

---

Informe Final

---

# IMPACTO DE LA AGRICULTURA SOBRE LA FERTILIDAD DE SUELOS DEL NOA Y NEA ARGENTINO

---



FINANCIADO POR:



# > . INDICE

# INDICE

→ INTRODUCCIÓN ..... Pág. 04

→ MATERIALES Y MÉTODOS ..... Pág. 06

→ RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... Pág. 10

- Materia orgánica del suelo ..... .10
- Reacción del suelo ..... .12
- Fósforo extractable ..... .13

→ MICRONUTRIENTES ..... Pág. 15

- Hierro y manganeso ..... .15
- Cobre y Zinc ..... .16
- Boro ..... .20
- CIC y cationes básicos ..... .21

→ CONCLUSIONES ..... Pág. 27

→ BIBLIOGRAFÍA ..... Pág. 29

→ ANEXO ..... Pág. 33

**Profesional responsable**

Ing. Agr. Dr. Hernán Sainz Rozas

**Profesionales colaboradores:**

Ing. Agr. Dra Virginia Aparicio

Dr. Ing. Agr Nahuel Reussi Calvo

Dr. Ing. Agr. Nicolás Wyngaard.

Lic. Bioquímica Mercedes Eyherabide

Lic en informática Hernán Angelini

Dr. Ing. Agr. Fernando García

Ing. Agr. María Fernanda González San Juan

Ing. Agr. Nicolás Rouillet

Ing. Agr. Dr. Esteban Ciarlo

**Técnicos de laboratorio**

María D'Elia

Sergio Zarza

Natalia Pereyra

Natalia Gulle

Agustín Mosca

**Responsables del muestreo**

Dr. Ing. Agr Nicolás Stahringer

D.S. Torrielli

Ing. Agr. Agustín Sanzano

Ing. Agr Andrés Saperdi

Ing. Agr. Anibal José Saperdi

Ing. Agr. MSch Juan Manuel Orcellet

## >>. INTRODUCCION

La salud del suelo se define como la capacidad del mismo para cumplir funciones en el agroecosistema. Por lo tanto, un suelo saludable es capaz de sostener la productividad, contribuyendo a la calidad ambiental y a la salud humana, animal y vegetal.

La materia orgánica del suelo (MO) se utiliza generalmente como un indicador de salud del suelo (ISS; Cambardella y Elliott, 1992), ya que está relacionada con varias funciones del suelo dentro del agroecosistema como la provisión de nutrientes (nitrógeno, fósforo y azufre, entre otros), la capacidad de intercambio catiónico, la estabilidad de agregados y la actividad microbiana, entre otras (Weil y Magdoff, 2004; Picone, 2015).

El pH del suelo puede ser considerado como otro ISS ya que la acidez o alcalinidad regula la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la adsorción de pesticidas a la matriz mineral del suelo (Picone, 2015; De Gerónimo y Aparicio, 2022). Además, en condiciones de extrema acidez o alcalinidad puede haber un efecto directo negativo del pH sobre el crecimiento de los cultivos (Brady and Weil, 1998). La disponibilidad de fósforo también podría ser considerado como un ISS ya que el crecimiento de los cultivos y el aporte de carbono estaría limitado en suelos con baja disponibilidad del mismo.

A partir de mediados de los '90, en algunas provincias del Noroeste argentino (NOA) - Tucumán y Salta- y del Noreste argentino (NEA) -región este de Santiago del Estero, suroeste del Chaco y norte de Entre Ríos-, se adoptaron modelos productivos propios de la región pampeana. En ambas regiones, la superficie destinada a la agricultura ha aumentado de 1.619.800 ha a 6.450.690 ha en 2019 (MAGyP, 2023), debido principalmente el crecimiento del área sembrada con soja (*Glycine Max*) y en menor medida maíz (*Zea mays*) y girasol (*Helianthus annuus*) (Satorre y Andrade, 2021). Esta expansión fue en detrimento de los bosques y selvas nativos y de cultivos regionales típicos.

Los suelos sobre los cuales se ha desarrollado la agricultura en el NOA y NEA pertenecen al orden de los Molisoles, Alfisoles, Inceptisoles, Entisoles y Vertisoles (Figura 1) y, en general, sus principales limitaciones, según orden, van desde la erosión hídrica o eólica, escasa estabilidad estructural, riesgo de ascenso de sales y climáticas por déficit de agua (Panigatti, 2010).

En estas zonas, mantener niveles adecuados de MO y de cobertura son esenciales para una adecuada salud edáfica, dada que las elevadas temperaturas de estas zonas que aceleran la descomposición de la MO y el ascenso de sales a través de la evaporación. En un muestreo realizado en 2018 en la región pampeana, se determinaron disminuciones de MO del 26% al 34% en los suelos bajo agricultura, respecto de suelos prístinos. Sin embargo, hay poca información disponible de los cambios de esta variable como consecuencia del avance de la agricultura para los suelos del NOA y NEA argentino.

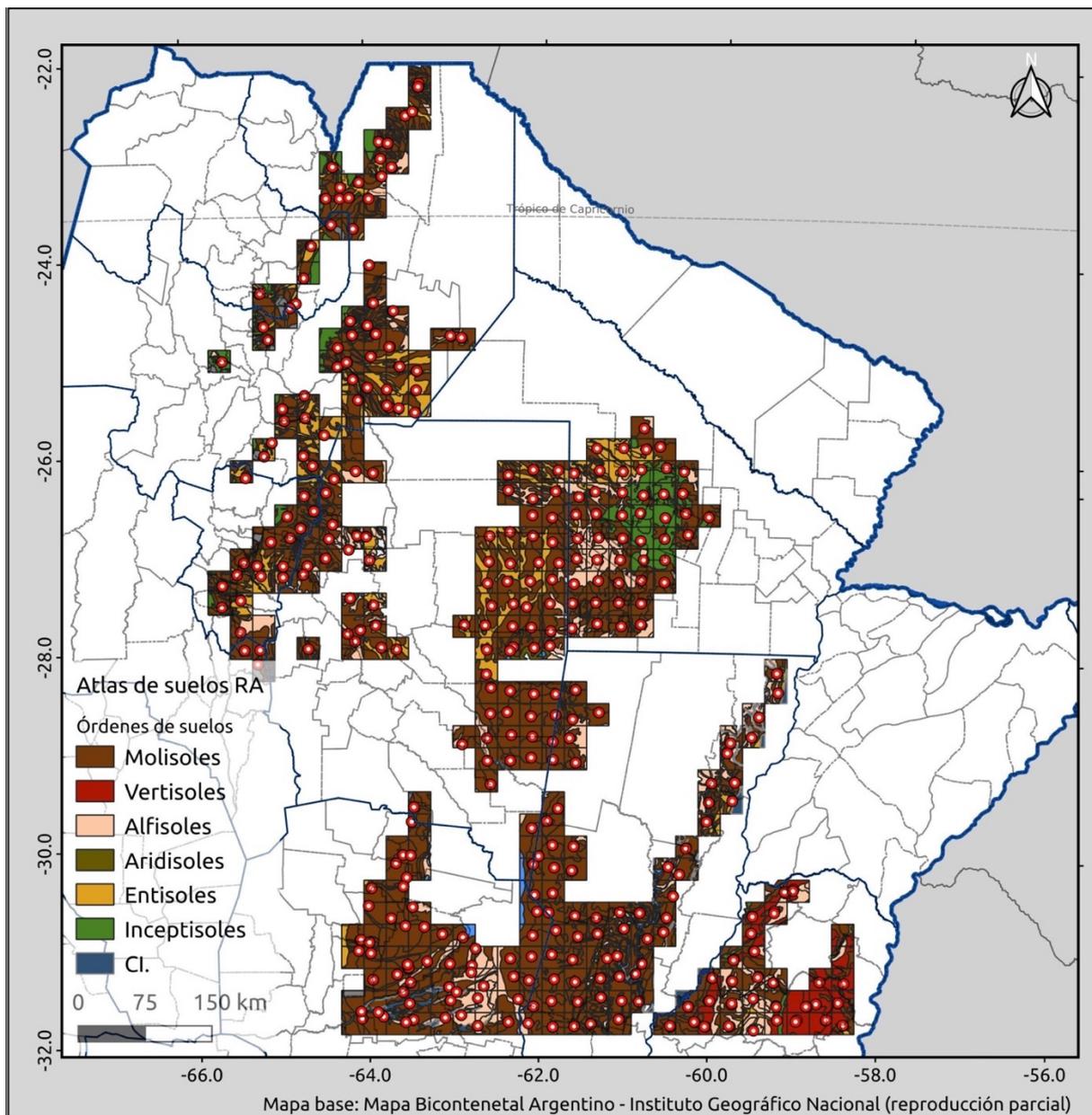
Para el caso del pH (relación suelo:agua 1: 2,5) se han informado valores que varían de 5,5 a 7,5 para el suroeste del chaco (Carta de Suelos del INTA, 1985) y de 6 a 7,5 para el norte de Entre Ríos, Santa Fe y Córdoba, este de Tucumán y oeste de Salta (Sainz et al., 2011). En los últimos años el pH de los suelos ha disminuido a valores por debajo de 6 en el este y norte de la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2019). Sin embargo, no se conoce como la actividad agrícola ha afectado el pH de los suelos en algunas regiones del NOA y NEA argentino.

Respecto a los nutrientes, Sainz Rozas et al. (2012) informaron que los valores más bajos de P extractable (Bray & Kurtz, 1945; P-Bray) se determinaron al norte de Entre Ríos, mientras que en el oeste de Santiago del Estero y norte y este de Tucumán, norte de Córdoba y Santa Fe, los niveles de P-Bray variaron de 20 a 90 mg kg<sup>-1</sup> según zonas y tipos de suelo. En los suelos del suroeste del Chaco los niveles de P-Bray del horizonte superficial varían de 30 a 166 mg kg<sup>-1</sup> según los tipos de suelo (Carta de suelos del INTA, 1985). Si bien el consumo de fertilizantes a nivel país viene aumentando constantemente desde el 2014/15, en el NOA y NEA se aplican entre 4,5 a 6 veces menos de nutrientes que en la región pampeana (45.000 a 109.000 t), correspondiendo a P, el 41% del consumo. El cultivo de soja suele recibir bajas dosis de P (Gayo y Regeiro, 2022) y presenta una elevada frecuencia dentro de las rotaciones agrícolas de esta zona. Estos resultados sugieren un balance negativo de este nutriente en los suelos de la zona y destacan la necesidad de conocer los niveles edáficos actuales. Por otra parte, no se ha informado la aplicación de otros nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y micronutrientes (Gayo y Regeiro, 2022), lo que conduce a la necesidad de evaluar el estado actual de los mismos.

El objetivo de este trabajo fue determinar los niveles actuales de MO, pH y de nutrientes (P extractable, Ca, Mg y K intercambiable y micronutrientes) en suelos prístinos y bajo agricultura en algunas zonas del NOA y NEA argentino.

## >>. MATERIALES Y MÉTODOS

Entre julio y octubre del 2022 se relevaron un total de 349 sitios de las principales zonas productoras de cultivos extensivos granos del NOA y NEA argentino, donde los grupos de suelos predominantes fueron Molisoles, Vertisoles y Aridisoles (**Figura 1**). En cada uno de estos sitios se tomaron muestras de suelos en parejas, correspondientes a suelos prístinos (sin historia de uso agrícola) y un suelo de uso agrícola por más de 10 años. Las áreas de muestreo se determinaron a partir de una grilla de 25 x 25 km, sobre la que se seleccionaron aquellas celdas donde al menos la mitad de la cobertura correspondía a lotes con cultivos agrícolas. Para definir la cobertura en cada celda se utilizó información generada por el INTA en el proyecto Mapa Nacional de Cultivos, específicamente el mapa correspondiente a la campaña de verano de 2021 (De Abelleyra et al., 2021). Las áreas “prístinas” correspondieron a montes, pastizales naturales y en menor proporción a zonas no disturbadas cercanas a los alambrados, siempre próximas a su muestra pareja “agrícola”. En cada sitio (prístino y bajo agricultura), 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.



