

Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana

Hernán Sainz Rozas, Mercedes Eyherabide, Gastón Larrea, Nicolás Martínez Cuesta, Hernán Angelini, Nahuel Reussi Calvo y Nicolás Wyngaard

Unidad Integrada INTA-FCA, Balcarce, Buenos Aires

sainzrozas.hernan@inta.gob.ar

Introducción

La producción de granos se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años en la Argentina, pasando de aproximadamente 39 millones de toneladas en 1993 a casi 124 millones de toneladas en la campaña 2016/17. Si bien los consumos de nitrógeno (N) y fósforo (P) se incrementaron en sincronía con el aumento de la producción, la reposición de P y de otros nutrientes siguen siendo inferiores a su extracción en los granos. Solo el 53%, 27%, 1.5% y 0.21% del fósforo (P), calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg) extraídos, respectivamente, se repusieron mediante fertilización desde 1993 hasta 2016 (García, 2017).

Paralelamente, la intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la Región Pampeana. De esta forma, dependiendo del tipo de suelo y textura, hoy en día solo se presenta el 50% del nivel original de MO (Sainz Rozas et al., 2013). El agotamiento de la MO explicaría la respuesta generalizada al agregado de N (Echeverría y Sainz Rozas, 2015), y en menor medida a azufre (S) (Reussi Calvo et al., 2009). Además, si continúa la tendencia declinante de los contenidos de MO es probable que se aceleren los procesos erosivos.

La escasa reposición de los cationes básicos podría afectar directamente el rendimiento de los cultivos e indirectamente a través de la alteración de otras propiedades físico-químicas del suelo relacionadas con el estado de salud de los suelos (materia orgánica, actividad microbiana, densidad aparente, estabilidad de agregados, pH). Durante un relevamiento realizado en 2005 y 2006 y 2010/11 se reportó que los valores más bajos de pH (desde 5,5 a 5,8) se determinaron en la zona norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (Sainz Rozas y Echeverría, 2011). Si bien estos valores de pH determinados no son considerados limitantes para la mayoría de los cultivos (Vázquez

y Pagani, 2015), es de esperar que de continuar esta tendencia sea necesario la aplicación de correctores de acidez en áreas críticas y en cultivos sensibles como la soja. Por otra parte, el K intercambiable (K_i) fue el nutriente que mostró mayor caída respecto de los suelos prístinos (39%, 22% y 19% para K, Ca y Mg, respectivamente). Los menores niveles de K_i se ubicaron al noreste de la región pampeana, mientras que los menores de Ca y Mg al nor-noroeste de la misma (Sainz Rozas et al., 2013). Por lo tanto, es necesario contar con información actualizada de los contenidos de bases intercambiables y de la acidez del suelo, y de su distribución geográfica.

Las deficiencias de micronutrientes (Mn, Fe, Cu y Zn) son menos frecuentes que para el caso de N, P y S en la región pampeana. Sin embargo, el incremento del uso de fertilizantes nitrogenados puede incrementar la exportación de los mismos, tanto por un aumento de su concentración en los granos como por el aumento de los rendimientos (Goldman et al., 2002). Los datos de un relevamiento realizado en 2010/11 en suelos de la región pampeana indican que el micronutriente que mostró la mayor caída por la agricultura fue el Zn (70% menos respecto de la condición prístina). Las áreas de mayores deficiencias se ubicaron al nor-noroeste y suroeste de la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2013). Desde este muestreo a la fecha los rendimientos de los cultivos se han incrementado y con ello la extracción de micronutrientes, lo que hace necesario contar con información actualizada de su disponibilidad en suelos de la región pampeana Argentina.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar los niveles actuales de MO, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de algunos nutrientes (Ca, Mg, K, Zn, Mn, Cu y Fe) en los mismos lotes muestreados en 2011; 2) determinar el cambio de dichas variables entre 2011 y 2018; y 3) elaborar mapas con los resultados actuales y compararlos con aquellos del muestreo realizado en 2011.

Materiales y métodos

Entre julio y septiembre de 2018 se tomaron un total de 570 muestras de suelo de la región pampeana Argentina (latitud: 33°O 23'S a 38° O 47'S, longitud: 57°O 36'O a 63°O 23'O), que abarca las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, La Pampa, Entre Ríos y Córdoba. La **Figura 1** describe los sitios de muestreo y los tipos de suelo predominantes. Casi todos los sitios muestreados (95%) corresponden a los muestreados en 2011. En cada sitio, se tomó una muestra de suelo compuesta (30 sub-muestras por sitio) de la capa de suelo de 0 a 20 cm usando un muestreador de acero inoxidable. Las muestras se secaron al aire, se mezclaron, se tamizaron para pasar una malla de 2 mm y se almacenaron en recipientes de plástico.

Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio del Grupo de Relaciones Suelo-Planta del INTA-FCA Balcarce a partir de muestras secadas a 30°C y tamizadas por 2 mm. Se determinó pH actual (relación suelo:agua de 1:2.5), P-Bray I (Bray and Kurtz, 1945), contenido de materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), CIC y cationes intercambiables extraídos con acetato de amonio 1N a pH 7 (Chapman, 1965; Schollenberger y Simon, 1945). Para la determinación de CIC, K, Ca intercambiable (Ca_i) y Mg intercambiable (Mg_i) se pesaron 2 g de suelo y se lo dejó durante la noche con 20 ml de acetato de amonio 1N (pH=7). La suspensión se filtró y el extracto se usó para determinar los cationes básicos mediante espectroscopia de emisión de llama (para el caso del K) y por absorción atómica para los demás cationes (Shimadzu AA-6200). La disponibilidad de Ki, Cai y Mgi se expresó en mg kg⁻¹ de suelo y meq 100 g⁻¹ de suelo. Las relaciones Ki / (Cai + Mgi) y Cai / Mgi se basaron en datos expresados como meq 100 g⁻¹. Luego del primer filtrado el suelo se lavó dos veces con 20 ml de etanol al 96%. Posteriormente, el NH₄⁺ en el suelo se desplazó utilizando 40 ml de NaCl al 10% y se cuantificó mediante micro-destilación por arrastre de vapor con posterior titulación con H₂SO₄ 0,04 N. Los meq de ácido consumidos son iguales a los meq de N-NH₄⁺ presentes en la muestra, valor que representa la CIC del suelo. Para la determinación de micronutrientes se siguió la técnica propuesta por Lindsay y Norvell (1978). Brevemente, se colocaron 10 g de suelo en un matraz cónico de 125-ml junto con 20 ml del extractante DTPA-TEA solución (pH = 7,3) y tras

agitar durante 2 h la suspensión se filtró a través de un Whatman no. 42 papel de filtro (Melanin Corp., Mobile, AL). Los filtrados fueron analizados utilizando espectrofotometría de absorción atómica (Modelo AA-600, Shimadzu Co., Kyoto, Japón).

Se realizó un análisis de conglomerados (AC) para agrupar suelos con características edáficas similares. Los Clusters se presentan en la **Figura 2**. Para cada Cluster, variable y fecha de muestreo (2011 o 2018), se compararon los valores medios de los suelos prístinos y agrícolas. El paquete estadístico R Commander versión 2.5-2. (Fox, 2017) se utilizó para todas las determinaciones estadísticas.

Los mapas se realizaron mediante el programa ESRI ArcMap con el valor de cada variable edáfica asociado a su posición geográfica. El método de interpolación utilizado fue el que mejor se ajustó al comportamiento de la semivarianza. Para que los resultados sean comparables, los rangos de disponibilidad utilizados en los mapas fueron los mismos que en el muestreo realizado en 2011.

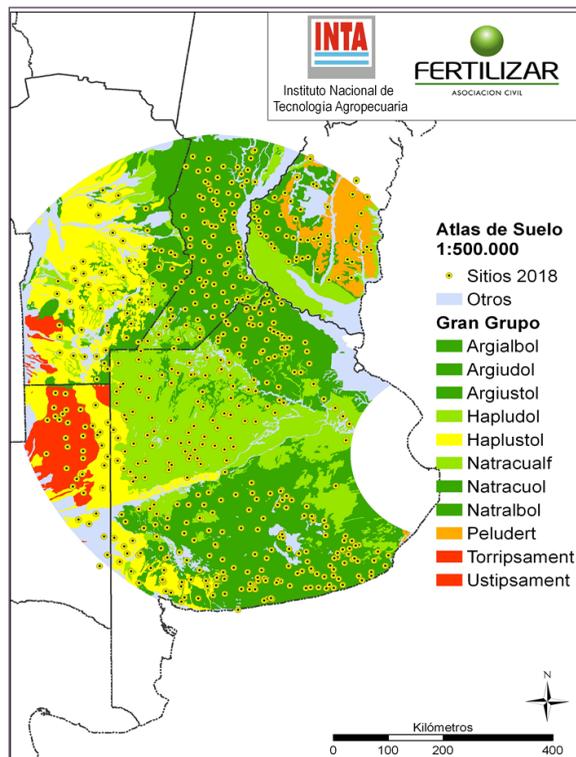


Figura 1. Mapa indicando los sitios de muestreos y los principales grandes Clusters de suelos.

Resultados y discusión

Materia orgánica

Excepto en el Cluster 3 (sureste y suroeste de la provincia de Buenos Aires), la magnitud de los valores de la MO no cambió significativamente entre 2011 y 2018. Sin embargo, los suelos prístinos siempre presentaron mayor MO que los suelos agrícolas (Figuras 3 y 4). El hecho de que la MO no se modificó entre 2011 y 2018 en la región pampeana norte (Clusters 1, 2 y 4) sugiere que se ha alcanzado un nuevo equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de C. Por otro lado, la disminución de la MO en el Cluster 3 entre 2018 y 2011 sugiere que no se ha alcanzado el equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de C en esta área. Otra causa puede deberse al alto

valor de erodabilidad de los suelos en esta área (Piscitelli et al., 2010), que junto con el aumento de escorrentía determinado en los últimos años puede haber producido un aumento del proceso de erosión hídrica (Puricelli, 2019, comunicación personal). La magnitud de la reducción de la MO entre los suelos prístinos y agrícolas varió de 26% a 34% entre Clusters. En términos de concentración de nutrientes, esta disminución de la MO representaría una pérdida de 1176 a 1668 kg/ha para N orgánico y de 98 a 139 kg/ha para azufre orgánico. Estos resultados explican la respuesta generalizada al N y la respuesta frecuente y creciente a la fertilización con S en la región pampeana.

El patrón de MO fue el mismo en suelos prístinos y agrícolas, esto es: la MO disminuyó desde el sureste hacia el noroeste de Pampas (Figura 4). A escala regional, el nivel de MO en suelos prístinos está determinado por el clima, que regula la magnitud de las entradas de carbono (biomasa) y las salidas (respiración microbiana) en el sistema del suelo (Álvarez y Steinbach, 2006). El menor contenido de MO en el área occidental que en el este, está determinado por una menor precipitación anual, mientras que la disminución de norte a sur es una consecuencia de la menor temperatura. Otro factor que puede explicar el gradiente de MO de este a oeste es la textura, ya que las arcillas del suelo (más abundantes en el área este) protegen a la MO de la descomposición microbiana, favoreciendo la acumulación de MOS (Six et al., 2002).

