

CONTENIDO DE ELEMENTOS TRAZA EN ARGIUDDOLES DE LA CUENCA DEL ARROYO PERGAMINO BAJO AGRICULTURA CONTINUA

LETICIA SOLEDAD GARCIA*¹ LUIS ANTONIO MILESI DELAYE¹; MARÍA LILIANA DARDER¹; ANA CLARA CAPRILE¹; ADRIÁN ENRIQUE ANDRIULO^{1,2}

Recibido: 7/5/2019

Recibido con revisiones: 18/7/2019

Aceptado: 19/7/2019

RESUMEN

Los fertilizantes, utilizados continuamente para aumentar los rendimientos de cultivo, conllevan elementos traza (ET) potencialmente contaminantes para el suelo. Los objetivos del trabajo fueron: a) analizar las concentraciones de ET en fertilizantes comúnmente utilizados en la pampa ondulada Argentina; b) examinar las concentraciones de ET en el suelo a 0-20 cm luego de 25 años en una secuencia maíz-trigo/soja de segunda (M-T/S) bajo siembra directa continuamente fertilizada con nitrógeno y fósforo; c) explorar la contribución de ET por parte de los fertilizantes utilizados en la secuencia; d) estimar el aporte de ET durante 25 años en un sector de la cuenca del arroyo Pergamino y compararlo con las reservas del suelo a 0-5 cm; e) contrastar las reservas de ET con los niveles guía nacionales de contaminación para uso agrícola y f) realizar un balance simplificado de ET en ambos sitios. En general, los fertilizantes fosforados presentaron las mayores concentraciones de ET y se ubicaron en el límite inferior de los intervalos informados a nivel global. En M-T/S las concentraciones de plomo, cadmio, cobre, zinc y molibdeno del horizonte superficial se encontraron en el límite inferior del intervalo de concentraciones mundiales mientras que las correspondientes a arsénico, vanadio y manganeso se acercaron al promedio de dicho intervalo. La proporción de ET acumulada proveniente del aporte de los fertilizantes en relación con la reserva de ET del horizonte A en la secuencia M-T/S y con la reserva del horizonte 0-5 cm en el sector de la cuenca resultó muy pequeña, aunque con una muy elevada dispersión en el sector de la cuenca. En ninguno de los casos se superaron los límites edáficos permisibles propuestos por la ley argentina de residuos peligrosos.

Palabras clave: metales pesados, fertilizantes, siembra directa, calidad de suelos

CONTENT OF TRACE ELEMENTS IN ARGIUDDOLLS OF THE PERGAMINO STREAM BASIN UNDER CONTINUOUS AGRICULTURE

ABSTRACT

Fertilizers carry potentially soil contaminating trace elements (TE). The aims of this work were: a) to analyze the concentrations of TE in fertilizers commonly used in Rolling pampas region; b) to examine the TE soil concentrations in the 0-20 cm deep after 25 years of a maize-wheat/soybean (M – W/S) sequence under no tillage, continuously fertilized with nitrogen and phosphorus; c) to explore the contribution of TE by fertilizers used in the sequence; d) to estimate the TE input during 25 years in a sector of the Pergamino stream basin and to compare with soil TE reserves of the 0-5 cm deep; e) to contrast the soil TE reserves with the pollution national guide levels informed for agriculture land-use and f) to perform a simplified TE balance on both sites. In general, phosphorus fertilizers had the highest TE concentrations and they were located at the lower limit of the globally reported intervals. In M-W/S the concentrations of lead, cadmium, copper, zinc and molybdenum of the surface horizon were found in the lower limit of the range of global concentrations while those corresponding to arsenic, vanadium and manganese were close to the average. The proportion of TE accumulated from the contribution of fertilizers in relation to the reserve of TE of horizon A in the sequence M-W/S and with the horizon 0-5 cm in the sector of the basin was very small, although with a very high dispersion in the basin sector. In none of the cases the permissible land limits proposed by the Argentine law on hazardous waste were exceeded.

Key words: heavy metals, fertilizers, no tillage, soil quality.

¹ EEA Inta Pergamino

² Autora de contacto garcia.leticia@inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes minerales aportan los nutrientes necesarios para incrementar los rendimientos de los cultivos. Contribuyen con un 40 a 60% de la producción mundial de alimentos (Roberts, 2009) y se espera que su uso aumente, a medida que la población mundial se incremente y la demanda exceda la capacidad actual de producción de las tierras agrícolas (Stewart *et al.*, 2005). A nivel mundial, el consumo total de fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio, es decir, N, P y K, respectivamente) en 2015 fue de 137,6 kg ha⁻¹ de tierra cultivable y en Argentina alcanzó los 27,6 kg ha⁻¹ (World Bank, 2018).