**Figura 1.** Mapa indicando los sitios de muestreos y los principales órdenes de suelos. CI.: Complejos indefinidos.

Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio del Grupo de Relaciones Suelo-Planta y en el grupo Manejo y Calidad de Suelo y Agua de la EEA 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) y el contenido de MO por calcinación, siguiendo el método propuesto por Schulte & Hopkins (1996). Se pesaron 5 g de muestra en crisoles de 15 ml, posteriormente fueron colocados en estufa durante 24 h a 105°C. Las muestras fueron enfriadas en desecador y pesadas. Luego se colocaron durante 2 h en una mufla a 360°C, posteriormente se transfirieron

a un desecador y luego de enfriarse se registró el peso nuevamente. El cálculo de MO se realizó por diferencia de peso en las distintas temperaturas, según:

$$\% \text{ MO} = ((\text{peso } 105^{\circ}\text{C} - \text{peso } 360^{\circ}\text{C}) * 100) / \text{peso } 105^{\circ}\text{C}$$

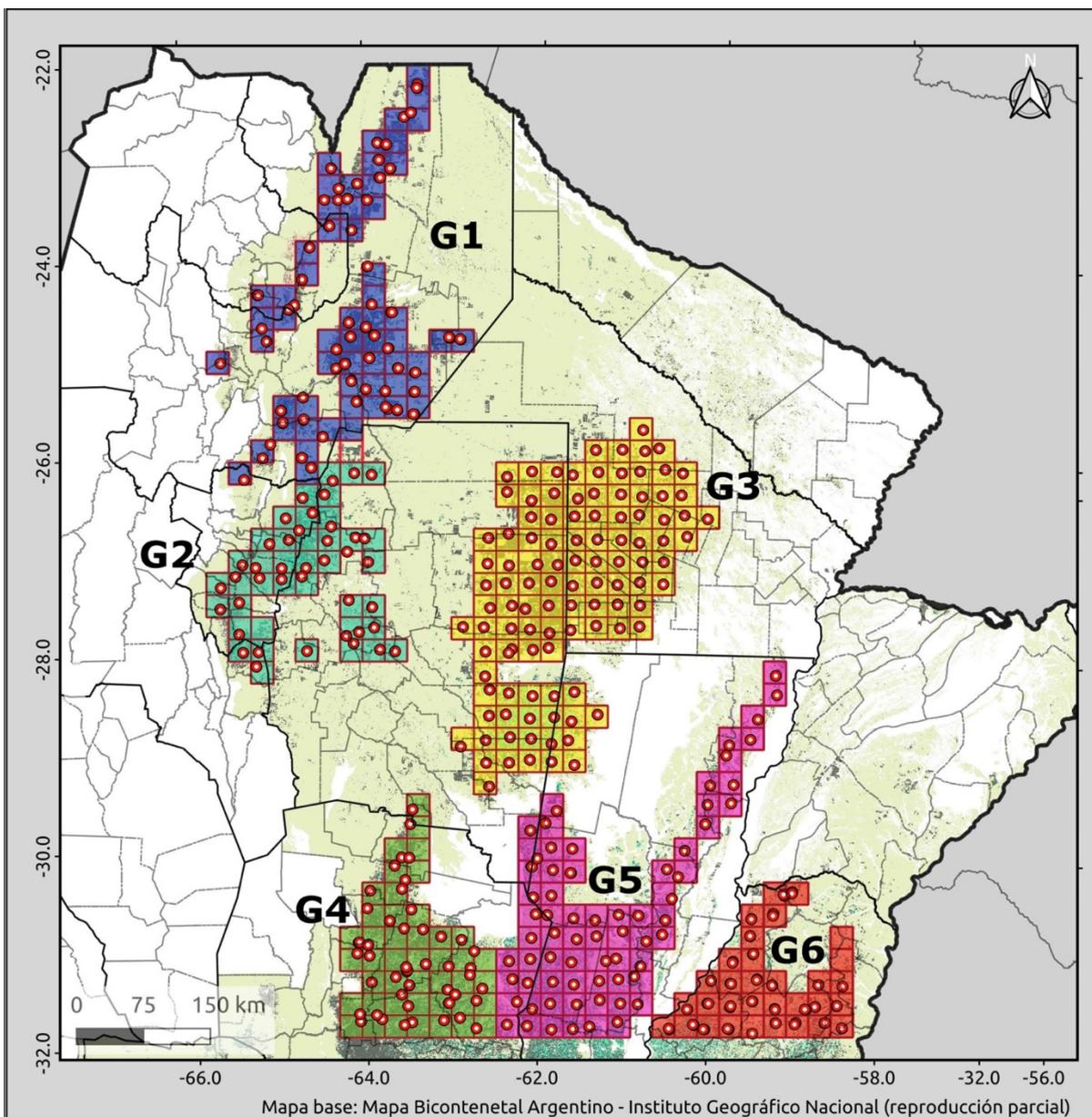
Para la determinación de CIC, Ki, Ca intercambiable (Cai) y Mg intercambiable (Mgi) se siguió la técnica sugerida por Chapman (1965). Brevemente, se pesaron 10 g de suelo y se lo dejó durante la noche con 100 ml de acetato de amonio 1N (pH=7), al día siguiente se continuó lavando el suelo hasta alcanzar los 250ml de acetato de amonio. 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). Luego del primer filtrado el suelo se lavó con 100 ml de etanol al 96%. Posteriormente, el  $\text{NH}_4^+$  en el suelo se desplazó utilizando 250 ml de NaCl al 10% y se cuantificó mediante micro-distilación por arrastre de vapor con posterior titulación con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,04 N. Los meq de ácido consumidos son iguales a los meq de  $\text{N-NH}_4^+$  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). Para la determinación de B en suelo se siguió la técnica propuesta por Keren (1996). Brevemente, se colocaron 5 g de muestra de suelo y se le agregó 25 ml de la solución extractiva (Ac. Amonio 1M, pH 4,8), se agitó 30 minutos con los tubos ubicados en posición horizontal y luego se procedió al filtrado. Del filtrado se tomó una alícuota de 7,5 ml y se colocó en un tubo de 15 ml, para luego agregar 1 ml la solución de azometina, 1 ml de solución de EDTA y 1 ml de la solución buffer, dejando que se desarrolle color por 2 horas. Se realizó una curva de calibración y se leyó en un espectrofotómetro UV- visible a una longitud de onda de 420 nm.

Para el análisis estadístico de los datos las zonas se dividieron en 6 grupos: sureste de Jujuy y norte de Salta (G1), este de Tucumán y oeste de Santiago del Estero (G2), este de Santiago del Estero y suroeste del Chaco (G3), norte de Córdoba (G4), norte de Santa Fe (G5), norte de Entre Ríos (G6) (**Figura 2**). En cada grupo y condición de suelo (prístino o agrícola) fueron realizados algunos análisis estadísticos descriptivos como la media, desvío estándar y rango intercuartílico. Para el contraste de hipótesis de las variables edáficas para grupo y condición del suelo, se evaluó el supuesto de normalidad de la distribución de la variable por medio del test Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov en función del número de datos de cada grupo y condición de manejo. La comparación de medias de todas las variables medidas se realizaron con el método paramétrico de la distribución T-student luego

de corroborar la normalidad y la igualdad de varianza con el F-test, usando la corrección de Welch cuando las varianzas no fueron iguales. Cuando los datos no tuvieron una distribución normal se utilizó el test no paramétrico de Wilcoxon (Bilisoly et al., 1997). El análisis estadístico y comparación de medias se realizó en R versión 4.2.3 (R Core Team, 2023).

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 y 2018.



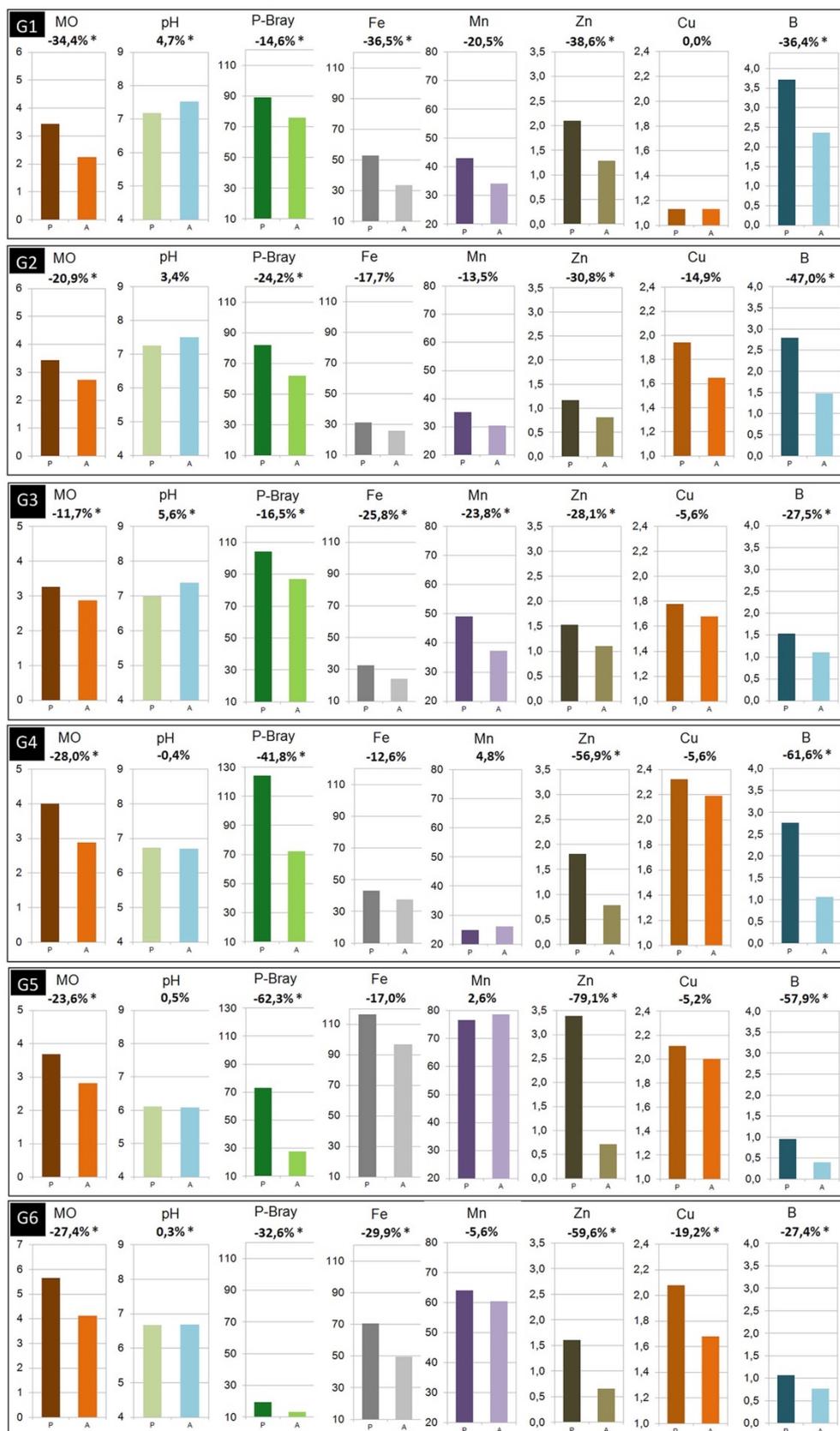
**Figura 2.** Mapa indicando los sitios de muestreos dentro de cada grupo.

## >>. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

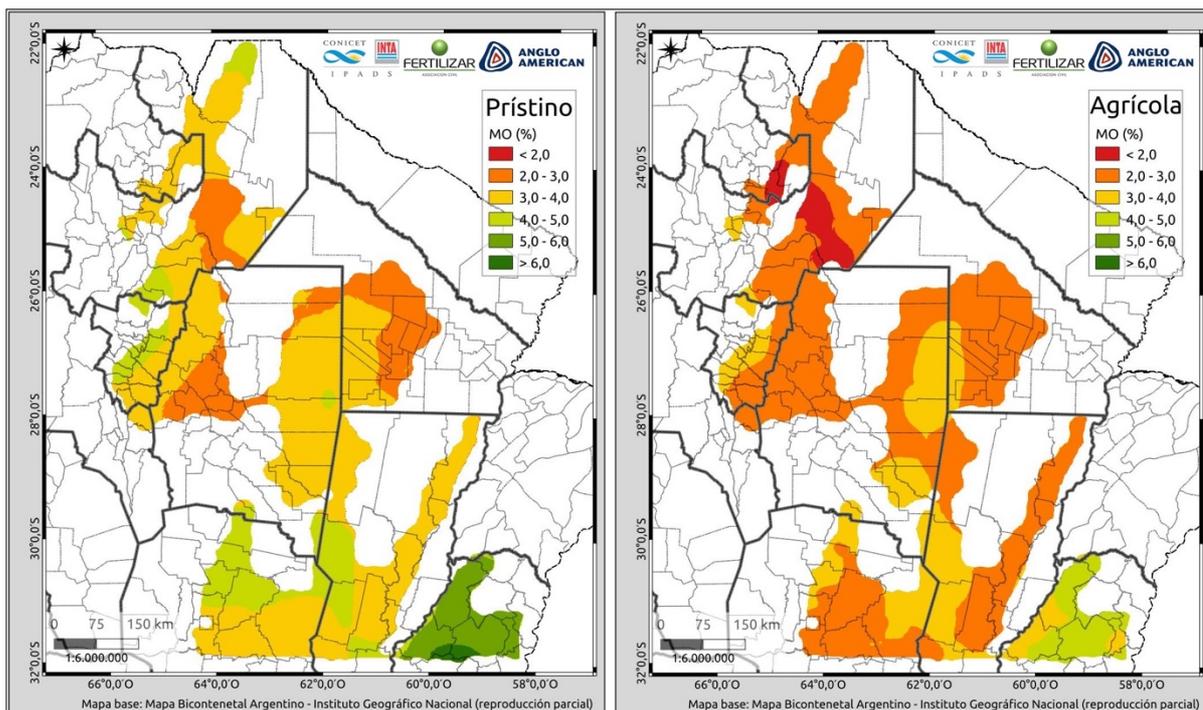
En general los modelos de interpolación utilizados fueron adecuados para predecir la semi-varianza de las variables mapeadas, tanto en suelos prístinos cómo agrícolas. Esto se debe a que la varianza estructural relativa [(semivarianza al alcance del rango menos la semivarianza del efecto pepita/semivarianza total)\*100], mostró valores de 39 al 69% y del 36 al 85%, en suelos prístinos y agrícolas, respectivamente. Esto indica una dependencia espacial de los valores de media a elevada según algunos autores (Zimback, 2001; Cordoba et al., 2014). A su vez, el  $r^2$  de la relación entre valores predichos y observados varió 0,27 a 0,5 y de 0,32 a 0,73 en suelos prístinos y agrícolas, respectivamente (Ver anexo).

### ►► Materia orgánica del suelo

El valor más alto de MO en suelos prístinos se observó en el G6 (norte de Entre Ríos; **Figura 3**), debido a la textura más fina de los suelos de este grupo, que deriva en una mayor estabilización y protección de la MO (Guggenberger et al., 1995; Six et al., 2002), y al régimen de humedad del suelo respecto a las demás zonas (Panigatti, 2010). La reducción de la MO generada por la agricultura varió entre el 11,7% y el 34%, según el grupo (**Figura 3**). Esta variabilidad se puede visualizar más claramente en la **Figura 4**, donde se ven mayores reducciones de la MO de suelos agrícolas de la región NOA norte y sur, aunque en el norte de Córdoba, norte de Santa Fe y norte de Entre Ríos la reducción de la MO varió del 23 al 28%, siendo bajas en el este de Santiago del Estero y suroeste del Chaco (**Figuras 3 y 4**). Los valores más elevados de reducción de MO son similares a los informados para la región pampeana por Sainz Rozas et al. (2019), a pesar de la menor historia agrícola de los suelos del NOA y NEA. Esto pone de manifiesto que la mineralización de la MO en estas zonas se acelera cuando se quita la cobertura de monte nativo o pastizal natural por las temperaturas más elevadas y la menor protección de la fracción orgánica en estos suelos (Panigatti, 2010; Guggenberger et al., 1995; Six et al., 2002), respecto a aquellos de la región pampeana. Esta disminución de los niveles de MO puede impactar en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y azufre en el corto a mediano plazo, pero también en la pérdida de estabilidad estructural, dado que esta última está relacionada positivamente con las fracciones más lábiles de la MO, que, a su vez, son las que primero se pierden (García et al., 2020).



