM, AND POTASSIUM IN AGRICULTURAL AND PRISTINE SOILS FROM THE PAMPAS REGION

In Argentina, the increase in grain crop production during recent years has not been accompanied by an increase in soil calcium (Ca), magnesium (Mg), and potassium (K) replenishment. Soil processes and attributes that affect crop growth and development and nutrient extraction vary in space and time. The parent material of the soils from the Pampas region (PR) is mineralogically homogeneous. However, there is evidence that suggest that the Loess sediments of some regions of the PR may have different composition depending on their origin. This suggests differences in the total content of bases and in the relationship between their total content and the exchangeable fraction. The objectives of our study were: to characterize and map the spatial variability of the total and exchangeable content of Ca, Mg, and K, the cation exchange capacity (CIC), and base saturation (SB). To this end, we worked with samples ( $n = 1200$ ) collected during 2010 and 2011. At each site, a composite soil sample (0-20 cm) was taken from an agricultural and a pristine soil. The CIC, and total and exchangeable Ca, Mg, and K were determined in these samples ( $Ca_i$ ,  $Ca_T$ ,  $Mg_i$ ,  $Mg_T$ ,  $K_i$ , and  $K_T$ , respectively). Data was analyzed through multivariate analysis (HCPC) to group similar sites into clusters. Once these clusters were defined, data were analyzed using mixed linear models. The spatial distribution was studied through empirical semivariograms. Subsequently, the interpolation was performed using ordinary kriging and results were mapped. It was observed that the agricultural activity caused changes in the availability and spatial variability of  $K_i$ ,  $Ca_i$ ,  $Mg_i$ , SB, and  $Ca_T$ . The  $K_i$  reduction was greater (-34%) than that observed for  $Mg_i$  (-19%). The variograms for agricultural and pristine soils showed spatial continuity, with range values varying from 140 to 300 km for pristine soils and from 92 to 250 km for agricultural soils. Both  $K_i$  and  $Ca_T$  showed the greatest range reduction from the evaluated variables. The  $K_i$  was the variable that presented the greatest spatial variation (92 km) and the greatest concentration reduction, which demonstrates that its behavior is closely associated with regional management practices. However, the concentration of all cations was in the high to very high range according to international literature. Our results suggest that Ca and Mg

replacement capacity would be lower for the northern zone of the RP, since it showed a lower total / interchangeable ratio (8/1 and 12/1, respectively). On the contrary, for K, the lowest ratio (21/1) was observed in the southern RP. These results indicate that future Ca, Mg and, K deficiencies will differ depending on the zone. These differences will be determined by variations on total soil base content and extraction rate, which is defined by the crops used in the rotation.

**Keywords:** spatial variability, loess, cations

## INTRODUCCIÓN

La extensa superficie que abarca el territorio argentino presenta una amplia diversidad de órdenes edáficos taxonómicos y de climas (Panigatti, 2010). La principal actividad económica de este país es la producción agrícola-ganadera. En la región central argentina se encuentra ubicada la denominada región pampeana (RP), la cual abarca la provincia de Buenos Aires, y parte de La Pampa, Santa Fe, Córdoba y Entre Ríos (desde 31° a 39° S y desde 58° a 64° W). La RP es una zona de clima templado húmedo a subhúmedo y los suelos pertenecen mayormente al orden Molisol (Panigatti, 2010). En general, estos suelos tienen buenas condiciones para la agricultura, con un horizonte superficial con 2 a 3,5% de materia orgánica (MO), y son más desarrollados y con texturas más finas al este (Gelati y Vázquez, 2008). Los suelos de la RP, en su estado original, tenían elevada fertilidad dado que derivan de un material de tipo sedimentario conocido como loess pampeano (Teruggi, 1957; Sayago, 1995; Gallet *et al.*, 1998; Zárate, 2003).

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 Mg en el 2015, de la cual más del 80% se produce en la RP (SIIA, 2016). Este aumento se debió, en parte al incremento en los rendimientos por unidad de superficie y a la expansión del área bajo agricultura, básicamente debido al avance del cultivo de soja. A nivel país, la práctica de fertilización con nitrógeno (N) y fósforo (P) ha sido ampliamente adoptada, sin embargo, la reposición de otros nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) es nula o escasa (Sainz Rozas *et al.*, 2013). Por ejemplo, durante la campaña 2016, la producción de granos seco de soja fue de alrededor de 51.900.000 de Mg, mientras que el consumo de fertilizantes potásicos fue de alrededor de 10.118 Mg ((Ministerio de Agroindustria de la Nación). Si por cada tonelada de grano de soja producida por hectárea se exportan 19 kilogramos de K, con estos consumos de fertilizante se estaría reponiendo el 1,15 % de lo removido del sistema.

La mayor extracción de bases del sistema suelo como consecuencia del aumento de los rendimientos de los cultivos y de las prolongadas e intensivas actividades ganaderas de carne o leche podrían ocasionar una disminución en la disponibilidad de estos nutrientes. Esto no solo traería problemas de deficiencias nutricionales, sino que también afectaría a las condiciones físicas de los suelos debido a su rol fundamental en la formación y estabilización de agregados, que disminuyen la resistencia a la penetración,

facilitando la dinámica del aire y del agua (Vázquez *et al.*, 2010). A su vez, las concentraciones de cationes básicos están muy relacionadas con el pH de suelo. En zonas templadas, los principales factores responsables de la acidificación de los suelos son la disminución en los niveles de bases y el uso continuo de fertilizantes amoniacales. Por ejemplo, altos porcentajes de saturación con Ca están asociados a un pH favorable para el crecimiento de plantas y microorganismos (Vázquez y Pagani, 2015).

Heredia *et al.* (2012) informaron que gran parte de los suelos del norte de la RP presentaban bajos valores de saturación cálcica (< 60 %). En línea con esto, algunos trabajos realizados en la misma zona demuestran respuesta al agregado de Ca en los cultivos de alfalfa y soja (Fontanetto *et al.*, 2012; Oderiz *et al.*, 2012). No obstante, no se conoce cuál ha sido el impacto de la producción agrícola sobre el contenido de cationes intercambiables debido a que no se cuenta con los valores de referencia de los suelos prístinos.

Las plantas se proveen de los nutrientes que requieren para su crecimiento a partir de la solución del suelo. Una proporción de los nutrientes que la planta toma de la solución del suelo es extraída del sistema durante la cosecha. Esta proporción depende de la especie vegetal, del órgano de cosecha, del rendimiento y del elemento en consideración (Gelati y Vázquez, 2008). Por ejemplo, para el cultivo de maíz (rendimiento 10 Mg ha<sup>-1</sup>), trigo (rendimiento 5 Mg ha<sup>-1</sup>), soja (rendimiento 4 Mg ha<sup>-1</sup>) y caña de azúcar (rendimiento 75 Mg ha<sup>-1</sup>) la exportación de Ca en los granos será de 2, 2, 2, 12 y 31 kg ha<sup>-1</sup>; la de K de 34, 17, 67 y 59 kg ha<sup>-1</sup>, y la de Mg de 9, 8, 11 y 26 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Barbazán *et al.*, 2015; Vázquez y Pagani, 2015). Estos datos llevan a pensar que la variabilidad espacial para Ca y K dependerá en mayor medida de los cultivos predominantes en cada zona, mientras que la de Mg sería menos afectada por la secuencia de cultivos. Henríquez *et al.* (2005) analizaron el efecto diferencial de tres tipos de cultivos (caña de azúcar, café y bosque) sobre el nivel de Ca, Mg, K intercambiables (Cai, Mgi, Ki, respectivamente) y P en un mismo lote, con el mismo tipo de suelo luego de 20 años. Estos autores informaron que la zona que tuvo monocultivo de caña de azúcar presentó los niveles más bajos de Cai y Ki asociado a la mayor extracción de estos nutrientes. Por otra parte, estos datos también sugieren que las relaciones Ca<sub>i</sub>+Mg<sub>i</sub>/K<sub>i</sub> podrían aumentar mientras que la relación Cai/Mg<sub>i</sub> aumentaría levemente o se mantendría constante si la soja es el cultivo predominante, respecto a suelos prístinos o inalterados. A su vez, el

cambio en dichas relaciones sería mayor para la zona norte de la RP debido a la mayor frecuencia del cultivo de soja en las secuencias.

Los procesos y atributos de suelo que afectan el rendimiento de los cultivos y la extracción de nutrientes varían en el espacio y en el tiempo (Mulla y Schepers, 1997). A escala regional, el material original, el clima, los usos de la tierra, el tipo de vegetación y las características del relieve son los determinantes de la variación espacial y temporal (Mallarino y Wittry, 2004). A nivel de lote, la topografía es uno de los principales factores que origina variabilidad espacial por su efecto en la distribución de agua y sedimentos (Ceddia *et al.*, 2009). Sin embargo, las prácticas de manejo como la orientación de los surcos, método de aplicación de nutrientes, las labores mecánicas y compactación pueden dominar las causas de variabilidad a escalas pequeñas (Mallarino y Wittry, 2004), alterando atributos químicos, físicos, y biológicos del horizonte superficial (Corá *et al.*, 2004).

Si bien el contenido de  $Ca_i$ ,  $Mg_i$  y  $K_i$  es afectado en parte por las diferencias en la extracción de los cultivos, su valor en el suelo resulta del balance entre pérdidas (exportación, lavado y erosión) y aportes (riqueza del material parental, grado de meteorización, residuos animales y vegetales, sedimentación derivada de la erosión, ascenso de napas salobres y aplicación de enmiendas). El material original de los suelos de la RP argentina es mineralógicamente homogéneo, rico en minerales meteorizables con cantidades notables de Ca, K, P, Mg y microelementos (Scoppa, 1976); que dio como resultado suelos fértiles y productivos (Imbellone y Teruggi, 1993). Sin embargo, Morrás (1997, 1999) y Zárate (2003) encontraron evidencias mineralógicas y geoquímicas que sugieren que los sedimentos loésicos de Pampa Ondulada podrían tener diferente composición según su procedencia. Esto sugiere diferencias en el contenido total de bases (CT) y en la relación entre contenido total y la fracción intercambiable (FI) (CT/FI) debidas a la heterogeneidad del material madre. La relación CT/FI podría también indicar el poder de reabastecimiento de bases ante balances negativos de las mismas. Sin embargo, en la actualidad esta información es escasa.

En síntesis, el contenido de bases intercambiables, la relación entre las mismas y las relaciones CT/FI pueden presentar elevada variabilidad sitio-específica generada no solo por el tipo de suelo sino también por la actividad antrópica que se desarrolla en cada uno de los mismos. A partir de lo mencionado, la realización de mapas que ilustran la distribución geográfica de las propiedades del suelo sería de utilidad para la identificación

de zonas o áreas deficientes o potencialmente deficientes en algún nutriente. La construcción de dichos mapas requiere de técnicas de interpolación adecuadas. Los valores interpolados están sujetos a incertidumbres causadas por errores de muestreo y de los modelos utilizados, los cuales, en la práctica afectan la utilización de los valores estimados (Heuvelink y Webster, 2001; Goovaerts, 2001). La geoestadística provee un medio para caracterizar y cuantificar la variabilidad espacial, y a su vez para predecir con certeza los valores en puntos no muestreados (White *et al.*, 1997; Oliver y Webster, 2014). La modelización de la variabilidad espacial puede ser realizada a través de la construcción de semivariogramas y de la predicción de los valores en sitios no muestreados a partir de la técnica de Kriging (García, 2004). Contar con este tipo de información es clave para diseñar esquemas de muestreo de suelo que permitan el monitoreo de la evolución de los cationes básicos. No obstante, hasta el momento no se conoce la naturaleza y el grado de variabilidad espacial de las distintas bases, de la relación entre las mismas ni de la relación CT/FI en suelos de la RP Argentina. Los antecedentes descriptos sugieren una mayor variabilidad espacial para el  $K_i$  en relación al  $Ca_i$  y al  $Mg_i$ .

Si bien para los suelos de la RP se han reportado los niveles de extracción de bases por los diferentes cultivos, no existe información actualizada del CT de estas, de la relación entre las mismas ni de CT/FI en suelos prístinos y con prolongada historia agrícola. Esta información permitirá identificar las zonas o áreas con mayor potencial de respuesta al agregado de enmiendas básicas y/o potásicas. En función de los antecedentes mencionados se plantean las siguientes hipótesis:

- 1) La actividad agrícola produjo una mayor reducción de la disponibilidad de  $K_i$  que de  $Ca_i$  y  $Mg_i$ .
- 2) En suelos con historia agrícola la variabilidad espacial de las bases intercambiables es en orden decreciente:  $K_i > Ca_i > Mg_i$ .
- 3) El CT y la relación CT/FI de los cationes básicos varía según zonas.

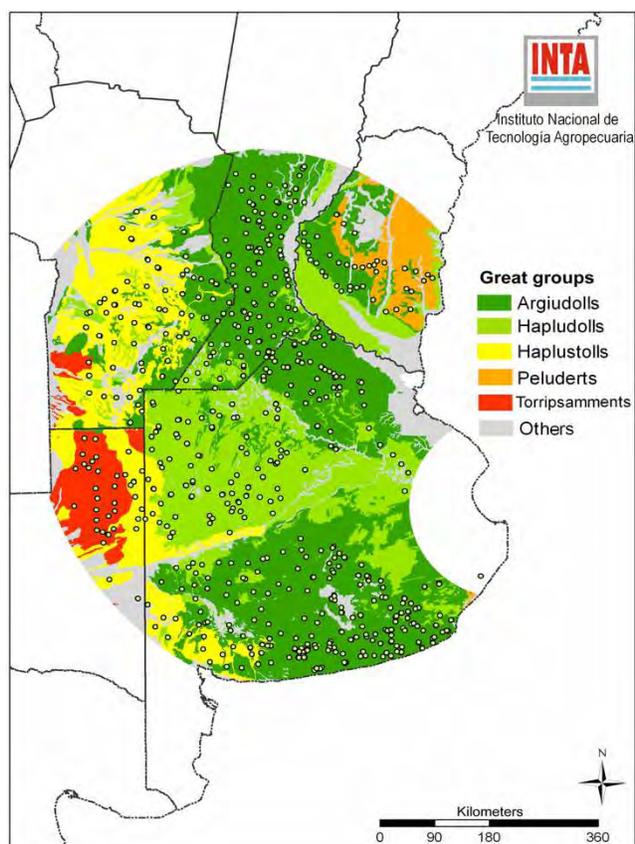
#### Objetivos

- Determinar el contenido total e intercambiable de Ca, Mg, K, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la saturación con bases (SB) en suelos agrícolas y prístinos de la RP.
- Caracterizar la variabilidad espacial de dichas variables y mapear su distribución geográfica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. Muestreo de suelos

Las muestras (n=1200) con las que se trabajó fueron recolectadas durante el año 2010 y 2011 de suelos de aptitud agrícola de 28 zonas representativas 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 o cuenca del Salado. Los suelos de esta región pertenecen en su mayor parte al Orden de los Molisoles incluyendo los Grandes grupos de los Argiudoles, Hapludoles y Haplustoles, y en menor medida a los Vertisoles (Peludertes, actualmente Hapludertes) y Entisoles (Torripsamientos) (Figura 1).



**Figura 1.** Gran Grupos de Suelos de la región pampeana (RP). Los puntos grises son los sitios muestreados.

Se recogieron muestras georreferenciadas de aproximadamente tres sitios por partido y/o departamento. 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).

## **2. Determinaciones analíticas**

El suelo fue secado en estufa a 30°C y molido con martillo de madera para evitar contaminación. La muestra una vez cuarteada fue tamizada por 2 mm. La CIC se determinó siguiendo la técnica propuesta por Chapman (1965). A 2 g de suelo se le agregaron 20 mL de acetato de amonio 1N a pH 7. Luego se agitó durante 30 minutos y se centrifugó durante 10 minutos. Al suelo remanente se adicionó 20 mL de alcohol etílico 96%. Posteriormente se agitó 5 minutos y se centrifugó otros 5 minutos para luego desechar el alcohol remanente. Este paso se repitió 2 veces más. Luego se lavó el suelo con 40 mL de cloruro de sodio al 10%, se agitó 30 minutos y se centrifugó 10 min. Se tomó una alícuota de 10 mL del sobrenadante y se destiló. El destilado se tituló con ácido clorhídrico 0,1 N.

Para la determinación de  $Ca_i$ ,  $Mg_i$  y  $K_i$  se siguió la metodología propuesta por Haby *et al.* (1990). Para ello se utilizó 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). El extracto resultante fue utilizado para cuantificar el Ca y Mg por absorción atómica y el K por emisión de llama. Los resultados de  $Ca_i$ ,  $Mg_i$  y  $K_i$  se expresaron en  $mg\ kg^{-1}$ . Las relaciones  $Ca_i+Mg_i/K_i$  y  $Ca_i/Mg_i$  se calcularon a partir de los resultados expresados en  $cmolc\ kg^{-1}$ .

Para la determinación de Ca, Mg y K total ( $Ca_T$ ,  $Mg_T$  y  $K_T$ ) se modificó la metodología propuesta por Helmke y Sparks (1996). Para ello se utilizó un digestor con tubos de teflón (50 mL) a los cuales se les adaptó en su extremo un tipo de pipeta automática para lograr un reflujo constante y evitar pérdidas de volumen por evaporación. Se calibró la técnica para determinar el tiempo óptimo de digestión que permita digerir toda la muestra de suelo bajo las nuevas condiciones. Para ello se utilizaron cuatro muestras al azar (dos prístinas y dos agrícolas) pertenecientes a diferentes zonas y se probaron tres tiempos de digestión 3, 5 y 7 horas. El tiempo especificado en la técnica original es de 3 horas (Helmke y Sparks, 1996) pero el utilizado en este trabajo fue de 5 horas. 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 digirieron a 110 °C. Luego, el digesto se recogió en 2,8 g de ácido bórico y se llevó a 100 mL de volumen con agua destilada. Al digesto se le realizó una dilución de 3/10 y se determinó  $K_T$  por emisión de llama. Para la cuantificación de  $Ca_T$  y  $Mg_T$ , se tomó 1 ml de la dilución de 3/10, se le agregó 2,5 mL de lantano y se llevó a un volumen final de 25 mL con agua destilada. La lectura se realizó en un espectro de absorción atómica. Los contenidos totales se expresaron en  $g\ 100\ g^{-1}$  de suelo. A su vez se calculó la relación  $Ca_T/Ca_i$ ,  $Mg_T/Mg_i$  y  $K_T/K_i$ .

### 3. Análisis Estadísticos y Geoestadístico

Para la prueba de puesta a punto de la técnica para la determinación de  $Ca_T$ ,  $Mg_T$  y  $K_T$  se utilizó un modelo lineal mixto, donde el tiempo de digestión fue colocado como factor fijo y la “muestra” como factor aleatorio.

Para agrupar sitios de características similares del total de zonas muestreadas 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 esto se utilizaron 12 variables cuantitativas correlacionadas por sitio de la condición agrícola, algunas determinadas en este trabajo y otras tomadas de Sainz Rozas *et al.* 2013. (Tabla 1).

**Tabla 1.** Matriz de correlación de parámetros de suelo.

	CIC	Ca <sub>i</sub>	SB	K <sub>i</sub>	Mg <sub>i</sub>	Na	pH	Mn	Cu	Fe	B	MO
CIC	1											
Ca <sub>i</sub>	0,95	1										
SB	0,30	0,52	1									
K <sub>i</sub>	-0,41	-0,42	0,23	1								
Mg <sub>i</sub>	0,69	0,68	0,57	-0,05	1							
Na	0,37	0,26	0,17	0,12	0,54	1						
pH	-0,03	0,19	0,81	0,33	0,33	0,13	1					
Mn	0,49	0,33	-0,41	-0,71	0,17	0,13	-0,59	1				
Cu	0,69	0,59	-0,07	-0,54	0,44	0,13	-0,31	0,83	1			
Fe	0,34	0,13	-0,53	-0,14	-0,19	0,22	-0,70	0,41	0,27	1		
B	0,30	0,30	0,34	0,38	0,19	0,14	0,18	-0,35	-0,19	0,43	1	
MO	0,78	0,64	0,09	-0,1	0,44	0,5	-0,22	0,38	0,50	0,68	0,62	1

El HCPC combina el análisis de componentes principales (PCA) con el análisis de conglomerados (CA). El PCA reduce la dimensionalidad a nuevos componentes denominados principales. Cada componente principal (PC) se describe en términos de  $p$  nuevos componentes (C<sub>Pi</sub>), que se definen como una combinación lineal de las variables originales. El CP1 explica el máximo de la varianza total, el CP2 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. A su vez, el 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 usando el paquete nlme (Pinheiro, 2016). Se utilizó la función “gls” para ajustar un modelo que consideró como efectos fijos la situación de manejo, el clúster y la interacción entre estos. Debido a la heterogeneidad de varianzas, éstas se modelaron de manera independiente para cada situación y clúster. Para realizar el análisis de la varianza se utilizó el programa R versión 3.3.1 (R, 2016).