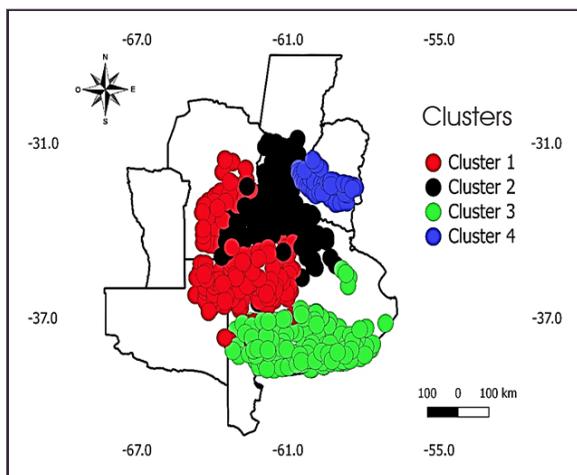


Figura 2. Clusters o subregiones con suelos de características similares surgidos del análisis de conglomerados.

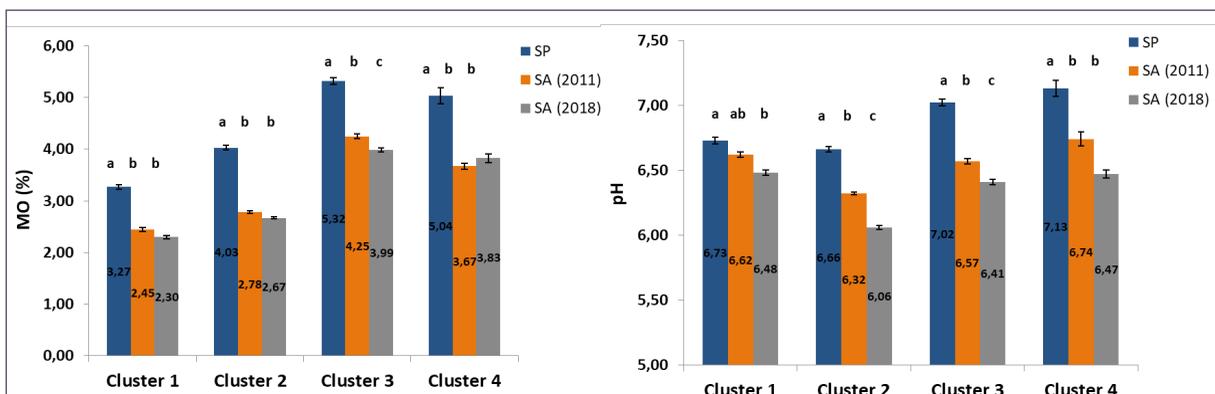


Figura 3. Análisis estadístico de la media de MO y pH para cada Cluster o subregión. SP: suelos prístinos; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2011; SA (2018): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2018. Dentro de un Cluster letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

Acidez del suelo

El pH del suelo tendió a disminuir con el tiempo, ya que la mayoría de los sitios presentaron diferencias significativas entre los suelos prístinos y los suelos agrícolas muestreados en 2011 o 2018. La mayor acidificación se observó en los Clusters 2, 3 y 4 (Figuras 3 y 5), y puede ser explicado por: i) una mayor exportación de cationes básicos debidos a los mayores rendimientos de cultivos y a la frecuencia del monocultivo de soja, y ii) la presencia de horizontes texturales B, que determinan que la extracción de bases se limita principalmente a las contenidas en el horizonte superficial (Correndo et al., 2011). Otros factores que pueden explicar la mayor acidificación, principalmente en el Cluster 2, es la menor capacidad buffer de los suelos por su bajo contenido de MO, una mayor historia de uso de fertilizantes con N y la mayor extracción de cationes básicos con respecto a los suelos de otras áreas (Cruzate y Casas, 2012). En el muestreo del 2011, un 30% de los suelos muestreados mostró valores de pH por debajo de 6,26, mientras que, en 2018, un 44% de los suelos mostraron valores de pH por debajo de 6,17 (Figura 6). Un estudio de suelos realizado en 2005-2006 en la región pampeana (n = 30000) determinó que el pH en los suelos agrícolas oscilaba entre 6 y 7,5 (Sainz Rozas et

al., 2011). La comparación de estos resultados con los actuales y con los del muestreo de 2011, demuestra una tendencia decreciente en los valores de pH.

En algunas áreas del norte y este de la región pampeana Argentina, los valores de pH pueden llegar a ser limitantes para las leguminosas y para la actividad microbiana, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes. En este sentido, en suelos con contenidos similares de N en el pool orgánico lábil, Divito et al. (2011) determinaron que la cantidad de N liberada durante una incubación anaeróbica del suelo varió de 63 a 78 mg kg⁻¹ para valores de pH de 5.3 y 5.8, respectivamente. Además, a valores de pH inferiores a 5, la concentración de aluminio (Al) intercambiable aumentaría (Brady y Weil, 2008), el cual por hidrólisis reduciría aún más los valores de pH del suelo. Si bien las tendencias regionales sugieren que la acidez podría limitar la producción de cultivos en estas áreas, la determinación del pH para evaluar una posible respuesta al encalado del suelo se debe realizar a nivel de lote.

Tanto la MO como el pH se asociaron positivamente con la CIC del suelo (Figura 7). Estos resultados están en línea con los reportados por Brady y Weil (2008) y sugieren que una mayor disminución en los niveles de pH y MO puede resultar en una mayor pérdida de cationes básicos.

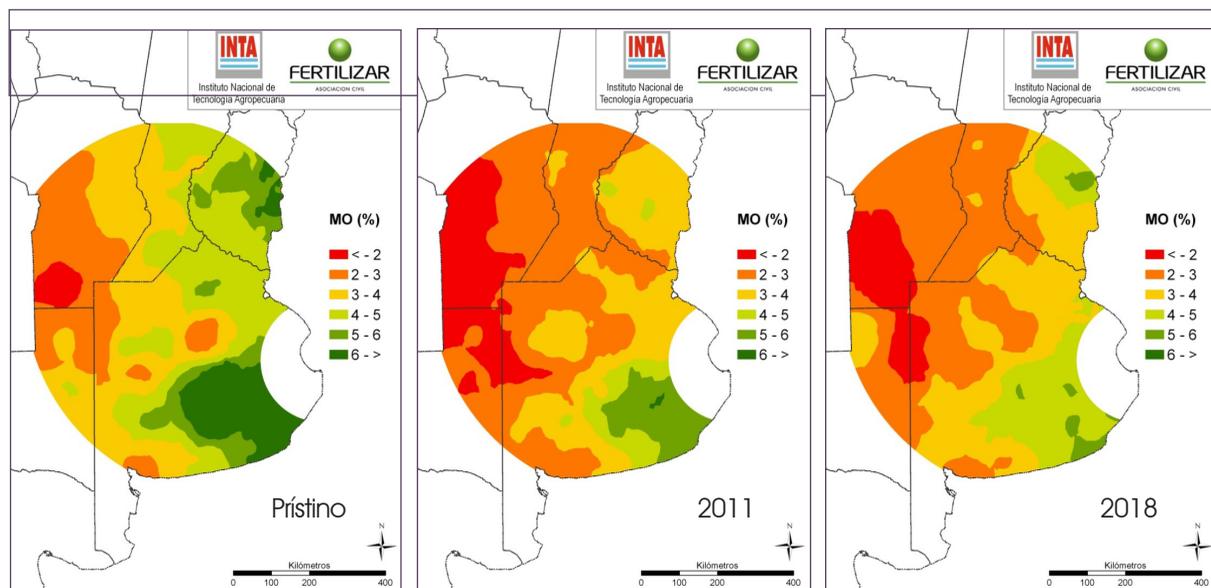


Figura 4. Distribución de los contenidos de materia orgánica (MO) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos prístinos (muestreados en 2011) y con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018. En 2011 y 2018 las muestras se tomaron del mismo lote.

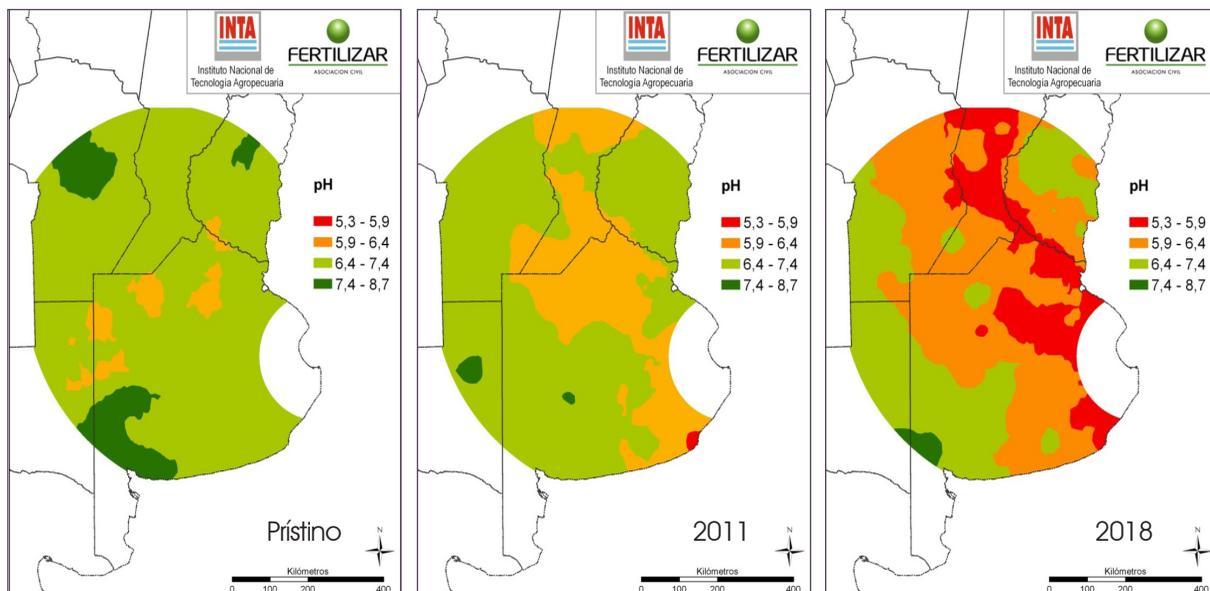


Figura 5. Distribución de valores de pH en la capa superficial (0 a 20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y suelos agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

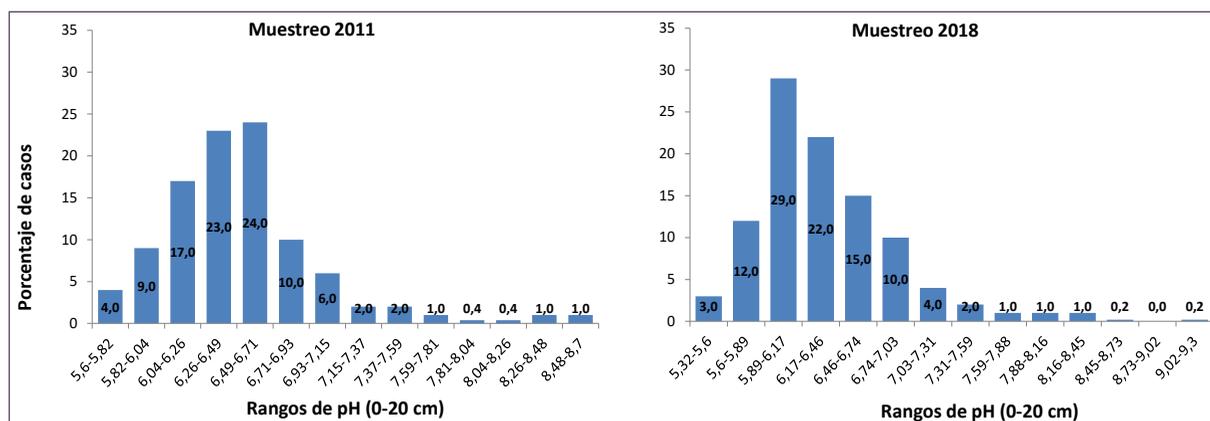


Figura 6. Distribución de valores de pH en agua (relación 1:2,5) en la capa superficial de suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