**Figura 3.** Valores medios de MO, pH, P-Bray y micronutrientes (en la capa de 0-20 cm) en suelos prístinos (P) y agrícolas (A) de algunas regiones del NOA y NEA Argentino. Asteriscos indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) según el T-student o el test no paramétrico de Wilcoxon (Bilisoly et al., 1997). Los valores en porcentaje indican la reducción (negativo) o incremento (positivo) de la variable en consideración entre muestras de suelos prístinos y agrícolas.

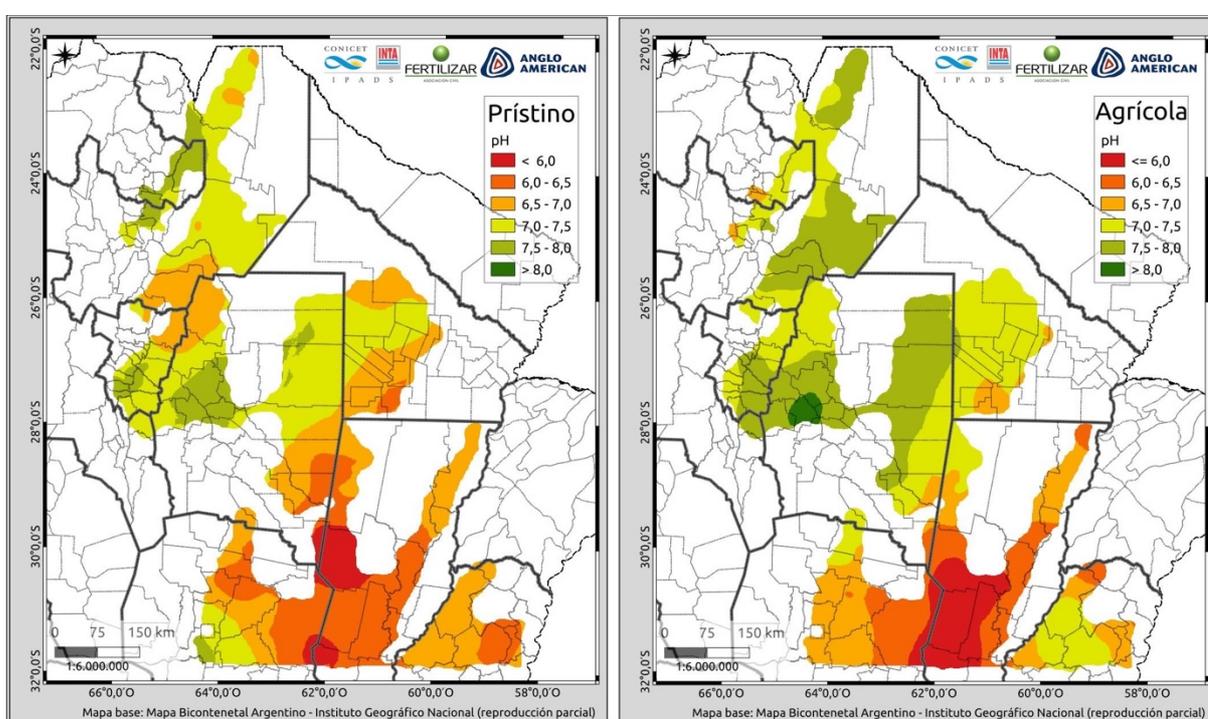


**Figura 4.** Niveles de MO (0-20 cm) en algunos suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA argentino.

## ►► Reacción del suelo

El pH del suelo mostró un comportamiento diferente según grupos. En el G4 se determinó tendencia a mayor acidificación debido a la agricultura (aunque no fue estadísticamente significativa), mientras que en los restantes grupos este comportamiento fue inverso (G1, G3 y G6; **Figuras 3 y 5**). Un estudio de suelos realizado en 2005-2006 informó que el 75% de los suelos del este de Tucumán y oeste de Salta mostraron valores de pH por debajo de 6,8 a 7,1 (Sainz Rozas et al., 2011), los que en general, son ligeramente inferiores a los determinados actualmente en dicha zona, particularmente en los suelos bajo agricultura (**Figuras 3 y 5**). Por otro lado, un estudio de clasificación de suelos realizado para el este y suroeste del Chaco (Carta de suelos del INTA, 1985), informó que la mayoría de los suelos tenían valores de pH por debajo de 6,8, valor inferior al informado para dicha zona en los suelos bajo agricultura (**Figuras 3 y 5**). Esto sugiere un incipiente proceso de alcalinización, lo cual es opuesto a lo informado para la región pampeana. El aumento del pH podría traer aparejado una disminución de la disponibilidad de micronutrientes como hierro, manganeso, cobre y zinc (Brady and Weil, 2008). En este sentido, Jobbágy et al. (2008) informaron que la expansión de la agricultura reemplazando el monte nativo o el pastizal natural aumenta el drenaje profundo, seguido por ascensos graduales del nivel freático y una fuerte movilización de sales disueltas, lo que podría incrementar el pH si son sales carbonatadas sódicas. Esto podría disminuir la fertilidad de los suelos cuando los

niveles freáticos y las sales movilizadas alcanzan la superficie. Según dichos autores, esta vulnerabilidad hidrológica exige la compresión y el manejo de los ciclos del agua y las sales en sistemas bajo agricultura desde una perspectiva eco-hidrológica y plantea el desafío de desarrollar una “agronomía del agua” capaz de contribuir a la regulación de los niveles freáticos en los ecosistemas cultivados. Esto podría lograrse utilizando cultivos puentes con raíces profundas de manera de mantener el nivel freático por debajo de la zona de enraizamiento de los cultivos, además de proveer cobertura, lo que también disminuiría la evaporación y, por ende, el ascenso freático. En la zona norte de Córdoba y Santa Fe (G4 y G5) no se observaron cambios significativos del pH, pero si en el norte de Entre Ríos, el cual mostró una ligera tendencia a la alcalinización (**Figuras 3 y 5**).

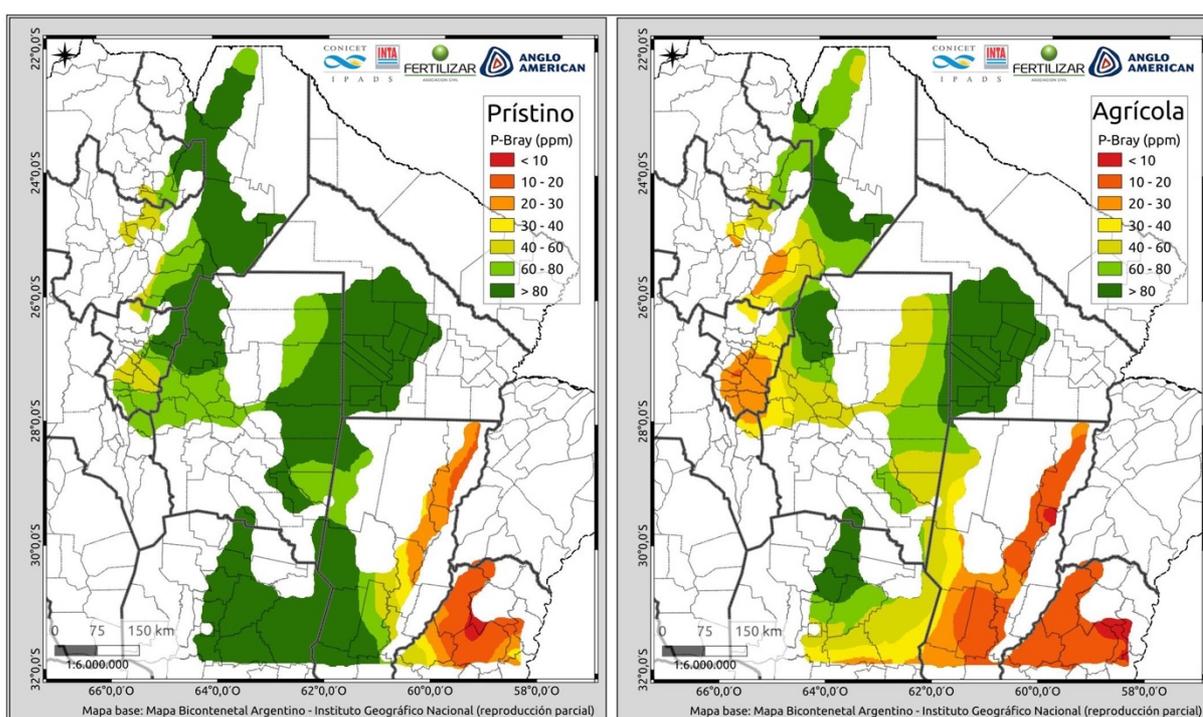


**Figura 5.** Niveles de pH (relación suelo:agua 1:2,5; 0-20 cm) en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA argentino.

## ►► Fósforo extractable

Para los suelos en condición prístina, los valores de P-Bray variaron entre 19 y 124 mg kg<sup>-1</sup>, correspondiendo el valor más bajo al G6 (norte de Entre Ríos), resultado esperable en función de los bajos niveles de P del material original a partir del cual se desarrollaron estos suelos (Morrás, 1996). En suelos bajo agricultura, los niveles de P-Bray variaron entre 13 y 87 mg kg<sup>-1</sup>, correspondiendo el valor más bajo al G6 (norte de Entre Ríos; **Figuras 3 y 6**). En consecuencia, la reducción en la concentración de P-Bray respecto de los suelos prístinos

varió entre 15% y 62%, observándose las reducciones más elevadas al norte de Santa Fe, Córdoba y norte de Entre Ríos (**Figuras 3 y 6**). En suelos bajo agricultura, los valores más bajos de P-Bray ( $10 \text{ a } 30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se observaron en el norte de Santa Fe y Entre Ríos y en el centro-sur de Tucumán (**Figura 6**). Esto indica que en estas zonas el P podría ser limitante para la producción de los cultivos según los niveles críticos informados por García et al. (2015). Si bien en los demás grupos los niveles actuales de P-Bray duplican o triplican a los niveles críticos de la mayoría de los cultivos (**Figura 6**), la fuerte caída del P-Bray observada en los suelos de estas zonas con mucha menor historia agrícola que aquellos de la región pampeana, sugiere que la capacidad buffer de P de los suelos de estas áreas es baja, por lo que se debe comenzar a monitorear el estado de esta variable a nivel de lote y comenzar a reponer este nutriente cuando la situación lo amerite. Esta práctica es muy poco frecuente en los sistemas productivos del NOA y NEA, ya que la adopción de la fertilización fosfatada es realizada aproximadamente por el 40% de los productores (Fertilizar AC, 2022), con el agravante de que aquellos que fertilizan lo hacen con dosis muy bajas (Goya y Regeiro, 2022). Esta baja reposición de P impactó positivamente en la confiabilidad del modelo de interpolación utilizado, ya que fue capaz de caracterizar adecuadamente la variabilidad espacial del nutriente, la cual se altera a medida que aumenta la historia de fertilización con este nutriente (Pagani, 2015). Por lo tanto, la variabilidad espacial del P en el NOA y NEA estaría dada principalmente por el contenido de P del material original y por la extracción de los cultivos, variables que se afectan a escalas espaciales mayores.