La distribución espacial se analizó mediante técnicas geoestadísticas (White *et al.*, 1997). El objetivo principal de éstas es la caracterización de la variable investigada en todas las localizaciones partiendo de la información suministrada por los puntos muestrales (García, 2004). 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, con el fin de eliminarla en caso de que existiera (Olea, 2009).

La variabilidad en la distribución espacial de los datos en los ambientes prístinos y agrícolas fue analizada mediante semivariogramas empíricos realizados en una dirección ortogonal (N135°), con una tolerancia de 22.5°, teniendo en cuenta lo expresado por Krohling (1999) y Zárate (2003) en lo que respecta a las direcciones predominantes del viento durante la génesis sedimentaria de los materiales parentales de los suelos. 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. Por otra parte, el rango determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá del cual la autocorrelación es nula (García,

2004). Posteriormente, se elaboraron los variogramas esféricos, exponencial y gaussiano dependiendo del catión, según la dirección de máxima variabilidad (Isaaks y Srivastava, 1989)

Posteriormente, la interpolación se realizó mediante krigeado ordinario (Isaaks y Srivastava, 1989) usando el programa SADA versión 5.0.78 (2014). El modelo de krigeado fue corroborado mediante la validación cruzada del resultado del krigeado (Isaaks y Srivastava, 1989), la cual consistió en el krigeado de los datos quitando un punto del conjunto y calculado el residual entre el valor estimado y el medido en esa localidad. Este proceso se repitió para el total de datos disponibles. Finalmente, se analizó la distribución de frecuencias de los residuales obtenidos en la validación cruzada. Los resultados del krigeado fueron aceptados en función de que los residuales no mostraran grandes asimetrías en su distribución de frecuencias respecto a un valor central cercano al cero. Esta comprobación se hizo mediante el gráfico cuantil - cuantil (Q-Q plot) con el cual se analizó la coincidencia existente entre la distribución de frecuencia de los residuales y la distribución normal con media nula. Los resultados ya validados fueron procesados mediante Quantum Gis (Qgis Development Team, 2014) a fin de obtener los productos cartográficos finales.

La representación cartográfica del  $\text{Ca}_i$ ,  $\text{Mg}_i$  y  $\text{K}_i$  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  $\text{Ca}_i$  y  $\text{Mg}_i$  se asumieron rangos de valores óptimos de 600 a 1000  $\text{mg kg}^{-1}$  y de 50 a 100  $\text{mg kg}^{-1}$  respectivamente, según la textura del suelo (Tabla 2) (correspondiendo el valor menor a suelos arenosos y el mayor a suelos francos, según Vázquez y Pagani, 2015). Para  $\text{K}_i$  se asumió como rango de valores óptimos de 110-170  $\text{mg kg}^{-1}$  (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 2). Es válido destacar que estos valores son solo orientativos debido a que no existen estudios de calibración con cultivos a nivel país.

**Tabla 2.** Rango de valores de calcio, magnesio y potasio intercambiable ( $Ca_i$ ,  $Mg_i$  y  $K_i$ ), según categorías de disponibilidad.

Disponibilidad	$Ca_i$	$Mg_i$	$K_i$
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
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

Los rangos de relaciones  $Ca_i+Mg_i/K_i$  y  $Ca_i/Mg_i$  se realizaron 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 3).

**Tabla 3.** Rango de valores óptimos para las relaciones calcio + magnesio/ potasio intercambiable ( $Ca_i+Mg_i/K_i$ ) y calcio/ magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) según su disponibilidad relativa.

Disponibilidad	$Ca_i+Mg_i/K_i$	$Ca_i/Mg_i$
Baja	$\geq 11/1$	$\geq 15/1$
Optima	7-11/1	3-15/1
Alta	$\leq 7$	<3

Para la representación cartográfica de los cationes totales ( $Ca_T$ ,  $Mg_T$  y  $K_T$ ) se definieron rangos de disponibilidad. Las categorías de  $K_T$  se determinaron según lo informado por Scoppa (1974) quien determinó la concentración de  $K_T$  para cuatro series de suelo de la Pampa Ondulada (Citado en Moscatelli, 2001, p.13). Se consideraron valores elevados a aquellos que superaban 1,96 %, valores medios los que se encontraban entre 1,86-1,74% y bajos a aquellos inferiores a este último valor (Tabla 4). Para  $Ca_T$  y  $Mg_T$  se asumieron rangos de contenidos normales entre 0,5% a 1,5% para suelos no calcáreos, contenidos altos a aquellos superiores a 1,5% y bajos a aquellos inferiores a 0,5% (Tabla 3) (Vázquez y Pagani, 2015).

**Tabla 4.** Rango de valores de calcio, magnesio y potasio total ( $Ca_T$ ,  $Mg_T$  y  $K_T$ ), según categorías de disponibilidad.

Contenido	$Ca_T$ , $Mg_T$	$K_T$
-----------	-----------------	-------

---

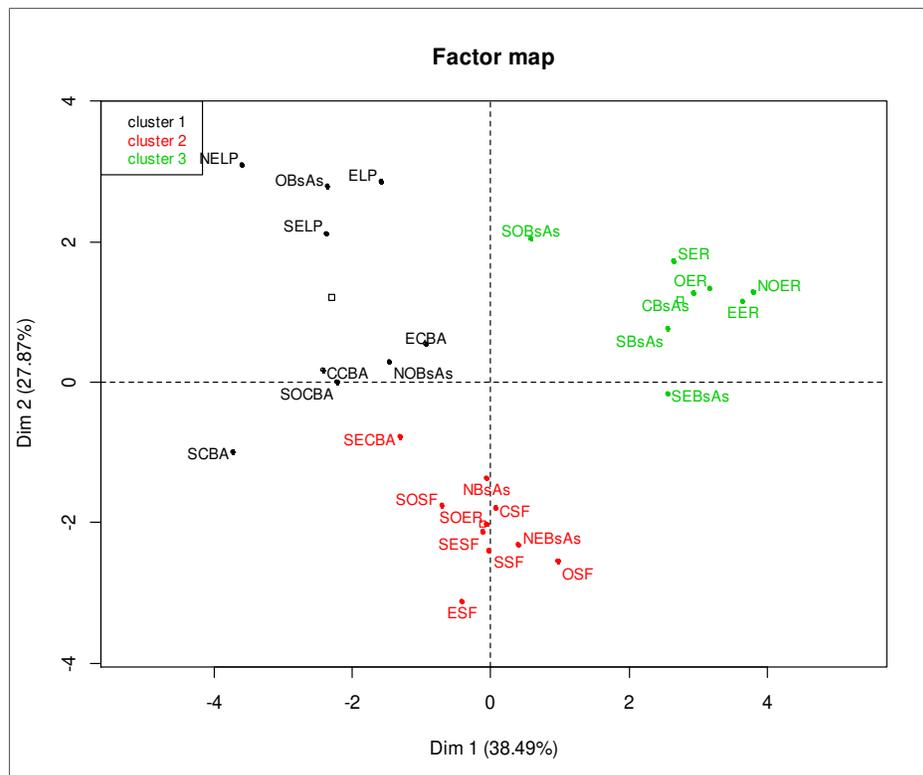
	.....%.....	
Bajo	<0,5	<1,74
Medio	0,5-1,5	1,86
Alto	>1,5	>1,96

---

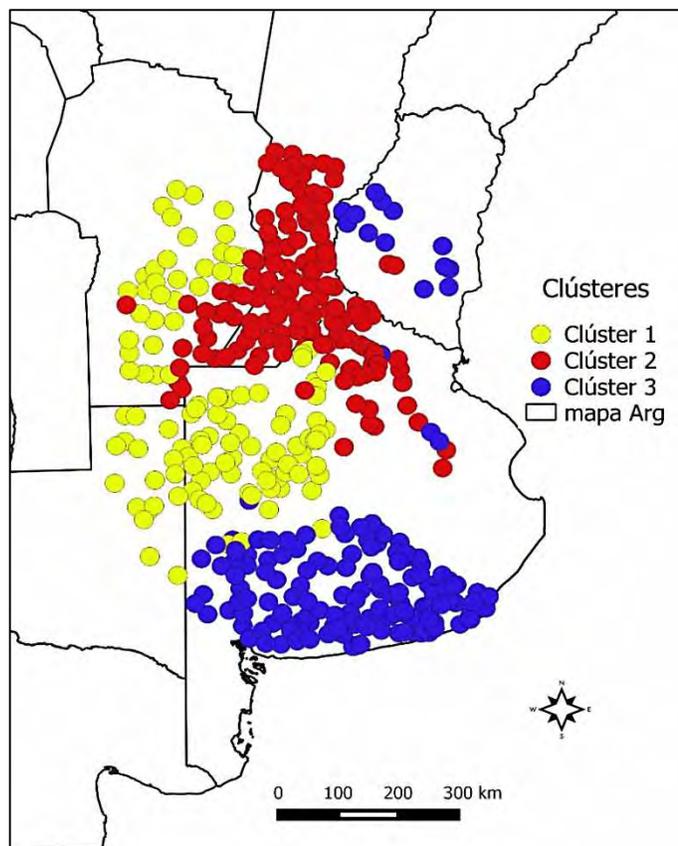
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. Agrupación jerárquica de componentes principales

Como se puede observar en la Figura 2 y en el mapa de la Figura 3, en función de los resultados obtenidos de la agrupación jerárquica de componentes principales quedaron definidos tres clústeres de sitios similares. 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.



**Figura 2.** Análisis de conglomerados (CA). Los sitios dentro de cada clúster son similares entre sí.



**Figura 3.** Mapa de la región pampeana (RP) con sitios de características edáficas similares agrupados en clústeres (1,2 y 3).

Como muestra la Tabla 5 los tres primeros componentes principales (CP1, CP2 y CP3) explican el 38,8%, 28,4% y 16,4% de la variabilidad del sistema respectivamente. En conjunto estos ejes acumulan un 83,6% de la variabilidad total. Si la mayor parte de la varianza poblacional total (por ejemplo, de 80 a 90 %), puede ser atribuida a los primeras “m” componentes (uno, dos o tres), entonces estos pueden remplazar las “p variables originales”, sin mayor pérdida de información. (Bramardi, S., com. pers.).

**Tabla 5.** Descomposición de la variabilidad por componente principal (CP) para las variables de suelo asociadas a las zonas.

Componentes	Autovalor	Proporción	Proporción acumulada
CP 1	4,65	38,8	38,76
CP 2	3,41	28,4	67,18
CP 3	1,97	16,4	83,58

Cada propiedad de suelo está representada por un auto-vector, que queda definido por la correlación que existe entre la propiedad del suelo y la CP considerada (Tabla 5). El ángulo existente entre los vectores representa el grado de correlación entre las variables medidas. La carga del factor es la correlación existente entre una variable original y un factor, obtenido por combinación lineal de las variables originales.

**Tabla 6.** Autovectores de los parámetros analizados para las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2).

Variables	Cargas CP1	Cargas CP2
CIC	0,95	0,18
MO	0,84	0,08
Ca <sub>i</sub>	0,85	0,36
Cu	0,81	-0,27
SB	0,13	0,91
pH	-0,21	-0,87
K <sub>i</sub>	-0,48	0,47
Mg <sub>i</sub>	0,64	0,56
Na	0,46	0,30
Mn	0,66	-0,62
Fe	0,47	-0,51
B	0,26	0,47

Las correlaciones obtenidas muestran que la CP1 queda definida por las variables CIC, MO, Ca, Cu y la CP2 por SB, Mn y pH (Tabla 6). Se consideraron relevantes, aquellas variables cuya carga supera los 2/3 de la variable con la carga máxima por CP (0,95 en CP1 y 0,91 en CP2) (Bramardi, S., com.pers.).

Los autovalores hallados permitieron establecer gradientes para los parámetros de suelo y así caracterizar a los sitios de los distintos clústeres. Se observó que los suelos del clúster 1 poseen baja CIC, Ca, MO y Cu pero alta SB y pH neutros a alcalinos. Los sitios del clúster 3 poseen alta SB, MO, CIC, Ca, Cu, Mg, Mn y pH neutros, mientras que los suelos del clúster 2 son suelos ácidos con niveles intermedios de MO, CIC, Ca, Cu, baja SB y niveles intermedios de nutrientes como Mn, Mg.

A modo de síntesis, los resultados obtenidos de HPCD de suelos bajo agricultura permitieron agrupar zonas similares en clústeres y a su vez caracterizarlas edáficamente. Así, las comparaciones entre situaciones de manejo se realizaron dentro de cada clúster dependiendo de que se presente interacción significativa manejo \*clúster.

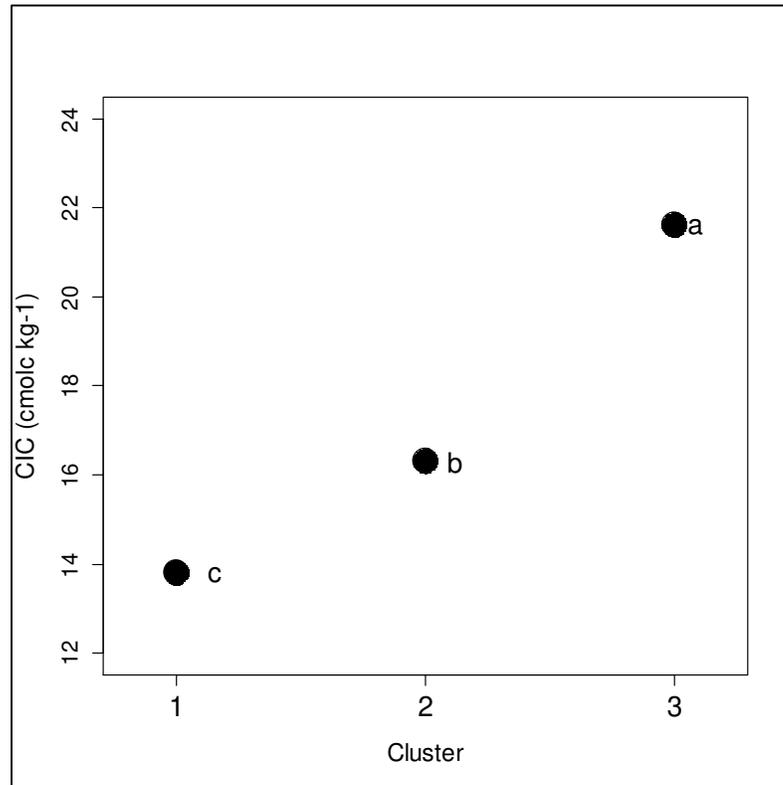
## 2. Capacidad de intercambio catiónico

No se observó interacción entre manejo y clúster sobre la CIC (Tabla 7), tampoco efecto de manejo, pero sí de clúster. Esto demuestra que la CIC presenta variación espacial dada por características regionales propias de los sitios. El valor promedio más alto se registró en el clúster 3 (21,62 cmolc kg<sup>-1</sup>), seguido por el clúster 2 (16,31 cmolc kg<sup>-1</sup>) y el 1 (13,8 cmolc kg<sup>-1</sup>) (Figura 4). Esto podría ser explicado por el mayor contenido de MO y de arcilla (Imbellone y Teruggi, 1993; Zarate, 2003) que presenta el clúster 3 respecto de los otros dos. Vale aclarar, que si bien el horizonte superficial de los sitios que conforman este clúster poseen propiedades similares, hay diferencias composicionales, taxonómicas y de comportamiento entre los suelos de Entre Ríos con los del Sur de Buenos Aires. Esto llevaría a pensar los valores elevados CIC de los suelos de Entre Ríos sean en buena parte debidos al contenido y tipo de arcilla (Morras y Cruzate, 2000), en tanto en el sur de Buenos Aires sea determinante el alto contenido de MO (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

La falta de efecto de la agricultura podría ser debido a que, si bien se han informado caídas en los niveles de MO en la RP (Sainz Rozas *et al.*, 2013), estas serían principalmente en la fracción activa y lenta (Galantini y Suñer, 2008), las cuales no están relacionadas estrechamente con la CIC (Brady y Weil, 2008; Quiroga y Studdert, 2015).

**Tabla 7.** Análisis de la varianza para la evaluación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	18785,282	<,0001
Manejo	1	1,814	0,1784
Clúster	2	294,932	<,0001
Manejo*Clúster	2	1,387	0,2503



**Figura 4.** Capacidad de intercambio catiónico (CIC) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

Los resultados obtenidos nos sugieren que la CIC es poco sensible a los cambios en el suelo generados por la agricultura, lo que es esperable dado que la misma es definida por las de fracciones más estables de la MO y la textura del suelo, la cual está poco sujeta a cambios (Brady y Weil, 2008). A su vez, las diferencias entre los clústeres se deben a características propias de las zonas como contenidos de MO y porcentajes de arcilla.

### **3. Potasio intercambiable**

Se observó interacción entre manejo y clúster (Tabla 8), por lo que se compararon las medias de manejo dentro de cada uno de estos últimos (Figura 5). A su vez, se observaron variaciones espaciales de los niveles de K<sub>i</sub> dentro de los clústeres. Esto podría ser debido a diferencias en las características composicionales y taxonómicas de los suelos. Morras y Cruzate (2001) para las zonas agrupadas en el clúster 2 informaron similar variabilidad espacial en los niveles de este catión. Se vió una mayor reducción de

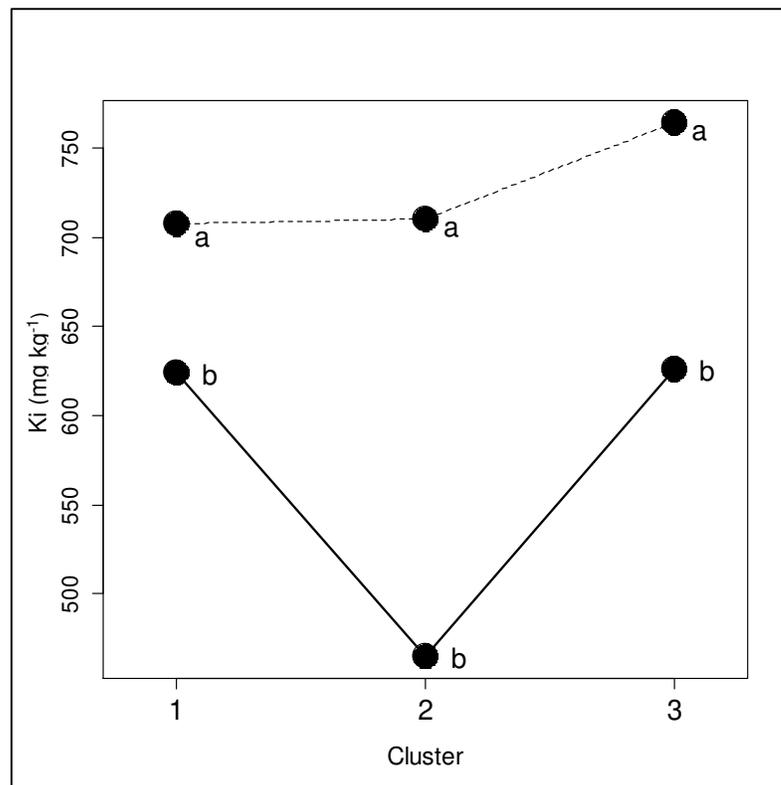
los concentraciones de Ki en el clúster 2, siendo la misma de un 34% (Figura 5). Esto podría ser consecuencia de la alta exportación del nutriente debido a una mayor frecuencia de soja en las rotaciones (Cruzate y Casas, 2003), y a que este cultivo extrae más respecto a los típicos de la zona (Ciampitti y García, 2007). Manzanal (2017) en un trabajo reciente, informó que durante la campaña 2013-2014 la superficie ocupada por el cultivo de soja en la Argentina alcanzaba 20 millones de hectáreas, lo que representaba dos tercios de la superficie total sembrada en el país. Para esta región, Flores y Sarandón (2003) calcularon que para el período comprendido entre 1970-1999, la pérdida de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) fue de 23 millones de toneladas, responsabilizando a la soja del 45,6 % de dicha pérdida. La interacción determinada entre clúster y manejo demuestra que las caídas en los niveles de este catión están asociadas a las rotaciones realizadas en cada zona, lo que conlleva a un aumento de la variabilidad espacial más allá de la causada por diferencias en los materiales originarios y por los procesos de formación de suelo.

En todos los casos la concentración de este catión se encuentra en el rango de alto a muy alto según los valores reportados internacionalmente (Tabla 2). En línea con esto, Prystupa et al. (2004) no determinaron respuesta al agregado de este nutriente en el cultivo de maíz en suelos del norte de Buenos Aires.