Según las Naciones Unidas, se espera que la población mundial alcance los 9,2 mil millones para 2050. El Proyecto del Milenio y su informe del Estado del futuro (Glenn *et al.*, 2008) indicaron que la producción de alimentos tendrá que aumentar al doble en 30 años, para ayudar a resolver la crisis alimentaria originada en 2008. El aumento en la producción de alimentos tendrá que ocurrir en tierras cultivables cada vez menos disponibles; por lo tanto, esto solo puede lograrse intensificando la producción. Sin embargo, ésta intensificación deberá realizarse de manera ambientalmente segura, apoyada en procesos internos y conducidos biológicamente en el suelo, en un esfuerzo por reducir las dosis externas y alcanzar rendimientos adecuados (Lowrance *et al.*, 1984).

Los fertilizantes, además de los nutrientes, contienen elementos traza (ET) potencialmente contaminantes en diferentes proporciones. El interés ambiental por la presencia de ciertos metales como cadmio (Cd), manganeso (Mn), zinc (Zn), plomo (Pb), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni), vanadio (V), cobalto (Co), cromo (Cr) y de metaloides como el arsénico (As) en suelos agrícolas está relacionado con su no biodegradabilidad. Su capacidad de acumulación en el perfil del suelo hasta concentraciones tóxicas y su interacción con diferentes propiedades del mismo determinan su acumulación, movilidad y biodisponibilidad hacia otros componentes del ecosistema (Bernad *et al.*, 2007). Algunos de ellos (As, Cd y Pb) no son esenciales para las plantas mientras que otros (Cu, Zn, Fe y Mn) a pesar de ser-

lo, en algunos casos, resultan motivo importante de preocupación ambiental. Su acumulación excesiva en los suelos agrícolas provoca contaminación y tienen consecuencias para la calidad y la seguridad de los alimentos. Los estudios internacionales sobre la concentración de ET en fertilizantes muestran resultados muy variables debido a lo diverso de su origen y a procesos que se siguen en su fabricación. Por lo tanto, resulta necesario estudiarlos de manera local y en base a las regulaciones oficiales, con la intención de avanzar hacia una agricultura sostenible (Rodríguez Ortiz *et al.*, 2014).

En la subregión pampa ondulada argentina, son escasos los estudios relacionados con el efecto de las actividades agrícolas sobre la acumulación de ET en el suelo (Lavado y Aparicio, 2019; Miretti *et al.*, 2012; Buffa & Ratto, 2009; Lavado & Zubillaga, 2008; Lavado, 2006; Lavado *et al.*, 2004; Lavado *et al.*, 1999). Los objetivos del presente trabajo fueron: a) analizar las concentraciones de ET en fertilizantes comúnmente utilizados en la región; b) examinar las concentraciones de ET en el suelo a 0-20 cm luego de 25 años de la secuencia maíz-trigo/soja de segunda (M-T/S) bajo siembra directa (SD) continuamente fertilizado con N y P; c) explorar la contribución de ET por parte de los fertilizantes utilizados en dicha secuencia; d) estimar el aporte de ET durante 25 años en un sector de la cuenca del arroyo Pergamino, considerando una secuencia típica, tipo y dosis de fertilizantes concebida a partir de información de encuestas publicadas y de datos de producción oficiales, y compararlo con las reservas del suelo a 0-5 cm en posiciones de loma y media loma; e) contrastar las reservas de ET con los niveles guía nacionales de contaminación para uso agrícola en ambos sitios y f) realizar un balance simplificado de ET en los mismos sitios de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la cuenca del arroyo Pergamino, Buenos Aires – Argentina. Para tal fin, se tomó información del tratamiento M-T/S bajo SD fertilizado con N y P de un ensayo de larga duración de secuencias de cultivos y sistemas de labranzas ubicado en la Estación Experimental