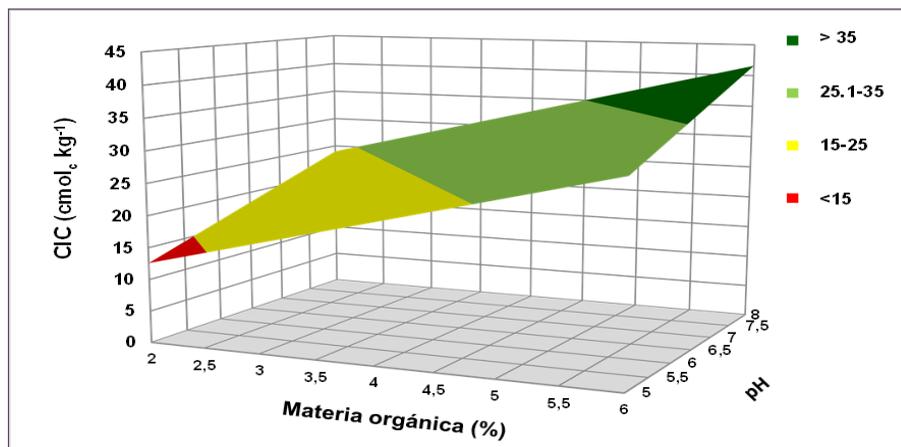


Figura 7. Capacidad de intercambio catiónico en función del contenido de MO y del pH edáfico. $CIC = -15,2 + 4,4 * MO + 3,8 * pH$; $r^2 = 0,50$.

Niveles de fósforo extractable

Salvo en el Cluster 3, los niveles de P extractable (P-Bray) en suelo disminuyeron significativamente entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 (Figura 8). Como puede visualizarse en la Figura 9, el área ocupada con niveles de P-Bray superiores a 15 mg kg⁻¹ se achicó considerablemente entre 2011 y 2018, mientras que en el mismo período creció el área ocupada con niveles de P-Bray entre 10 y 15 mg kg⁻¹ y aparecieron algunas zonas con menos de 10 mg kg⁻¹ en el sur de Santa Fe (Figura 9). El análisis de frecuencia muestra que el porcentaje de lotes con menos de 15,9-16,5 mg kg⁻¹ de P-Bray pasó del 44% en 2011 al 66% en 2018 (Figura 10). Esto sugiere que los balances de P continuaron siendo negativos durante el período evaluado. Si se asume que los umbrales críticos de P-Bray para la mayoría de los cultivos oscilan de 12 a 18 mg kg⁻¹ (García et al., 2015), estos resultados indican que el nivel actual de P-Bray en los suelos de esta vasta región podría ser limitante para la producción de los cultivos.

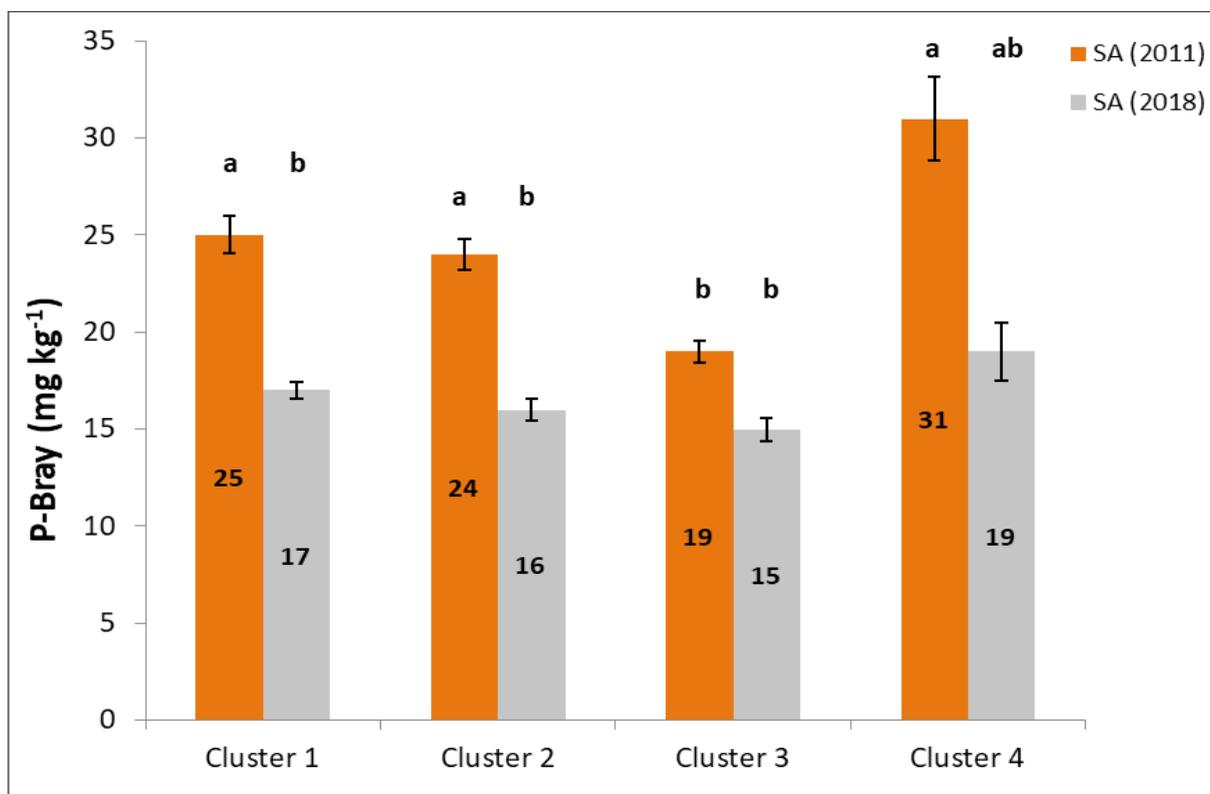


Figura 8. Análisis estadístico de la media de P-Bray para cada cluster o subregión. SA (2011): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2011; SA (2018): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2018. Dentro de un cluster letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

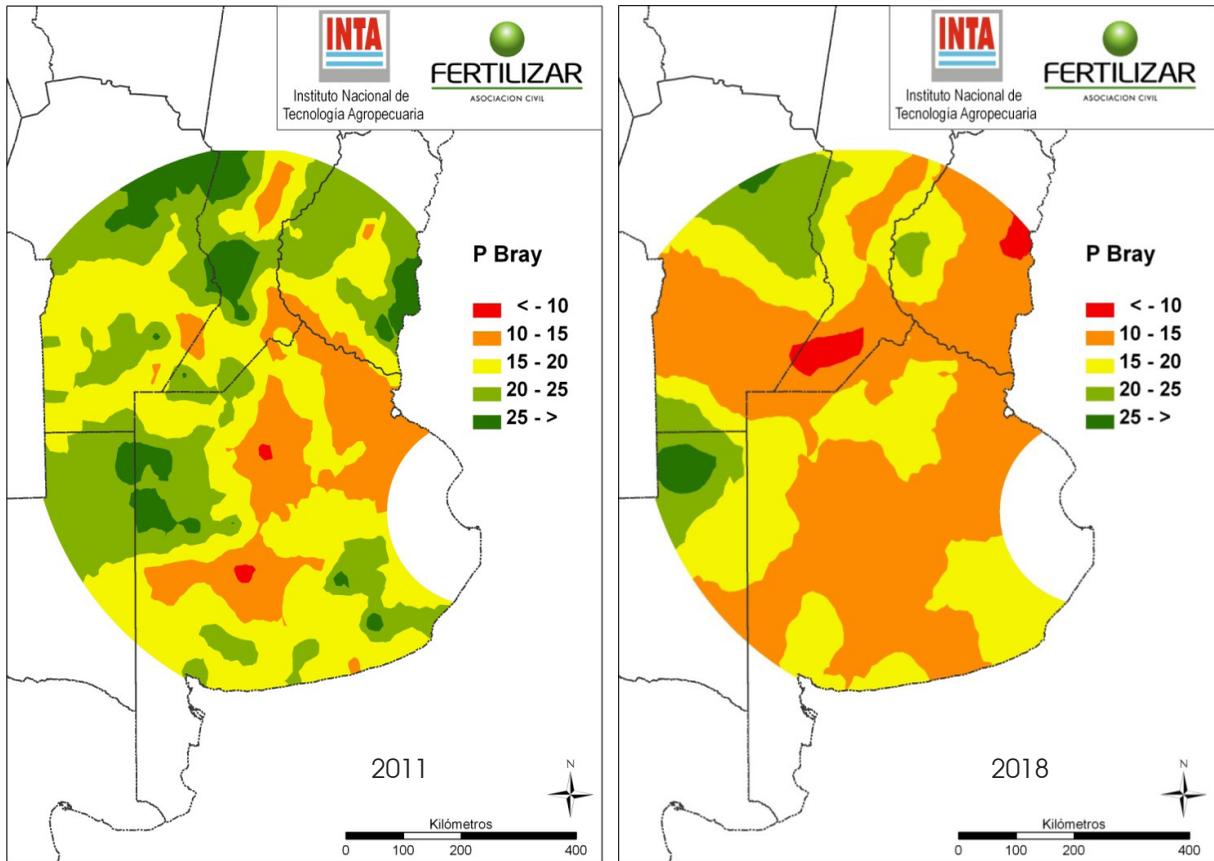


Figura 9. Distribución de los niveles de P-Bray del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

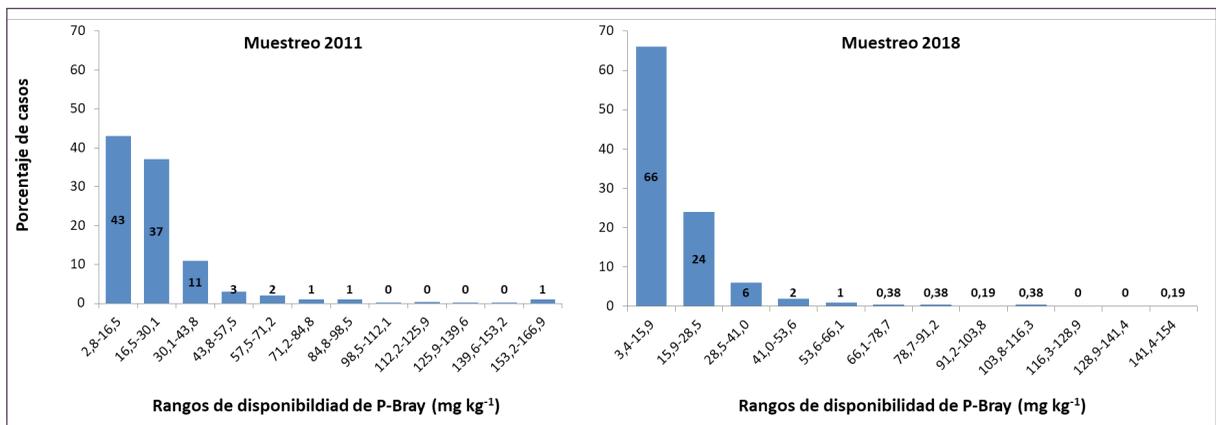


Figura 10. Frecuencia de rangos de valores de P-Bray (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

Bases intercambiables

Los valores de C_{ai} determinados en el último muestreo estuvieron en el rango medio a alto (de 1650 a 3939 $mg\ kg^{-1}$) en la mayoría de los Clusters, y por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). Sin embargo, se observó una tendencia decreciente (-3.9% a -16%) desde 2011 hasta 2018, la cual fue significativa en el Cluster 2. Los valores de C_{ai} determinados en 2018 fueron 19% a 29% más bajos que los observados en suelos prístinos, correspondiendo la mayor disminución al Cluster 2 (Figura 11). La gran disminución de C_{ai} en este Cluster podría ser una consecuencia de la alta frecuencia de soja hasta 2015 en la rotación de cultivos, ya que la extracción de Ca por esta soja es de cinco a seis veces mayor que la del trigo y el maíz (Vázquez y Pagani, 2015).