Por otra parte, la caída del nivel de K<sub>i</sub> en los primeros 20 cm de suelo no solo depende del balance del nutriente, sino también de la interacción con otras propiedades del suelo. Por ejemplo, la dinámica de intercambio entre las fracciones de K (Öborn *et al.*, 2005; Römheld y Kirkby, 2010; Fernández *et al.*, 2008) y/o de la interacción con las capas más profundas del perfil. Dependiendo de la riqueza de los horizontes sub-superficiales, la absorción y redeposición por parte de los cultivos podría o no conducir a la de estratificación superficial de K (Bordoli y Mallarino, 1998; Jobbagy y Jackson, 2001; Mallarino y Borges, 2006).

**Tabla 8.** Análisis de la varianza para la evaluación del potasio intercambiable ( $K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	12116,480	<,0001
Manejo	1	206,325	<,0001
Clúster	2	53,952	<,0001
Manejo*Clúster	2	15.905	<,0001



**Figura 5.** Potasio intercambiable ( $K_i$ ) en clústeres y manejos (prístino= línea discontinua, agrícola= línea llena) de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre manejo de suelo, según el test de Tukey.

Si bien los valores actuales para este nutriente están por encima de los niveles críticos para los cultivos, los valores obtenidos evidencian que la agricultura ha provocado una fuerte caída en la concentración de K extractable. Esto también demuestra que la velocidad de reposición desde las fracciones menos disponibles no alcanza a

contrarrestar lo exportado por los cultivos y lo perdido por lavado. Esto concuerda con lo reportado por Lossinoy y Conti (2005), quienes informaron caídas similares a las encontradas en este trabajo para la zona norte de la RP.

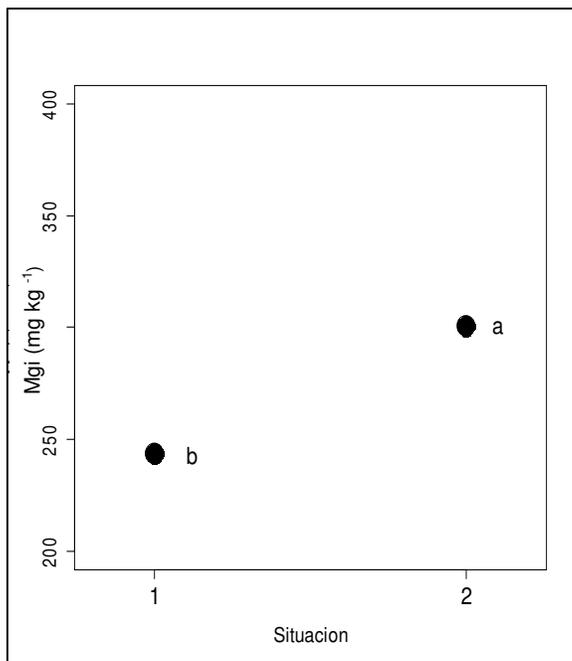
#### **4. Magnesio intercambiable**

Se observó un efecto significativo del manejo y de clúster sobre la concentración de  $Mg_i$ , pero no interacción entre estos factores (Tabla 9). Por lo tanto, se analizaron solo los efectos principales de los factores. Se determinó diferencia significativa entre manejos (Figura 6a), lo que demuestra que la agricultura redujo el contenido de  $Mg_i$ . Esta disminución fue en promedio de  $57 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que representa en porcentaje una caída del 19%. La menor caída del Mg respecto del K se debe a que la exportación en los granos del primer nutriente representa del 30 al 40% la del K (Vázquez y Pagani, 2015). Sin embargo, la concentración de  $Mg_i$ , tanto para situaciones prístinas como agrícolas, se encuentra en el rango de alto a muy alto según lo reportado internacionalmente (Tabla 2). Estos resultados están en línea con lo informado por Girón, *et al.* (2016), quienes no determinaron respuestas al agregado de Mg en el cultivo de soja en el oeste de la región (clúster 1).

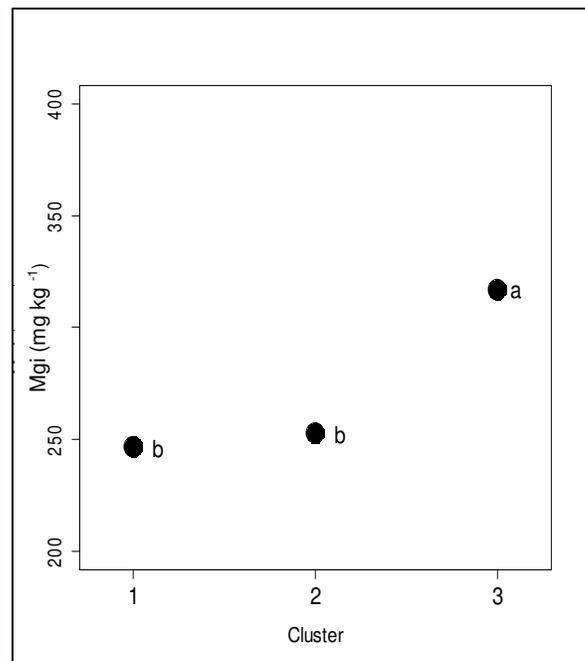
La concentración más alta se determinó en el clúster 3 y difirió significativamente del 1 y 2 (Figura 6b). Esto coincide con lo informado Senbayram *et al.* (2015), quienes informaron que los suelos de texturas arcillosas poseen altos contenido de  $Mg_i$  dada su alta CIC. En la Argentina, los depósitos de loess pampeano presentan una disminución en el tamaño de partículas de Oeste a Este, hallándose las texturas finas en los sitios agrupados en el clúster 3, texturas medias en el clúster 2 y las más gruesas en el clúster 1 (Imbellone y Teruggi, 1993; Zarate, 2002). Estas diferencias de textura podrían explicar la variación entre los clústeres. Como se observó en la Tabla 6, los clústeres con alta CIC fueron los que a su vez presentaban altos valores  $Mg_i$ .

**Tabla 9.** Análisis de la varianza para la evaluación del magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) para cada situación de manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	9557,907	<,0001
Manejo	1	112,621	<,0001
Clúster	2	67,350	<,0001
Manejo*Clúster	2	5,3924	0.0539



**Figura 6a.** Magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en situación de manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la RP. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.



**Figura 6b.** Magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en clústeres de suelos de la RP. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

### 3. Calcio intercambiable

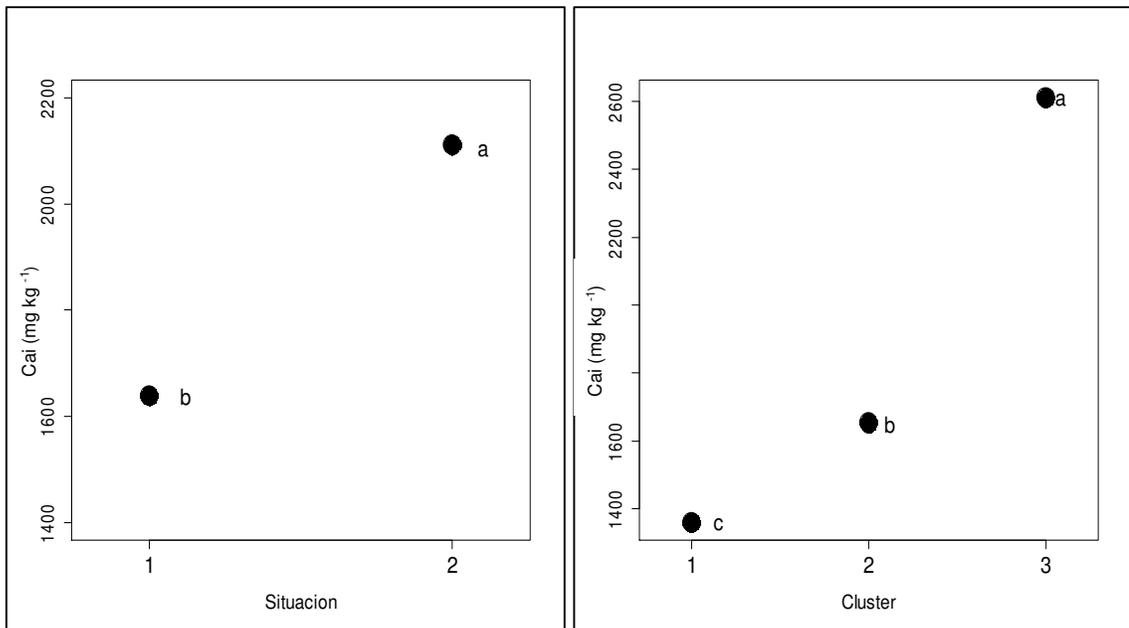
Se determinó efecto significativo del manejo y clúster sobre la concentración de  $Ca_i$  pero no interacción entre estos dos factores (Tabla 10), por lo tanto se evaluaron los efectos principales de estos últimos. Se observó diferencia significativa entre manejos (Figura 7a), lo que demuestra que la agricultura redujo la concentración de dicho nutriente. Esta disminución fue de  $472\ mg\ kg^{-1}$ , lo que en términos relativos representa

una caída de un 22 % con respecto a la condición prístina. El menor contenido de  $\text{Ca}_i$  se observó en el clúster 1 y el mayor en el clúster 3 (Figura 7b), lo que se debe a la mayor CIC de este clúster, dada la elevada correlación existente entre ambas variables (Tabla 1). Esto coincide con los gradientes determinados a partir los autovalores del HCPC (Tabla 5).

La mayor parte del área relevada se encuentra en el rango de media a alta disponibilidad, lo que está en línea con lo informado por Cruzate y Rivero (2008). Sin embargo, se determinaron contenidos bajos de  $\text{Ca}_i$  (por debajo de  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en el clúster 1 (Figura 7b). En coincidencia con esto, en algunos sitios de esta región se han informado respuestas positivas al encalado en soja y alfalfa, en suelos con contenidos de  $\text{Ca}_i$  que oscilaron entre 600 y  $1200 \text{ mg kg}^{-1}$  (Vázquez *et al.*, 2010; Vázquez, 2011).

**Tabla 10.** Análisis de la varianza para la evaluación del calcio intercambiable ( $\text{Ca}_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	6438,702	<,0001
Manejo	1	125,459	<,0001
Clúster	2	184,245	<,0001
Manejo*Clúster	4	18,5631	0,0807



**Figura 7a.** Calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

**Figura 7b.** Calcio intercambiable ( $Ca_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

En síntesis, estos resultados sugieren que la disolución de minerales primarios y secundarios y la redistribución desde horizontes subsuperficiales a horizontes superficiales no fueron capaces de contrarrestar las pérdidas de los nutrientes debido a la exportación en granos, erosión y lavado, lo que ha resultado en caídas de la fracción intercambiable. Esto también demuestra que, si bien los suelos de la RP son muy ricos en bases, de continuar los planteos productivos sin reposición se intensificará el desbalance de nutrientes.

## 6. Saturación con bases

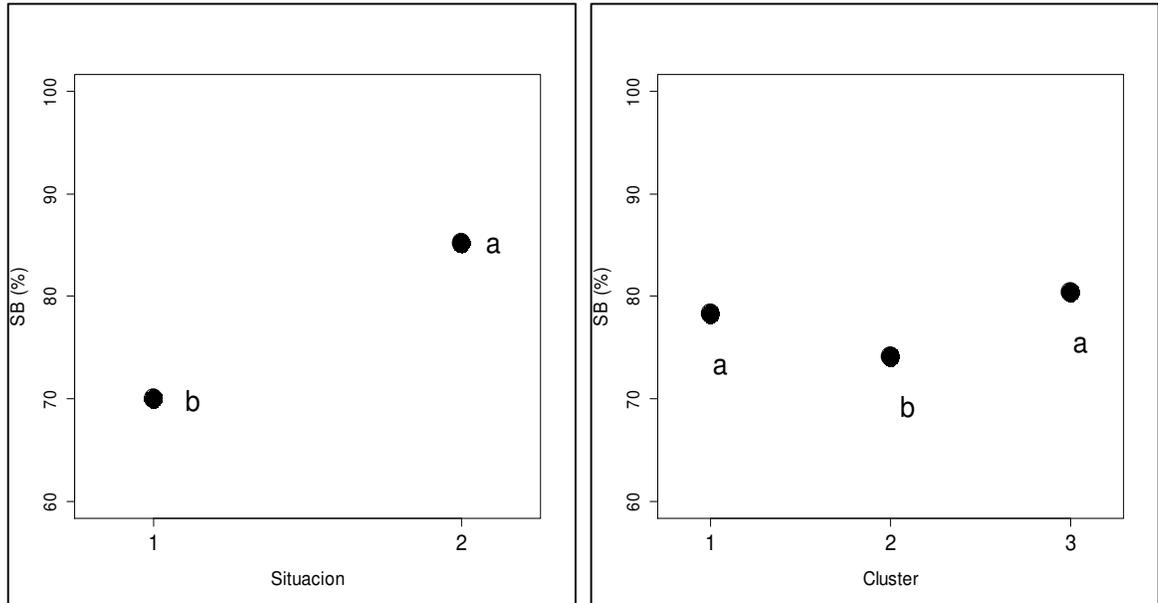
Se observó efecto del manejo y clúster sobre la SB pero no interacción entre estos factores (Tabla 11), por lo que se evaluaron los efectos principales. La SB cayó un 17 % dado el efecto de la agricultura (Figura 8a). Esto se debe a la escasa o nula reposición de bases vía fertilizantes (García y González Sanjuan, 2010; Sainz Rozas *et al.*, 2013). El promedio de SB para los suelos agrícolas fue del 70%, y en ninguno de los clústeres se

determinaron valores por debajo de 60% (Figura 8b), valor considerado limitante para algunos cultivos de altos requerimientos (Vázquez y Pagani, 2015).

La SB muestra una estrecha correlación con el pH del suelo (Tabla 1). Se observó que la SB explica el 52% de la variación en el pH del suelo ( $\text{pH} = 4,61 + 0,026 * \text{SB} (\%)$ ,  $R^2 = 0,52$ ,  $p < 0,0001$ ). La acidificación de los suelos es un proceso que consiste en la sustitución de las bases  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  y sodio ( $\text{Na}^+$ ) del complejo de intercambio catiónico por  $\text{H}^+$  y/o  $\text{Al}^{+3}$ . Esto puede en algunos casos formar parte del proceso natural de formación del suelo. Sin embargo, existen factores de uso y manejo que inducen o promueven la acidificación como se mencionó en párrafos anteriores.

**Tabla 11.** Análisis de la varianza para la evaluación de la saturación con bases (SB) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	45926,65	<,0001
Manejo	1	497,98	<,0001
Clúster	2	34,57	<,0001
Manejo*Clúster	2	1,8	<,1657



**Figura 8a.** Saturación con bases (SB) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

**Figura 8b.** Saturación con bases (SB) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey

A modo de síntesis estos resultados sugieren que la mayor parte del área relevada presenta SB adecuada para la mayoría de los cultivos excepto para la alfalfa (Havlin *et al.*, 2005a), la cual para un adecuado crecimiento requiere valores de alrededor del 80% (Morón, 2000). Al igual que lo mostrado por los gradientes obtenidos de los resultados del HCPC, las zonas del oeste y norte de la RP podrían ser susceptibles a sufrir acidificación de continuar los sistemas productivos actuales sin reposición de bases, ya que sus niveles de MO son intermedios a bajos y sus pH neutros a ácidos. Estas características las colocan a dichas áreas en situación desfavorable respecto al sudeste bonaerense frente a la acidificación.

### **7. Calcio + magnesio/ potasio intercambiable**

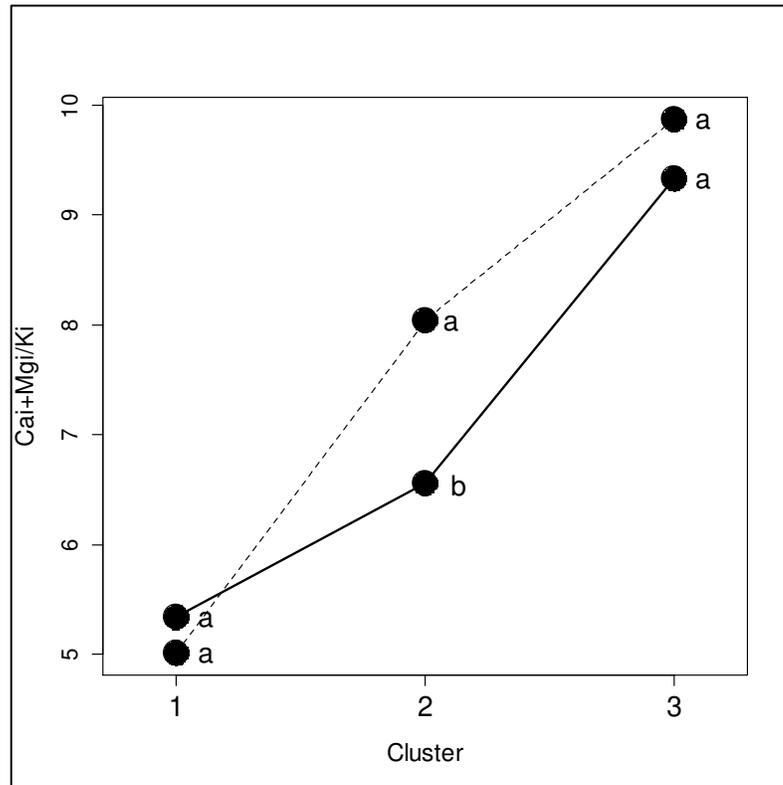
Se determinó interacción entre manejo y clúster sobre la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  por lo que se compararon las medias de manejo dentro de cada clúster (Tabla 12). En el único clúster donde se observó diferencia significativa entre manejo fue en el 2 (Figura 9). La mayor relación mostrada para la condición agrícola sugiere una mayor extracción de K respecto a las otras dos bases. Como ya fue discutido, el  $K_i$  (Figura 4) fue el catión que

más disminuyó por efecto de la agricultura (-34%, -24% y -19%, para K, Ca y Mg, respectivamente). Para rendimientos promedios de soja, maíz, trigo y girasol, la soja exportaría de 0,58 a 4,45 veces más K que el resto de los cultivos por lo que la mayor caída del K podría ser debido en parte a un aumento de la frecuencia de soja.

Sin embargo, a pesar del cambio en las relaciones generado por la agricultura, en dicha zona no se determinaron valores superiores a 15:1, relación considerada óptima por Bear y Toth (1948) para un "suelo ideal" (65% Ca, 10% Mg y 5% K). Este concepto sostiene que los suelos que mantienen esta relación son suelos balanceados que presentan una adecuada fertilidad física, química y biológica. Si bien esta relación entre nutrientes se ha propuesto como indicador de deficiencia o suficiencia del nutriente que se encuentra en el denominador, el empleo del mismo puede derivar en conclusiones erróneas. Por ejemplo, un valor alto de relación podría indicar deficiencia del nutriente que está en el denominador, pero esto puede o no ser evidenciado en el cultivo, ya que la respuesta va a depender también del valor absoluto de la concentración de cationes (Vázquez y Pagani, 2015). Kopittke y Menzies (2007) evaluaron el concepto de "suelo ideal" en un gran número de trabajos analizados, pero no pudieron sostener este concepto. Estos autores informaron que la fertilidad química, física y biológica del suelo se puede mantener en un rango amplio de relaciones catiónicas. De hecho, McLean, que trabajó durante la década del'40, afirmó que, en general, "no existe una relación o rango de saturación con bases ideal" (Eckert y McLean, 1981), y que "se debe hacer hincapié en proporcionar niveles suficientes, pero no excesivos de cada catión en lugar de intentar alcanzar una relación de única que evidentemente no existe" (McLean *et al.*, 1983).

**Tabla 12.** Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio + magnesio/potasio intercambiable ( $Ca_i+Mg_i/K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	3554,026	<,0001
Manejo	1	0,365	<,5460
Clúster	2	94,001	<,0001
Manejo*Clúster	2	23,0325	<.0001



**Figura 9.** Relación calcio + magnesio/ potasio intercambiable ( $Ca_i + Mg_i / K_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP) y manejo (prístino= línea discontinua, agrícola= línea llena). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad entre condición de suelo, según el test de Tukey.

Por lo tanto, todo lo analizado nos sugiere que es más importante la disponibilidad absoluta del nutriente que las relaciones entre los mismos, y estas relaciones podrían ser evaluaciones complementarias a las de los valores absolutos para un correcto diagnóstico.

### **8. Calcio/magnesio intercambiable**

No se observó interacción entre manejo y clúster sobre la relación  $Ca_i / Mg_i$ , pero sí un efecto significativo de estos dos factores (Tabla 13). La agricultura produjo un descenso de la relación  $Ca_i / Mg_i$  lo que se condice con lo mostrado en secciones anteriores, donde el  $Ca_i$  disminuyó más que el  $Mg_i$  (25% vs 19%, respectivamente) (Figura 10a).