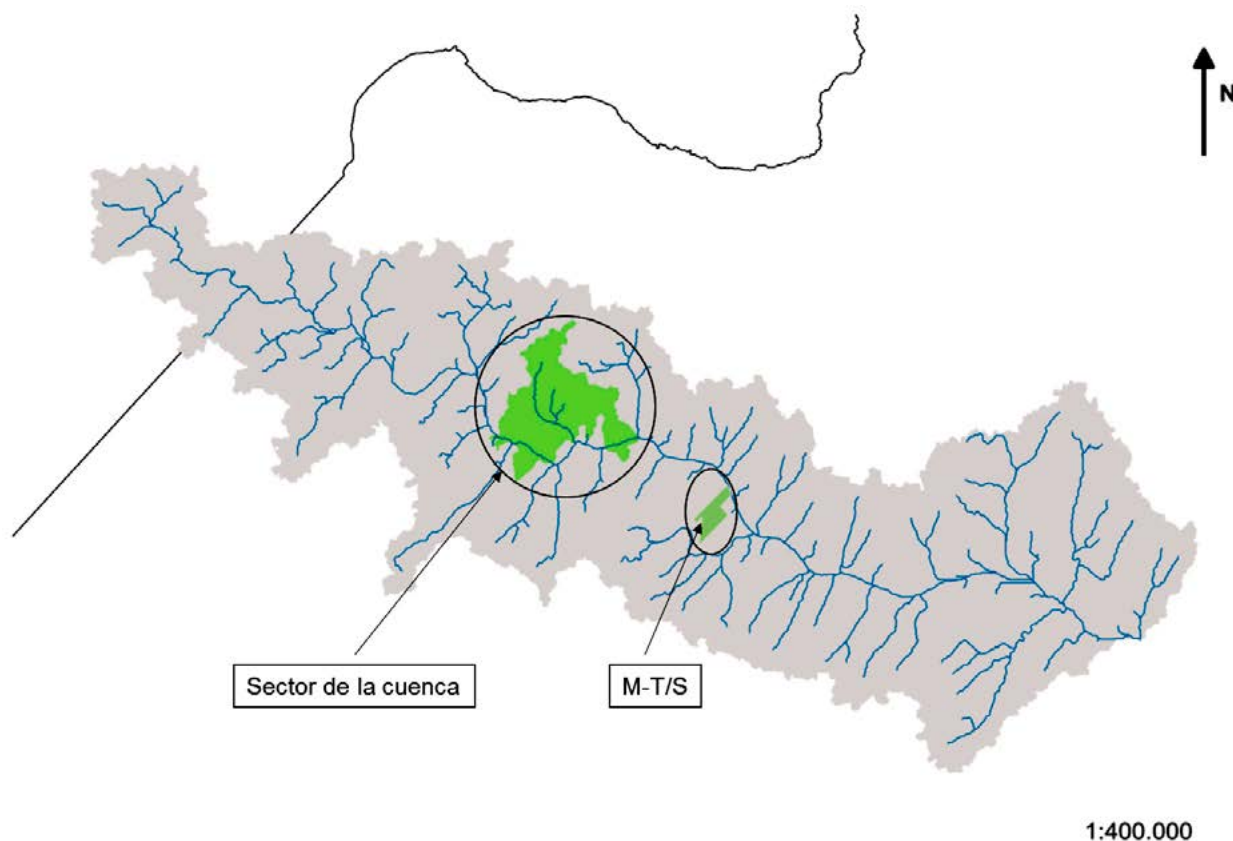


Figura 1. Ubicación del área de la cuenca del arroyo Pergamino y del tratamiento maíz-trigo/soja de segunda siembra bajo siembra directa (M-T/S) de un ensayo de larga duración de secuencias de cultivos y sistemas de labranza ($33^{\circ}57'36,13\text{S}$, $60^{\circ}33'47,78\text{O}$).

Figure 1. Location of the Pergamino stream basin area and the long-term corn-wheat/soybean of second treatment under direct drilling (M-W/S) from a long-term trial of crop sequences and tillage systems ($33^{\circ}57'36,13\text{S}$, $60^{\circ}33'47,78\text{O}$).

Agropecuaria (EEA) Pergamino del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y de un sector de la cuenca (110 km² en total) que se encuentra bajo agricultura continua (**Figura 1**).

Descripción del área de estudio

La cuenca del arroyo Pergamino es una cuenca típica de la región pampa ondulada, de acuerdo con indicadores hidrológicos como: divisoria de aguas definida, red de drenaje desarrollada y punto de descarga único (Uriburu Quirno *et al.*, 2010). Se caracteriza por un relieve suavemente ondulado con pendientes variables en el intervalo de 0,5 a 3%. La región posee una condición fisiográfica que facilita el drenaje superficial hacia el NE (Cuenca del Plata) (Instituto Nacional del Agua [INA], 2007).

El clima es templado, con temperaturas medias que oscilan entre 10 y 12 °C en el invierno

y 23 a 25 °C en el verano y una humedad relativa anual entre 70% y 73%. La precipitación media anual del periodo 1910-2018 es de 988 mm (Información brindada por la estación meteorológica de la EEA INTA Pergamino).

Los suelos de la cuenca son, principalmente, del orden Molisoles, profundos, pudiendo alcanzar hasta 2 m sin presentar limitaciones dentro del perfil. La agricultura se practica en lomas y medias lomas. En las posiciones altas del paisaje predominan los Argiudoles típicos, familia fina illítica térmica con textura franco limosa, excepto el horizonte B textural, que presenta más del 35% de arcilla, textura franco arcillo limosa y permeabilidad lenta. Las lomas se corresponden con la serie Pergamino. Las medias lomas corresponden a complejos conformados por distintas fases por erosión de la serie Pergamino (INTA, 1972). El área de la cuenca seleccionada no tiene influencia de asentamientos urbanos