Los valores de C_{ai} más bajos se observaron en los Clusters 1 y 2 (noroeste y norte de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe; Figura 12). En estas áreas, hay informes sobre la respuesta de la soja y la alfalfa a enmiendas calcáreas (Gambaudo y Fontanetto, 2011; Vázquez et al., 2010; Vázquez, 2011). Si la tendencia C_{ai} observada entre 2011 y 2018 continúa, las deficiencias de Ca podrían generalizarse en el Cluster 2 en aproximadamente 16 años (Tabla 1). Sin embargo, si los valores de MO y pH siguen disminuyendo junto con la CIC, el aumento de las pérdidas de Ca por lixiviación podría acelerarse y, por lo tanto, se podría acortar el tiempo hasta que Ca se vuelva limitante para los cultivos.

Al contrario de lo que se observó para C_{ai} , se determinó una disminución significativa del Mg_i entre las fechas de muestreo de 2011 y 2018 en todos los Clusters. La magnitud de la disminución de Mg_i respecto del 2011 osciló entre 30% y

40%, correspondiendo el mayor valor al Cluster 2, seguidos por los Clusters 1 y 4 (Figura 13). Los valores de Mg_i determinados en el último muestreo estuvieron dentro del rango considerado alto en los Clusters 3 y 4 (de 314 a 350 $mg\ kg^{-1}$), mientras que en los Clusters 1 y 2 los valores informados están por debajo de los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). En el muestreo de 2011, solo el 6% de los lotes evaluados presentaba valores de Mg_i menores a 269 $mg\ kg^{-1}$, mientras que en 2018 el 57% de los lotes evaluados presentaban valores menores a 262 $mg\ kg^{-1}$ (Figura 13).

Las mayores caídas determinadas en los Clusters 1 y 2 pueden estar asociadas a que estas áreas presentan los mayores rendimientos limitados por agua de soja y maíz de la región pampeana. A manera de ejemplo los rendimientos de soja y maíz oscilan de 4,1 a 4,9 $t\ ha^{-1}$ y de 11,6 a 13 $t\ ha^{-1}$, respectivamente (Aramburu Merlos et al., 2015). Estos rendimientos se asocian a niveles de extracción aproximados de Mg en los granos de 12,3 a 14,7 $kg/ha/año$ para soja y de 17,4 a 19,5 $kg/ha/año$ para maíz. Además, el Mg es adsorbido más débilmente por los coloides del suelo que el Ca y, por consiguiente, es más susceptible de ser desplazado por el H^+ y luego lixiviado cuando el suelo se acidifica (Brady y Weil, 2008). Por lo tanto, la acidificación del suelo observada en el Cluster 2 (Figura 5) también puede contribuir a explicar la mayor reducción del Mg_i respecto a otros Clusters.

A nivel regional, los valores más bajos de Mg_i determinados en 2018 se observaron en el Cluster 1 (sur de Córdoba) y 2 (casi toda la provincia de Santa Fe) (Figura 14). De mantenerse las tasas de disminución determinadas entre 2011 y 2018, las zonas donde primero podrían aparecer respuesta más frecuente al agregado de Mg sería la correspondiente al Cluster 2, seguida por el

Tabla 1. Tasa de disminución de cationes intercambiables entre 2011 y 2018 (TD) y años hasta alcanzar el umbral de deficiencia (YD) para los distintos Cluster y/o subregiones de la región pampeana Argentina.

	Nutrientes					
	Calcio		Magnesio		Potasio	
	TD $mg\ kg^{-1}\ año^{-1}$	YD Años	TD $mg\ kg^{-1}\ año^{-1}$	YD Años	TD $mg\ kg^{-1}\ año^{-1}$	YD Años
Cluster 1	18	36	17	8	12	36
Cluster 2	48	16	20	5	13	17
Cluster 3	17	112	19	11	15	32
Cluster 4	81	36	25	10	17	4

Cluster 1 (Figuras 11 y 14; Tabla 1). No obstante, de continuar la tendencia decreciente de los contenidos de MO y del pH de los suelos, el tiempo para alcanzar el umbral crítico podría ser menor debido a que las pérdidas por lavado podrían incrementarse como consecuencia de una disminución de la CIC (Figura 7).

Los valores de K_i estuvieron dentro del rango alto a muy alto en la mayoría de los Clusters (de 285 a 682 mg kg⁻¹) y estuvieron por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (Barbazán et al., 2011; Barbagelata y Mallarino, 2012). Como en el caso del Mg, la disminución de K_i entre 2011 y 2018 fue significativa en todos los Clusters y osciló entre el 12% y el 30%, con las mayores reducciones observadas en los Clusters 2 y 4 (Figura 11). En 2011, solo el 7% de los lotes muestreados tuvieron valores de K_i menores a 310 mg kg⁻¹, mientras que en 2018 el 13% de los lotes mostraron valores menores a 262 mg kg⁻¹ (Figura 15), el cual es levemente superior al umbral crítico informado por Barbagelata y Mallarino (2012).

Como se indicó para Ca y Mg, los Clusters 2 y 4 se caracterizan por la alta frecuencia de la soja en las rotaciones y por presentar suelos con un horizonte B textural, que limita el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes desde ese horizonte. Por lo tanto, en estas subregiones, la absorción de K por los cultivos se limitaría al horizonte A, aumentando la tasa de extracción (Correndo et al., 2011). A manera de ejemplo y para rendimientos potenciales en secanos en dichas zonas de 3,2 a 4,9 t ha⁻¹ para soja y de 10,4 a 13 t ha⁻¹ para maíz (Aramburu Merlos et al., 2015), los niveles de extracción de K en grano varían de 51 a 78 kg/ha y de 31 a 39 kg/ha, respectivamente.

Los valores de K_i más bajos se observaron en el Cluster 4 (provincia de Entre Ríos) y en parte del Cluster 2 (este de Santa Fe) (Figura 15 y 16). Los bajos valores de K_i registrados en el Cluster 4 también se explican por el bajo contenido de K de los materiales parentales que formaron los suelos de esta subregión (Morrás, 2003; Larrea, 2019) y por la mayor tasa de pérdida de K_i causada por la agricultura (Tabla 1). De continuar esta tasa de caída, las deficiencias de K podrían generalizarse en 17 años en el Cluster 2 y en 4 años en el Cluster 4 (Tabla 1). Como se mencionó, esta tasa podría acelerarse si la MO y el pH continúan disminuyendo.

Relación entre cationes

La relación Ca_i+Mg_i/K_i aumentó significativamente de 2011 a 2018 solo en el Cluster 4 (provincia de Entre Ríos), porque la reducción del K_i tuvo una magnitud mayor que la observada para Ca_i (Figuras 11 y 17). Es importante mencionar que los suelos prístinos del Cluster 4 ya presentaron una relación Ca_i+Mg_i/K_i mayor que la ideal, debido al alto contenido de Ca y al bajo contenido de K del material original que formó estos suelos (Morrás, 2003; Larrea, 2019). En los Clusters 1, 2 y 3, a pesar del que el K_i se redujo de 2011 a 2018, la relación Ca_i+Mg_i/K_i no se modificó, ya que las concentraciones de Ca_i y Mg_i también se redujeron durante este período, manteniendo la proporción entre los cationes (Figuras 11 y 17). Estos resultados demuestran que la relación Ca_i+Mg_i/K_i no sería un indicador efectivo de deficiencias de K, ya que el valor relativo de K_i es adecuado para la producción de cultivos, mientras que en algunas regiones el valor absoluto de K_i está cerca del umbral crítico. Kopittke y Menzies (2007) también informaron que la relación Ca_i+Mg_i/K_i no es efectiva como índice nutricional.

La relación Ca_i/Mg_i aumentó de 2011 a 2018 en todos los Clusters (Figura 17). Sin embargo, el valor observado todavía está ligeramente por encima del umbral crítico informado por Vázquez y Pagani (2015). Al igual que en el caso de la relación Ca_i+Mg_i/K_i , el uso de la relación Ca_i/Mg_i puede enmascarar las deficiencias de Mg (Kopittke y Menzies, 2007), ya que la relación fue adecuada en todos los Clusters, pero el Mg_i disminuyó en algunas regiones (Figura 14).

En síntesis, los suelos agrícolas de Argentina mostraron un pequeño incremento de las relaciones Ca_i+Mg_i/K_i y Ca_i/Mg_i , a pesar de que se determinaron importantes disminuciones de K_i y Mg_i entre 2011 y 2018. Por lo tanto, el uso de estas relaciones para el diagnóstico de deficiencias es cuestionable.

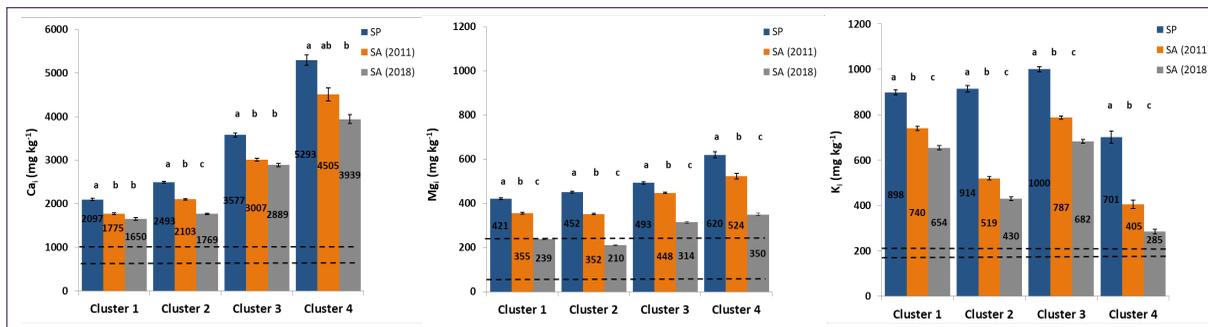


Figura 11. Contenidos de Ca, Mg y K intercambiable (Ca_i, Mg_i y K_i) en los distintos clusters o subregiones en suelos prístinos (SP) o con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 (SA 2011) y en 2018 (SA 2018). Dentro de un cluster columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad. Las líneas horizontales punteadas indican el rango crítico para diferentes cultivos informados por Bundy (2004), Vázquez y Pagani (2015) y Barbagelata y Mallarino (2012).