**Figura 6.** Mapa indicando el P extractable (Bray-1) de sitios prístinos y agrícolas del NOA y NEA argentino.

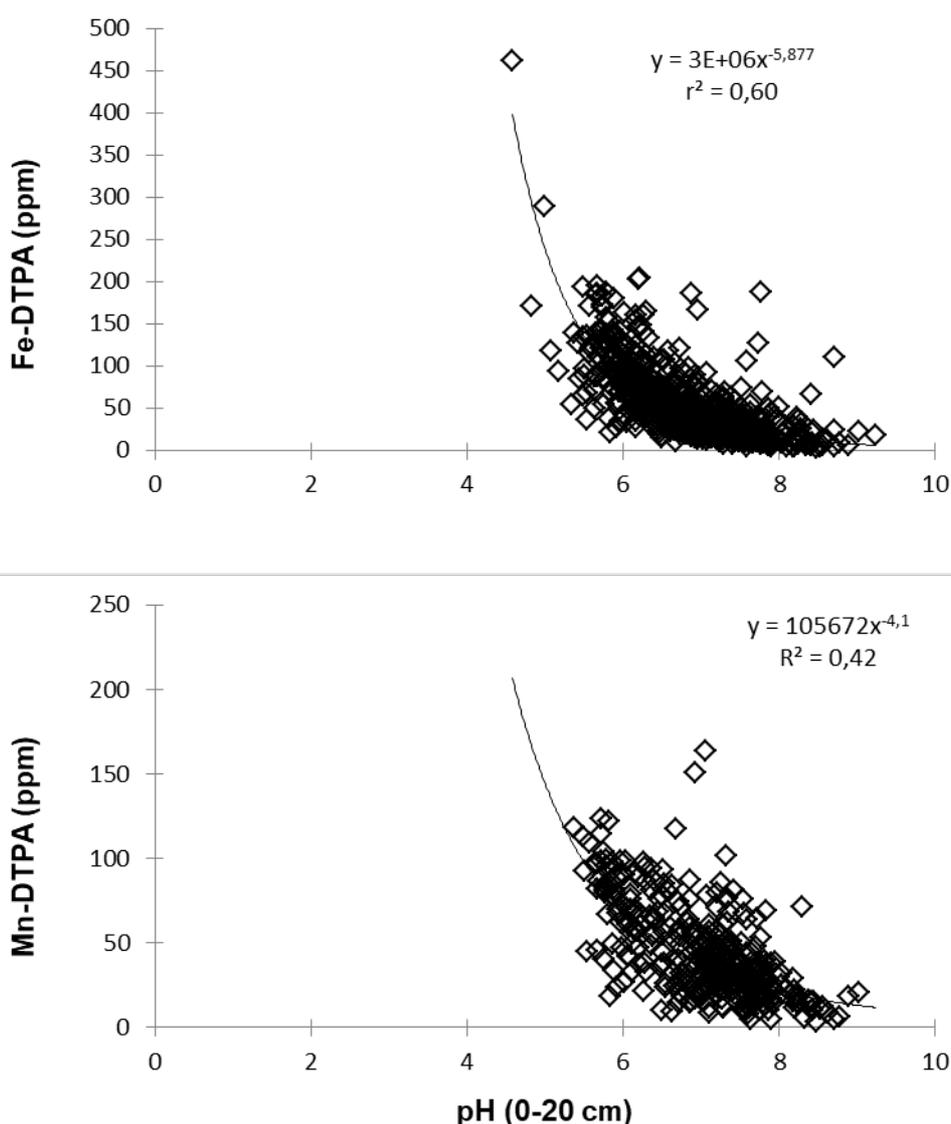
## >>. MICRONUTRIENTES

### ▶▶ Hierro y manganeso

Los valores de Fe y Mn extractable con DTPA (Fe-DTPA; Mn-DTPA) en los suelos bajo agricultura estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad (25 a 97 y 26 a 79 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente; **Figura 3**) y superan ampliamente a los umbrales críticos (2,5 a 8 mg kg<sup>-1</sup>) informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims & Johnson, 1991). No obstante, en la mayoría de los grupos se determinó una reducción significativa del contenido de Fe-DTPA (17% al 36%) y en menor medida del Mn-DTPA (5% al 24%), respecto a los suelos prístinos (**Figura 3**). Esto difiere de lo informado por Sainz Rozas et al. (2019) para suelos de la región pampeana, ya que en dicho trabajo no se determinó disminución en la disponibilidad de ambos nutrientes debido a la agricultura, e inclusive, en algunas zonas de dicha región, la disponibilidad de ambos nutrientes en suelos agrícolas fue mayor que en los prístinos.

La disponibilidad de Fe-DTPA y Mn-DTPA se asoció negativamente con el pH del suelo (**Figura 7**) y no se ajustaron relaciones diferentes al analizar ambos sets de datos por separado (suelos agrícolas y prístinos). La elevada sensibilidad a la disminución de las fracciones disponibles de ambos nutrientes al incremento del pH ha sido informada por números autores (Behera and Shukla 2014).

Por lo tanto, la discrepancia entre los cambios de la disponibilidad de Fe-DTPA y Mn-DTPA debido al uso agrícola en los suelos del NOA y NEA, respecto a aquellos de la región pampeana, podría ser debida a que en los suelos de la región pampeana la agricultura redujo el pH, mientras que en los suelos del NOA y NEA, en general, lo incrementó (**Figuras 3 y 5**).



**Figura 7.** Relación entre el Fe y Mn extractable con DTPA y el pH del suelo (0-20 cm) en suelos del NOA y NEA argentino (n= 698).

En suelos bajo agricultura, los menores valores de Fe-DTPA se ubicaron al suroeste de Salta, oeste y este de Santiago del Estero y en una pequeña zona al oeste del Chaco y norte de Santa Fe (**Figura 8**). Si bien la concentración de Fe-DTPA aún duplica o triplica los umbrales críticos, se debería comenzar a monitorear el estado de este nutriente, particularmente en suelos con pH superiores a 7,5 (**Figura 7**).

En cuanto al Mn-DTPA, las **Figuras 3 y 9** sugieren un impacto mucho menor de la agricultura y, en general, se observaron valores muy por encima de los umbrales mencionados. Los valores más bajos (10 a 20 mg kg<sup>-1</sup>) se observaron en pequeñas áreas al norte de Salta, este de Tucumán y norte de Santa Fe (**Figura 9**). En estas áreas se debería monitorear la disponibilidad de este nutriente en suelos con pH superiores a 7,5 (**Figura 7**).

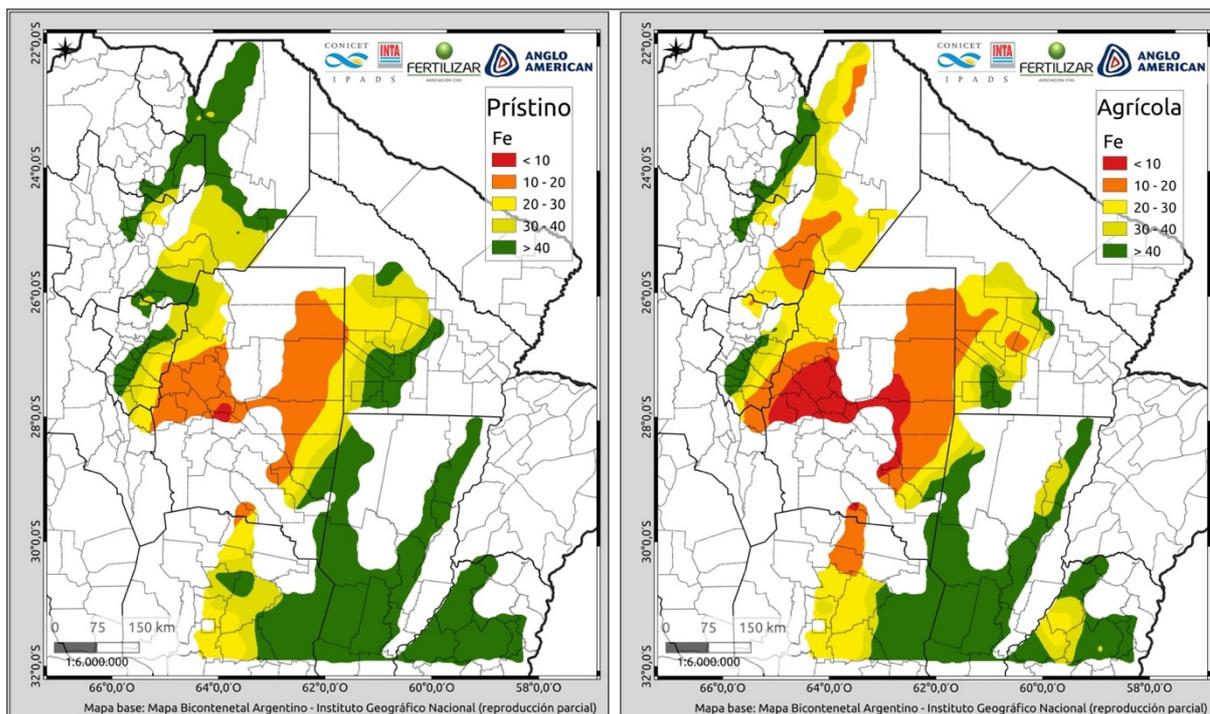


Figura 8. Niveles de Fe-DTPA en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

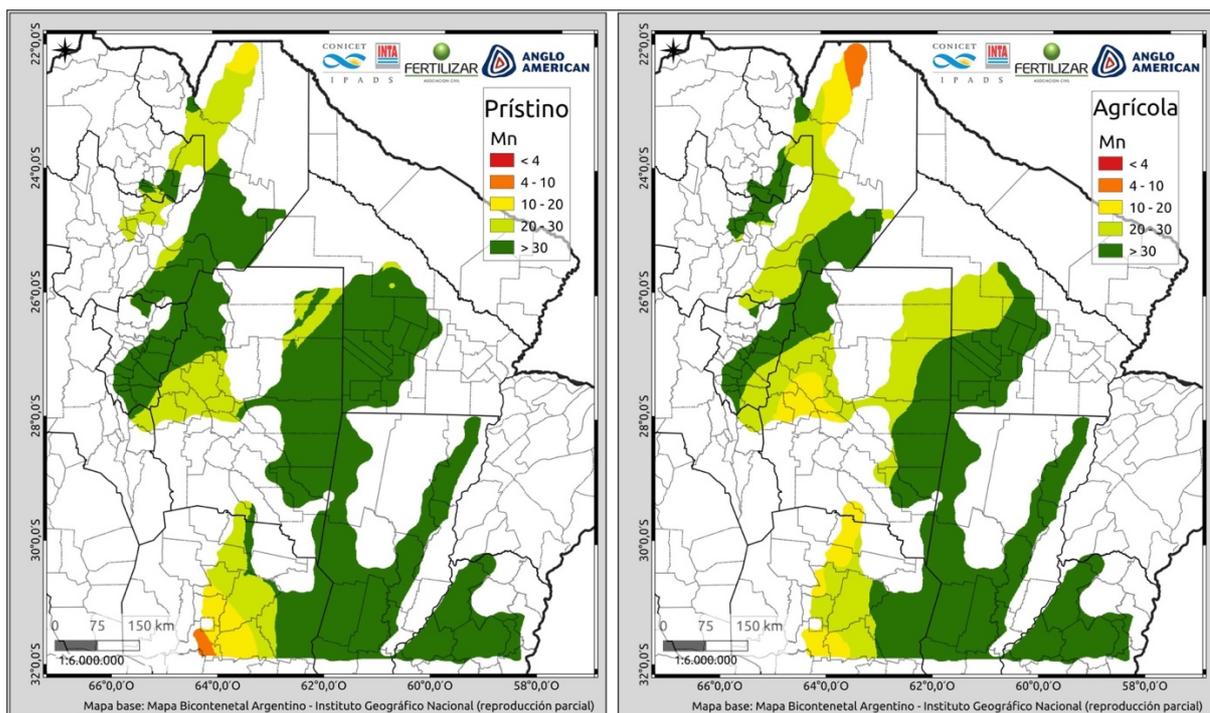


Figura 9. Niveles de Mn-DTPA en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

## ►► Cobre y Zinc

Los valores medios de Cu extractable con DTPA (Cu-DTPA) estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad, ya que variaron entre 1,1 y 2,3 y entre 1,1 y 2,2 mg kg<sup>-1</sup> para suelos prístinos y agrícolas, respectivamente (**Figura 3**). Estos valores superan a los umbrales críticos (0,4 a 0,6 mg kg<sup>-1</sup>) informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003). Si bien se determinó una tendencia a una reducción del Cu-DTPA en 5 de las 6 subregiones, en la mayoría de los casos no fue significativa (**Figura 3**). Estos resultados están en línea con aquellos informados por Sainz Rozas et al. (2019) para suelos de la región pampeana. Esto puede deberse a que el Cu es uno de los micronutrientes catiónicos que presenta menor extracción en grano (Torri et al., 2015). Los valores más bajos de Cu-DTPA (0,6 a 0,6 mg kg<sup>-1</sup>) se ubicaron en un área reducida al norte de Salta (**Figura 10**). Por lo tanto, este nutriente no parece ser un problema en el corto plazo en los suelos agrícolas del NOA y NEA argentino.

Respecto al Zn, la agricultura redujo significativamente la disponibilidad de Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA) respecto de los suelos prístinos (28 al 79%) según los grupos (**Figura 3**). Considerando que el rango crítico de Zn-DTPA en suelo para el cultivo de maíz es de 0,8 a 1,2 mg kg<sup>-1</sup> (Barbieri et al., 2017) y para la soja de 0,51 a 1,27 mg kg<sup>-1</sup> (Bustos et al., 2022), la mayoría de los grupos analizados presentaron valores medios similares o por debajo de los valores máximos del rango crítico en ambos cultivos.

La disminución de la concentración de Zn-DTPA no se relacionó con la pérdida de MO ni con el aumento del pH ( $P > 0,10$ ), por lo que la misma se debería principalmente a los balances negativos de Zn causados por la falta de aplicaciones de este nutriente. En este sentido, cultivos de maíz, trigo, soja y girasol (con rendimientos de 9, 4, 3 y 2,5 t/ha) extraen de 80 a 250 g Zn/ha (Echeverría y García, 2015).

Geográficamente, los valores más bajos de Zn-DTPA (0,4 a 0,8 mg kg<sup>-1</sup>) se encontraron al este de Tucumán, este y oeste de Santiago del Estero y en la mayor parte del norte de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos (**Figura 11**). En síntesis, más del 50% del área sembrada presenta valores bajos para los cultivos de maíz (Barbieri et al., 2017), soja (Bustos, 2022) y trigo (Martínez Cuesta et al., 2022). Por lo tanto, estos resultados sugieren fuertemente la necesidad de monitorear el estado de este nutriente en dichas zonas mediante el análisis de suelo, dado que puede llegar a limitar severamente el rendimiento de los cultivos.