y es representativa de la producción agropecuaria regional. Desde la década de los 90 se registró un proceso de intensificación agrícola, caracterizado por el uso creciente de agroquímicos junto a la adopción de la SD (Viglizzo *et al.*, 2011). Las rotaciones incluyen los cultivos de M, T y S, con predominancia de S. Generalmente, los cultivos son sembrados sin laboreo, siendo la SD un sistema de implantación de cultivos muy difundido. Trigo y M se fertilizan con dosis variables de P y N, mientras que S se fertiliza sólo con P (**Tabla 1**). A nivel de la cuenca, las dosis medias de fertilizantes fosforados que generalmente se aplican son: 19 kg ha⁻¹ de fósforo para T y M, 10 kg ha⁻¹ para soja de primera (S1a) y segunda (S2a) siembra. Las dosis más altas corresponden a los cultivos que ocupan la menor superficie (T: 13% y M: 15%), fertilizándose, aproximadamente, el 99% de la superficie sembrada. La S, si bien ocupa el mayor porcentaje de la superficie (S1a: 57% y S2a: 16%) solo el 88% y 21% de la superficie de S1a y S2a son fertilizadas, respectivamente, con dosis bajas (Cabrini & Calcaterra, 2009). Las dosis promedio de fertilizantes nitrogenados que se aplican son de 61 kg ha⁻¹ de N para T y M (Cabrini & Calcaterra, 2009), mientras que la S se fertiliza con N en muy pocas ocasiones (Restovich *et al.*, 2012). La **Tabla 1** muestra las dosis promedio de nutrientes aplicados mediante fertilizantes minerales por cultivo bajo SD para empresas agrícolas con superficies comprendidas entre 151 y 500 ha (Cabrini & Calcaterra, 2009).

Tabla 1. Dosis promedio de nutrientes de fertilizantes minerales utilizados por las establecimientos agropecuarios medianas (151 – 500 ha) para los cultivos típicos de la cuenca del Arroyo Pergamino, en kg ha⁻¹.

Table 1. Average nutrient dose of mineral fertilizers from medium-sized farms (151-500 ha) for typical crops in the Stream Pergamino basin, in kg ha⁻¹.

Nutrientes	Trigo	Maíz	S1a	S2a
	Dosis (kg ha ⁻¹)			
N	67,0	73,0	2,0	1,0
P	20,0	22,0	9,0	4,0
K	0,2	0,3	0,2	0,0
S	3,0	4,0	6,0	2,0
Ca	0,0	0,0	1,0	0,0

N: Nitrógeno; P: Fósforo; K: Potasio; S: Azufre; Ca: Calcio; S1a: Soja de primera; S2a: Soja de segunda.

N: Nitrogen; P: Phosphorus; K: Potassium; S: Sulfur; Ca: Calcium; S1a: First Soybean; S2a: Second Soybean.

El tratamiento M-T/S correspondiente al ensayo de larga duración se encuentra en un suelo Argiudol típico serie Pergamino (Pe) pura (INTA, 1972). El ensayo tiene un diseño en bloques completamente aleatorizado. En esta secuencia se repiten 3 cultivos cada dos años; para este trabajo se dispuso del registro de rendimientos, dosis y tipos de fertilizantes utilizados para el período 1979-2004.

Fertilizantes analizados

Los fertilizantes fueron seleccionados por su uso en la cuenca según lo informado por Cabrini & Calcaterra (2009) y en el tratamiento M-T/S. En muchos casos, al contar con diferentes proveedores para un mismo fertilizante, se analizó el producto de una muestra compuesta. Se determinaron las concentraciones de As, Cd, Pb, Cu, Mn, Mo, V y Zn de los siguientes fertilizantes minerales: urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, fosfato diamónico (DAP), fosfato monoamónico (MAP), superfosfato triple de calcio (SFT), superfosfato simple de calcio (SFS), cloruro de potasio y sulfato de calcio. Estos fertilizantes eran sólidos granulados, excepto una de las muestras de urea que era perlada.

Contenido de ET en fertilizantes, suelo y granos

En el tratamiento M-T/S se tomaron, en 2004, tres muestras de suelo compuestas por bloque de los horizontes 0-5, 5-10 y 10-20 cm y se de-

terminaron las concentraciones totales de As, Cd, Pb, Cu, Mn, Mo, V y Zn. Además, en las campañas 2003/2004 y 2004/2005 se tomaron muestras de granos de M, T y S para determinar la concentración de los mismos ET.

Para la comparación de medias en el tratamiento entre las profundidades cada espesor de suelo se utilizó la prueba de «t» ($p < 0.10$).

En el área de la cuenca, en 2013, se tomaron 27 muestras de suelo compuestas del horizonte 0-5 cm y se determinaron las concentraciones de Cu, Mn, Fe y Zn.

Tanto en la cuenca como en M-T/S se determinó la densidad aparente del suelo por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986) para transformar las concentraciones de ET (mg kg^{-1}) en cantidades (g ha^{-1}).