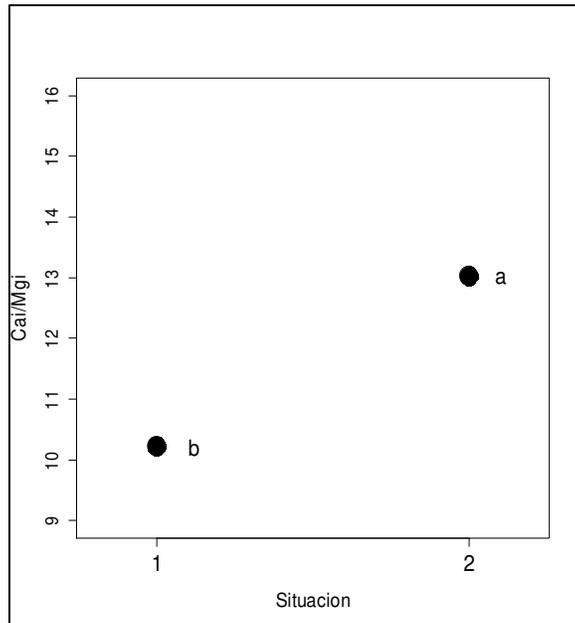
El clúster 3 fue el que presentó la mayor relación de bases y difirió significativamente del resto (Figura 10b). Esto podría ser debido a la alta concentración de  $Ca_i$  presente en

este (promedio de manejo) respecto al resto de las zonas. Para este clúster la concentración de  $Ca_i$  es 16 veces superior a la  $Mg_i$ , mientras que, para el resto, el  $Ca_i$  supera en 10,8 y 8,5 veces la concentración de  $Mg_i$  (clúster 2 y 1, respectivamente). Sin embargo, los valores obtenidos para esta relación se encuentran en el rango óptimo según los valores reportados internacionalmente (Tabla 3). Bear y Toth (1948) propusieron que la relación de un suelo ideal era de 6,5:1. Sin embargo, como se mencionó, este concepto de relación ideal no pudo ser validado cuando se analizó la información proveniente de ensayos de respuesta a Ca, Mg y K, realizados en suelos con amplia variación en el contenido de dichas bases (Kopittke y Menzies, 2007).

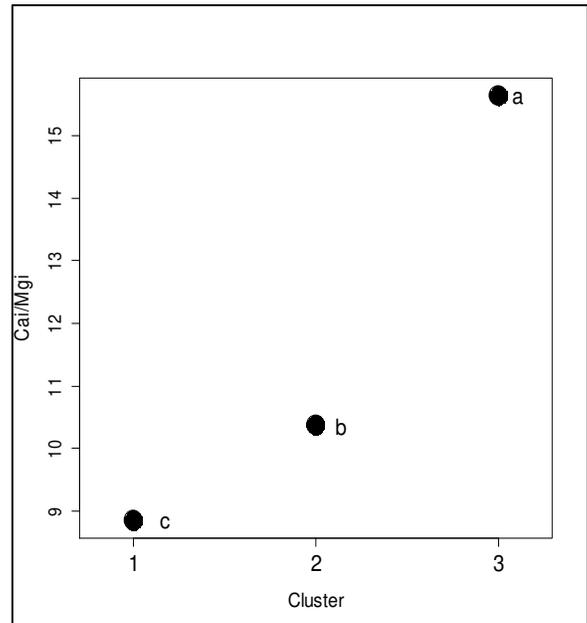
Por lo tanto, y al igual que lo enunciado para la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$ , estas solamente pueden ser utilizadas como evaluaciones complementarias a los valores absolutos para un correcto diagnóstico.

**Tabla 13.** Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio / magnesio intercambiable ( $Ca_i/Mg_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) y la interacción entre ambos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	8585,063	<,0001
Manejo	1	1155,221	<,0001
Clúster	2	206,252	<,0001
Manejo*Clúster	2	6,7158	<,0935



**Figura 10a.** Relación calcio / magnesio intercambiable (Cai/Mgi) en manejo agrícola (1) y prístina (2) de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.



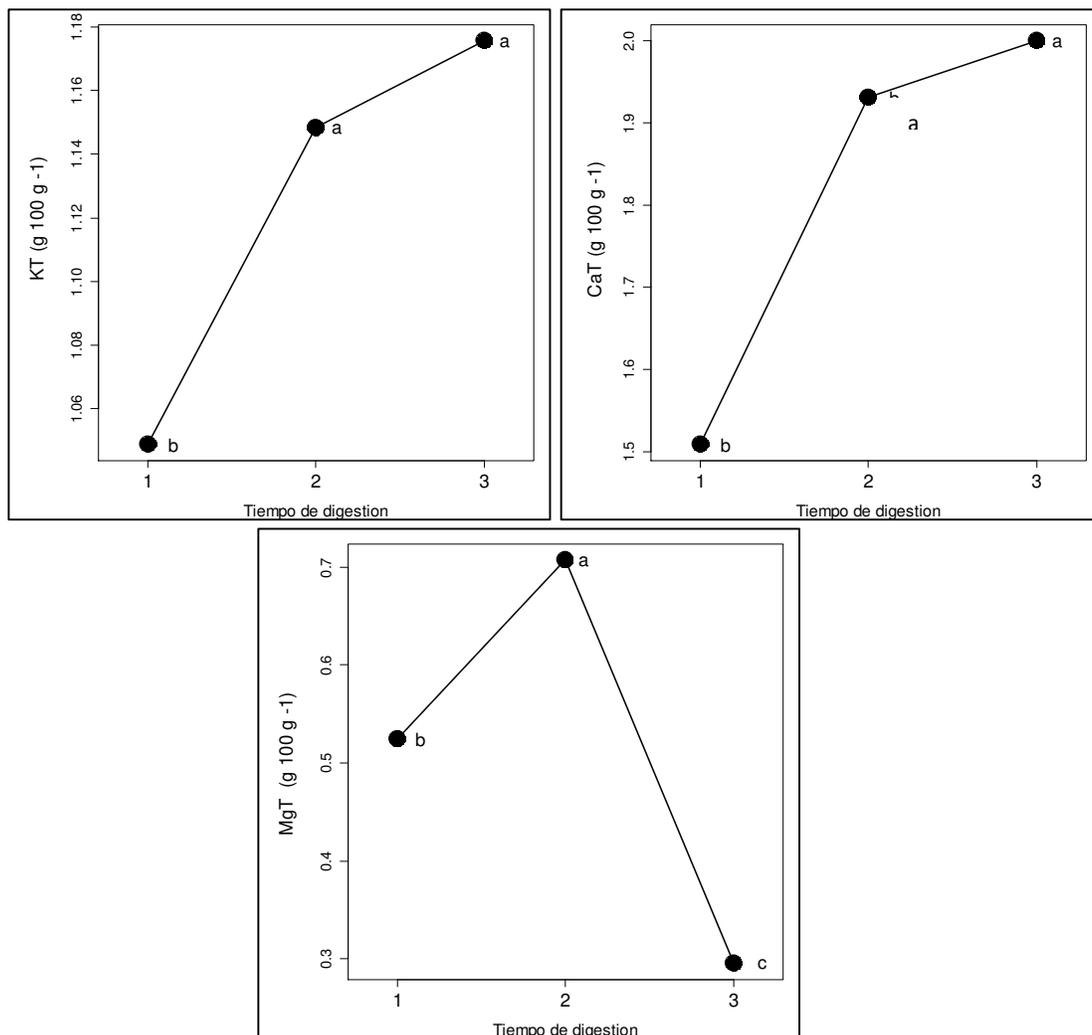
**Figura 10b.** Relación calcio / magnesio intercambiable (Cai/Mgi) en clústeres (1, 2 y 3) de suelo de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

### 9. Puesta a punto de técnica para determinación de cationes totales

El análisis de la varianza (Tabla 14) mostró efecto diferencial del tiempo de digestión sobre la concentración de los tres cationes, por lo que se compararon las medias de tiempo de digestión. Como muestra la comparación de medias de la Figura 11, no hubo diferencia significativa sobre la concentración obtenida de  $K_T$  y  $Ca_T$  entre los tiempos de digestión de 5 y 7 pero si respecto a 3 horas. Sin embargo, en la determinación de  $Mg_T$  el tiempo de 5 horas fue el que permitió obtener la mayor concentración y difirió significativamente del resto de los tiempos. En función de los resultados obtenidos el tiempo seleccionado fue el de 5 horas, dado que el mismo permitió obtener las más altas concentraciones de los tres cationes.

**Tabla 14.** Análisis de la varianza de los tiempos de digestión para potasio, calcio y magnesio total ( $K_T$ ,  $Ca_T$  y  $Mg_T$ ).

		gl	F-valor	p-valor
$K_T$	Ordenada	1	232,86401	<0,0001
	Tiempo de digestión	2	17,53819	<0,0001
$Ca_T$	Ordenada	1	193,50789	<0,0001
	Tiempo de digestión	2	6,45368	<0,0047
$Mg_T$	Ordenada	1	63,85645	<0,0001
	Tiempo de digestión	2	49,41370	<0,0001



**Figura 11.** Concentración de potasio, calcio y magnesio total (KT, CaT y MgT) para muestras de suelo de la región pampeana (RP) luego de 3 hs (1), 5 hs (2) y 7 hs (3) de digestión.

### 9.1. Eficiencia de recuperación

Para evaluar la eficiencia de recuperación de  $\text{Ca}_T$  y  $\text{Mg}_T$  por el espectro de absorción atómica y del  $\text{K}_T$  por el fotómetro de llama se prepararon soluciones de concentración conocida que se leyeron con los respectivos equipos (Tabla 15).

**Tabla 15.** Soluciones de concentraciones esperadas y determinadas con el fotómetro de llama y espectro de absorción atómica luego de 5 horas de digestión.

Elemento	Concentraciones esperadas (meq/L)	Concentraciones determinadas (meq/L)	Eficiencia de recuperación (%)
$\text{K}_T$	0,228	0,231	98,9
	0,369	0,385	96,0
	0,656	0,769	85,3
	1,538	1,308	85,0
	1,923	1,679	87,3
Eficiencia de recuperación promedio			90,5
$\text{Ca}_T$	0,025	0,016	65,4
	0,050	0,052	105
	0,100	0,090	90,0
	0,200	0,164	82,1
Eficiencia de recuperación promedio			85,7
$\text{Mg}_T$	0,010	0,009	95,8
	0,020	0,021	105
	0,030	0,025	81,9
	0,050	0,045	85,2
Eficiencia de recuperación promedio			91,9

Como muestra la Tabla 15 con los equipos se lograron eficiencias de recuperación aceptables. Por lo tanto, las concentraciones totales obtenidas por digestión se multiplicaron por 1.10 ( $K_T$  y  $Mg_T$ ) o 1.15 ( $Ca_T$ ) para obtener los valores corregidos por la eficiencia de recuperación.

### **10. Potasio total**

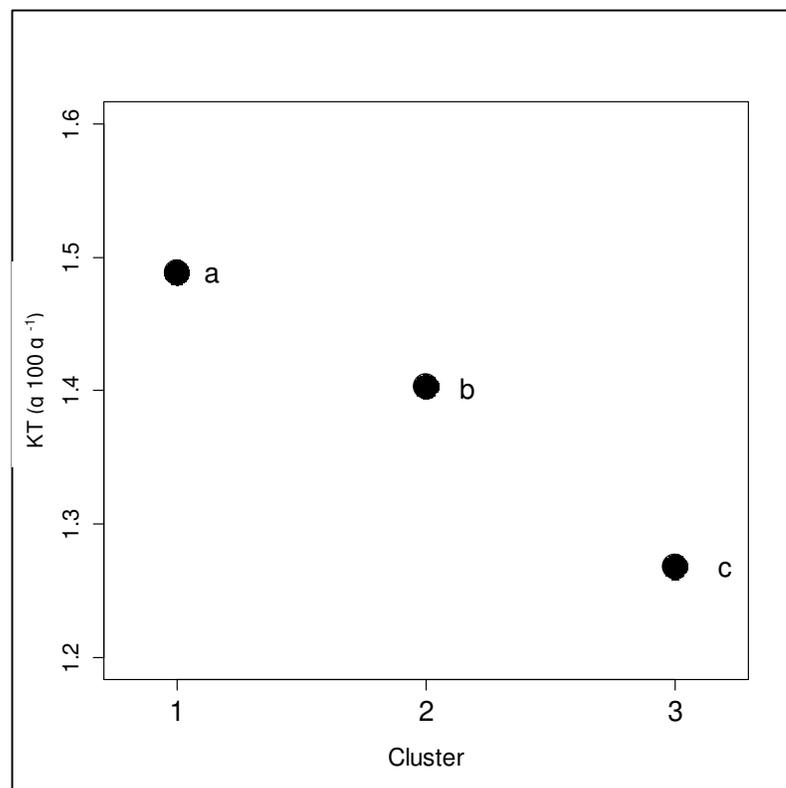
No se observó interacción entre clúster y manejo, tampoco efecto de manejo, pero sí de clúster sobre la concentración de  $K_T$ , por lo que se analizaron los efectos principales de este factor (Tabla 16). Se determinó diferencia significativa entre la concentración media de  $K_T$  (Tabla 16), dado que el clúster 1 fue el que presentó los mayores niveles, seguido por el 2 y el 3 ( $1,48 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ,  $1,41 \text{ g } 100\text{g}^{-1}$  y  $1,27 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ , respectivamente) (Figura 12). El K existe en cuatro formas en el suelo, estructural, fijado, intercambiable y en solución (Barbazán *et al.*, 2015). La forma estructural, constituye la mayor parte del  $K_T$  (Sparks, 1987). La cantidad de K depende de la composición del material madre y la etapa de desarrollo del suelo. Minerales como micas, feldespatos y vidrio volcánico son aquellos en los que principalmente se encuentra el K estructural. Estos minerales son encontrados en las fracciones más gruesas del suelo (Kirkman *et al.*, 1994). Esto podría explicar lo determinado en este trabajo, dado que las zonas agrupadas al oeste de la RP presentan texturas más gruesas que el resto (Morrás y Cruzate, 2000; Zarate, 2012). En el mismo sentido, Morrás y Cruzate (2001) informaron que la zona Oeste de la provincia de Santa Fe presenta una proporción alta de minerales illita- feldespatos asociados a altos contenidos de K y que los mismos disminuyen hacia el este. En el mismo sentido, varios estudios mineralógicos realizados en loess, loessoides y suelos de las regiones de Chaco-pampeana indican que el predominio de la illita disminuye de oeste a este con un aumento de esmectita e ilitesmectita interestratificada cerca del río Paraná (Iñiguez y Scoppa, 1970; Stephan *et al.*, 1977; Morrás *et al.*, 1982; Nabel *et al.*, 1999; Castiglioni *et al.*, 2005). Estas variaciones mineralógicas de los materiales primarios del suelo explican algunas de las principales diferencias observadas en la composición química y la fertilidad de los suelos entre los clústeres. Por lo tanto, los bajos contenidos  $K_T$  en el área mesopotámica se relacionan con los materiales sedimentarios de las cuencas de Paraná y Uruguay. Por el contrario, los molisoles en la parte noroccidental de Pampa (provincias occidentales de Santa Fe y Córdoba) son ricos potasio total y disponible debido a las contribuciones minerales de las sierras pampeanas de Córdoba.

Por otra parte, numerosos trabajos han informado que el material originario de los suelos de RP presentaba heterogeneidad espacial en su composición mineralógica (Scoppa, 1976; Moscatelli, 1991; Morras, 1996; Morras 1999; Zárate 2003). Morras (2003) informó que hacia el oeste de la RP el material loésico se caracteriza por la mayor proporción de plagioclasas, vidrio volcánico y piroxenos, composición que se corresponde con una asociación volcánico-piroclástica de origen andino. Por el contrario, hacia el este aparece una franja que bordea el río Paraná y el río de la Plata, y que se halla caracterizada por minerales asociados con aportes de la cuenca del Paraná. A su vez en el sureste de Santa Fe y del NE de Buenos Aires, los minerales presentes indicarían la existencia de aportes provenientes de las Sierras Pampeanas. Esta heterogeneidad del material originario podría ser otro de los factores determinantes de las diferencias de  $K_T$  encontradas en los distintos clústeres.

La falta de diferencia entre manejos en el contenido de  $K_T$  en los primeros 20 cm del suelo puede deberse a la magnitud del pool y también al patrón de absorción del catión por los cultivos, el cual depende de la textura de los horizontes sub-superficiales. Römheld y Kirkby (2010) y Ghiri, *et al.* (2011) informaron que el abastecimiento de K desde horizontes sub-superficiales puede contribuir de manera importante a la nutrición del cultivo. En el mismo sentido, para suelos de la RP, Correndo (2011) informó que la dinámica del  $K_i$  en los primeros 20 cm del perfil (cambios respecto a suelos prístinos) varió con el tipo de suelo y la presencia o no de horizontes argílicos, presentando caídas menos abruptas en los Hapludoles. Tan *et al.*, (2012) en otro trabajo también demostraron que el K de horizontes subsuperficiales puede ser importante fuente de abastecimiento de dicho nutriente para los cultivos. Si bien las especies difieren en su capacidad para extraer K del suelo, propiedades como la textura, estructura y compactación, influyen en los procesos antes mencionados (Martin y Sparks, 2013).

**Tabla 16.** Análisis de la varianza para la evaluación del potasio total ( $K_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	46412,40	<,0001
Manejo	1	0,92	<,3434
Clúster	2	101,07	<,0001
Manejo*Clúster	2	0,91	<,4007



**Figura 12.** Potasio total ( $K_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

Los resultados obtenidos permitieron constatar variaciones espaciales en los contenidos de  $K_T$  que podrían estar relacionadas con las diferencias mineralógicas y granulométricas de los sedimentos que constituyen el material parental. A su vez, estos resultados sugieren que el  $K_T$  de los primeros 20 cm del suelo no solo depende del balance (el cual es negativo para la situación bajo agricultura) sino también del reabastecimiento de K desde horizontes subsuperficiales.

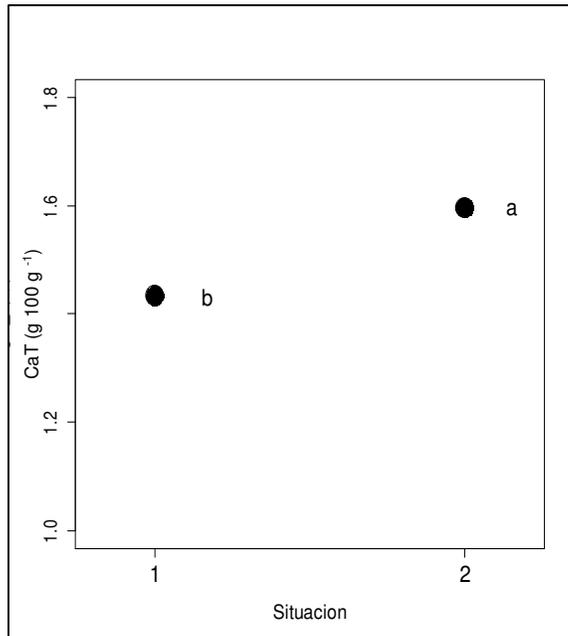
### 11. Calcio total

No se observó interacción entre clúster y manejo, pero si efectos de estos dos factores sobre la concentración de  $Ca_T$ , por lo que se analizaron los efectos principales de estos (Tabla 17). En promedio, la agricultura redujo los niveles de  $Ca_T$  en un  $0,17 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$  (Figura 13 a), equivalente a  $1700 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que el  $Ca_i$  disminuyó  $442 \text{ mg kg}^{-1}$ . Esto sugiere que las pérdidas de Ca del suelo (extracción de los cultivos más lavado) están siendo a expensas no solo del Ca de la fracción intercambiable sino también de otras fracciones del Ca en el suelo. Una posible explicación sería el aporte de Ca desde el  $CO_3Ca$  activo desde horizontes subsuperficiales (Panigatti, 2010),

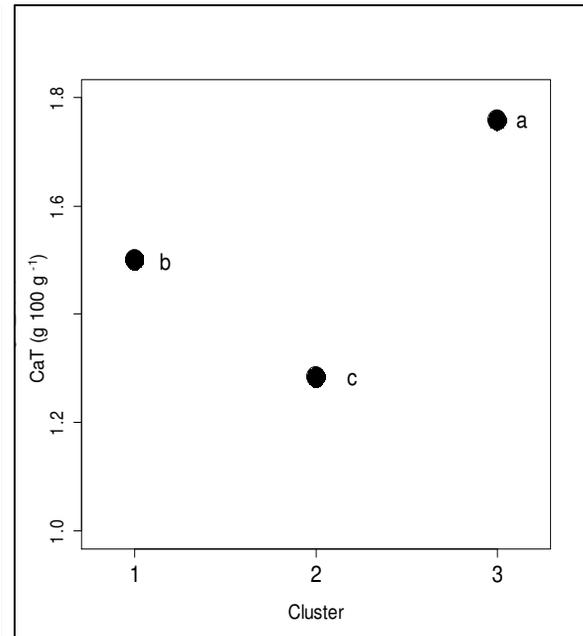
El contenido de  $Ca_T$  difirió significativamente entre clústeres (promedio de manejo). El clúster 3 fue el que presentó la mayor concentración media ( $1,76 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ), seguida por clúster 1 ( $1,51 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ) y clúster 2 ( $1,28 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ) (Figura 13b). De continuar estas tendencias, las caídas en los niveles de Ca no solo provocarían la desprovisión y desbalance nutricional para los cultivos, sino que a su vez se seguiría acelerando el proceso de acidificación edáfica (Sainz Rozas *et al.*, 2013). Además, el Ca al igual que otros cationes básicos divalentes cumple acciones positivas sobre las condiciones físicas del suelo, en su calidad de catión estructurante. Es así que disminuyen la resistencia a la penetración, facilitando la dinámica del aire y del agua, habitualmente comprometidas en suelos con larga historia productiva (Vázquez *et al.*, 2009).