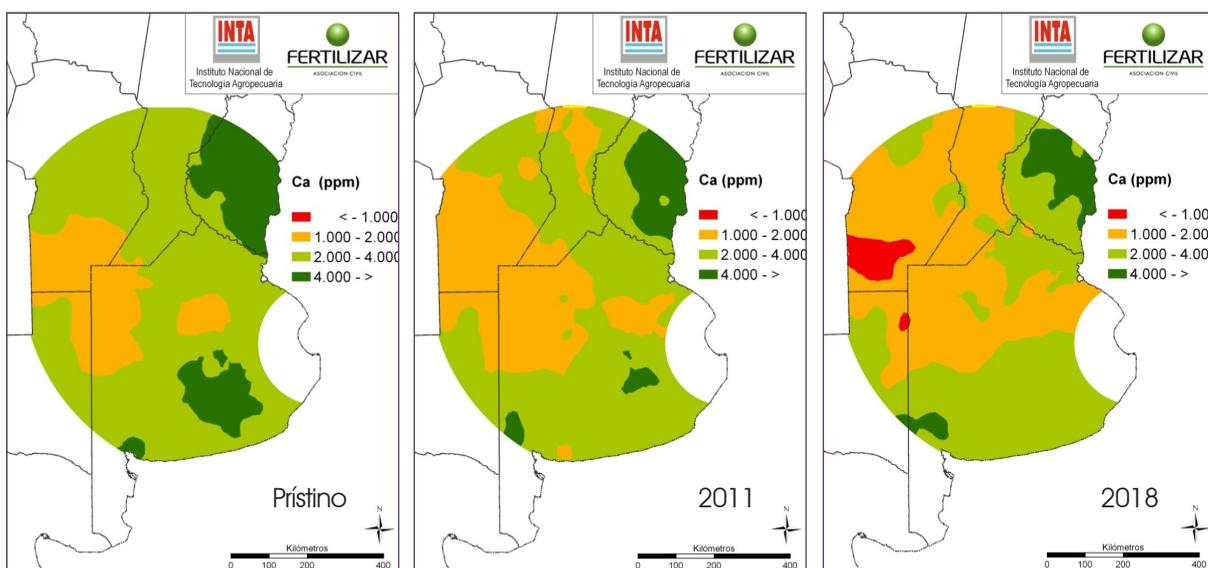


Figura 12. Distribución de los valores de calcio intercambiable (Ca_i) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

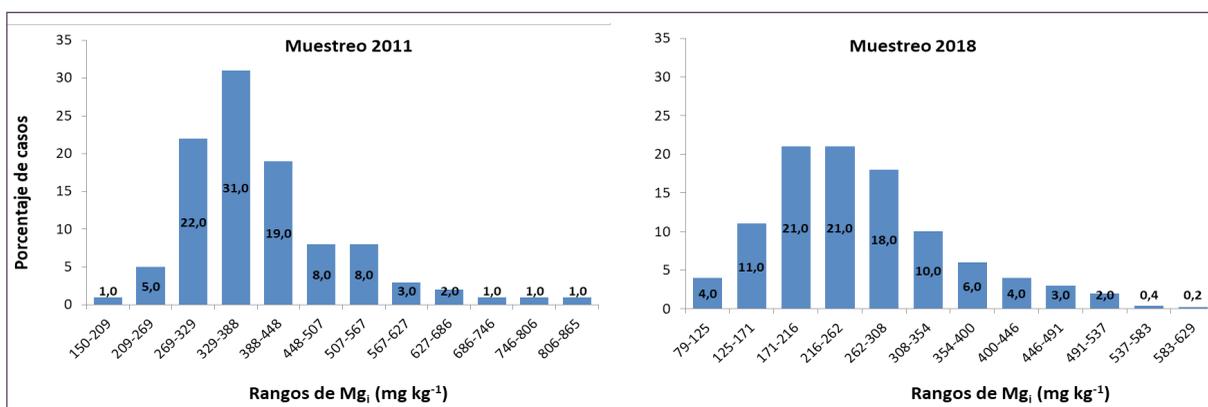


Figura 13. Frecuencia de rangos de valores de Mg intercambiable (Mg_i) (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

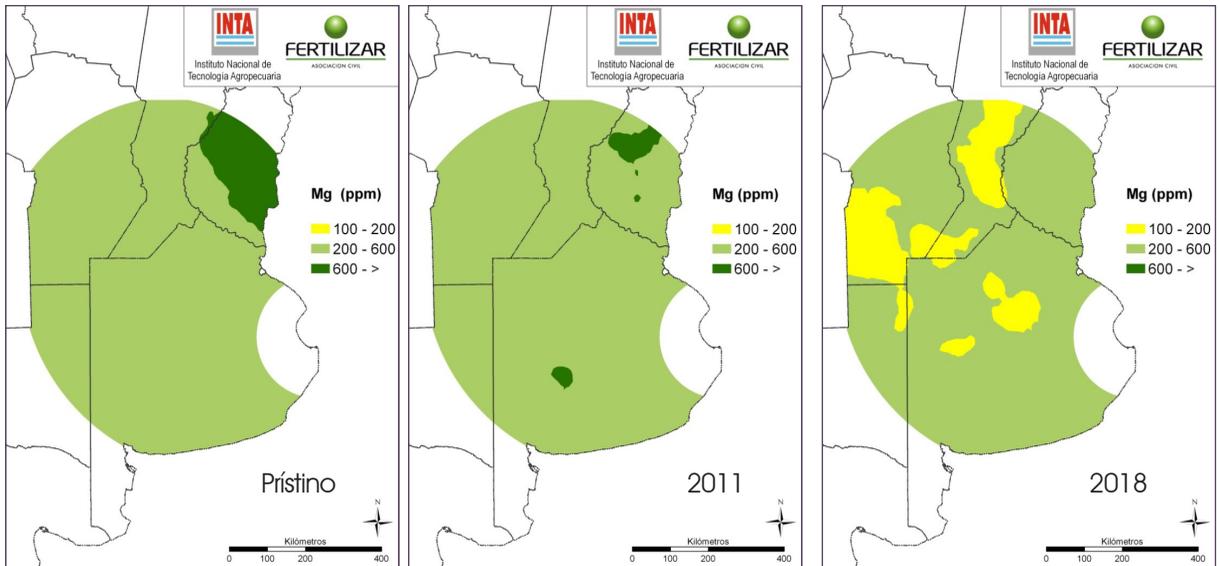


Figura 14. Distribución de los valores de magnesio intercambiable (Mg) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

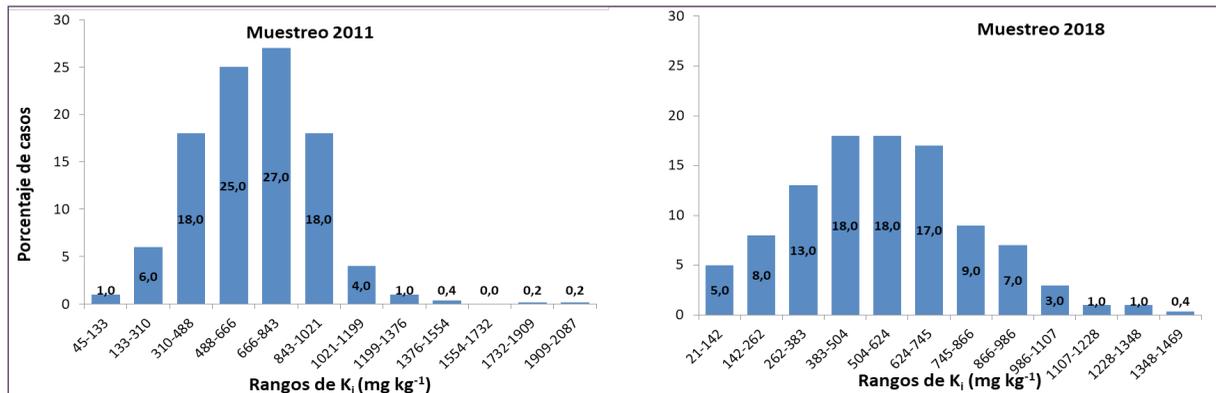


Figura 15. Frecuencia de rangos de valores de K intercambiable (K_i) (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

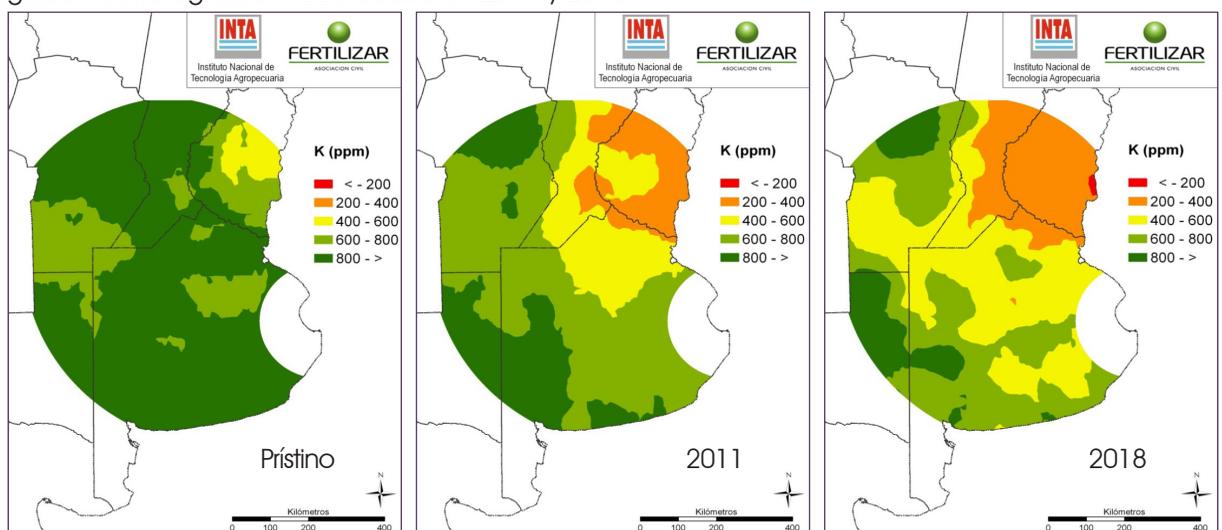


Figura 16. Distribución de los valores de potasio intercambiable (K_i) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