Las concentraciones de ET en las muestras de fertilizantes, suelo y granos se determinaron siguiendo el método EPA, 200.2 (USEPA, 1994), excepto las muestras de suelo de la cuenca que se realizaron conforme al método EPA 3051 (USEPA, 1996). La solución extractante utilizada fue una mezcla de ácidos clorhídrico/nítrico y de fluorhídrico/nítrico para el primer y segundo método, respectivamente, con digestión por horno de microondas en ambos casos. Ambos procedimientos garantizan su total destrucción y arrojan resultados comparables (Buffa & Ratto, 2009).

A partir de datos abiertos de producción agrícola del Ministerio de Agroindustria de Argentina para el partido de Pergamino se armó la secuencia típica de cultivos aproximada para la cuenca. Para esto, se tomó información del período 1990-2015 y se consideró la ocupación porcentual de los cultivos M, T y S, suponiéndose que toda la superficie ocupada con T era luego ocupada por S2a. En base a esto, se determinó que para un ciclo de 10 años la relación de cultivos consistió en ocho cultivos de S1a por cada doble cultivo T/S2a y de M.

A partir de los fertilizantes considerados, se armaron 1024 combinaciones posibles de fertilización para la secuencia típica de la cuenca. Conociendo la concentración de ET de cada uno de los fertilizantes, y las combinaciones de uso

probables, se calculó el aporte acumulado para el periodo analizado y se estimó el aporte medio anual de la agricultura zonal con su respectivo desvío estándar, expresándolo en g ha^{-1} .

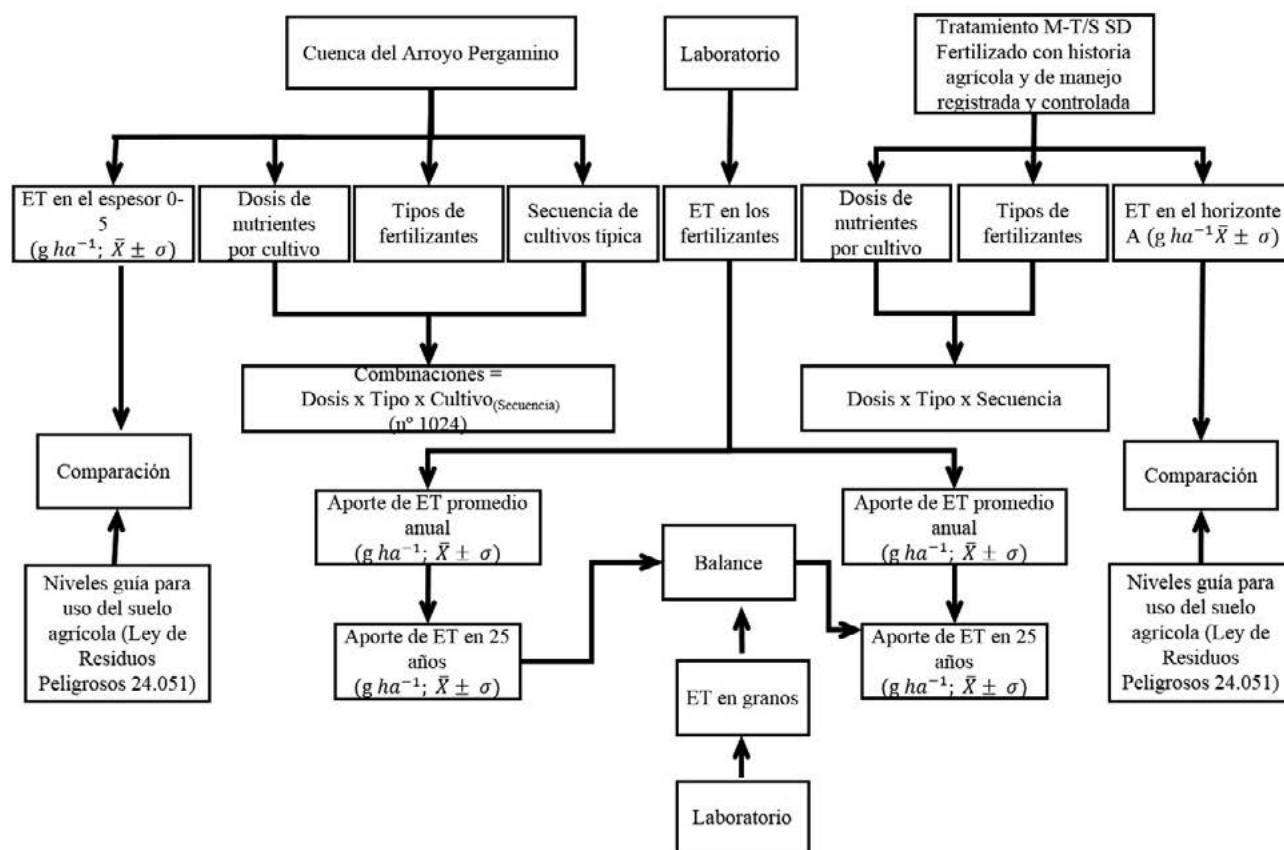
En M-T/S se estimó la cantidad total de los ET (As, Cd, Pb, Cu, Mn, Mo, V y Zn) aportados por dicha secuencia de cultivo (g ha^{-1}), fertilizada anualmente en promedio con 100 kg N ha y 12 kg P ha desde su inicio.