**Tabla 17.** Análisis de la varianza para la evaluación del calcio total ( $Ca_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	Gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	5743,122	<,0001
Manejo	1	17,806	<,0001
Clúster	2	55,115	<,0001
Manejo*Clúster	2	0,851	<,4275



**Figura 13a.** Calcio total ( $Ca_T$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.



**Figura 13b.** Calcio total ( $Ca_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey

Los resultados obtenidos permiten hipotetizar que la mayor caída del  $Ca_T$  respecto del intercambiable es debida a que una parte del Ca del suelo que abastece al pool intercambiable y soluble provendría de del  $CO_3Ca$  subsuperficial, lo que podría determinar un mayor potencial de pérdidas por lavado.

## 12. Magnesio total

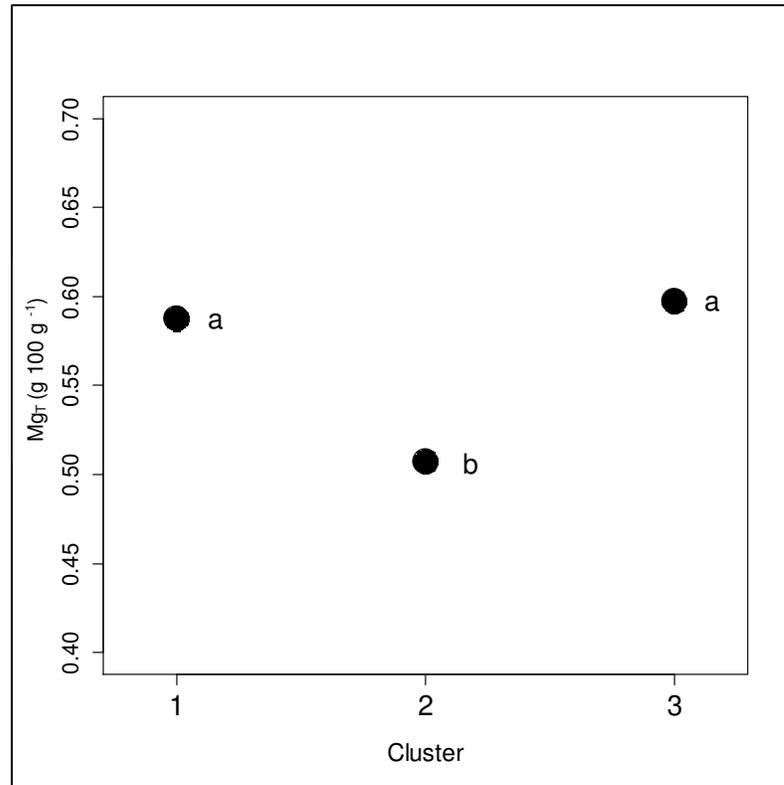
No se observó interacción entre clúster y manejo, tampoco efecto de manejo, pero sí de clúster sobre la concentración de  $Mg_T$ . Dado esto se analizaron los efectos principales de este factor (Tabla 18). Se determinó diferencia significativa entre los clústeres, el clúster 3 y 1 ( $0,6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ) fueron los que presentaron la mayor concentración y no difirieron entre sí (Figura 14). Si bien se encontró diferencia significativa respecto al clúster 2 las mismas se encuentran dentro de los rangos normales de concentración reportados en la bibliografía ( $0,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ ) (Vázquez y Pagani, 2015). Las diferencias en las concentraciones halladas según clúster podrían ser consecuencias de la

heterogeneidad espacial mineralógica del material madre de los suelos de RP (Scoppa, 1976; Moscatelli, 1991; Morras, 1996; Morras 1999; Zárata 2003).

La falta de efecto de la agricultura sobre el contenido de  $Mg_T$  en este estrato de suelo podría ser consecuencia del reabastecimiento de horizontes subsuperficiales. Gransee y Fühns (2012) evaluaron la contribución de diferentes pools de Mg del suelo a la nutrición de vegetal. Estos autores demostraron que las fracciones de Mg solubles e intercambiables no siempre reflejan la capacidad de los cultivos para explorar el suelo. De hecho, Grimme (1978) indicó que no hay una relación estrecha entre el Mg en solución e intercambiable en la capa superior del suelo y la concentración del catión en las plantas. A su vez informó que, dependiendo del tipo de cultivo, el subsuelo contribuye considerablemente a la nutrición con Mg. Esta base, a diferencia del K y del Ca, presenta mayor movilidad en suelo debido a su menor radio iónico y mayor radio hidratado. Independientemente del tipo de suelo, lo mencionado hace que dicho nutriente no se encuentre retenido muy fuertemente en el complejo de intercambio y este expuesto a pérdidas por lixiviación y movimiento en el perfil (Ding *et al.*, 2006; Gransee y Fühns, 2012).

**Tabla 18.** Análisis de la varianza para la evaluación del magnesio total ( $Mg_T$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	7727,769	<,0001
Manejo	1	0,051	<,8221
Clúster	2	22,968	<,0001
Manejo*Clúster	2	0,523	<,5932



**Figura 14.** Magnesio total ( $Mg_T$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

### **13. Relación potasio total/ potasio intercambiable**

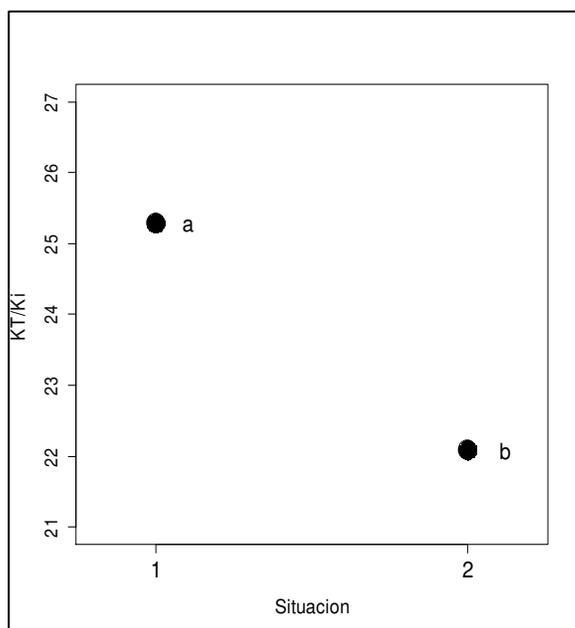
No se determinó interacción significativa entre manejo y clúster, pero sí efecto de estos factores sobre la relación  $K_T/K_i$  (Tabla 19). Los suelos bajo agricultura mostraron la mayor relación (Figura 15a) y la diferencia hallada entre situaciones de manejo es consecuencia de los diferentes niveles de  $K_i$  (Figura 5), dado que el  $K_T$  no mostró variaciones por efecto de la agricultura (Figura 12).

Por otra parte, dicha relación presenta variabilidad espacial dependiente de la zona. Los clústeres 1 y 2 fueron los que mostraron los valores promedio más altos y difirieron significativamente del 3 (Figura 15b). La menor relación mostrada para este último clúster es consecuencia de su alta concentración de  $K_i$  (Figura 5) y menor concentración total respecto al resto (Figura 12). Para el clúster 1 y 2 la fracción intercambiable representa aproximadamente el 4% del contenido total, mientras que para el clúster 3 representa 4,7%. Pese a estas diferencias, los porcentajes hallados concuerdan con los reportados

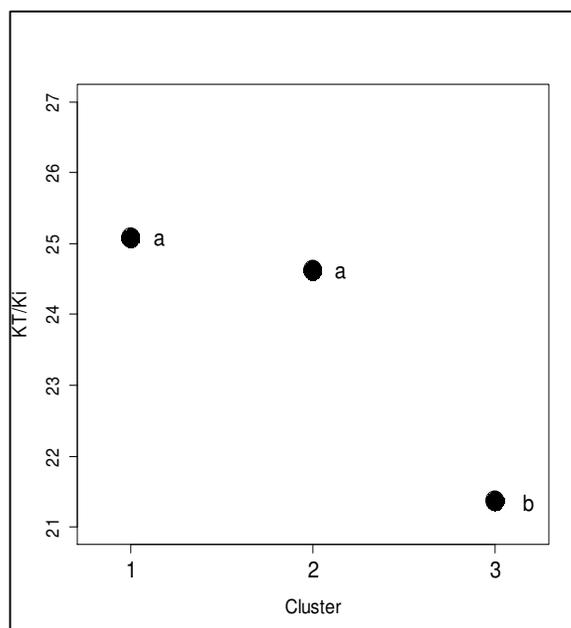
por la bibliografía dentro de los rangos normales para suelos de la RP (Barbazán *et al.*, 2015).

**Tabla 19.** Análisis de la varianza para la evaluación de la relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	4509,223	<,0001
Manejo	1	49,949	<,0001
Clúster	2	12,396	<,0001
Manejo*Clúster	2	1,735	<,1772



**Figura 15a.** Relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.



**Figura 15b.** Relación potasio total / potasio intercambiable ( $K_T/K_i$ ) en clústeres de suelo de la RP. Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

En síntesis, los resultados encontrados sugieren que en el mediano y largo plazo los pools de K menos disponibles podrían abastecer a la fracción intercambiable. Esto dependerá de condiciones del medio propia de cada zona como humedad, temperatura y

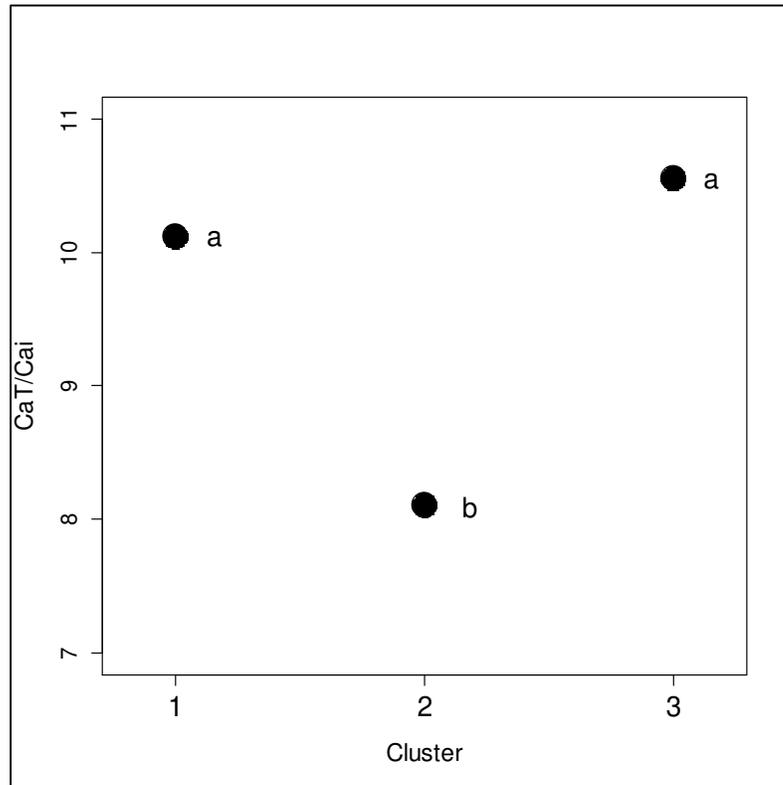
acidez principalmente (Conti y García, 2006). A su vez, dada la variabilidad espacial mostrada, la región noreste y sudeste de la RP podrían ser la más susceptible a presentar deficiencias dado que mostró la menor relación  $K_T/K_i$  y los contenidos de totales fueron inferiores a los del resto de las zonas en estudio.

#### **14. Relación calcio total/ calcio intercambiable**

No se determinó interacción significativa entre manejo y clúster, tampoco efecto de manejo, pero sí de clúster sobre la relación  $Ca_T/Ca_i$  (Tabla 21). La falta de diferencia entre manejos podría ser consecuencia de que para este catión la agricultura afectó no solo las fracciones intercambiables (Figura 7a) sino también los totales (Figura 13a), por lo que la variación se produjo tanto en el numerador como denominador de dicha relación. Por otra parte,  $Ca_T/Ca_i$  presenta variabilidad espacial dependiente de la zona. El clúster 1 y 3 fueron los que mostraron los valores promedio más altos y difirieron significativamente del 2 (Figura 16). La menor relación mostrada para este último clúster es consecuencia de su nivel intermedio de  $Ca_i$  y su baja concentración de  $Ca_T$  (Figura 7b y 13b). Para el clúster 1 y 3 la fracción intercambiable representa aproximadamente el 10% del contenido total, mientras que para el clúster 2 representa 12,3%.

**Tabla 20.** Análisis de la varianza para la evaluación de la relación calcio total/ calcio intercambiable ( $Ca_T/Ca_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), Clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	1496,6462	<,0001
Manejo	1	1,5197	<,2181
Clúster	2	12,9982	<,0001
Manejo*Clúster	2	0,2074	<,8128



**Figura 16.** Relación calcio total / calcio intercambiable ( $Ca_T/Ca_i$ ) en clústeres de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

Los resultados sugieren que en el mediano y largo plazo las fracciones menos disponibles del Ca podrán abastecer a la fracción intercambiable ya que son superiores a esta en todas las zonas. Esto dependerá de condiciones del medio propia de cada zona como son humedad, temperatura y acidez principalmente (Conti y García, 2006). A su vez, dada la variabilidad espacial mostrada, el clúster 2 podría ser la más susceptible a presentar problemas de acidificación o respuesta de los cultivos al agregado de Ca en el mediano a largo plazo ya que esta mostró la menor relación  $Ca_T/Ca_i$  y el contenido total de  $Ca_T$  y  $Ca_i$  fue inferior al del resto de los clústeres.

### **15. Relación magnesio total / magnesio intercambiable**

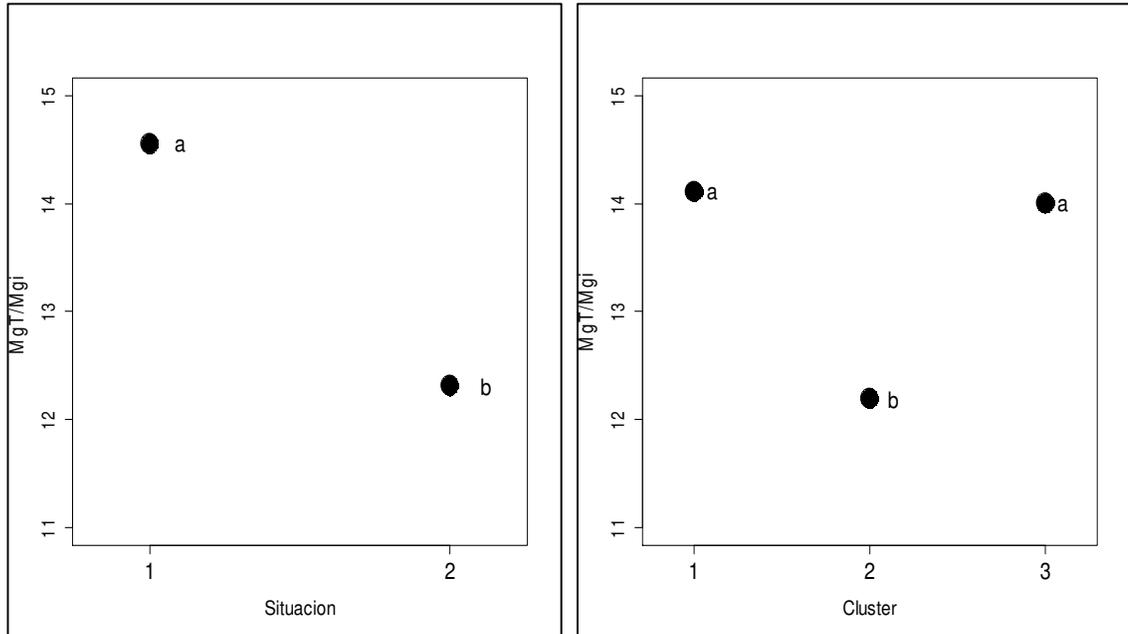
No se determinó interacción significativa entre manejo y clúster pero sí efecto de estos factores sobre la relación  $Mg_T/Mg_i$  (Tabla 21; Figura 17a). La diferencia hallada entre situaciones de manejo es consecuencia de los diferentes niveles de  $Mg_i$  (Figura 6a), dado

que el  $Mg_T$  no mostró variaciones por efecto de la agricultura (Figura 14). Como se mencionó, el  $Mg_i$  se redujo en promedio un 19% (Figura 6a).

Por otra parte, la relación  $Mg_T/Mg_i$  presentó variabilidad espacial dependiente de la zona (Figura 17b). Los clústers 1 y 3 fueron los que mostraron los valores promedio más altos y difirieron del clúster 2 (Figura 17b). Para el clúster 1 y 3 la fracción intercambiable representa aproximadamente el 7% del contenido total, mientras que para el clúster 2 representa 8,2%. Este comportamiento fue similar al observado para la relación  $Ca_T/Ca_i$  (Figura 16).

**Tabla 21.** Análisis de la varianza para la evaluación de la relación magnesio total / magnesio intercambiable ( $Mg_T/Mg_i$ ) para cada manejo (prístino y agrícola), clúster (1, 2 y 3) e interacción entre estos factores.

	gl	F-valor	p-valor
Intercepto	1	2019,9547	<,0001
Manejo	1	9,6468	<,0001
Clúster	2	3,4963	<,0005
Manejo*Clúster	2	0,4156	<,8221



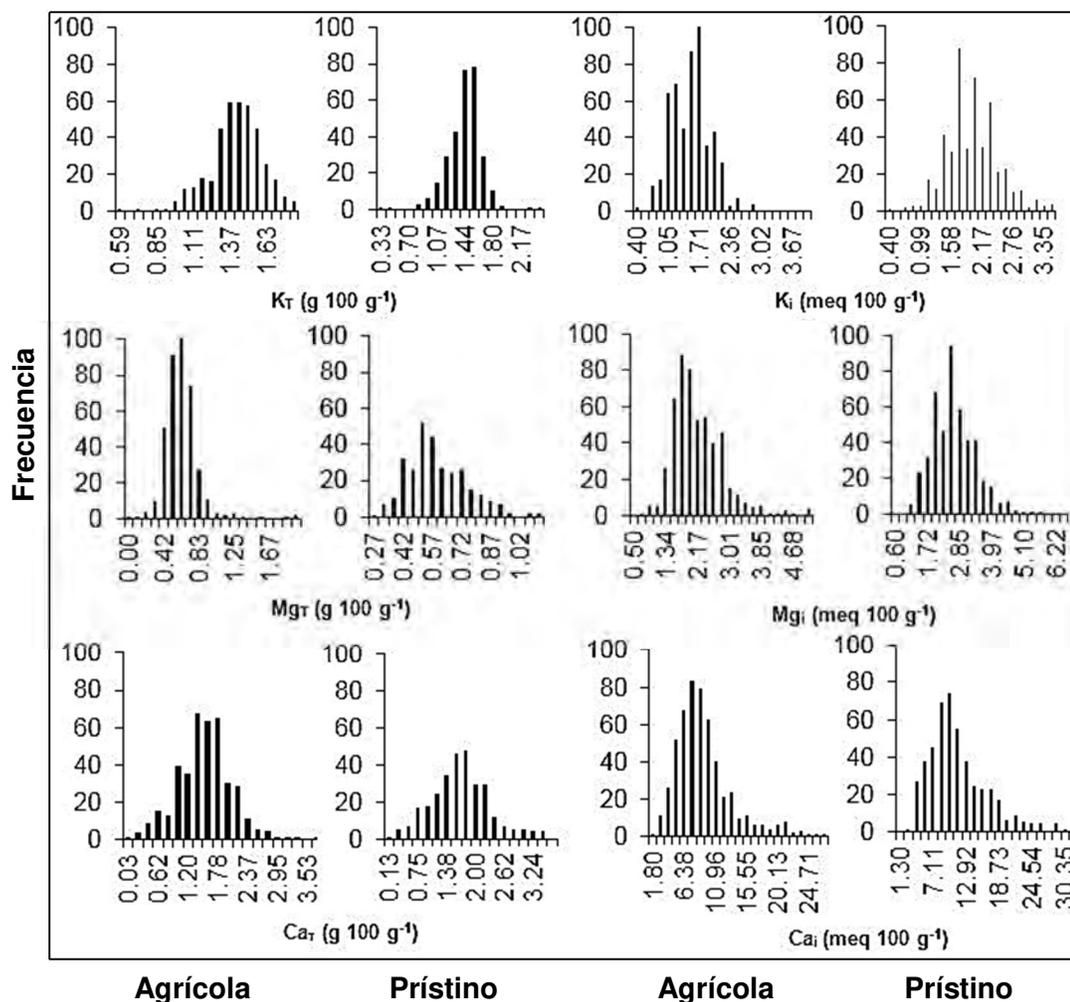
**Figura 17a.** Relación magnesio total/magnesio intercambiable ( $Mg_T/Mg_i$ ) en manejo agrícola (1) y prístino (2) de suelos de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según

**Figura 17b.** Relación magnesio total/magnesio intercambiable ( $Mg_T/Mg_i$ ) en clústeres de suelo de la región pampeana (RP). Letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según el test de Tukey.