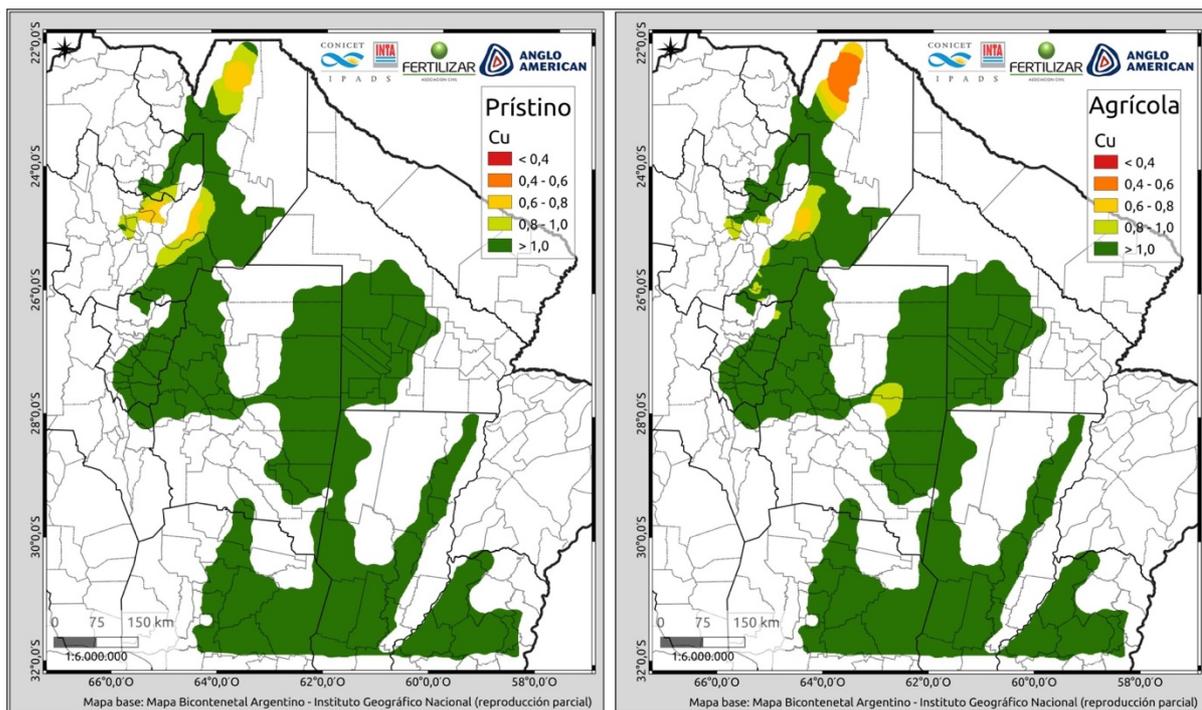


Figura 10. Niveles de Cu-DTPA en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

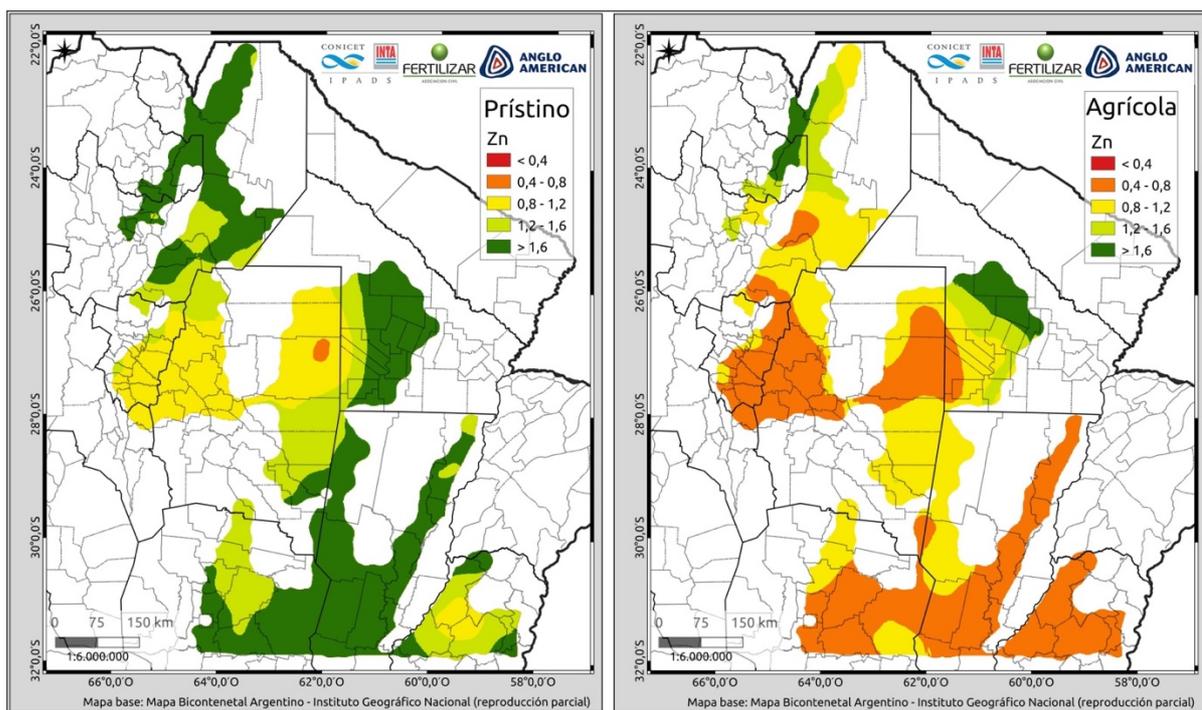


Figura 11. Niveles de Zn-DTPA en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

## ►► Boro

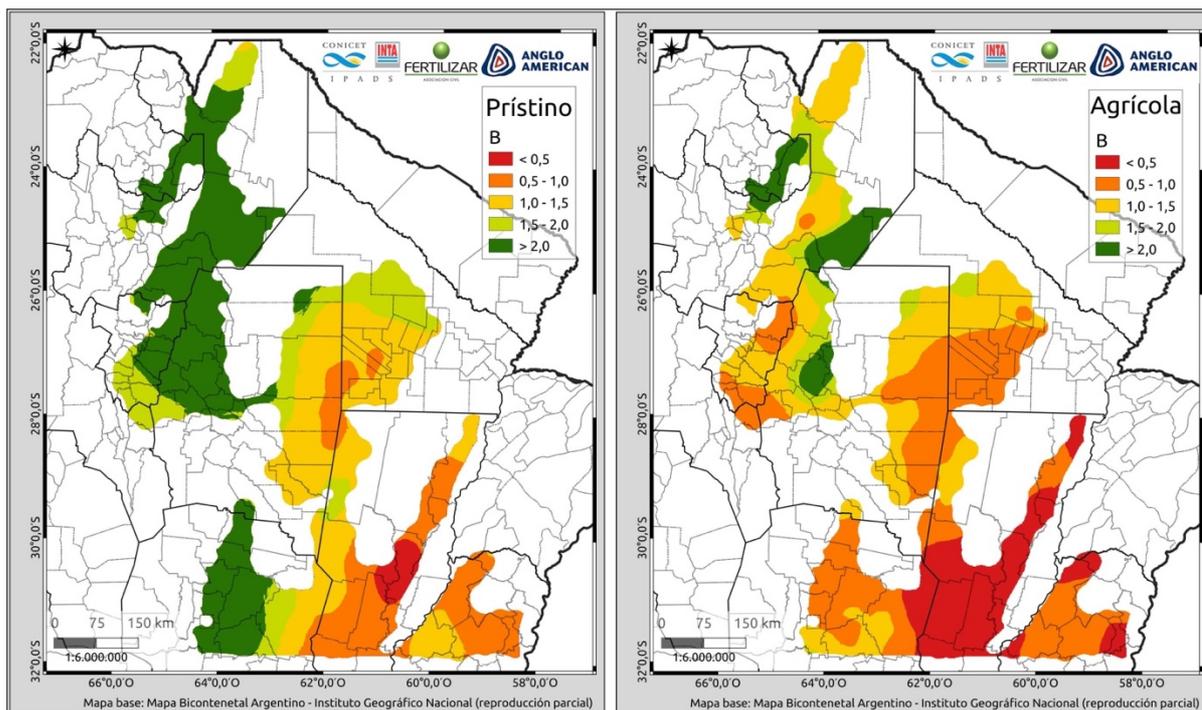
La agricultura redujo significativamente la disponibilidad de B extractable con acetato de amonio (B-AcNH<sub>4</sub>) respecto de los suelos prístinos (27% al 62%) según grupos (**Figura 3**). Los valores medios de B-AcNH<sub>4</sub> para los suelos agrícolas variaron de 0,40 a 2,36 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que para los suelos prístinos variaron de 0,95 a 3,71 mg kg<sup>-1</sup> (**Figura 3**). Los valores medios del G5 y G6 (norte de Santa Fe y norte de Entre Ríos) se ubicaron por debajo o muy cerca del valor inferior de los rangos críticos informados por Bustos (2022) para soja (0,61 a 0,94 mg kg<sup>-1</sup>).

El contenido de B-AcNH<sub>4</sub> se relacionó positivamente con el pH, P-Bray y la MO (B-AcNH<sub>4</sub>= -3,8 + 0,64 \* pH + 0,01 \* P-Bray + 0,13 \* MO; P < 0,05), no obstante, el coeficiente de regresión fue muy bajo (r<sup>2</sup>= 0,14). Por lo tanto, la diferencia de B-AcNH<sub>4</sub> entre suelos prístinos y agrícolas se debería principalmente a la falta de reposición de este nutriente en los planteos agrícolas.

Geográficamente, en suelos bajo agricultura, los valores más bajos (< 0,5 mg kg<sup>-1</sup>) se ubicaron al norte de Santa Fe y en algunas áreas pequeñas de Entre Ríos, mientras que los suelos con valores medios (0,5 a 1 mg kg<sup>-1</sup>) se ubicaron al noreste y sur de Tucumán y este de Santiago del Estero y suroeste de Chaco (**Figura 12**).

Como se mencionó, estos valores pueden ser limitantes para los cultivos de soja y maíz pero más aún para cultivos con mayores requerimientos como algunas leguminosas (alfalfa y tréboles) y girasol. Esta situación sugiere que es imprescindible monitorear el estado de esta variable en el suelo mediante el análisis del mismo y, también, comenzar a realizar calibraciones a campo para establecer umbrales críticos regionales.

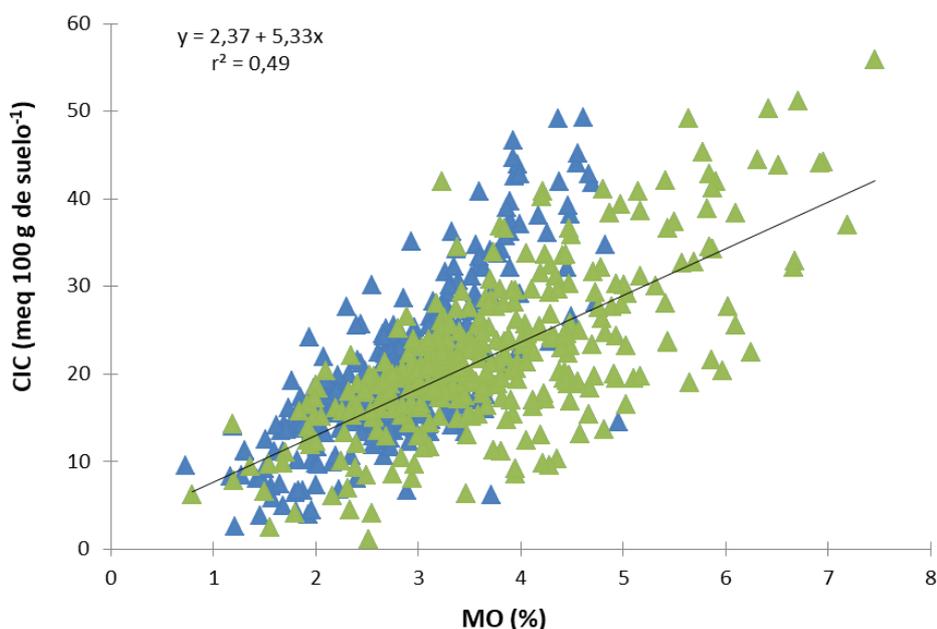
Esta situación sugiere que es imprescindible monitorear el estado de esta variable en el suelo mediante el análisis del mismo y, también, comenzar a realizar calibraciones a campo para establecer umbrales críticos regionales.



**Figura 12.** Niveles de B-AcNH<sub>4</sub> en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

## ►► CIC y cationes básicos

Se determinaron disminuciones significativas en los valores medios de la CIC debido a la agricultura en tres de los 5 grupos. En valores relativos estas reducciones variaron del 2,9 al 13,8% (**Figura 13**). Esta caída podría ser explicada por el menor contenido de MO de los suelos bajo agricultura respecto de los suelos prístinos, ya que se observó una relación significativa y positiva entre ambas variables (**Figura 14**). Esto sugiere que ante caídas de la MO del suelo el mismo tendría una menor capacidad de retener cationes básicos (Ca, Mg y K), lo que aceleraría la pérdida de estos nutrientes desde el sistema suelo.



**Figura 13.** Relación entre la CIC y la MO del suelo (0-20 cm). Azul: suelos agrícolas; Verdes: suelos prístinos.

Los valores medios de Ca intercambiable (Cai) disminuyeron en los suelos bajo agricultura en 3 de los 6 grupos. En valores relativos, esta disminución varió entre 10,7% y 12,7%. Los valores de Cai estuvieron en el rango medio a alto (de 2000 a más de 4000 mg kg<sup>-1</sup>) en la mayor parte de la zona relevada, salvo en el centro y norte de Santa Fe, zona que mostró los niveles más bajos (**Figura 15**). En dicha zona los valores de Cai están ligeramente por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (entre 600 a 1000 mg kg<sup>-1</sup>) (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). Coincidentemente, esta zona es la que mostró los niveles más bajos de pH, variable que se relacionó con la saturación cálcica ( $pH = 3,75 \times 0,1452; r^2 = 0,23$ ).

Sin embargo, como se mostró en la **Figura 13**, en otras áreas relevadas también se observó una importante reducción en los niveles de Cai, como por ejemplo en el NOA sur y en el centro norte de Córdoba (**Figura 15**), aunque dichos niveles están por encima de los umbrales críticos mencionados. La gran disminución en el centro norte de Córdoba y Santa Fe podría ser consecuencia de la alta frecuencia de soja en la rotación de cultivos, ya que la extracción de Ca de este cultivo es de cinco a seis veces mayor que la del trigo y el maíz (Vázquez y Pagani, 2015).