Los aportes de ET estimados para el sector de la cuenca del arroyo Pergamino (promedio \pm desvío estándar) se compararon con los aportes de ET del tratamiento M-T/S debido a la enorme diferencia de aporte de fertilizante nitrogenado entre el tratamiento de larga duración (100 kg N ha^{-1}) y la correspondiente al sector de la cuenca analizado (16 kg N ha^{-1}).

A continuación, en la **Figura 2** se presenta el esquema que sintetiza los pasos seguidos para la obtención de los aportes de ET bajo producción agrícola para la cuenca como para M-T/S y su comparación con los niveles guía propuestos para el uso agrícola, contenidos en la Ley de Residuos Peligrosos (Ley 24051, 1993).

Luego, las concentraciones en el suelo de la cuenca y de M-T/S se compararon con los niveles guía propuestos para el uso agrícola, contenidos en la Ley de Residuos Peligrosos (Ley 24051, 1993).

Por último, se realizó un balance simplificado de ET a los 25 años, teniéndose solo en cuenta como entrada los ET aportados por los fertilizantes y como salida los exportados en los órganos de cosecha, tanto a nivel de la cuenca como de M-T/S (**Tabla 1**). A nivel de la cuenca, se consideraron los rendimientos promedio del partido de Pergamino (Ministerio de Agroindustria de Argentina) para el periodo 1990 a 2015 (3,3; 7,7 y 3,1 Mg ha^{-1} para T, M y S1a, respectivamente) y se consideró que el rendimiento promedio para S2a representa el 82% del rendimiento promedio de la S1a (2,8 y 3,4 Mg ha^{-1} , respectivamente). Dicho porcentaje fue obtenido de series de datos bajo SD de los ensayos de largo plazo y de lotes de producción de la EEA Pergamino (Irizar, 2010; Llovet *com. pers.*). Los rendimientos promedio en M-T/S para el periodo 1979 a 2004



ET: elementos traza; M-T/S SD: maíz – trigo /soja de segunda siembra bajo siembra directa fertilizada.
 ET: trace elements; M-W/S DS: corn – wheat/soybean of second sowing under fertilized direct drilling.

Figura 2. Esquema del procedimiento seguido para la obtención de dosis y concentraciones de ET obtenidas luego de 25 años de aporte de fertilizantes en un sector de la cuenca del arroyo Pergamino y en un tratamiento de larga duración.

Figure 2. Scheme of the followed procedure to obtain doses and concentrations of ET obtained after 25 years of fertilizer supply in a sector of the Pergamino stream basin and in a long-term treatment.

fueron 3,6; 8,2 y 2,5 Mg ha⁻¹ para T, M y S2a, respectivamente. Se supuso que S1a y S2a tienen la misma tasa de exportación de ET.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de ET en los fertilizantes

Los fertilizantes fosforados presentaron mayores concentraciones de ET que los nitrogenados puros o en mezcla con azufre (**Tabla 2**), en coincidencia con lo reportado a nivel global (Rueda Saa *et al.*, 2011). El SPS, el SPT y el DAP tuvieron las concentraciones más elevadas de As, Cd y Pb mientras que nitrato de amonio, urea granulada y sulfato de amonio tuvieron las menores concentraciones de As, en coincidencia con Rodríguez Ortiz *et al.* (2014). La urea granulada tuvo las concentraciones más bajas de Pb, junto con el sulfato de calcio, y de Cd.

El cloruro de potasio y el sulfato de calcio tuvieron concentraciones intermedias de ET, con excepción del sulfato de calcio que presentó las máximas concentraciones de Cu (al igual que MAP) y de V.

Los contenidos de ET en los fertilizantes fosforados se encontraron cercanos al límite inferior del intervalo informado por Giuffré de López Camelo *et al.*, 1997; Martí *et al.*, 2002).

Contenido de ET en el suelo

Las concentraciones medias de ET dentro del horizonte A del tratamiento M-T/S no presentaron diferencias entre profundidades; en el caso de Cu, Mn, Mo y V, las elevadas diferencias en coeficientes de variación entre profundidades justificaron los resultados (**Tabla 3**). Dado que la cantidad de ET aportada por fertilizantes fue en promedio menor a 0,6%

Tabla 2. Concentraciones de algunos elementos traza en fertilizantes comúnmente utilizados en la región.**Table 2.** Concentrations of some trace elements in fertilizers commonly used in the region.