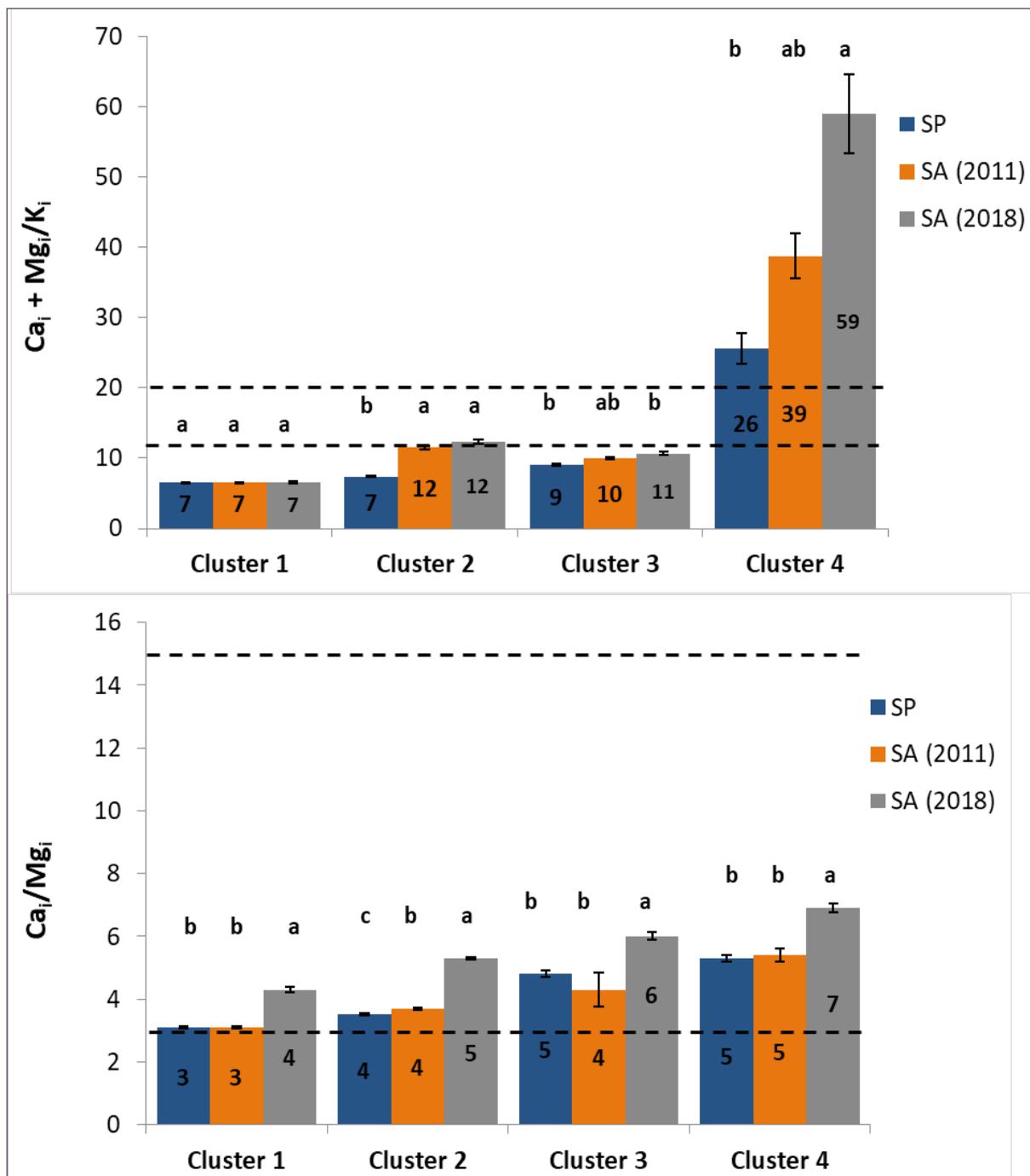


Figura 17. Relación entre los contenidos de Ca, Mg y K intercambiables (Ca_i , Mg_i y K_i) y Ca_i/Mg_i en los distintos clusters o subregiones en suelos prístinos (SP) o con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 (SA 2011) y en 2018 (SA 2018). Dentro de un cluster, columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad. Las líneas horizontales punteadas indican el rango crítico citado por Vázquez y Pagani (2015).

Micronutrientes

Manganeso y hierro

Los valores de Mn extractable con DTPA del muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (34 a 64 mg kg⁻¹) en todos los Clusters o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos (2,5 a 8 mg kg⁻¹) informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims y Johnson, 1991; **Figura 18**). No obstante, se determinó una reducción significativa del contenido de Mn entre el 2011 y 2018, la cual osciló del 40% al 57%. Las tasas de caída variaron de 3,3 a 10 mg kg⁻¹ año⁻¹ (**Figura 18**), por lo que a partir de los contenidos actuales y de los umbrales de respuesta, este micronutriente podría llegar a ser limitante en un rango de tiempo que varía de 4 a 8 años según regiones.

Geográficamente, los suelos con menores valores de Mn se ubicaron al oeste de Buenos Aires y este de La Pampa, donde los suelos pasaron de tener más de 20 mg kg⁻¹ al rango de 10 a 20 mg kg⁻¹ (**Figura 19**). Sin embargo, aún en estas zonas, los valores determinados superan a los umbrales críticos mencionados.

La actividad agrícola no disminuyó los contenidos Fe extractable con DTPA y en algunos Clusters o regiones se observó un mayor valor en los suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018 que en los suelos prístinos (**Figuras 18**), a pesar de que, junto con el Mn, es un micronutriente que presenta elevada extracción en los granos (Torri et al., 2015) y a que la fertilización es muy baja o inexistente. Esto puede deberse a que es uno de los elementos más abundantes en los suelos de la región pampeana (20900 mg kg⁻¹; Lavado y Porcelli, 2000) y a que la acidificación de los mismos (**Figura 5**) promovió el pasaje de formas no disponibles a formas disponibles, ya que se determinó una elevada correlación entre pH y Fe extractable con DTPA ($r = -0,56$). En este sentido, Lindsay (1991) informó que el aumento del Fe soluble por unidad disminución de pH es casi del 60% superior que la del Mn soluble.

Los valores de Fe extractable con DTPA en el muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (46 a 78 mg kg⁻¹) en todos los Clusters o subregiones (**Figuras 18 y 20**) y superan ampliamente a los umbrales críticos (2,5 a 5 mg kg⁻¹) informados por Sims y Johnson (1991).

En síntesis, ambos micronutrientes no serían limitantes para la producción en Molisoles con pH subácido a neutro y solo se podrían esperar deficiencias de los mismos en suelos con contenidos muy bajos de MO con pH alcalinos o en suelos calcáreos.

Cobre y cinc

Los valores de Cu extractable con DTPA del muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (1,2 a 1,9 mg kg⁻¹) en todos los Clusters o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos (0,4 a 0,6 mg kg⁻¹) informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003). Además, la agricultura no produjo una reducción significativa del Cu ya que los suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018, mostraron similares valores que los suelos prístinos (**Figura 21**). Esto puede deberse a que es uno de los micronutrientes catiónicos que presenta menor extracción en grano y a que la disponibilidad de Cu en suelos de la región pampeana es mayor en horizontes sub-superficiales que superficiales (Ratto 2006), los cuales podrían abastecer en gran medida los requerimientos de los cultivos. En ningún área de la región pampeana se determinaron valores por debajo de 0,6 mg kg⁻¹ (**Figura 22**) y, por lo tanto, la respuesta a este micronutriente es poco probable en la mayor parte del área relevada.

La agricultura redujo significativamente la disponibilidad de Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA) respecto de los suelos prístinos entre el 80% y el 86% según Clusters o zonas. Las tasas de caídas variaron de 0,06 a 0,26 mg kg⁻¹ año⁻¹, correspondiendo el mayor valor al Cluster 4 (Entre Ríos; **Figura 21**). En 2011, el 47% de los lotes presentaban valores de Zn-DTPA menores a 1,03 mg kg⁻¹, mientras que en 2018 dicho porcentaje creció al 67% (**Figuras 23**). Considerando que el rango crítico de Zn-DTPA en suelo para el cultivo de maíz es de 0,8 a 1,2 mg kg⁻¹ (Barbieri et al., 2017) y para la soja de 0,51 a 1,27 mg kg⁻¹ (Bustos et al., 2019), una superficie considerable de la región pampeana podría tener suelos deficientes en este nutriente.

Salvo el este y sudeste de Buenos Aires el resto del área presenta valores menores a 1,2 mg kg⁻¹ y las áreas con suelos con concentraciones de Zn-DTPA menores a 0,8 mg kg⁻¹ (de alta probabilidad de respuesta para el maíz y la soja) se ubicaron

en Entre Ríos, casi toda Córdoba, sudoeste y oeste de Bs As y este de La Pampa. Las zonas con respuesta incierta (entre 0,8 y 1,2 mg kg⁻¹) se ubicaron al oeste y noreste de Bs As, gran parte del sur de Santa Fe y sur de Córdoba (Figura 24). Ratto (2006) informó que el contenido de Zn en profundidad disminuye marcadamente en los suelos de la región pampeana Argentina, por lo habría escasa reserva de Zn en los horizontes sub-superficiales, por lo que los cultivos dependerían principalmente de su disponibilidad en el horizonte superficial.

En síntesis, de todos los micronutrientes evaluados hasta el momento el Zn sería limitante en una vasta superficie de la región pampeana. No obstante, estos mapas presentan tendencias regionales y la decisión acerca de fertilizar o no debe surgir de un adecuado muestreo de suelo a nivel de lote.

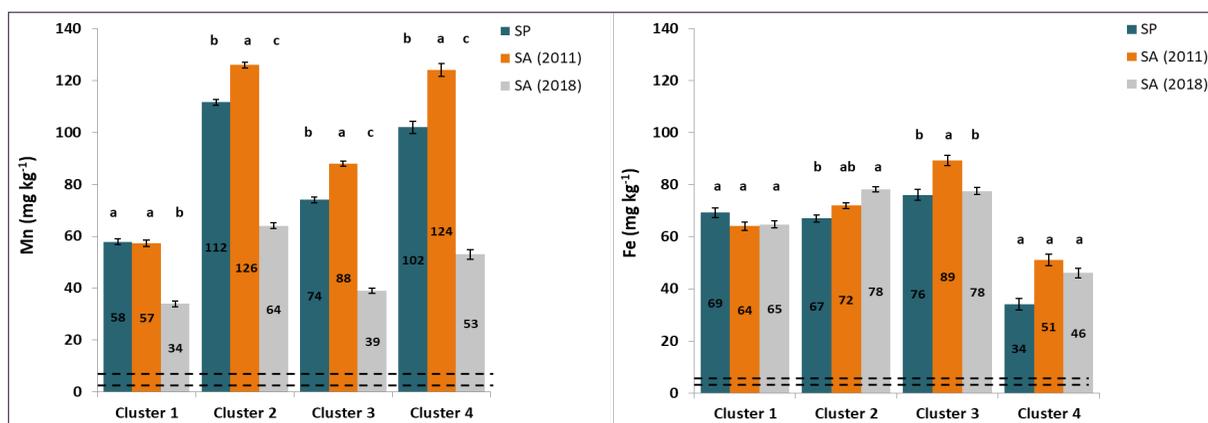


Figura 18. Niveles de manganeso (Mn) y hierro (Fe) extractable con DTPA (0-20 cm) en distintos Clusters o subregiones de la región pampeana Argentina. SP: suelos prístinos muestreados en 2011; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y SA (2018): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018. Líneas horizontales indican rangos críticos o nivel crítico informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims y Johnson, 1991; Meena et al., 2013). Dentro de un cluster columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad.