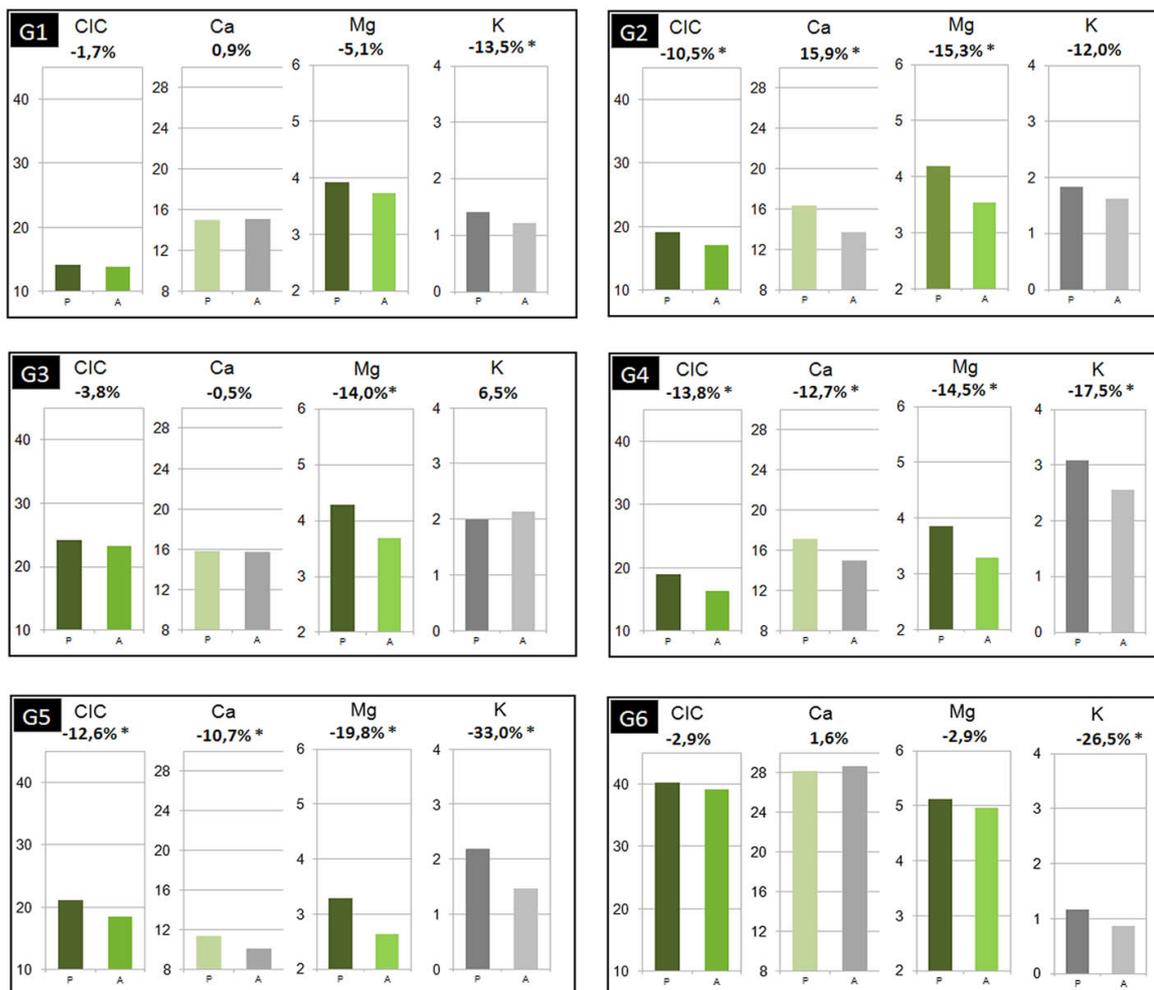
El Mg intercambiable (Mgi) también disminuyó, pero de manera más marcada que el Ca, ya que en 4 de los 6 grupos se determinaron reducciones significativas y, en términos relativos, variaron del 14,0 al 19,8% (**Figura 13**). Los valores de Mgi determinados en los suelos agrícolas estuvieron dentro del rango crítico informado por Bundy (2004) y Vázquez y

Pagani (2015) para suelos francos (de 100 a 500 mg kg<sup>-1</sup>). Nuevamente, de manera similar al Ca, los valores más cercanos al valor más bajo del rango se ubicaron sólo en el norte de Santa Fe (**Figura 16**). Es probable que está caída en los niveles de Mg en los suelos agrícolas de dicha zona se deban también a la mayor frecuencia de soja y maíz, y también, a la producción de maíz para silo, dado que por cada tonelada de biomasa seca se exportan de 22 a 27 kg/ha de Ca, Mg y K. A pesar de que los valores más bajos se presentaron en dicha zona, hubo caídas marcadas en los niveles de Mg también en otras zonas. En el NOA norte y sur y en una parte del NEA, los suelos bajaron al rango de 300 a 400 mg kg<sup>-1</sup> (**Figura 16**).

Por último, el nivel de K intercambiable (Ki) también se redujo por el uso agrícola del suelo en 4 de los 6 grupos y las caídas relativas fueron aún mayores que las de Mg, ya que variaron entre 13,5 y 36% (**Figura 13**). Los valores de Ki en los suelos bajo agricultura estuvieron dentro del rango alto a muy alto en la mayoría de las zonas (> 400 mg kg<sup>-1</sup>) y por encima de los valores umbrales críticos (140 a 220 mg kg<sup>-1</sup>) informados para diferentes cultivos por algunos autores (Barbazán et al., 2011; Barbagelata y Mallarino, 2012; Orcellet et al., 2023). Sin embargo, las zonas más críticas (valores < a 200 o entre 200 y 400 mg kg<sup>-1</sup>) se observaron en el noreste de Santa Fe y norte de Entre Ríos (**Figura 17**). Esto podría deberse al bajo contenido de K total de estos suelos (Morras, 2003; Larrea, 2019), a la presencia del horizonte B textural, que limita el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes desde ese horizonte (Correndo et al., 2011), a la baja o nula aplicación de K y al aumento de los rendimientos y la extracción de K en los granos de cultivos. A manera de ejemplo, para rendimientos potenciales en secanos en dichas zonas de 3,2 a 4,9 t ha<sup>-1</sup> para soja y de 10,4 a 13 t ha<sup>-1</sup> 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.

Para finalizar, tomando en cuenta los valores medios de Ca, Mg y K de la **Figura 13**, se calculó la relación  $C_{ai} + M_{gi} / K_i$  para los distintos grupos y, a excepción del G6 (norte de Entre Ríos), la actividad agrícola no cambió significativamente esta relación. Para los suelos prístinos el valor varió entre 6,7 y 28,5, mientras que para los suelos agrícolas esta relación varió entre 7,2 y 39. En ambos casos, el valor más alto corresponde al G6 y sugiere que en estos suelos se podrían manifestar deficiencias de K, ya que este valor está por arriba del ideal (7-11/1) informado por Vázquez y Pagani (2015). Esta alta relación se debe al elevado contenido de Ca y al bajo contenido de K del material original que formó estos suelos (Morras, 2003; Larrea, 2019). La relación Ca/Mg varió entre 3,4 y 5,5 para suelos prístinos y entre 3,8 y 5,6 para suelos agrícolas, y están dentro del rango ideal informado por Vázquez y Pagani (3-15/1), por lo que el Mg no limitaría la productividad de los cultivos. A pesar de que en estas relaciones ideales han sido ampliamente difundidas, existen trabajos que ponen en duda la efectividad de las mismas como predictores de deficiencias y sugieren como más adecuados

a los valores absolutos de estos nutrientes (Kopittke y Menzies, 2007). Esto es así porque una relación baja Ca+Mg/K podría enmascarar deficiencias de K si el suelo tiene muy bajos valores de Ca y Mg intercambiable, de igual manera podría ocurrir con la relación Ca/Mg; podría haber una subestimación de la disponibilidad de Mg si el Cai es bajo.



**Figura 13.** Valores medios de CIC, Ca, Mg y K intercambiable (en la capa de 0-20 cm) en suelos prístinos (P) y agrícolas (A) de algunas regiones del NOA y NEA argentino. Asteriscos indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) según el T-student o por el test no paramétrico de Wilcoxon (Bilisoly et al., 1997). Los valores en porcentaje indican la reducción (negativo) o incremento (positivo) de la variable en consideración entre muestras de suelos prístinos y agrícolas.

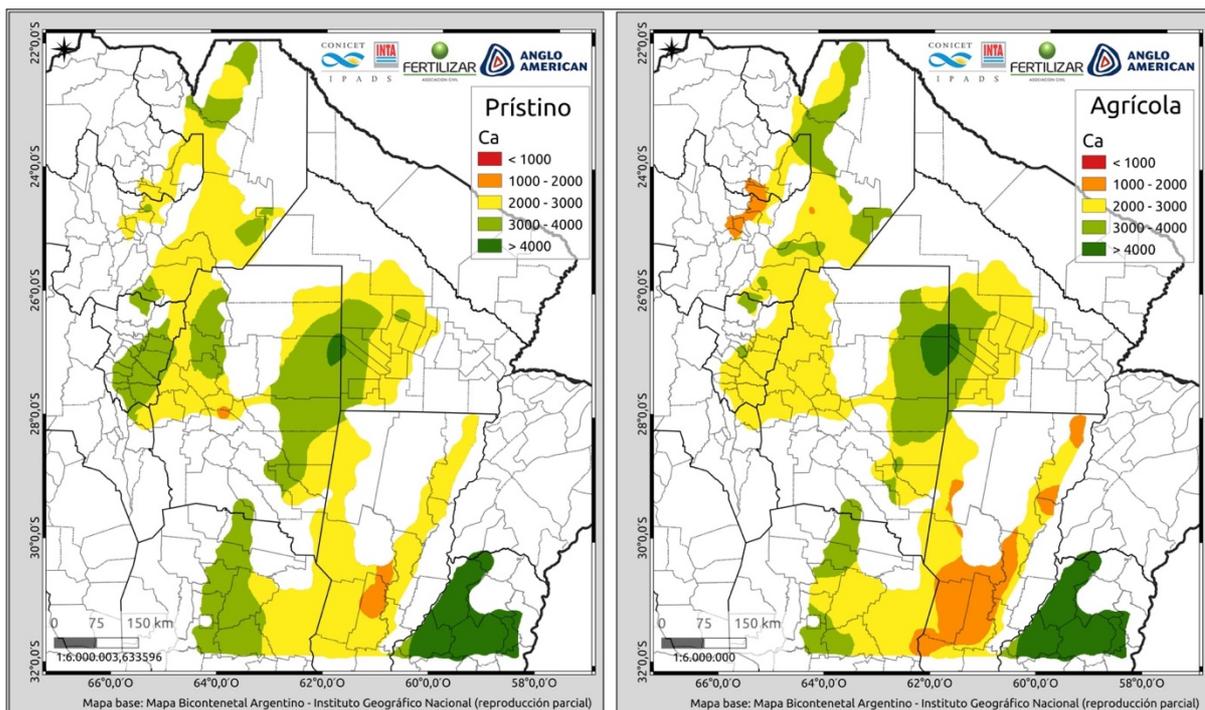


Figura 15. Niveles de Ca intercambiable en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

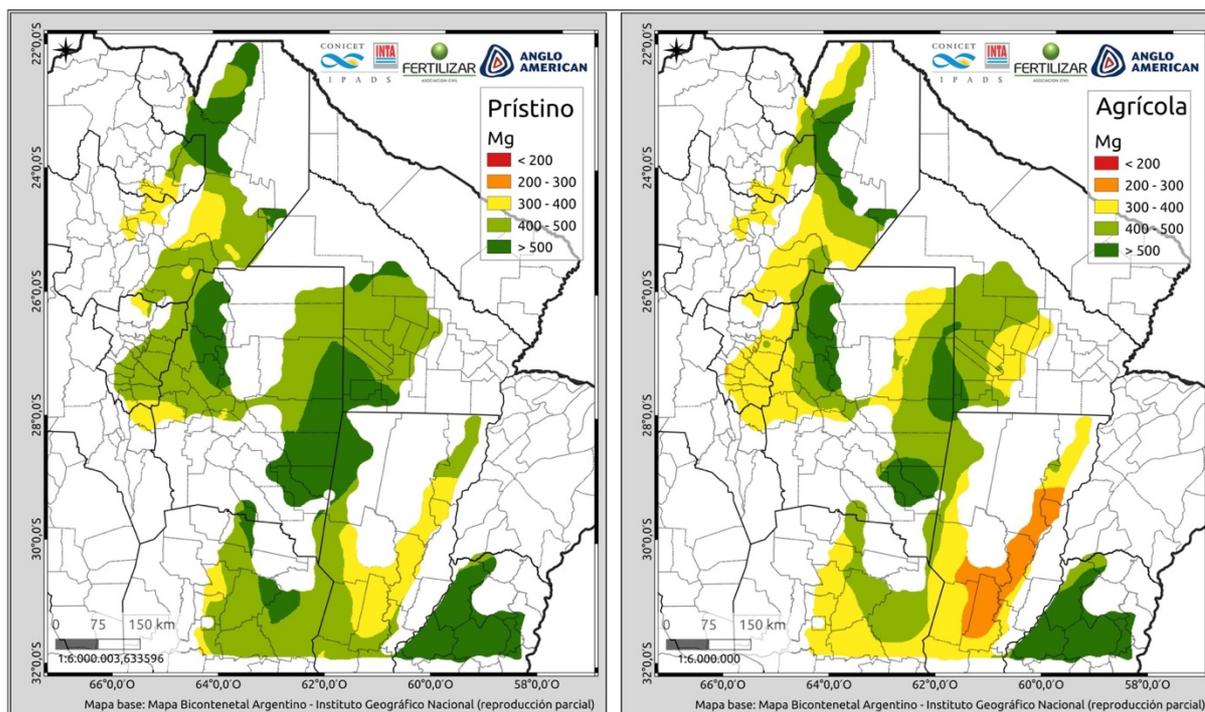


Figura 16. Niveles de Mg intercambiable en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

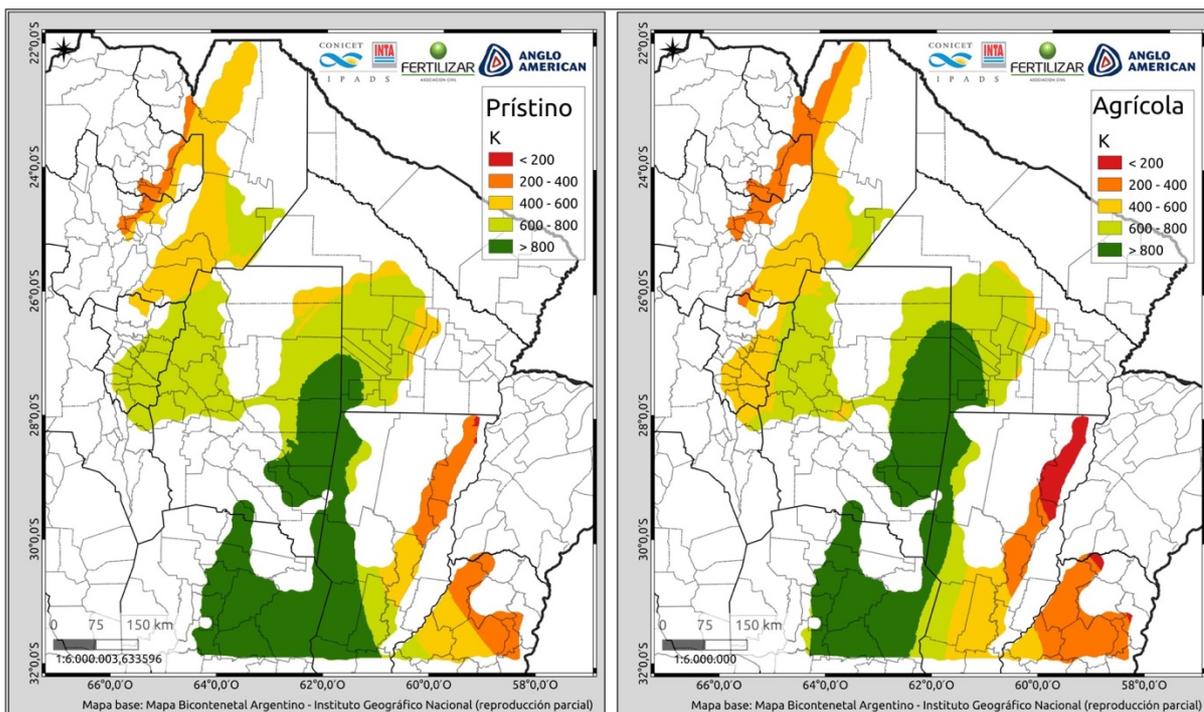


Figura 17. Niveles de K intercambiable en suelos prístinos y agrícolas del NOA y NEA en el estrato de 0-20 cm.