Fertilizantes	As	Cd	Pb	Cu	Mn	Mo	V	Zn
	mg kg ⁻¹							
Urea granulada	0,03	0,001	0,03	1	1	0,06	100	0,001
Urea perlada	0,2	0,025	0,3	1,5	11	0,5	0,5	0,003
Sulfato de amonio	0,03	0,01	0,1	1	1	0,06	100	0,001
Nitrato de amonio	<LD	0,5	0,2	nd	<LD	<LD	0,1	nd
Fosfato diamónico	0,9	0,037	2,3	17	38	0,5	190	0,01
Fosfato monoamónico	0,5	8,7	0,8	20	290	11	1700	0,14
Superfosfato simple de calcio	5	9,1	2	2,3	173	3,04	65	0,04
Superfosfato triple de calcio	5	80,9	2	15,7	160	6,42	191	0,219
Cloruro de potasio	0,06	0,11	1,5	2	20	0,12	300	0,003
Sulfato de calcio	0,5	0,1	0,03	20	20	9,3	1900	0,01

<LD: Menor al Límite de Detección; nd: No determinado; As: Arsénico; Cd: Cadmio; Pb: Plomo; Cu: Cobre; Mn: Manganese; Mo: Molibdeno; V: Vanadio; Zn: Zinc.

<LD: Less than the Detection Limit; nd: Not determined; As: Arsenic; Cd: Cadmium; Pb: Lead; Cu: Copper; Mn: Manganese; Mo: Molybdenum; V: Vanadium; Zn: Zinc.

Tabla 3. Concentración de elemento traza (ET) en el suelo, aporte acumulado por los fertilizantes, reserva media y concentración media en el suelo luego de 25 años de tratamiento maíz-trigo/soja de segunda siembra y nivel guía establecidos por la Ley 24.051(Residuos Peligrosos) para uso agrícola.**Table 3.** Concentration of trace element (TE) in the soil, accumulated contribution by fertilizers, average reserve and average concentration in the soil after 25 years of corn-wheat/soybean of second sowing treatment and guide level established by Hazardous Waste Law 24.051 for agricultural use.

Elemento Traza	Profundidad, cm	Concentración*			Aporte fertilizante	Reserva media	Concentración media suelo	Nivel guía
		0-5	5-10	10-20	g ha ⁻¹	0-20	mg kg ⁻¹	
		µg g ⁻¹						
As	valor medio	3,38	3,63	3,38	7	8970	3,5	20
	Desvío estándar	0,436	0,208	0,436				
Cd	valor medio	0,15	0,16	0,16	2	410	0,2	3
	Desvío estándar	0,017	0,017	0,021				
Pb	valor medio	11,00	11,25	11,25	4	29185	11,2	375
	Desvío estándar	1,155	0,000	0,577				
Cu	valor medio	6,48	7,28	3,93	28	14040	5,4	150
	Desvío estándar	8,041	8,981	1,436				
Mo	valor medio	0,60	0,73	0,55	10	1580	0,6	5
	Desvío estándar	0,252	0,058	0,173				
V	valor medio	48,00	53,50	49,00	514	129675	49,9	200
	Desvío estándar	9,292	2,082	6,506				
Zn	valor medio	37,50	40,45	40,00	319	102700	39,5	600
	Desvío estándar	0,006	0,010	0,000				
Mn	valor medio	520,00	640,00	610,00	258	1547000	595	
	Desvío estándar	0,147	0,061	0,045				

DE: desvío estándar; As: Arsénico; Cd: Cadmio; Pb: Plomo; Cu: Cobre; Mo: Molibdeno; V: Vanadio; Zn: Zinc; Mn: Manganese.

*No hubo diferencias significativas entre profundidades por elemento.

DE: standard deviation; As: Arsenic; Cd: Cadmium; Pb: Lead; Cu: Copper; Mo: Molybdenum; V: Vanadium; Zn: Zinc; Mn: Manganese.

* There were no significant differences between depths per element.

de su cantidad total presente en el horizonte A, y que el tratamiento analizado no recibió fertilizantes antes de su inicio, se especula que el largo periodo de laboreo convencional practicado hasta el inicio del ensayo fue el responsable de la distribución homogénea de ET dentro del horizonte A. Por otro lado, luego de 25 años de aplicación continua de fertilizantes nitrogenados y fosforados, las concentraciones medias de Pb, Cd, Cu y Zn del horizonte superficial (0-20 cm) se encuentran en el límite inferior del intervalo informado para los promedios mundiales en suelo (Lavado y Aparicio, 2019; Rueda Saa *et al.*, 2011), al igual que las de Mo (Neunhäuserer *et al.*, 2000). Sin embargo, las concentraciones medias de As, V y Mn se acercaron al valor promedio mundial (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

La relación entre el aporte de ET acumulado por los fertilizantes y la reserva total en el horizonte

A (reserva de ET) resultó muy pequeña en todos los casos (entre 0,01 para Pb y casi 0,6% para el caso del Mo). Entre los ET no nutrientes, el Cd mostró la mayor relación (0,5%) mientras que el de As (0,08%) y el de Pb (0,01%) fueron relativamente bajos, como consecuencia de la elevada participación del SPT en el tratamiento M-T/S. En el caso de los ET esenciales para las plantas, el aporte de Mn por fertilizantes resultó extremadamente bajo en relación a su elevada reserva edáfica, 1547000 g ha⁻¹ (Andriulo *et al.*, 1996).