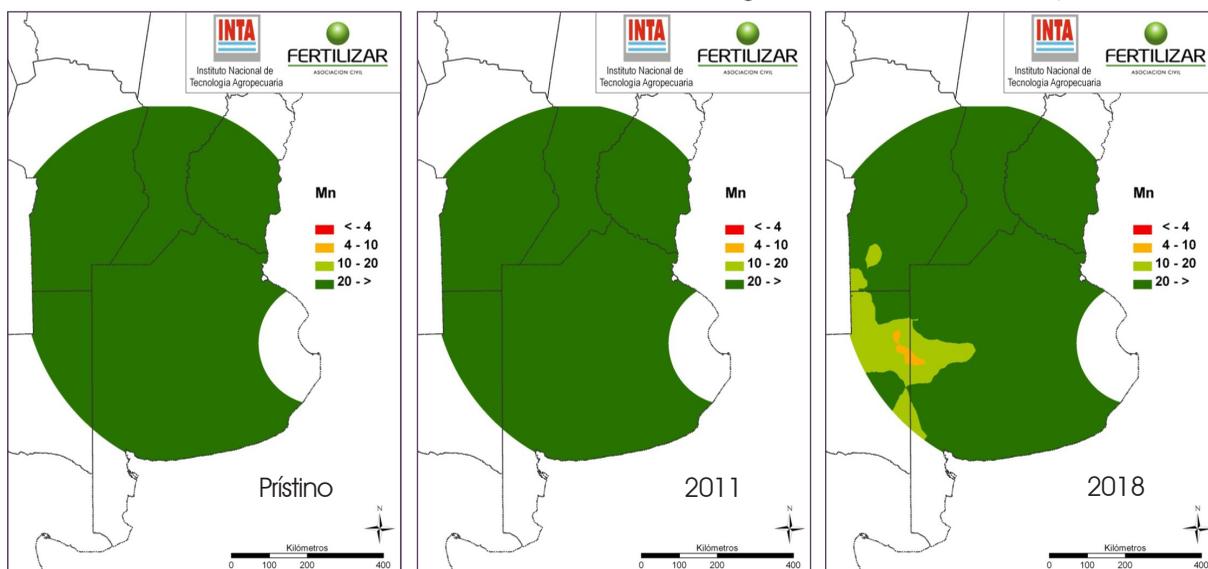


Figura 19. Niveles de Mn extractable con DTPA (mg kg⁻¹; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

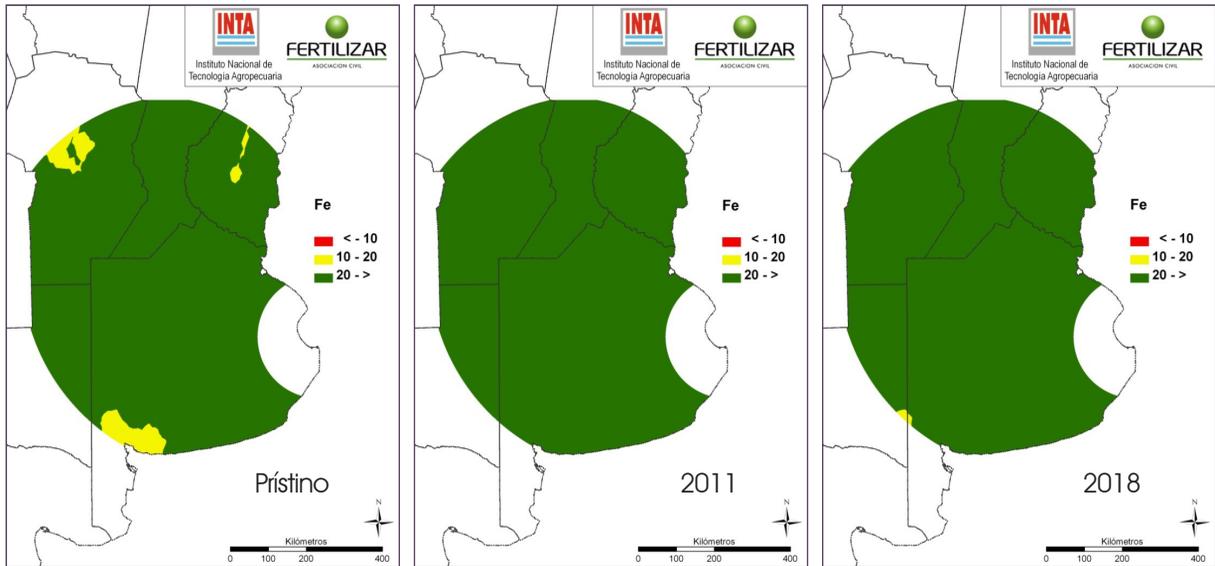


Figura 20. Niveles de hierro (Fe) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

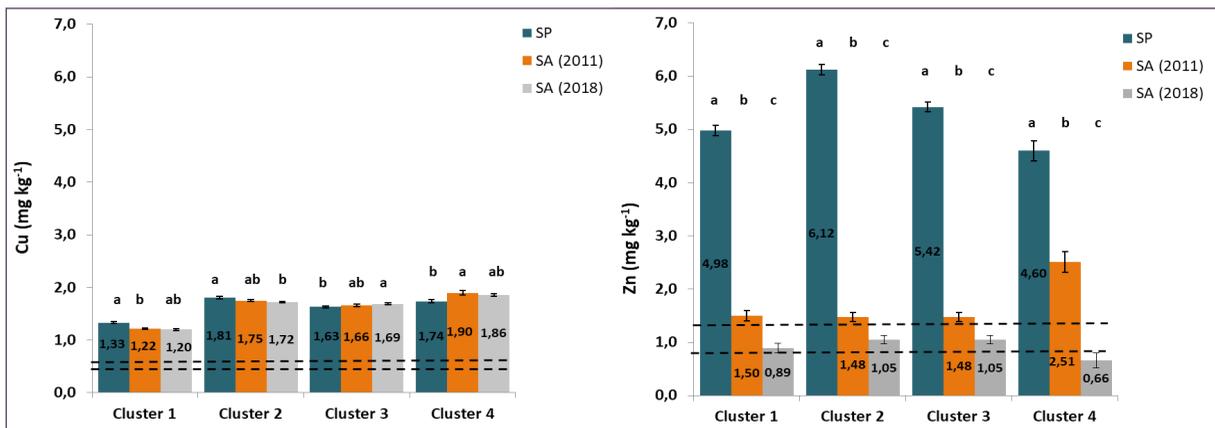


Figura 21. Niveles de cobre (Cu) y cinc (Zn) extractable con DTPA (0-20 cm) en distintos Clusters o subregiones de la región pampeana Argentina. SP: suelos prístinos muestreados en 2011; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y SA (2018): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018. Líneas horizontales indican rangos críticos informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003; Barbieri et al., 2017; Bustos et al., 2019).

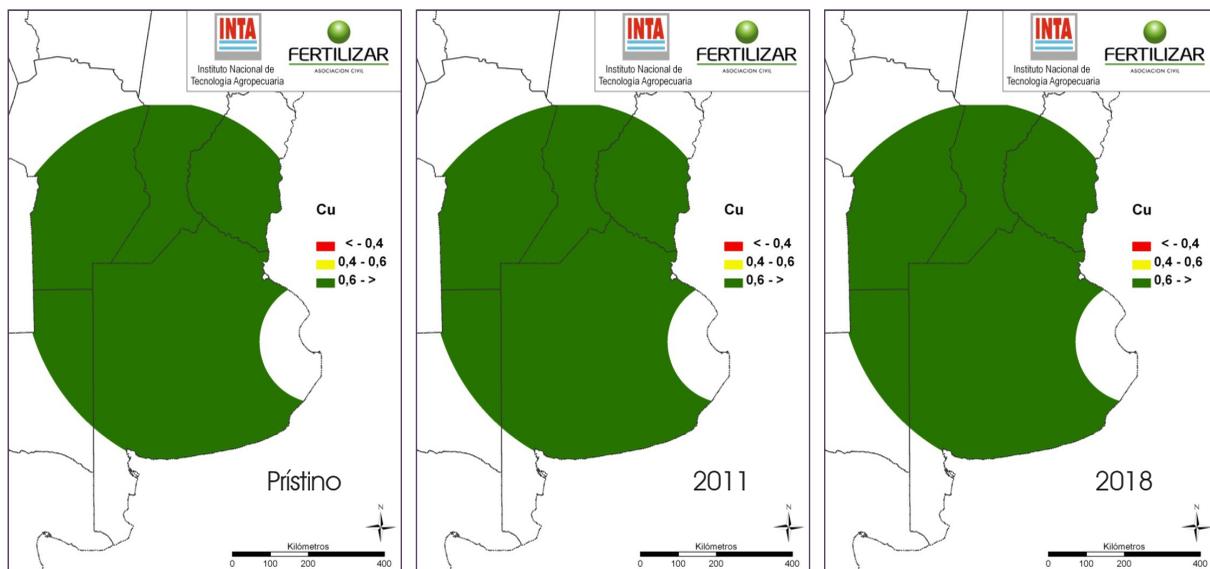


Figura 22. Niveles de cobre (Cu) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

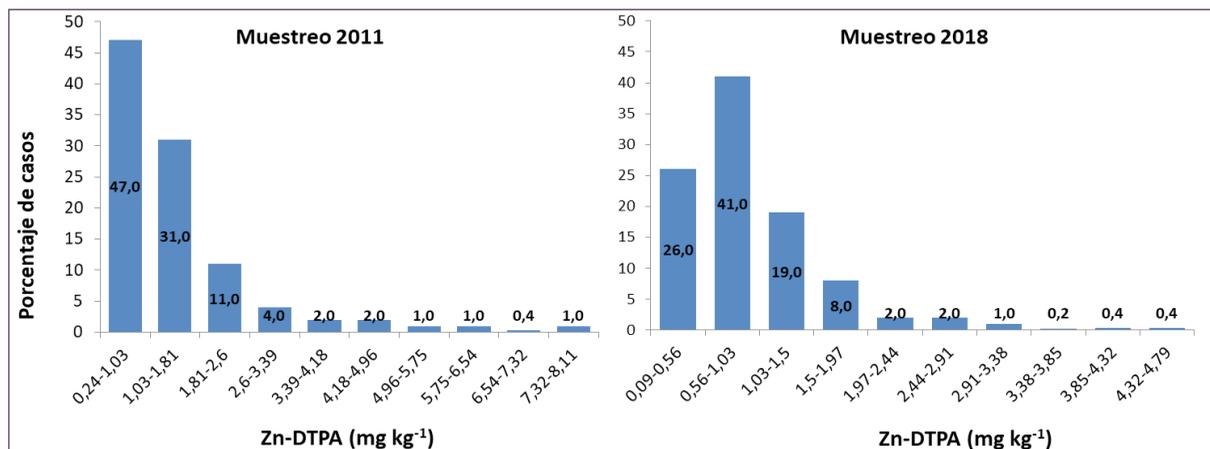


Figura 23. Frecuencia de rangos de valores de Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA; 0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

Conclusiones

Salvo en el sur y sureste de Buenos Aires, los niveles de MO no decrecieron entre el muestreo realizado en 2011 y 2018. Sin embargo, los niveles actuales están muy por debajo de los niveles originales y algunas funciones del suelo en los agro-ecosistemas, como por ejemplo la de un adecuado abastecimiento de N y S, está severamente afectada.