## >>. CONCLUSIONES

- La expansión agrícola hacia el NOA y NEA argentino ha provocado reducciones importantes en la MO (principal indicador de salud edáfica) de los suelos respecto a la condición prístina (hasta 34%). Excepto en el norte de Entre Ríos, la mayor parte de los suelos bajo agricultura mostraron valores de MO que variaron entre el 2 y 3%. En este contexto, incrementar la cobertura del suelo y la entrada de carbono al suelo a través de establecer sistemas mixtos agrícolas-ganaderos o una mayor intensificación (más cultivos por año y mayor proporción de gramíneas, uso de cultivos puente), serían herramientas de manejo claves para mantener y/o mejorar los niveles de MO actuales.
- A excepción del norte de Santa Fe, los suelos de las demás áreas bajo agricultura mostraron un aumento de pH respecto a los suelos en condición prístina. Esto podría ser debido a la disminución de la CIC asociado al menor contenido de MO y, en consecuencia, a una mayor saturación con bases o al ascenso freático, en casos donde los suelos permanecen con poca o nula cobertura viva la mayor parte del tiempo.
- Para P, los niveles de P-Bray en suelos bajo agricultura también han disminuido considerablemente respecto a aquellos en condición prístina (hasta 62%). Los suelos con valores más bajos ( $< 20 \text{ mg kg}^{-1}$ ) se ubicaron al sur de Tucumán, norte y noreste de Santa Fe y norte de Entre Ríos. Por lo tanto, en esta zona es clave implementar el análisis de suelo como práctica de manejo habitual para ajustar las dosis de nutriente aplicado.
- Se determinó una disminución del Fe-DTPA en los suelos bajo agricultura en el oeste y este de Santiago del Estero y suroeste del Chaco. Esta caída se explicó en gran parte por el aumento de pH del suelo bajo agricultura. Por lo tanto, se recomienda chequear este nutriente mediante el análisis de suelo. No se determinaron cambios significativos en los niveles de Mn y Cu.
- Se determinaron importantes disminuciones en los niveles de Zn (hasta el 79%) y de B (hasta el 62%) respecto a los suelos prístinos que se asocian a la extracción por parte de las cosechas sin hábitos de fertilización. Una gran parte de la superficie

cultivada muestra valores de Zn-DTPA menores a  $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$ , los cuales podrían ser limitantes para la producción, mientras que en el caso del B, casi un 50% de la superficie cultivada muestra valores por debajo de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ , los que también podrían ser limitantes teniendo en cuenta el bajo contenido de MO de estos suelos. Por lo tanto, es imprescindible incluir en el análisis de suelo de rutina a estos dos nutrientes.

- Se determinaron disminuciones en la CIC (entre 1,7% al 13%) en los suelos bajo agricultura, las cuales se relacionaron en parte con la disminución del contenido de MO. Por lo tanto, la capacidad de retener cationes básicos sería más baja, lo que podría acelerar la pérdida de los mismos en períodos de excesos hídricos.
- Se determinaron disminuciones en las fracciones intercambiables de Ca, Mg y K en los suelos bajo agricultura, las cuales oscilaron entre 0,5% al 33% dependiendo del nutriente y zona. Si bien la mayoría de las zonas relevadas mostraron contenidos de Cai y Mgi superiores a los umbrales críticos internacionales, las zonas que podrían presentar limitaciones en el mediano plazo se ubican al norte y noreste de Santa Fe. En cuanto al Ki, las zonas con niveles más cercanos a los umbrales críticos se ubicaron al noreste de Santa Fe y norte de Entre Ríos.

### ▶▶ **Agradecimiento**

Los autores agradecen a FERTILIZAR Asociación Civil y Anglo-American por el financiamiento de la investigación.

## >>. BIBLIOGRAFÍA

- Aramburu Merlos, F.A.; Monzón, J.P., Mercau, 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. y 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.
- Behera, S. K.; Shukla, A. K. (2014). Total and extractable manganese and iron in some cultivated acid soils of India: Status, distribution and relationship with some soil properties. *Pedosphere*, 24(2), 196-208.
- Bilisy, R.L., S. Nokes; S.R. Workman. (1997). Statistical treatment of soil chemical concentration data (Vol. 26, No. 3, pp. 877-883). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Brady, N.; R. Weil. 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.
- 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. 2021. Diagnóstico de la disponibilidad de zinc y boro para el cultivo de soja mediante el análisis de suelo y planta. Tesis para optar al Título de MAGISTER en Producción Vegetal Orientación Fertilidad de Suelos Área de Agricultura. Programa de posgrado en ciencias agrarias facultad de ciencias agrarias universidad nacional de Mar del Plata.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T., 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 777-783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

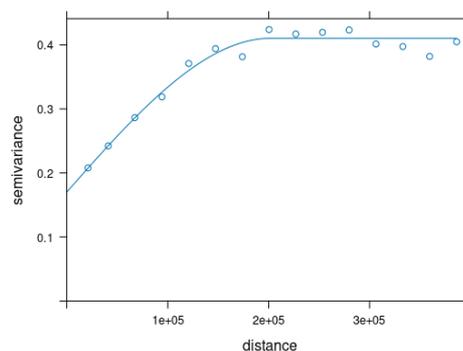
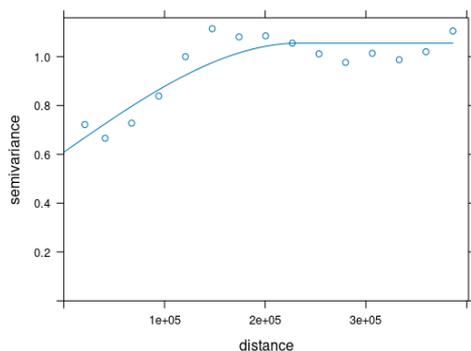
- Chapman, HD. 1965. Cation-exchange capacity 1. En: CA. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Vol. 2. Pp. 891-901. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Córdoba M, Bruno C, Aguata F, Tablada M, Balzarini M. 2014. Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. *Manual de Buenas Prácticas*. Ed. Balzarini, M. Eudecor. Córdoba, Argentina.
- Correndo, A; Rubio, G; Ciampitti, IA; GARCÍA, FO. 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. *Simposio Fertilidad 2011*. IPNI, Rosario, Argentina.
- De Abelleira D; S. Verón; S. Banchemo; M. Iturralde Elortegui; S. Valiente; O. Puig; F. Murray; J.P.; Martini; K. Zelaya; D. Maidana; N. Varlamoff; J. Peiretti; P. Benedetti; J. Portillo; M. Melilli; E. Maidana; Y. Goytía; V. Sapino; A. Regonat; F. Cracogna; C. Espíndola; M. Parodi; F. Colombo; J. Scarel; J. Ayala; L. Martins; M. Basanta; A. Rausch; G. Almada; L. Boero; J. Calcha; A. Chiavassa; M. Lopez de Sabando; D. Kurtz; F. Marini; S. Sarrailhe; M. Petek; T. Propato; A. Ferraina; A. Pezzola; C. Winschel; S. Muñoz; J. Mesa; J. Volante. 2021. *Mapa Nacional de Cultivos campaña 2020/2021, Colección 1, Versión 1.0, Informe*, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina. <http://www.geointa.inta.gov.ar/2021/09/07/mapa-nacional-de-cultivos-campana-2020-2021/>. Última revisión: abril 2023.
- De Gerónimo, E.; V.C Aparicio. (2022). Changes in soil pH and addition of inorganic phosphate affect glyphosate adsorption in agricultural soil. *European Journal of Soil Science*, 73(1), e13188.
- 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.
- García F.O.; L. Picone; I.A. Ciampitti. 2015. Fósforo. En Echeverría H. E. y F.O. García (ed.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. 2a. Edición. Buenos Aires, Argentina. ISBN 9-789875-215658. p. 229-264.
- García, G.V.; Wyngaard, N.; Reussi Calvo, N.I; San Martino, S.; Covacevich, F.; Studdert, G.A. 2020. Soil survey reveals a positive relationship between aggregate stability and anaerobically mineralizable nitrogen. *Ecological indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106640>.
- Gayo, S.; Regeiro, D. 2022. Fertilización 2021/22. Relevamiento de tecnología Agrícola aplicada (Retaa). Informe mensual N° 63. <http://bolsadecereales.org/retaa>. ISSN 2591-4871
- Guggenberger, G.; W. Zech; L. Haumaier; B.T Christensen. (1995). Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution <sup>13</sup>C NMR analysis. *European Journal of Soil Science*, 46(1), 147-158.
- Jobbágy, E.; M. Noretto; C. Santoni; G. Baldi. 2008. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. Diciembre de 2008 *Ecohidrología de llanuras y cambio de vegetación*. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- 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. 65:89-99
- 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.*

- 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.
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
- MAGyP, 2023. Estimaciones Agrícolas del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Presidencia de la Nación <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Consultado en abril de 2023.
- Martínez Cuesta, N; Carciochi, W.; Salvagiotti, F.; Sainz Rozas, H.; Wyngaard, N.; López de Sabando, M.; Barbieri, P. 2021. DTPA-extractable zinc threshold for wheat grain yield response to zinc fertilization in Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*. DOI: 10.1002/saj2.20295.
- 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.
- Orcellet J. M., C. Quintero, E. Figueroa, M. F. González Sanjuan, F.O. García. 2023. Potasio en cultivos extensivos del litoral argentino. *Simposio de Fertilidad*, pag 53-57.
- Pagani, A. 2015. Manejo sitio-específico de nutrientes. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 839-864
- Panigatti, J.L. (2010). Argentina: 200 años, 200 suelos (No. P32 INTA 18474 y CD 67). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires (Argentina).
- Picone L. 2015. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Cap. 1, p. 31-51. Ediciones INTA. 2015. ISBN: 978-987-521-565-8. Buenos Aires, Argentina.
- R Core Team (2023), R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>,
- Sainz Rosas, H.; H.E. Echeverría; H.P. Angelini. 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.; Echeverría, H.E.; Angelini, H. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra Pampeana argentina. 2012. *RIA / Vol. 38 / N.º 1*
- Sainz Rozas, H.; Eyherabide, M.; G. Larrea; N. Martínez Cuesta; H. Angelini; N. Reussi Calvo; H. E. Echeverría; N. Wyngaard. 2019. Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana. Argentina. Buenos Aires. 2019. *Simposio de Fertilidad 2019*. Fertilizar Asociación Civil.
- Satorre E. y F. H. Andrade. 2021. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. *Ciencia del Suelo*. Volumen 29 número 173:19-27.

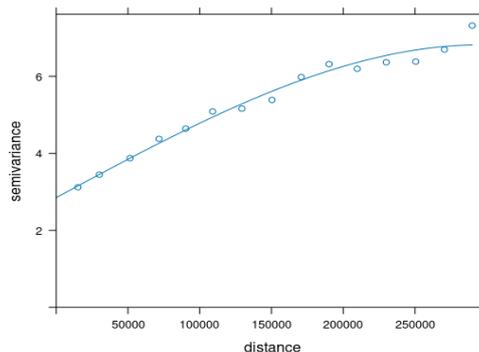
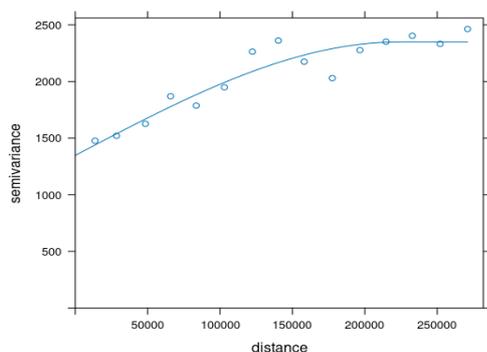
- Schulte, E.E.; B.G. Hopkins. 1996. Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition, In: FR Magdoff et al,(ed) Soli organic matter: Analysis and interpretation, SSSA Spec, Publ, 46, SSSA, Madison, WI, P 21-31.
- Six, J.; C. Feller; K. Denef; S.M. Ogle; J.C. S´a Moraes; A. Albrecht. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – effects of no-tillage. *Agronomie*. 22, 755–775. <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>.
- 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. 357-372.
- Vázquez, MS & A Pagani. 2015. Calcio y Magnesio. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 317-355.
- Weil, R.R., Magdoff, F. 2004. Significance of soil organic matter to soil quality and health. In Magdoff, F.; Weil, R.R. (eds.). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Boca Ratón, Florida, Estados Unidos: CRC Press. pp. 1-43.
- Zimback C. R. L. (2001). *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo*. Tese (Livre-Docência) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu.