En síntesis, los resultados encontrados nos sugieren que en el mediano y largo plazo los pools de Mg no disponibles podrán abastecer a la fracción intercambiable ya que son superiores a esta en todas las zonas. Esto dependerá de condiciones del medio propia de cada zona como son humedad, temperatura y acidez principalmente (Conti y García, 2006). A su vez, dada la variabilidad espacial mostrada, la Pampa Ondulada y la Pampa Llana Santafesina podría ser la más susceptible a sufrir deficiencias en el largo plazo dado que esta zona la menor relación y los contenidos de totales fueron inferiores a los del resto de las zonas en estudio.

### 16. Distribución espacial de cationes intercambiables y totales

En este trabajo, la distribución de las variables en ambos ambientes mostró una leve asimetría (Figura 18), por lo que fueron transformadas por medio de la raíz cuadrada o logaritmo en base diez según correspondiera.

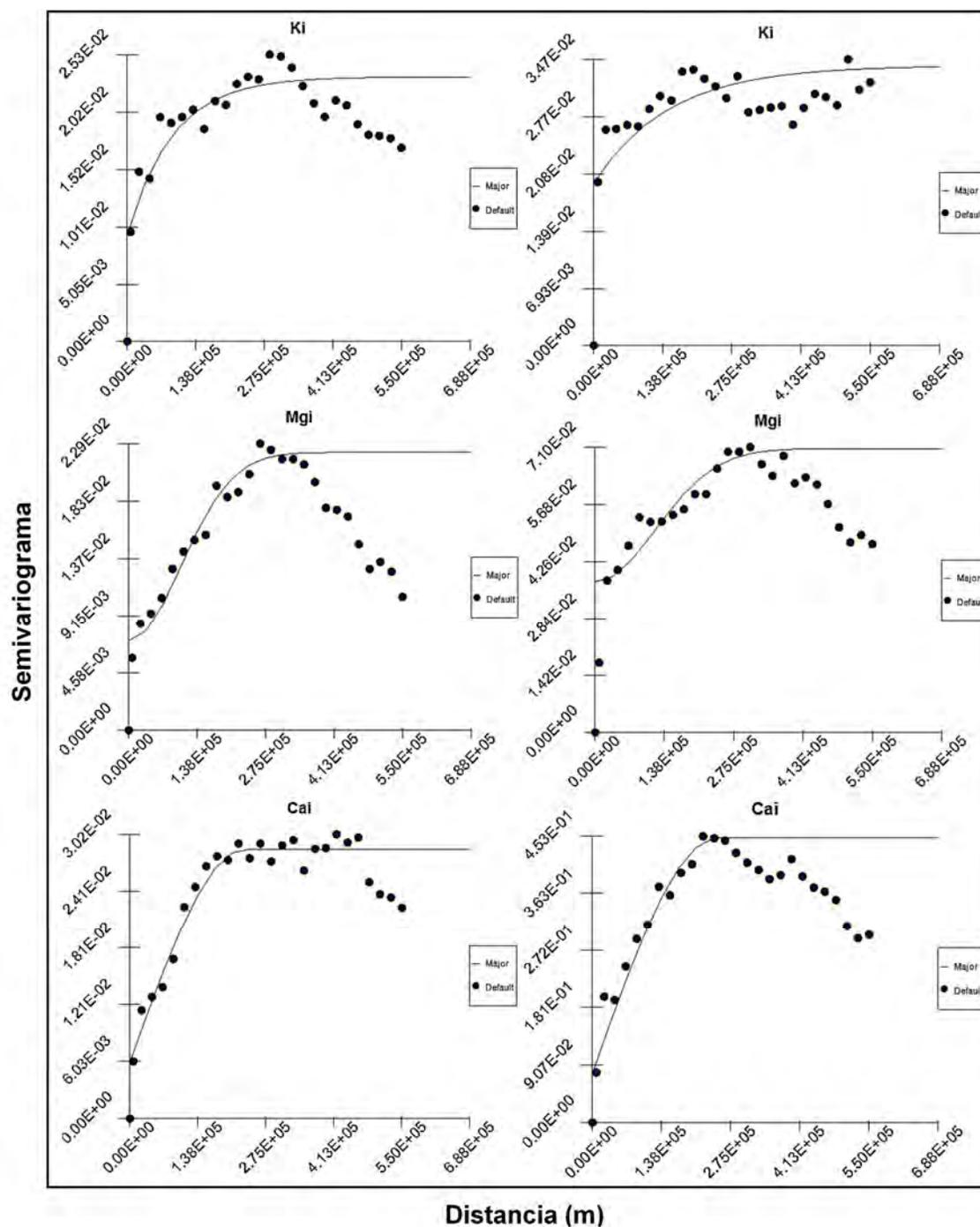


**Figura 18.** Distribución de los valores de cationes intercambiables derecha) y totales (izquierda) de muestras de suelo agrícolas y prístinas de la región pampeana (RP).

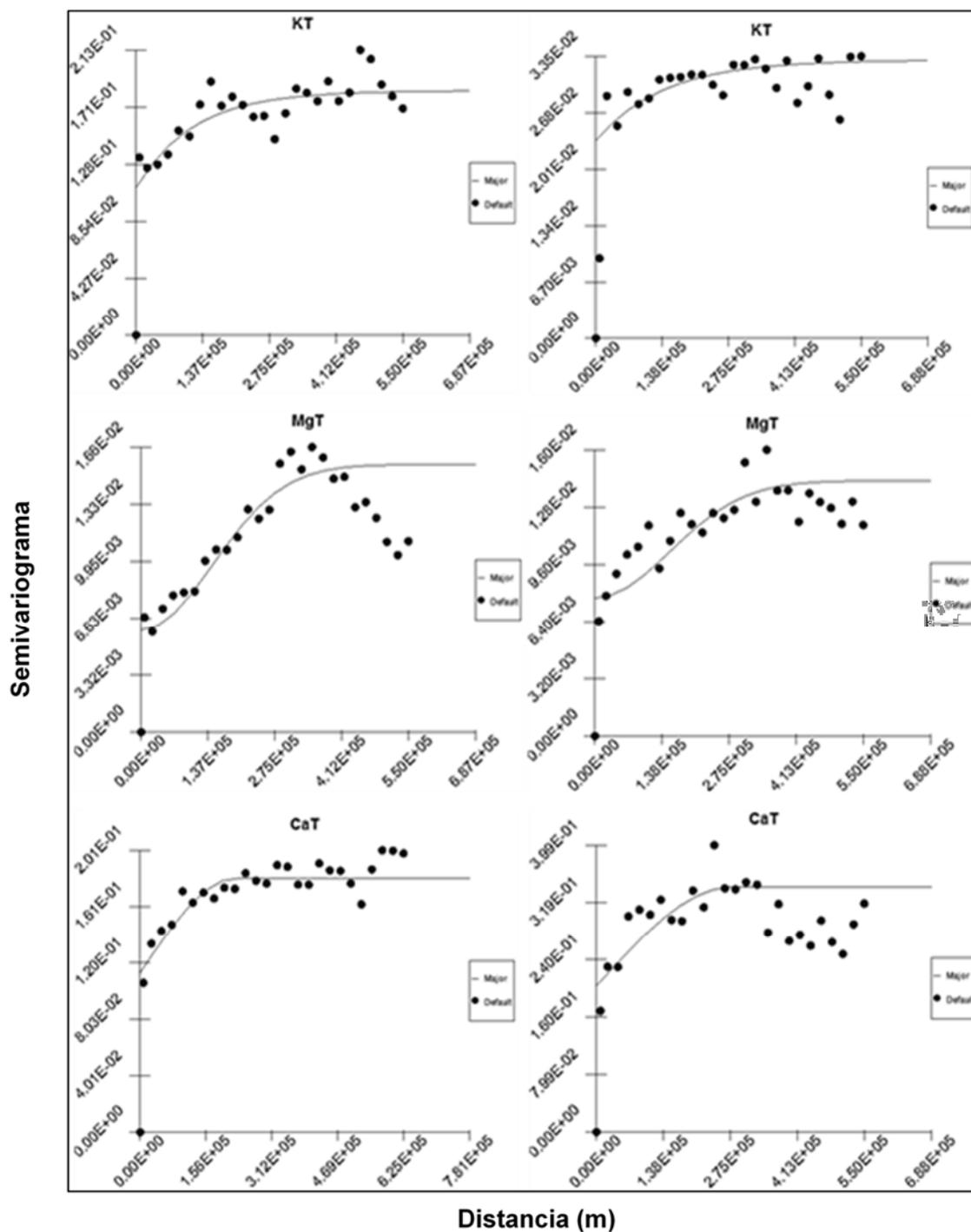
Luego, a partir de los datos experimentales transformados, se elaboraron los correspondientes variogramas experimentales (Figura 19 y 20). Los valores de los parámetros de ajuste se exponen en la Tabla 22.

En general, se observó efecto pepita para todos los cationes y para ambas situaciones de manejo. Sin embargo, no se encontraron valores altos, lo que sugiere una baja incertidumbre en el muestreo y en la determinación analítica. Los valores experimentales tuvieron un buen ajuste al modelo en todos los casos ( $r > 0,87$ ) (Tabla 22).

En general, los variogramas de suelos prístinos, señalan que los datos presentan una clara continuidad espacial, con rangos de entre 140 a 300 km, según el nutriente (Figura 19 y 20 y Tabla 22). En cambio, en ambientes agrícolas la distribución espacial de los valores mostró menor continuidad, ya que los rangos variaron de 92 a 250 km. Para los cationes intercambiables el K fue el que mostró la mayor reducción en el alcance (Figura 19, Tabla 22) y para los cationes totales el Ca (Figura 20, Tabla 13). Esto indicaría que el efecto antrópico (agricultura) aumentó la variabilidad espacial. Esto concuerda con lo observado con los resultados de secciones anteriores donde, por ejemplo, para el  $K_i$ , las caídas dependieron del clúster (interacción clúster \* manejo) y en el caso del  $Ca_T$  este fue el único catión que mostró disminuciones en su concentración por el efecto del manejo. Como se comentó en secciones anteriores, en las zonas donde el cultivo predominante fue soja, la extracción de bases es mayor que en aquellas rotaciones que tengan más frecuencias de gramíneas.



**Figura 19.** Variogramas correspondientes a valores potasio, magnesio y calcio intercambiable (K<sub>i</sub>, Mg<sub>i</sub> y Ca<sub>i</sub>) de muestras de suelo agrícola (izquierda) y prístinas (derecha) de la región pampeana (RP).



**Figura 20.** Variogramas correspondientes a valores potasio, magnesio y calcio total ( $K_T$ ,  $Mg_T$  y  $Ca_T$ ) de muestras de suelo agrícolas (izquierda) y prístinas (derecha) de la región pampeana (RP).

**Tabla 22.** Parámetros de los modelos ajustados para valores de potasio, calcio y magnesio (K, Ca y Mg) intercambiables y totales en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).

<b>Modelo</b>	<b>K</b>		<b>Ca</b>		<b>Mg</b>	
	<b>Exponencial</b>		<b>Esférico</b>		<b>Gaussiano</b>	
	<b>Situación</b>	<b>Agrícola</b>	<b>Prístino</b>	<b>Agrícola</b>	<b>Prístino</b>	<b>Agrícola</b>
	Intercambiable					
<b>Alcance</b>	91304,4	150569,3	231586,8	248530,8	147367,7	169790,9
<b>Contribución</b>	0,014	0,014	0,023	0,374	0,015	0,033
<b>Efecto pepita</b>	0,009	0,020	0,006	0,077	0,007	0,038
<b>r</b>	0,94	0,95	0,89	0,88	0,92	0,95
	Total					
<b>Alcance</b>	11938,9	140978,5	225693,5	277820,6	207000,2	227788,6
<b>Contribución</b>	0,072	0,009	0,067	0,138	0,0096	0,004
<b>Efecto pepita</b>	0,110	0,023	0,113	0,200	0,006	0,007
<b>r</b>	0,87	0,97	0,97	0,96	0,93	0,95

A partir de los modelos ajustados se interpolaron los datos mediante krigeado ordinario para suelos agrícolas y prístinos de la RP y se obtuvieron los mapas que permiten observar el comportamiento espacial mencionado en párrafos anteriores. Los resultados de la validación cruzada (Figura 27), demostrando coincidencia entre la distribución de frecuencia de los residuales y la distribución normal con media nula, dan argumentos suficientes para aceptar el proceso de interpolación de los datos.

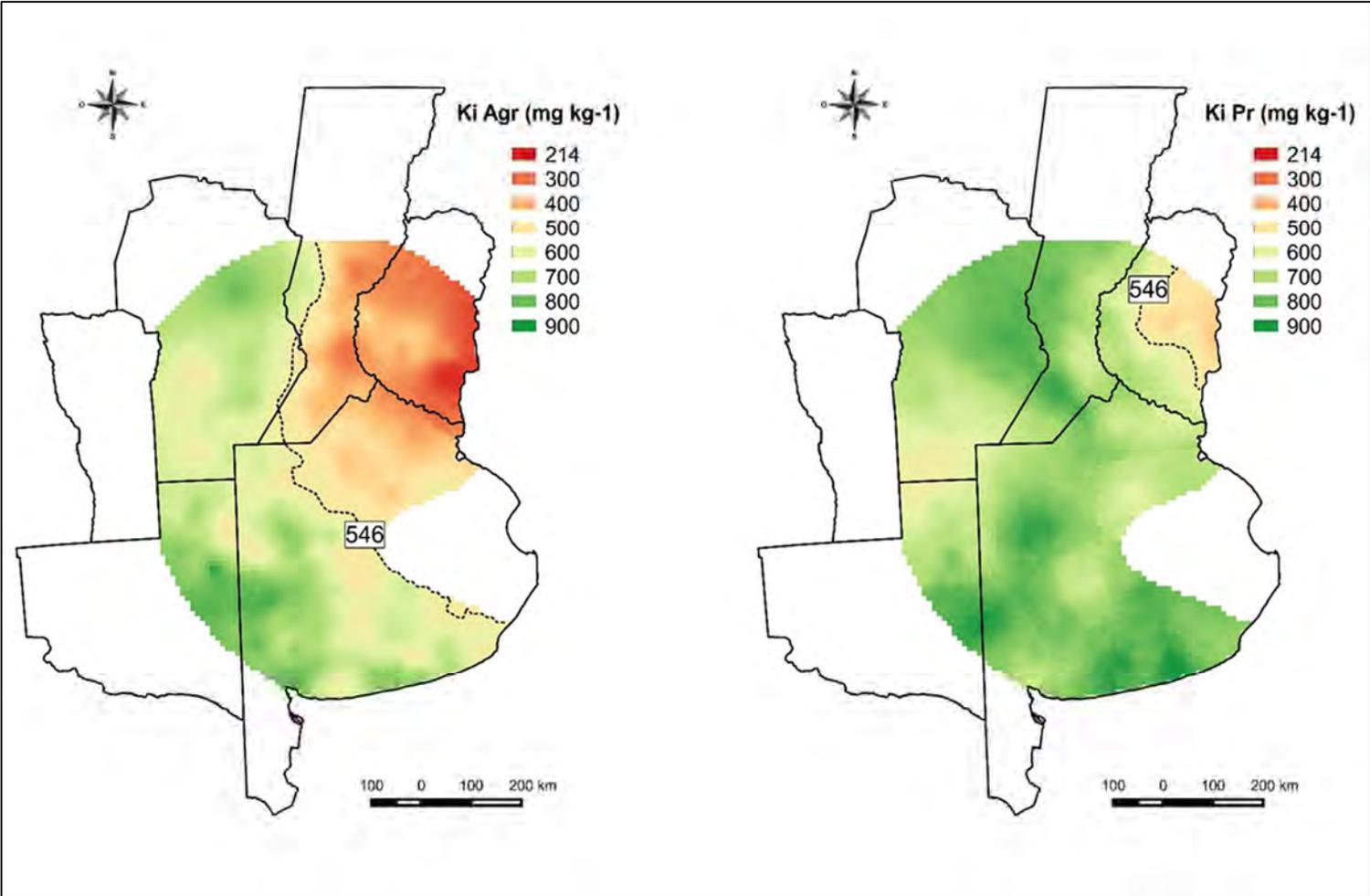
La actividad agrícola disminuyó el  $K_i$  en toda la RP, aunque existen zonas (noreste de Buenos Aires, sureste de Santa Fe y Entre Ríos) en donde la caída fue mayor (Figura 21). No obstante, como es mostrado en esta misma figura, la disponibilidad de  $K_i$  en la región estudiada es alta a muy alta, con valores mayores de  $K_i$  que el umbral de respuesta ( $150\text{-}175\text{ mg kg}^{-1}$ ) (Conti y García, 2006). En lo que respecta al  $K_T$  no se observaron variaciones en las concentraciones por efecto de la agricultura (Figura 22). Sin embargo, se observaron variaciones espaciales en los contenidos de  $K_T$  (Figura 22), siendo la zona oeste de la RP las que registraron las mayores concentraciones.

La actividad agrícola produjo disminuciones significativas del  $Mg_i$  (Figura 23). No obstante, la disponibilidad de  $Mg_i$  está en el rango de alta a muy alta y no se detectaron zonas con valores menores al umbral crítico de  $50$  o  $60\text{ mg kg}^{-1}$  (Havlin *et al.*, 2005). El  $Mg_T$  no mostró variaciones en las concentraciones por efecto de la agricultura (Figura 24). Sin embargo, al igual que el  $K_T$  se observaron variaciones espaciales siendo la zona oeste y en particular la zona noroeste de la RP las que registraron las mayores concentraciones.