El pH de los suelos continuó disminuyendo entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 y en algunas zonas al este de Buenos Aires y centro-norte de Santa Fe los suelos presentan niveles de pH por debajo de 6. Si bien estos niveles no serían limitantes para la mayoría de los cultivos, algunos

procesos del suelo como la mineralización de N podría verse afectado.

Los niveles de P-Bray continuaron disminuyendo entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 y la mayor parte de los suelos de la región pampeana presentan rangos de P-Bray de bajos a medios, por lo que este nutriente podría ser limitante para la producción de los cultivos.

Las concentraciones actuales de Ca, Mg, y K, en los suelos agrícolas de la región pampeana están por encima de los rangos críticos descritos en la literatura, pero estos valores disminuyeron 10%, 34% y 18% entre 2011 y 2018, respectivamente. Esta reducción indica que la liberación de cationes básicos por la intemperización desde minerales primarios es insuficiente para compen-

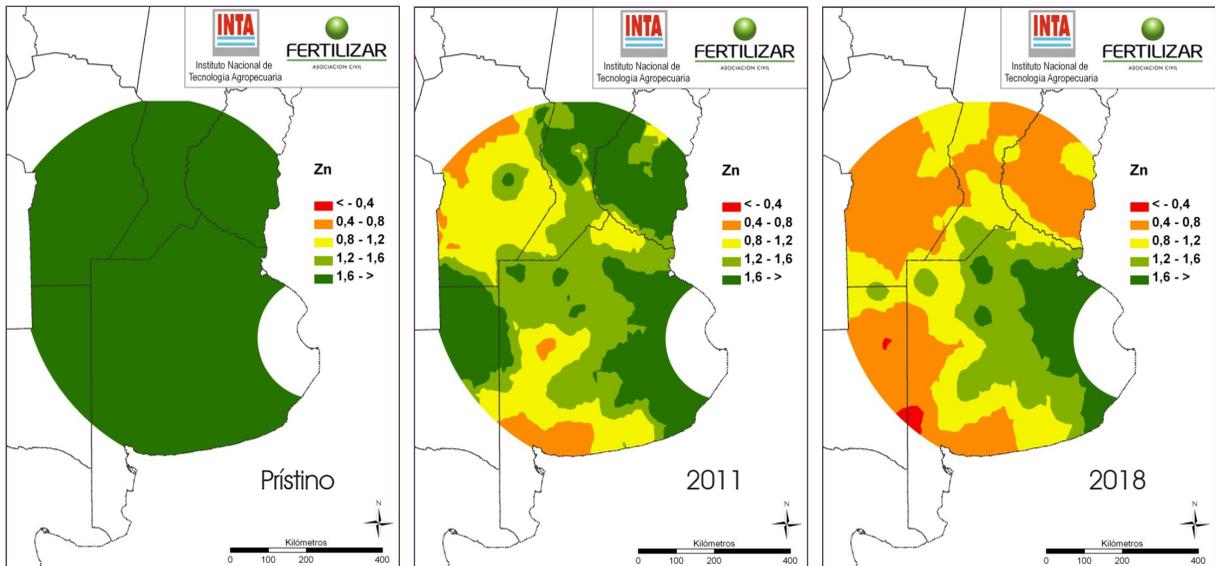


Figura 24. Niveles de cinc (Zn) extractable con DTPA (mg kg^{-1} ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

sar las pérdidas del sistema (por exportación en granos, lavado y erosión).

A partir de las tasas de disminución de Ca, Mg, y K , determinadas entre 2011 y 2018, puede inferirse que: i) las deficiencias de Ca se observarán antes en los Clusters 1 y 2 (oeste y norte de región pampeana), ii) las deficiencias de Mg se observarán antes en los Clusters 1, 2 y 3 (toda la región pampeana, excepto la provincia de Entre Ríos), y iii) las deficiencias de K se observarán antes en los Clusters 2 y 4 (norte de la región pampeana y Entre Ríos). Por lo tanto, estos resultados sugieren que el análisis de la concentración de cationes intercambiables debe comenzar a incorporarse a los análisis de suelo de rutina para diagnosticar su disponibilidad en los laboratorios de análisis de suelo de la región pampeana.

En cuanto a los micronutrientes, el Zn es el más limitante para el crecimiento de cultivos sensibles a su deficiencia en una vasta superficie de la región pampeana y continuó disminuyendo entre el muestreo de 2011 y 2018. No obstante, la necesidad de fertilización debe surgir del análisis del suelo a nivel de lote.

Agradecimiento

A Fertilizar Asociación Civil, Uralkali Trading SIA y Nitron Group, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

Bibliografía

- Álvarez, R & HS Steinbach. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: *Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos»* (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. p. 31-40.
- Aramburu Merlos, F.A.; Monzón, J.P., Mercáu, J.L., Taboada, M.; Andrade, F.H.; Hall, A.J.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184: 145-154.
- Barbagelata, P. A. and Mallarino, A. P. 2012. Field Correlation of Potassium Soil Test Methods Based on Dried and Field-Moist Soil Samples for Corn and Soybean. *Soil Science Society of Am. J.* 77: 318-327.
- Barbazán, M.; Boutes, C.; Beux, L; Bordoli, M.; Cano, JD; Ernst, O; García A; FO García & A Quincke. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agroc.* 15(2): 93-99.
- Barbieri, P.A.; Sainz Rozas, H.R.; Wyngaard, N.; Eyherabide, M.; Reussi Calvo, N.I.; Salvagiotti, F.; Correndo, A.; Barbagelata, P.A.; Espósito Goya, G.; Colazo, J.C.; Echeverría, H.E. 2017. Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn?, *Soil Science Soc. Am. J.* 81:556-563.
- Brady, N.; Weil, R. 1998. *Soil Acidity. The Nature and Properties of soil.* 14th ed. Prentice-Hall, inc. Simona and Schuster A Viacon Company. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Bray, R.H. & L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Bundy, L. G. 2004. Corn fertilization. University of Wisconsin-Madison and University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. Cooperative Extension Publishing. 12 p.
- Bustos A.N., Sainz Rozas H.R., Alvarez C., Barbieri P.A., Eyherabide M., Wyngaard N. 2019. Diagnóstico de la disponibilidad de zinc para el cultivo de soja. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Montevideo, Uruguay.
- Chapman, HD. 1965. Cation-exchange capacity 1. En:

- CA. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Vol. 2. Pp. 891-901. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 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. y R. Casas.** 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6:7-14. IPNI, del sudeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas*. 39: 23-25.
- Divito, G.A., Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E., Studdert, G.A., Wyngaard, N.** 2011. Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no-tillage. *Soil & Tillage Research*. 114: 117-126.
- Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.** 2015. Nitrógeno. Pp. 189-228. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Elgala, A.M. Ismail, A.S.; Ossman, M.A.** 1986. Critical levels of iron, manganese and zinc in Egyptian soils. *Journal of Plant Nutrition*. 9: 267-280.
- ESRI ArcMap 9.2 -- Licencia 37142261_v9 - del set ArcGIS Desktop.**
- Fox, J.** 2017. *Using the R Commander: A Point-and-Click Interface or R*. Boca Raton FL: Chapman and Hall/CRC Press.
- Gambaudo, S.; H. Fontanetto.** 2011. Diagnóstico de la acidez edáfica y su corrección. Simposio FERTILIDAD 2011, Rosario, Argentina.
- García, F.O.** 2017. El balance de nutrientes. Manejo, deterioro o polución. El papel de la fertilización. Curso Agrícola FundaCREA Buenos Aires, 25 de Julio de 2017.
- García, F.O.; Picone, L.I.; Ciampitti, I.A.** 2015. Fósforo. Pp. 229-264. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Goldman V; Echeverría, H.E.; Andrade, F.; Uhart, S.** 2002. Incidencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de nutrientes en maíz. *Ciencia del Suelo* 20 (1):27-35.
- Karamanos, R.E., Goh, T.B. and Harapiak, J.T.** 2003. Determining wheat responses to copper in prairie soils. *Can. J. Soil Sci.* 83:213-221.
- Kopittke, P.M.; Menzies, N.W.** 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:259-265.
- Kruger, G.A., Karamanos, R.E. and Singh, J.P.** 1985. The copper fertility of Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.* 65:89-99.
- Larrea, G. E.** 2019. Disponibilidad de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana. Tesis de Magister Scientiae en producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Lavado, R.; Porcelli, C.A.** 2000. Contents and main fractions of trace elements in Typic Argiudolls of the Argentinean Pampas. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 12: 67-70.
- Lindsay W.L. & W.A. Norvell.** 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42:421-428. Madison, USA.
- Lindsay, W.L.** 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: J.J. Mortvedt, editor, *Micronutrients in agriculture*. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 90-111.
- Meena, R.S.; Mathur, A.K. and Sharma, S.K.** 2013. Determination of critical limit of iron for wheat in soils of sub-humid southern zone (IV-B) of Rajasthan. *Green Farming*. 4: 298-302.
- Morras, HJ.** 2003. Distribución y origen de sedimentos loessicos superficiales de la pampa norte en base a la mineralogía de arenas: Resultados preliminares. *Rev. de la Asoc. Arg. de Sedimentología*. 10(1):54-64.
- Nayyar, V.K.; Sadana, U.S. and Takkar, TN.** 1985. Methods and rates of application of Mn and its critical levels for wheat following rice on coarse textured soils. *Fertilizer Research*. 8: 173-178.
- Piscitelli, M.; Varni, M.; Sfeir, A.; Ares, G.** 2010. Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para Suelos de la representativos de la Cuenca alta del arroyo Azul (partido de de Azul, Buenos Aires). *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata*. 109: 17-22.
- Ratto, S.E.** 2006. Los microelementos en el Sistema productivo del área pampeana. Pp. 79-112. En: M. Vázquez (ed.). *Micronutrientes en la agricultura. Diagnóstico y fertilización en la Argentina*. La experiencia brasilera. Editorial Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.
- Reussi Calvo, N.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H.** 2009. Determination of sulfate concentration in soil: depth of sampling. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 40:1624-1633.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, 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: 29-37.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H.E., Barbieri, P., Angelini, H., Larrea, G.E., Ferraris, G y Barraco, M.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?. Actas del Simposio Fertilidad 2013. IPNI-FERTILIZAR. Rosario, 22 a 23 de Mayo de 2013.
- Schollenberger, C.J. & R.H. Simon.** 1945. Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soils-Ammonium acetate method. *Soil Sci.* 59:13-24.
- Sims, J.T., and G.V. Johnson.** 1991. Micronutrient soil tests. In: J.J. Mortvedt, editor, *Micronutrients in agriculture*. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 427-476.
- Six, J; RT Conant; EA Paul & K Paustian.** 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Torri, S.I.; Urricarriet, S.; Lavado, R.** 2015. Micronutrientes y elementos traza. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 357-376.
- Vázquez, M.** 2011. Causas de la acidificación en el ambiente templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. Simposio Fertilidad 2011, Rosario, Argentina.
- Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, P. Gelati, J. García Díaz, J. Kostiría & M. García.** 2010. Evaluación del efecto de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa*) y propiedades edáficas en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo*. 28: 141-154.
- Vázquez, M.S; Pagani, A.** 2015. Calcio y Magnesio. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 317-355.
- Walkley, A.; Black, Y.** 1934. An examination of the Degjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37. ◀