## >>. ANEXO

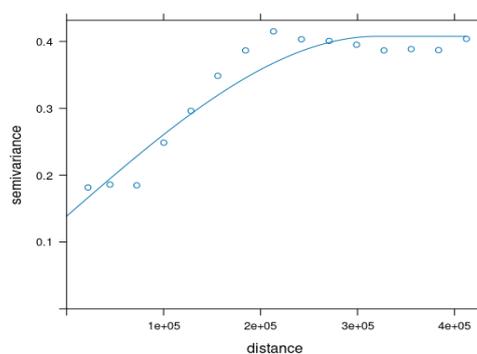
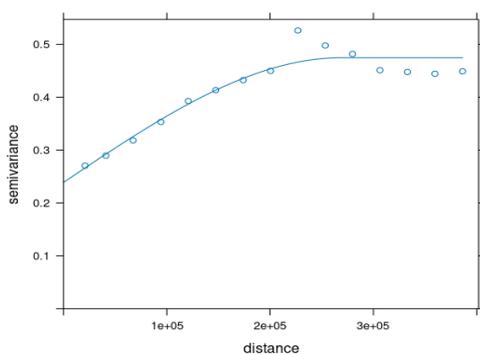
### Modelos de interpolación para las variables edáficas mapeadas y parámetros asociados a su capacidad predictiva



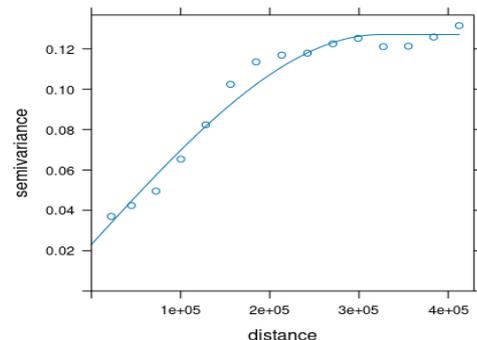
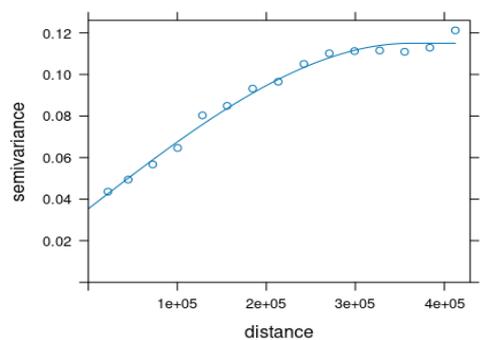
P	A	MO (%)
Spherical	Spherical	Model
233603	201898	Range
0.4466	0.2401	Partial sill
0.6086	0.1702	Nugget
0.3778	0.4518	r <sup>2</sup>
0.9020	0.5384	RMSE



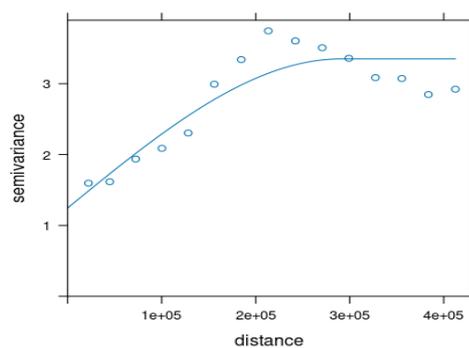
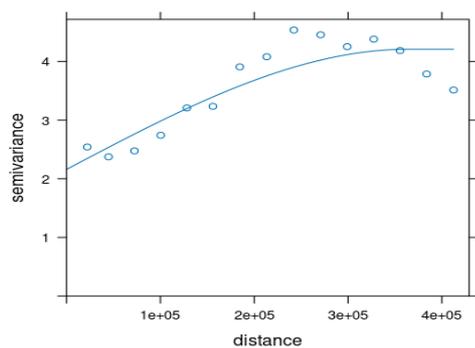
P	A	P-Bray (ppm)
Spherical	Spherical (raiz(P))	Model
223104	296378	Range
1347	3.9713	Partial sill
1000	2.8507	Nugget
0.4210	0.5893	r <sup>2</sup>
40.2105	1.9249	RMSE



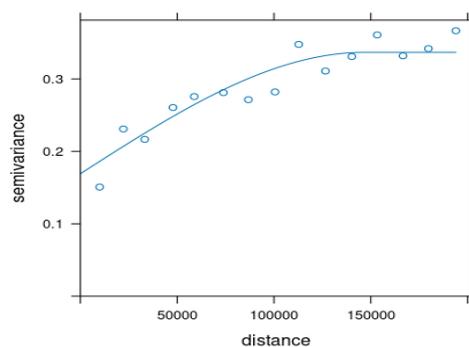
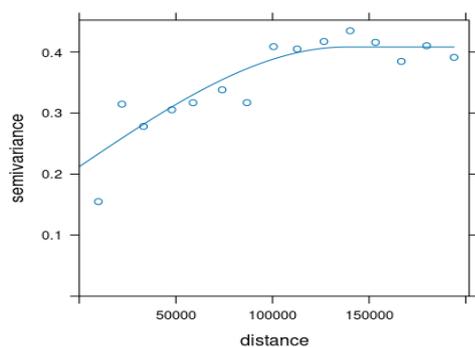
P	A	pH
Spherical	Spherical	Model
269174	320330	Range
0.2357	0.2690	Partial sill
0.2380	0.1386	Nugget
0.3843	0.5934	r <sup>2</sup>
0.5765	0.4767	RMSE



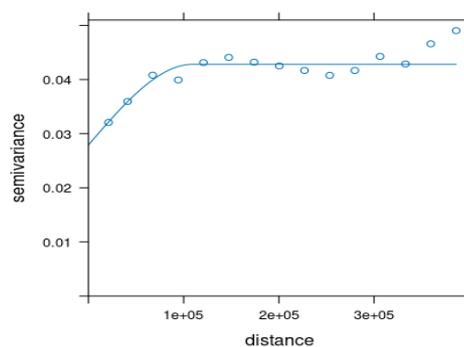
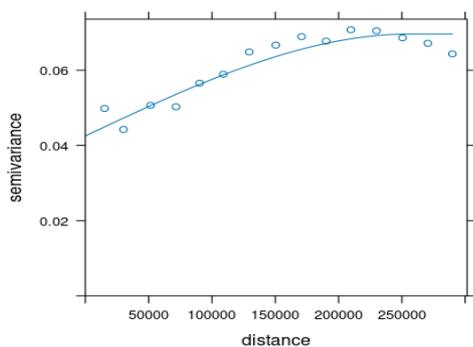
P	A	Fe
Spherical (log10(Fe))	Spherical (log10(Fe))	Model
362104	323690	Range
0.0796	0.1039	Partial sill
0.0353	0.0231	Nugget
0.5468	0.6496	r <sup>2</sup>
0.2317	0.2139	RMSE
0.7397	0.8063	r (pearson)



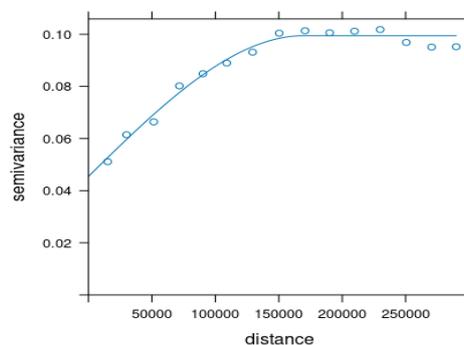
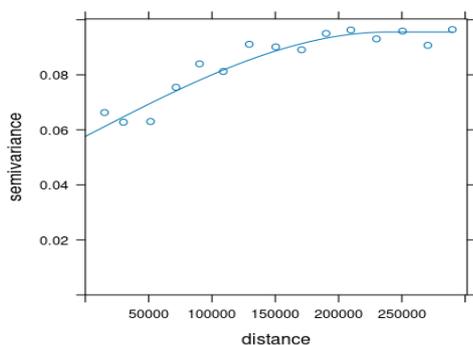
P	A	Mn
Spherical (Raíz(Mn))	Spherical (Raíz(Mn))	Model
364446	290590	Range
2.0483	2.1041	Partial sill
2.1600	1.2464	Nugget
0.3688	0.5545	r <sup>2</sup>
1.7488	1.3661	RMSE
0.6102	0.7451	r (pearson)



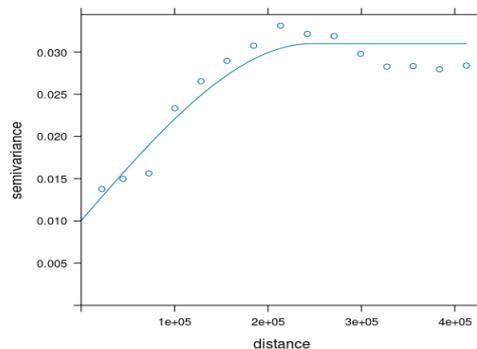
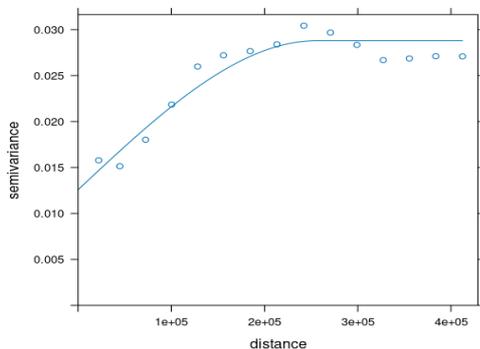
P	A	Cu
Spherical	Spherical	Model
138025	146565	Range
0.1959	0.1676	Partial sill
0.2121	0.1691	Nugget
0.4200	0.4393	r <sup>2</sup>
0.5641	0.4993	RMSE
0.6485	0.6631	r (pearson)



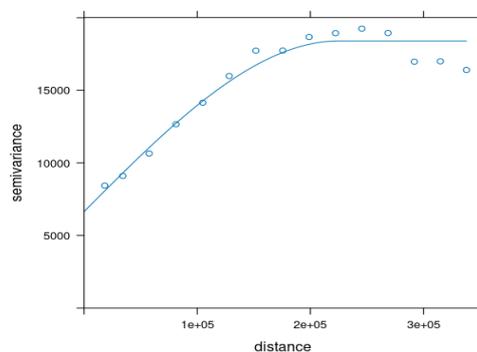
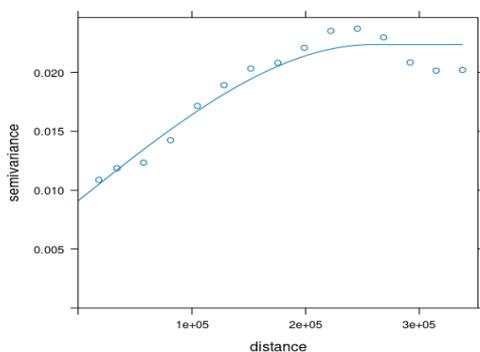
P	A	Zn
Spherical (log10(Zn))	Spherical (log10(Zn))	Model
256698	109463	Range
0.0271	0.0149	Partial sill
0.0425	0.0279	Nugget
0.2714	0.3235	r <sup>2</sup>
0.2276	0.1906	RMSE
0.5217	0.5710	r (pearson)



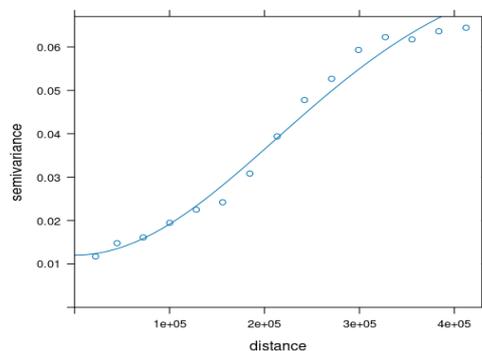
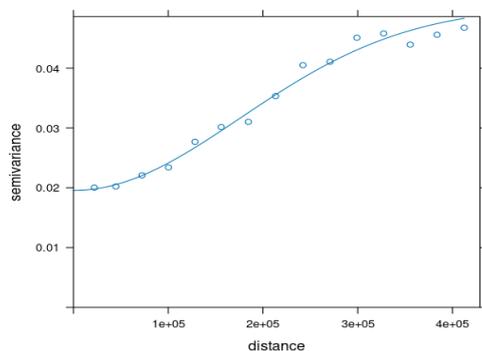
P	A	B
Spherical (log10(B))	Spherical (log10(B))	Model
239168	169593	Range
0.0379	0.0539	Partial sill
0.0576	0.0454	Nugget
0.4203	0.4543	r <sup>2</sup>
0.2614	0.2636	RMSE
0.6483	0.6751	r (pearson)



P	A	Ca
Spherical (log10(Ca))	Spherical (log10(Ca))	Model
255770	247106	Range
0.0162	0.0209	Partial sill
0.0125	0.0100	Nugget
0.3208	0.3787	r <sup>2</sup>
0.1384	0.1361	RMSE
0.5671	0.6341	r (pearson)



P	A	Mg
Spherical (log10(Mg))	Spherical	Model
258688	225124	Range
0.0132	11750	Partial sill
0.0091	6645	Nugget
0.3544	0.4201	r <sup>2</sup>
0.1170	98.53	RMSE
0.5955	0.6481	r (pearson)



P	A	K
Gaussian (log10(K))	Gaussian (log10(K))	Model
248829	299545	Range
0.0307	0.0678	Partial sill
0.0195	0.0120	Nugget
0.5304	0.7229	r <sup>2</sup>
0.1514	0.1223	RMSE
0.7287	0.8506	r (pearson)



**FERTILIZAR**

ASOCIACION CIVIL