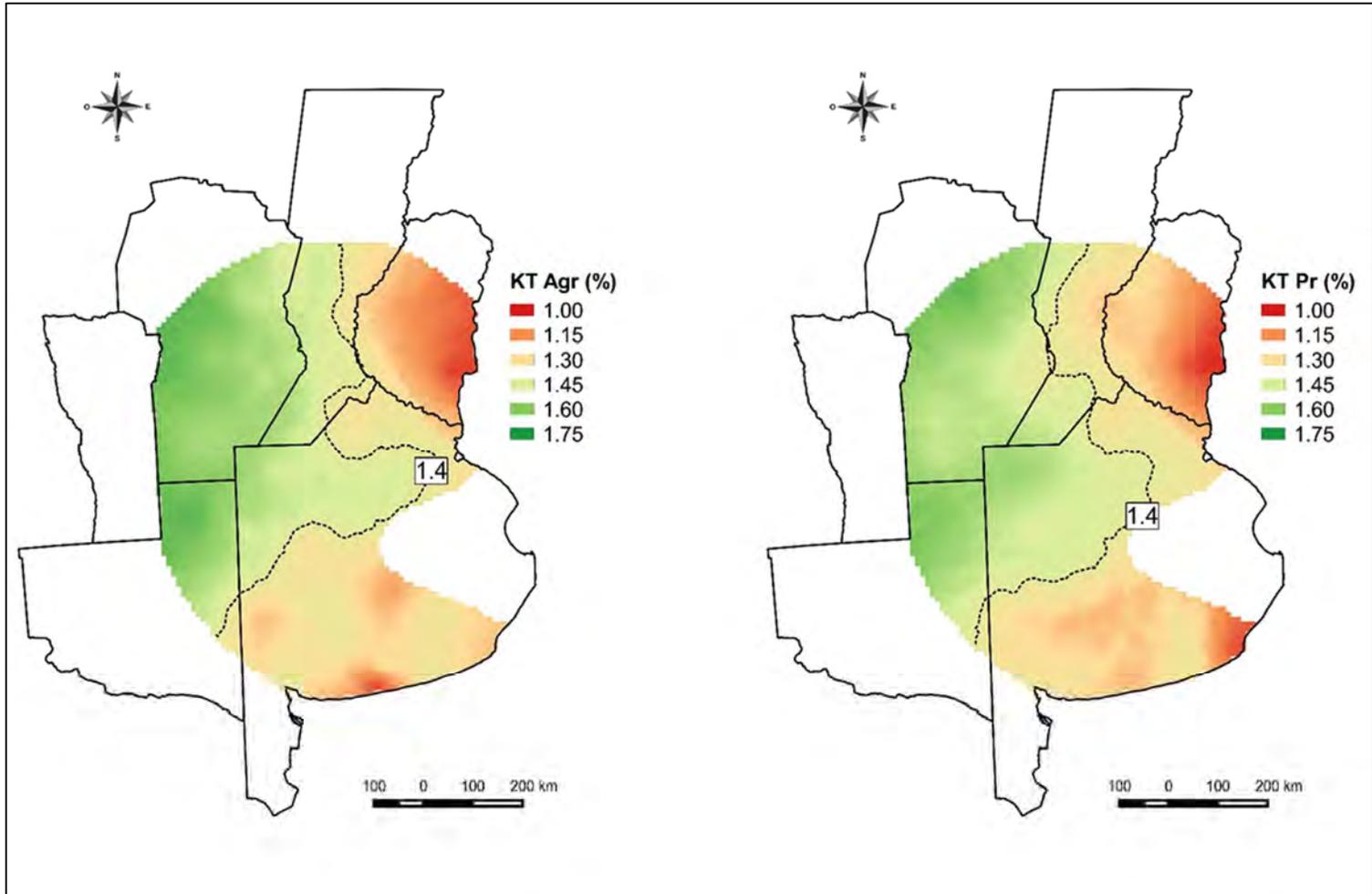
El  $Ca_i$  se ubicó en el rango considerado medio a alto en la mayor parte del área relevada (Figura 25), resultados que coinciden con lo reportado por Cruzate y Rivero (2008). La actividad agrícola produjo disminuciones del  $Ca_i$ . Los valores altos a muy altos de  $Ca$  se observaron en la provincia de Entre Ríos y en el sur de Buenos Aires y los más bajos en el norte de Buenos Aires, centro sur de Santa Fe y el sur suroeste de Córdoba (Figura 25). El  $Ca_T$  mostró disminución por efecto de la agricultura (Figura 26) y la zona del centro sur de Santa Fe fue la zona más afectada. También se observaron reducciones en las concentraciones de  $Ca_T$  en el sudeste de Córdoba

A modo de síntesis podemos decir que la actividad agrícola aumentó la variabilidad espacial de todos los cationes. Dentro de los intercambiables el  $K$  es el que mostró las mayores reducciones en continuidad espacial, mientras que para los cationes totales fue el  $Ca$ . También los resultados encontrados sugieren que, para el análisis regional de  $Ca$ ,

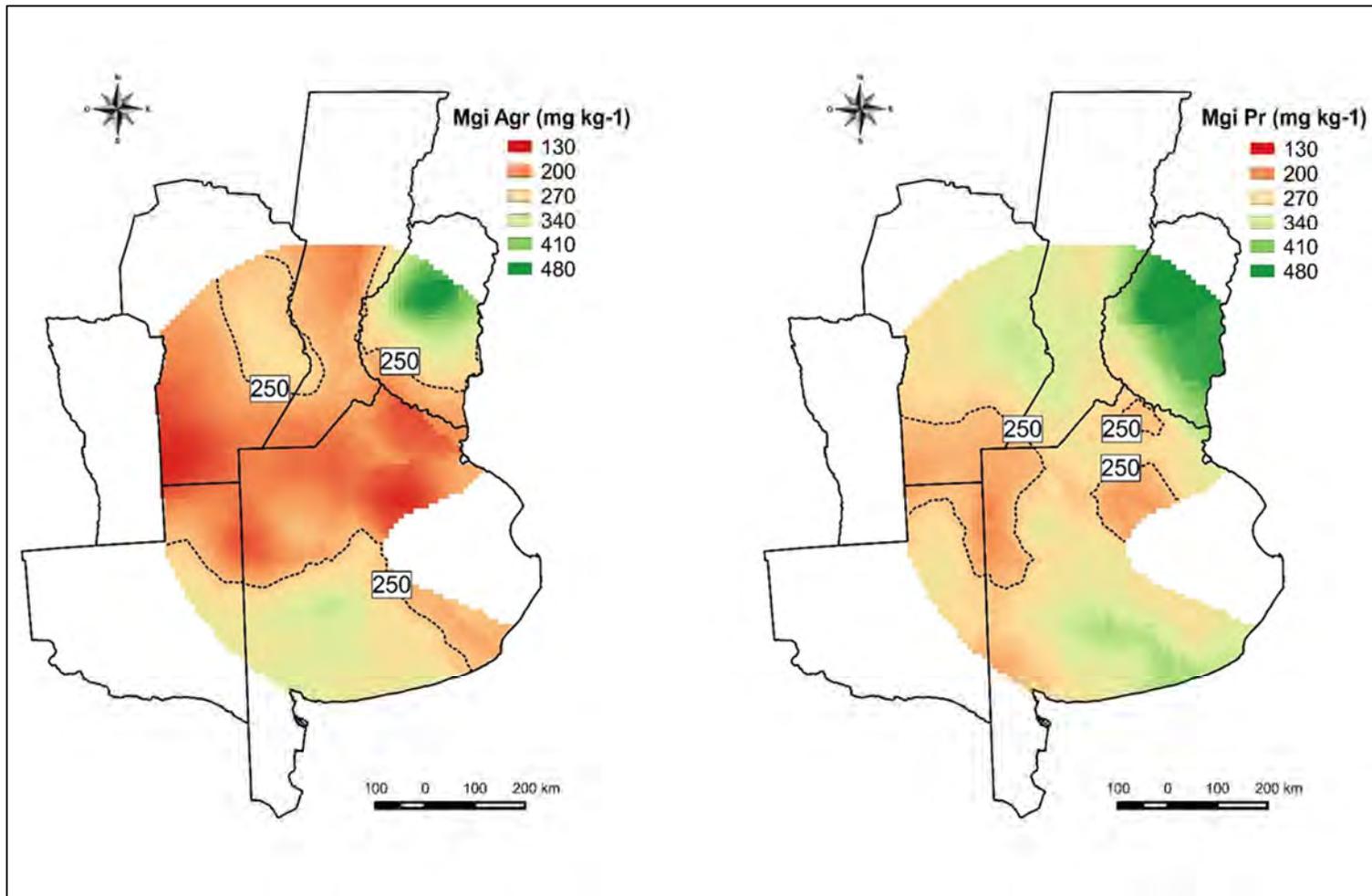
Mg, K y de sus relaciones en ambientes agrícolas, una adecuada red de muestreo debería considerar que la distancia máxima entre las estaciones debería ser de 90 km. Gran parte de los resultados de este trabajo son originales y contribuirán a diseñar futuros esquemas de muestreo para el caso que se requiera realizar el seguimiento de la evolución de los contenidos de bases en los suelos de la RP.



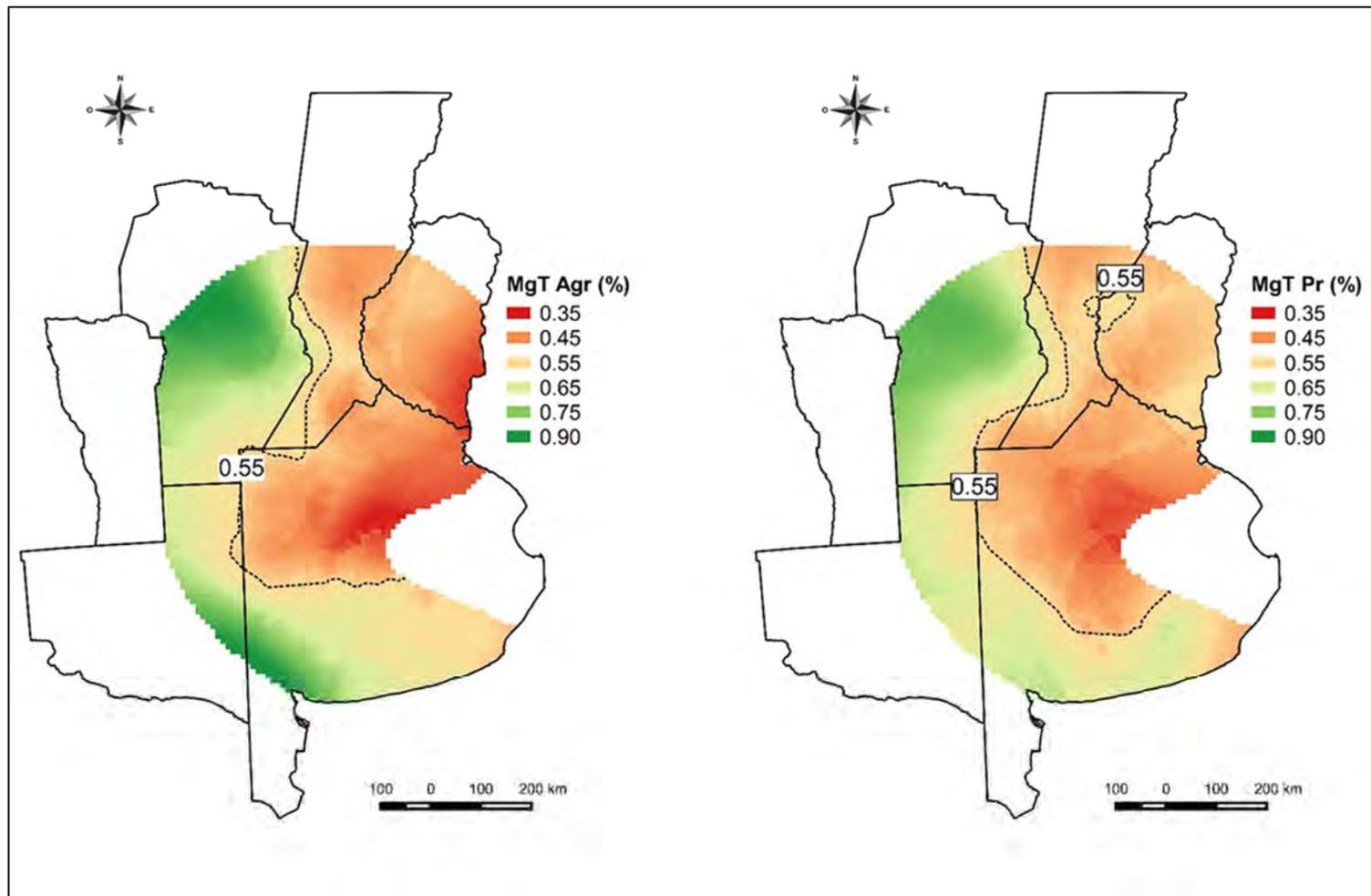
**Figura 21.** Mapa de distribución de potasio intercambiable ( $K_i$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



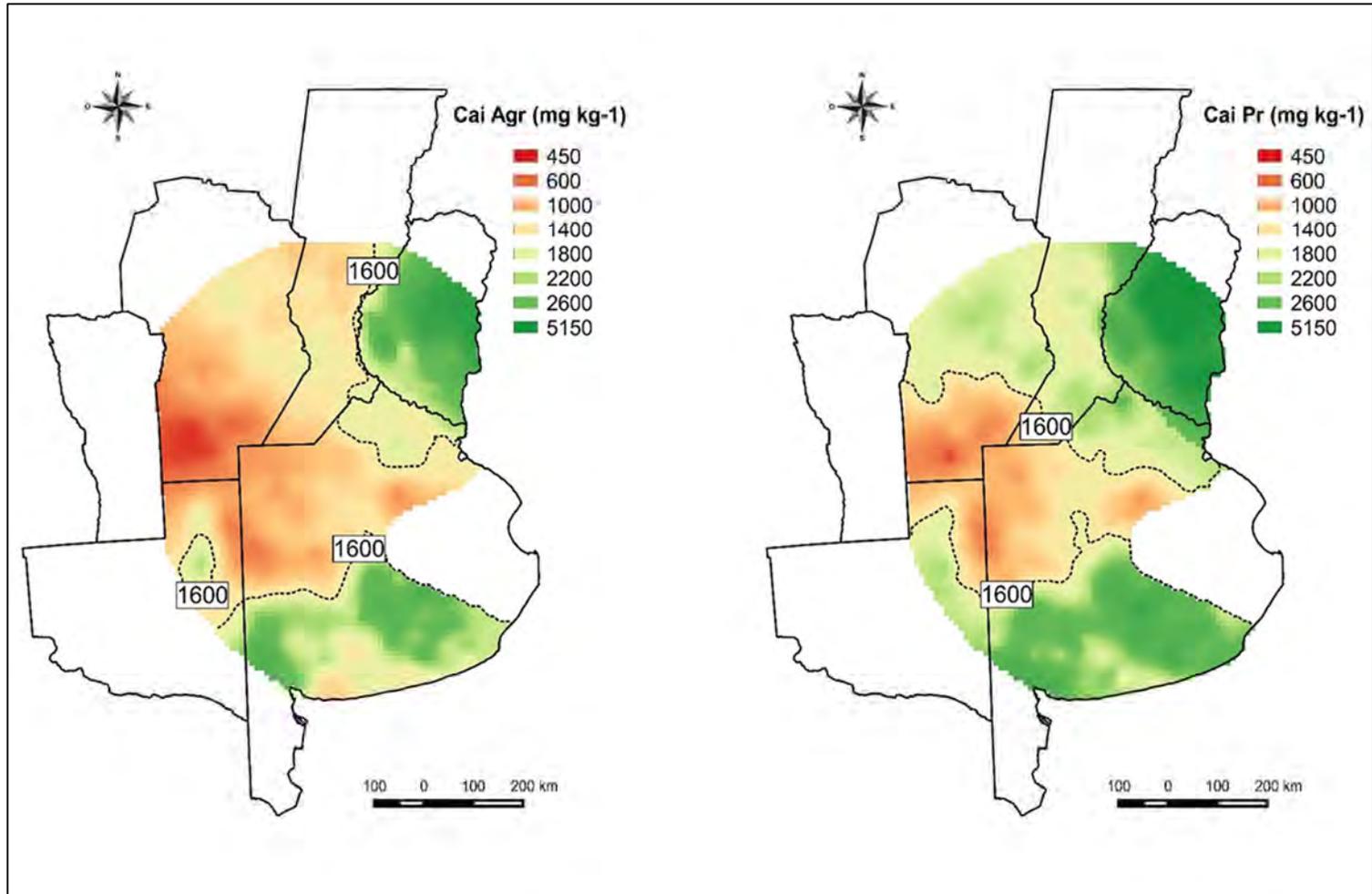
**Figura 22.** Mapa de distribución de potasio total ( $K_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



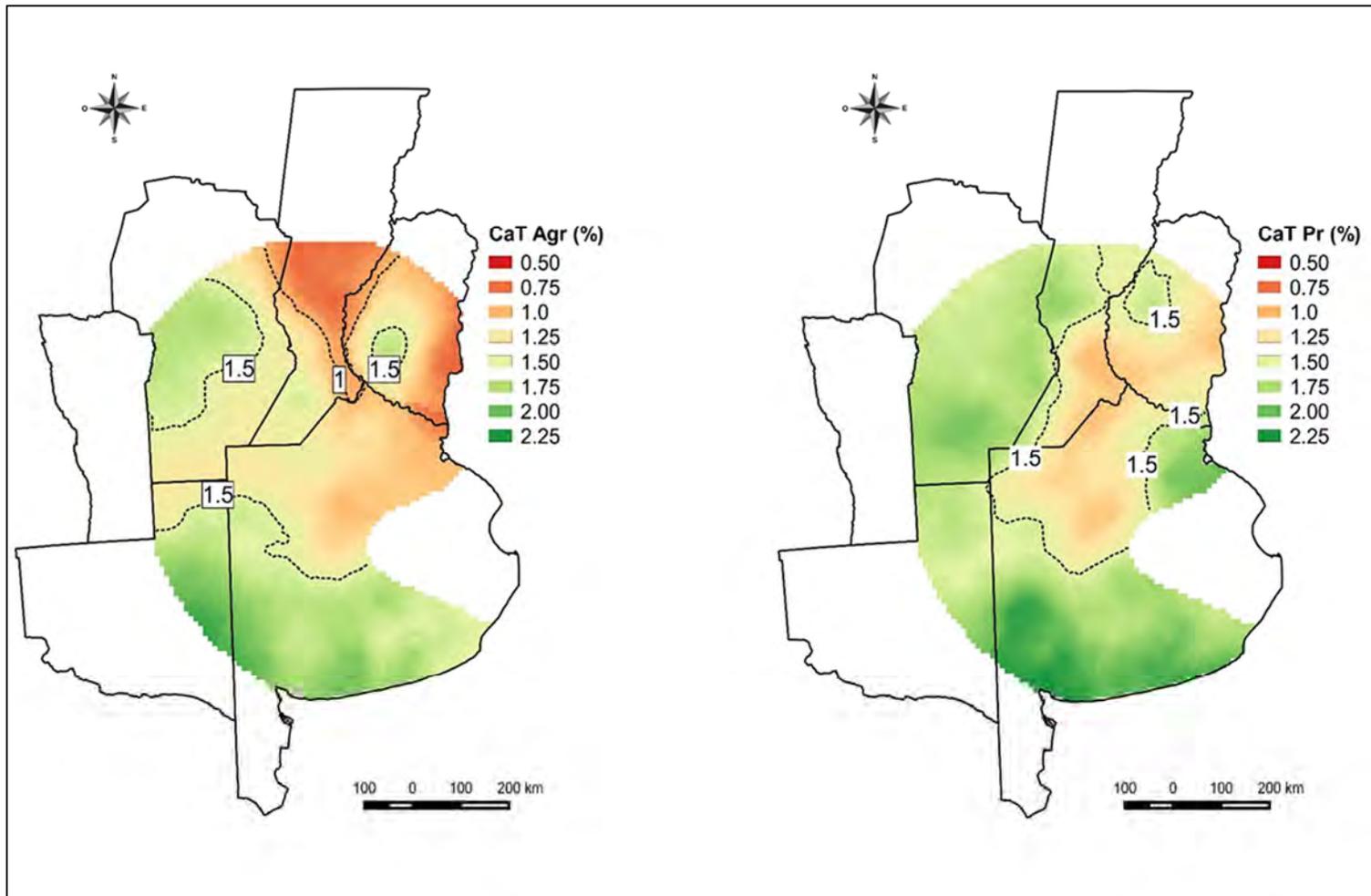
**Figura 23.** Mapa de distribución de magnesio intercambiable (Mgi) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



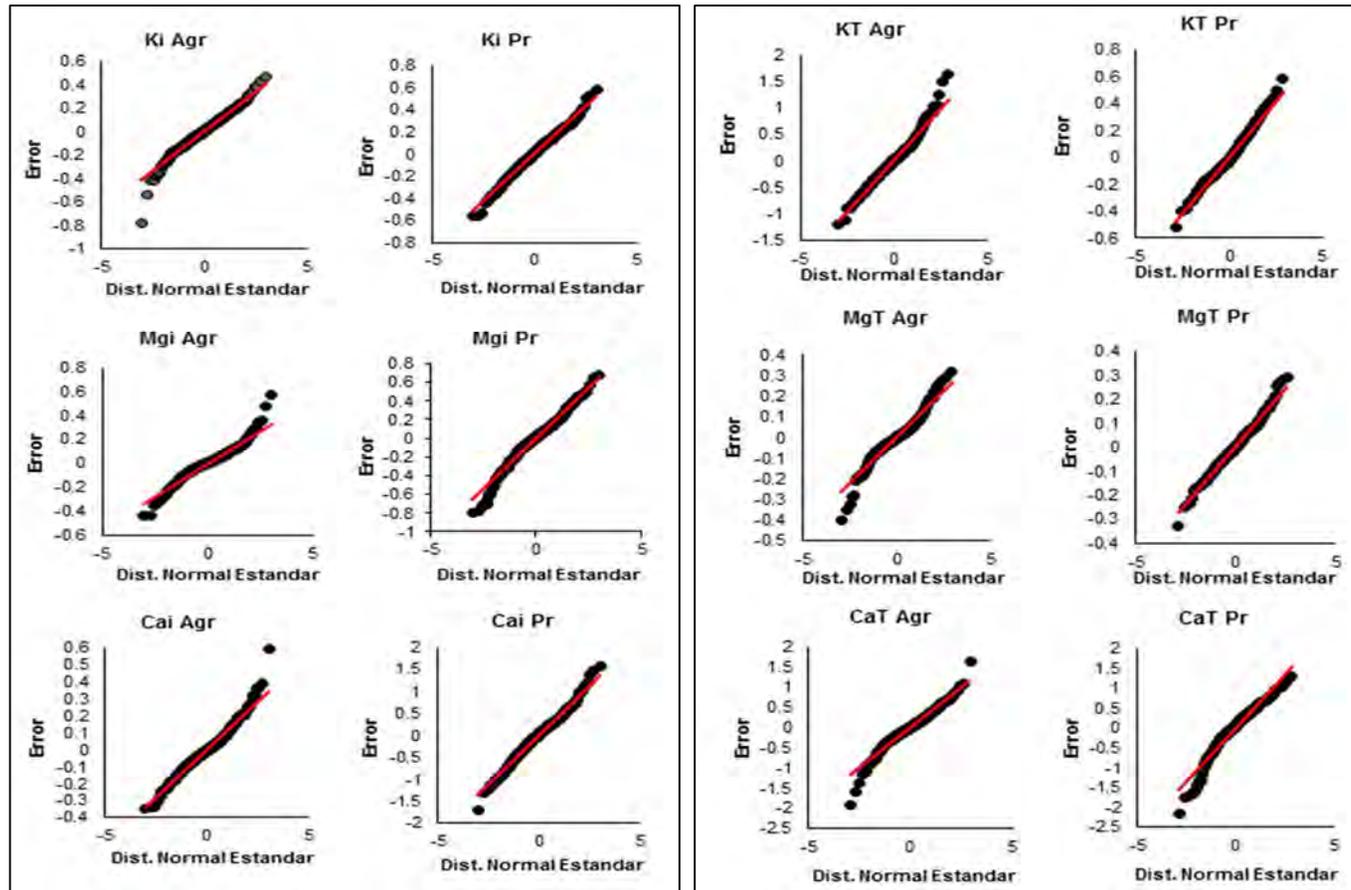
**Figura 24.** Mapa de distribución de magnesio total ( $Mg_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



**Figura 25.** Mapa de distribución de calcio intercambiable (Cai) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



**Figura 26.** Mapa de distribución de calcio total ( $Ca_T$ ) en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana (RP).



**Figura 27.** Distribución de frecuencia de los residuales en función de la distribución normal con media nula para las variables potasio, magnesio y calcio (K, Mg y Ca) intercambiable y total en manejo prístino y agrícola.

## CONSIDERACIONES FINALES

La actividad agrícola originó cambios en la disponibilidad y variabilidad espacial de  $K_i$ ,  $Ca_i$ ,  $Mg_i$ , SB y  $Ca_T$  en suelos de la RP. Dicha actividad redujo en mayor medida el  $K_i$  (-34%) y en menor medida el  $Mg_i$  (-19%). A su vez el  $K_i$  fue el único catión que presentó interacción situación de manejo\*clúster, lo que, sumado a la gran variación espacial, demuestra que su comportamiento está muy asociada a prácticas de manejo zonales como rotaciones de cultivo. Sin embargo, a pesar de la disminución en su concentración, todos los cationes se encuentran en el rango de alto a muy alto según lo reportado internacionalmente.

Los resultados de este trabajo sugieren que la capacidad de reposición de Ca y Mg sería menor para la zona norte de la RP (clúster 2) dado que fue la que mostró menor relación total/intercambiable. Esto no sería así para el K, dado que la región sur y este de la RP (clúster 3) fue la que mostró la menor relación total/intercambiable de este catión. Los resultados concernientes al Ca y Mg son novedosos para la Argentina. Para el caso del K existen varios antecedentes sobre suelos de la RP en los que se estudiaron diversas fracciones de este elemento y se realizaron análisis de su distribución espacial en relación con los materiales parentales de los suelos; sin embargo este es el primer estudio sobre el contenido total e intercambiable en suelos prístinos y bajo cultivo que abarca el conjunto de la RP. Los resultados obtenidos son inéditos para la Argentina e indican que los potenciales problemas de deficiencia de Ca, Mg y K en el mediano a largo plazo difieren según zona y que esta diferencia está dada por variación de los contenidos totales (más relacionados a la naturaleza del material madre y dinámica del nutriente en el suelo) y al tipo de cultivo predominante por su influencia en la extracción de cada nutriente.

## CONCLUSIONES

- 1) No hay evidencias suficientes para rechazar la Hipótesis 1, ya que la disponibilidad de  $K_i$  se redujo más que la de  $Ca_i$  y  $Mg_i$ .
- 2) Hay evidencias suficientes para rechazar parcialmente la hipótesis 2, ya que, si bien la variabilidad espacial de  $K_i$  fue mayor a la de  $Ca_i$  y  $Mg_i$ , esta última fue mayor que la de  $Ca_i$ .
- 3) No hay evidencias suficientes para rechazar la hipótesis 3, ya que CT y la relación CT/FI mostraron variabilidad según zonas.

## BIBLIOGRAFÍA

- BARBAZÁN, M.; BAUTES, C.; BEUX, L.; BORDOLI, M.; CANO J. D.; ERNST, O.; GARCÍA A.; GARCÍA F.; QUINCKE, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*. 15(2): 93-99.
- BARBAZAN, M.M.; CONTI, M.E.; GARCÍA, F.O. 2014. Potasio. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos*. INTA. EEA. Balcarce. Balcarce, Argentina. pp. 265-285.
- BEAR, F. E.; TOTH, S. J. 1948. Influence of calcium on availability of other soil cations. *Soil Science*. 65(1):69-75.
- BORDOLI, J. M.; MALLARINO, A. P. 1998. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. *Agronomy Journal*. 90(1): 27-33.
- BORUVKA, L.; KOSÁK, J. 2001. Geostatistical investigation of a reclaimed dumpsite soil with emphasis on aluminium. *Soil & Tillage*. 59: 115-126.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. pp 311-358.
- CAMILIÓN, M.C.1993. Clay mineral composition of pampean loess (Argentina). *Quaternary International*. 17: 27-31.
- CARVALHO, D. F. D. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agricola*. 66(3): 338-352.
- CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O.; MOTA, L. D. S.; ANJOS, L. H. C. D.; CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERBALDO, J. M. G. 2004. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(6): 1014-1015.
- CHAPMAN, H. D. 1965. Cation-exchange capacity 1. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties, (methodsofsoilanb). ASA, CSSA, SSSA Madison, WI. *Agronomy Monograph* 9.2 pp. 891-901.
- CIAMPITTI, I.A.; GARCÍA, F.O. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Cereales, Oleaginosos e Industriales*. [en línea] IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina. <<http://lacs.ipni.net/article/LACS-1081>> [consulta: 5 de mayo de 2018].
- CONTI, M.E.; GARCÍA, F.O. 2006. Potasio. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos*. INTA. EEA Balcarce, Buenos Aires, Argentina. pp. 123-137.
- CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERBALDO, J. M. G. 2004. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28:1013-1021.

- CORRENDO, A.; RUBIO, G.; CIAMPITTI, I. A.; GARCÍA, F. O. 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- CRUZATE, G.; CASAS, R. 2003. Balance de nutrientes. *Revista Fertilizar INTA*.8: 7-13.
- CRUZATE, G.A.; RIVERO, E. 2008. Potasio, calcio y magnesio: mapas de disponibilidad en distintos suelos de la republica argentina. 21º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas. San Luis.
- DING, Y.; LUO, W.; XU, G. 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. *Annals of Applied Biology*. 149(2): 111-123.
- DURÁN, A.; MORRÁS, H.; STUDDERT, G.; LIU, X. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chinese Geographical Science*. 21(5): 511.
- ECKERT, D.J.; MCLEAN, J. 1981. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops: I. Growth chamber studies. *Agronomy Journal* 73:795–799.
- FLORES, C.C.; SARANDÓN, S. 2003. ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de agriculturización en la Región Pampeana Argentina, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*. 105 (1): 52-67.
- FONTANETTO, H.; GAMBAUDO, S.; ALBRECHT, J.; SILLÓN, M. 2012. Fertilización con calcio en soja en la región central de Santa Fe. Actas 23º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, abril 16-20, 2012.
- GALANTINI, J. A.; SUÑER, L. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*. 25(1):41-55.
- GALLET, S.; JAHN, B. M.; LANOË, B. V. V.; DIA, A.; ROSSELLO, E. 1998. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*. 156(3-4): 157-172.
- GARCÍA, F.J. 2004. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Revista Ecosistemas*. 13(1): 78-86.
- GARCÍA, F.O.; GONZÁLEZ SANJUAN, M.F. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 48:1-5.
- GELATI, P.R.; VÁZQUEZ, M.E. 2008. Extracción agrícola de bases en el norte de la provincia de Buenos Aires, Argentina: costo de su remediación e implicancias económicas. *Revista iberoamericana de Economía Ecológica*. 7:117-129.
- GHIRI, M. N.; ABTAHI, A.; OWLIAIE, H.; HASHEMI, S. S.; KOOHKAN, H. 2011. Factors affecting potassium pools distribution in calcareous soils of southern Iran. *Arid Land Research and Management*. 25(4):313-327.

- GIRÓN, P.; MACCHIAVELLO, A.; BARRACO, M.; OTTAVIANO, C.; FERRO, D. A.; VÁZQUEZ, M. 2016. Aplicación de correctores básicos y fertilizantes cálcicos/magnésicos en el cultivo de soja. 25º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, jun 27-jul 1, 2016.
- GOOVAERTS, P. 2001. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*. 103(1-2): 3-26.
- GRANSEE, A.; FÜHRS, H. 2013. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*. 368(1-2): 5-21.
- GRIMME, H. 1978. Wurzelsystem und Nährstoffanlieferung. *Kali-Briefe*. 14(2): 79-89.
- HABY, V.A.; RUSSELLE, M.P.; SKOGLEY, E.O. 1990. Testing soils for potassium, calcium, and magnesium In: Westerman, R.L. (ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3<sup>rd</sup>. ed. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin. SSSA Book Ser. 3. pp. 181-227.
- HAVLIN, J.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.. 2005. *Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management*. Pearson, New Jersey, USA. pp 199-243.
- HELMKE, P. A.; SPARKS, D.L. 1996. Beryllium, Magnesium, calcium, Strontium, and Barium. In: Sparks, D.L. (ed.). *Methods of soils Analysis. Chemical Methods*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. SSSA Book Series 5.3 pp. 575-602.
- HENRÍQUEZ, C.; KILLORN, R.; BERTSCH, F.; SANCHO, F. 2005. La geostatística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging. *Agronomía Costarricense*. 29(2):73-81.
- HEREDIA, O. S.; CRUZATE, G. A.; ROTONDARO, R. 2012. Estado actual del calcio en suelos pampeanos. *Actas 23º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 16 al 20 de abril 2012.
- HEUVELINK, G.B.M.; WEBSTER, R. 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*. 100(3): 269-301.
- IMBELLONE, P.A.; TERUGGI, M.E. 1993. Paleosols in loess deposits of the Argentine Pampas. *Quaternary International*. 17:49-55.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. R. 1989. *Applied geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 p.
- JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*. 53(1): 51-77.
- KIRKMAN, J. H.; BASKER, A.; SURAPANENI, A.; MACGREGOR, A. N. 1994. Potassium in the soils of New Zealand a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 37(2): 207-227.

- KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Science Society of America Journal*. 71(2):259-265.
- KRÖHLING, D. M. 1999. Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa, Argentina. *Quaternary International*. 62(1): 49-55.
- LINDSAY, W.L. 1979. *Chemical equilibrium in soils*. John Wiley and Sons. New York. pp. 34-49.
- LOSINNO, B. N.; CONTI, M. E. 2005. Evolución espacial y temporal de potasio en 30 años de agricultura continúa en el noreste de la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 26: 23-24.
- MALLARINO, A. P.; BORGES, R. 2006. Phosphorus and potassium distribution in soil following long-term deep-band fertilization in different tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*. 70(2):702-707.
- MALLARINO, A.P.; WITTRY, D. J. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agriculture*. 5(2):131-144.
- MANZANAL, M. 2017. Territorio, Poder y Sojización en el Cono Sur latinoamericano: El caso argentino. *Mundo Agrario*. 18(37): 00-00.
- MARTIN, H. W.; SPARKS, D. L. 1985. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 16(2):133-162.
- MAYLAND, H. F.; WILKINSON, S. R. 1989. Soil Factors Affecting Magnesium Availability in Plant-Animal Systems: A Review 1. *Journal of Animal Science*. 67(12):3437-3444.
- MCLEAN, E.O.; HARTWIG, R.C.; ECKERT, D.J.; TRIPLETT, G.B. 1983. Basic cation saturation ratios as a basis for fertilizing and liming agronomic crops: II. Field studies. *Agronomy Journal*. 75:635-639.
- MENGEL, K. 2007. Potassium. *Hand book of plant nutrition*. In: Barker A V; Pilbeam D J (eds.). Taylor and Francis, New York, pp.91-120.
- MINISTERIO de Agroindustria de La Nación. 2018. Datos Abiertos Agroindustria [en línea] <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> [consulta 6 de julio de 2018].
- MORÓN, A. 2000. Alfalfa: Fertilidad de suelos y estado nutricional en sistemas agropecuarios de Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 8:1-6.
- MORRÁS, H, 1999. Geochemical differentiation of Quaternary sediments from the Pampean Region based on soil phosphorous contents as detected in the early 20th century. *Quaternary International*. 62:57-67.

- MORRÁS, H. 1996. Diferenciación de los sedimentos superficiales de la región pampeana en base a los contenidos de fósforo y potasio. Acta 6º. Reunión Argentina de Sedimentología 16 al 27 de mayo de 2016.
- MORRAS, H. J. 2003. Distribución y origen de sedimentos loessicos superficiales de la pampa norte en base a la mineralogía de arenas: Resultados preliminares. Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología. 10(1):54-64.
- MORRÁS, H.; CRUZATE, G. 2001. Origen y distribución del potasio en suelos de la Región Chaco Pampeana Norte (Argentina). Actas 1º Simposio FAUBA-IPI-Fertilizar INTA, 20 al 21 de noviembre 2001.
- MOSCATELLI, G.; LUTERS, L. A.; GÓMEZ, L. A.. 2001. Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina. .En: El potasio en sistemas agrícolas argentinos. Actas del 10 Simposio FAUBA-IPI-Fertilizar INTA. Buenos Aires, Argentina, 20 y 21 de noviembre de 2001. INTA. EEA Pergamino, pp.13-19.
- MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: Pierce F. J.; Sadler, E. J. (eds.) The state of site specific management for agriculture ASA/CSSA/SSSA: Madison, Wi. pp 1-18.
- ÖBORN, I.; ANDRIST-RANGEL, Y.; ASKEKAARD, M.; GRANT, C. A.; WATSON, C. A.; EDWARDS, A. C. 2005. Critical aspects of potassium management in agricultural systems. Soil Use and Management. 21(1): 102-112.
- ODERIZ, A.; MERANI, V.; MILLÁN, G.; BARIDÓN, E.; PELLEGRINI, A.; VÁZQUEZ, M. 2012. Encalado de alfalfa en un Hapludoléntico de Trenque Lauquen (Buenos Aires). Actas 23º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 16 al 20 de abril 2012.
- OLEA, R. A. 2009. A practical primer on Geostatistics. : U.S. Geological Survey Open-File Report 2009–1103, 346 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20091103>.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. 2014. Tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. Catena. 113: 56-69.
- PANIGATTI, J. L. 2010. Argentina: 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA: Buenos Aires. pp 34-158. .
- PICONE, L.A. 2014. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.) INTA. EEA Balcarce: Balcarce, Argentina. pp. 31-158.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; R CORE TEAM. 2016. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-117. [en línea] < <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>>.[consulta: Febrero 2018 ].
- PRYSTUPA, P.; SALVAGIOTTI, F.; FERRARIS, G.; BOEM, F. G.; ELISEI, J.; COURETOT, L. 2004. Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y potasio en cultivos de maíz en la pampa ondulada. INPOFOS Informaciones Agronómicas. 23: 1-4.

- QGIS Development Team. 2009. Quantum Gis Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>
- QUIROGA, A.R.; STUDDERT, G. A. 2014. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.) Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos. INTA: EEA Balcarce. Balcarce, Argentina. pp. 73-100.
- R CORE TEAM. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. [en línea] <<http://www.R-project.org>>. [consulta: Febrero 2018].
- RAMOS, M.; COTS-FOLCH, R.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. 2007. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: A multivariate analysis. *Geoderma*. 142(3-4): 251-261.
- RENGEL, Z. 1992. Role of calcium in aluminium toxicity. *New Phytologist*. 121: 499-513
- RÖMHELD, V.; KIRKBY, E.A. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. *Plant and Soil*. 335(1-2):155-180.
- SAINZ ROZAS, H. R.; ECHEVERRIA, H. E.; ANGELINI, H. P. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del Suelo*. 29(1): 29-37.
- SAINZ ROZAS, H.; EYHERABIDE, M.; ECHEVERRÍA, H.E.; BARBIERI, P.; ANGELINI, H.; LARREA, G.E.; FERRARIS, G.; BARRACO, M. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Simposio Fertilidad 2013.
- SAWYER, J. E.; MALLARINO, A. P.; KILLORN, R.; BARNHART, S. K. 2002. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. Pm-1688 (rev.). Iowa State University Extension and Outreach: Ames, Iowa. 12p.
- SAYAGO, J. M. 1995. The Argentine neotropical loess: an overview. *Quaternary Science Reviews*. 4(7-8): 755-766.
- SCHOLLENBERGER, C.J.; SIMON, R.H. 1945. Determination of Exchange Capacity and Exchangeable Bases in Soil-Ammonium Acetate Method. *Soil Science*. 59: 13-24.
- SCOPPA, C. 1976. Mineralogía de suelos. *IDIA Suplemento* 33: 659-673.
- SENBAYRAM, M.; GRANSEE, A.; WAHLE, V.; THIEL, H. 2016. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant–soil continuum. *Crop and Pasture Science*. 66(12):1219-1229.
- STEWART, R.N.; PURUCKER, S. T. 2014. SADA: a freeware decision support tool integrating GIS, sample design, spatial modeling, and risk assessment. [en línea] <[https://www.researchgate.net/publication/255586959\\_SADA\\_A\\_Freeware\\_Decision\\_Support\\_Tool\\_Integrating\\_GIS\\_Sample\\_design\\_Spatial\\_Modeling\\_and\\_Risk\\_Assessment](https://www.researchgate.net/publication/255586959_SADA_A_Freeware_Decision_Support_Tool_Integrating_GIS_Sample_design_Spatial_Modeling_and_Risk_Assessment)> [consulta: Julio 2018].

- TAN, D.; JIN, J.; JIANG, L.; HUANG, S.; LIU, Z. 2012. Potassium assessment of grain producing soils in North China. *Agriculture, Ecosystems Environment*. 148: 65-71.
- TERUGGI, M. E. 1957. The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Research*. 27(3): 322-332.
- VÁZQUEZ, M. 2011. Causas de la acidificación en el ámbito templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. Simposio Fertilidad 2011, pp. 13-29.
- VÁZQUEZ, M.; TERMINIELLO, A.; CASCIANI, A.; MILLÁN, G.; GELATI, P.; GUILINO, F.; GARCÍA DÍAZ, J.; KOSTIRIA, J.; GARCÍA, M. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo* 28. (2):141-154.
- VÁZQUEZ, M.; TERMINIELLO, A.; DUHOUR, A.; GARCÍA, M.; GUILINO, F. 2009. Efecto del encalado sobre propiedades físicas de un suelo de la pradera Pampeana: Asociación con propiedades químicas. *Ciencia del Suelo*. 27(1):67-76.
- VAZQUEZ, M.S.; PAGANI, A. 2014. Calcio y magnesio. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos INTA*. EEA. Balcarce Balcarce, Argentina. pp. 317-355.
- WARNCKE, D.; BROWN, J.R. 1998. Potassium and other basic cations. In: Brown, .R. (ed.) *Recommended soil test procedures for the North Central Region*, 3rd ed. Missouri Agricultural Experiment Station, Columbia, MO, pp. 31-33.
- WHITE, J. G.; WELCH, R. M.; NORVELL, W. A. 1997. Soil Zinc Map of the USA using Geostatistics and Geographic Information Systems. *Soil Science Society of America Journal*. 61:185-194.
- ZÁRATE, M. A. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*. 22(18-19):1987-2006.
- ZÁRATE, M. A.; TRIPALDI, A. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research*. 3(4): 401-417.