En la cuenca, el espesor de 0-5 cm de los Argiudoles presentó concentraciones y reservas medias de Cu, Zn y Mn superiores a las obtenidas en el tratamiento de larga duración (**Tabla 4**). Esto probablemente se debió a la menor exportación por parte del sistema de cultivo, producto de la baja intensificación de la secuencia

Tabla 4. Concentración de algunos elementos traza (ET) en el espesor 0-5 cm, reserva media, aporte acumulado por los fertilizantes en 25 años en la cuenca del arroyo Pergamino y nivel guía establecidos por la Ley 24.051 (Residuos Peligrosos) para uso agrícola.

Table 4. Concentration of some trace elements (TE) in the soil thickness 0-5 cm, average reserve, contribution accumulated by the fertilizers in 25 years in the basin of the Pergamino stream and guide level established by Law 24.051 (Hazardous Waste) for agricultural use.

Elemento Traza	Profundidad, cm	Concentración	Reserva media	Aporte acumulado por fertilizante	Nivel guía
		mg kg ⁻¹	0-5	g ha ⁻¹	mg kg ⁻¹
As	valor medio	ND		7	
	Desvío estándar			5	
Cd	valor medio	ND		45	
	Desvío estándar			40	
Pb	valor medio	ND		5	
	Desvío estándar			2	
Cu	valor medio	19,51	11130	34	150
	Desvío estándar	1,697		15	
Mo	valor medio	ND		14	
	Desvío estándar			6	
V	valor medio	ND		1752	
	Desvío estándar			1367	
Zn	valor medio	55,10	31493	179	600
	Desvío estándar	4,327		99	
Mn	valor medio	751,20	431545	355	
	Desvío estándar	88,168		144	
Fe	valor medio	24324,33	13923191		
	Desvío estándar	1356,793			

DE: desvío estándar; As: Arsénico; Cd: Cadmio; Pb: Plomo; Cu: Cobre; Mo: Molibdeno; V: Vanadio; Zn: Cinc; Mn: Manganeseo; Fe: Hierro; ND: No Determinado.

DE: standard deviation; As: Arsenic; Cd: Cadmium; Pb: Lead; Cu: Copper; Mo: Molybdenum; V: Vanadium; Zn: Zinc; Mn: Manganese; Fe: Iron; ND: Not Determined.

de cultivos (predominio de soja) con respecto a la existente en M-T/S. El aporte acumulado de ET resultó dentro del mismo intervalo informado para M-T/S, aunque con una muy elevada dispersión en función de las posibles fuentes nitrogenadas y fosforadas consideradas.

La concentración y reserva de Mn en ambos sitios y Fe en la cuenca resultaron elevadas, propio del material originario de estos suelos (Buffa & Ratto, 2009; Martín Neto *et al.*, 1994).

Nuevamente, las concentraciones medias de Cu y Zn encontradas en el suelo están lejos de los valores umbrales para considerarlo como contaminado (Tabla 4).

Balances de ET

La exportación de ET por parte de los cultivos depende de la especie, de la genética del cultivar, de los rendimientos obtenidos, de la intensificación de cultivos en la secuencia, de las características edáficas donde se desarrollan y su variación temporal, entre los principales factores (Mallarino *et al.*, 2017; Hamnér, 2016; Zhao *et al.*, 2009; Šimić *et al.*, 2009). Así, M, independientemente de su tasa de exportación, su rendimiento promedio muy superior a los de T y S2a, explica su mayor exportación de ET (Tabla 5).

Tabla 5. Exportación de elementos traza por parte de los granos de maíz, trigo y soja en el tratamiento de largo plazo obtenida en 2004.

Table 5. Trace elements exported by corn, wheat and soybean in the long-term treatment obtained in 2004.

Elemento traza	Maíz	Trigo	S2a
	mg Kg ⁻¹		
As	0,20	0,20	0,20
Cd	0,03	0,03	0,03
Pb	2,20	0,90	0,50
Cu	2,30	13,00	13,00
Mn	6,30	45,00	40,00
Mo	0,40	0,40	1,70
V	0,50	0,50	0,50
Zn	20,00	30,00	30,00

As: Arsénico; Cd: Cadmio; Pb: Plomo; Cu: Cobre; Mn: Manganeseo; Mo: Molibdeno; V: Vanadio; Zn: Zinc.

As: Arsenic; Cd: Cadmium; Pb: Lead; Cu: Copper; Mn: Manganese; Mo: Molybdenum; V: Vanadium; Zn: Zinc.

En general, tanto en la cuenca como en M-T/S, la exportación de ET fue superior al aporte proveniente de fertilizantes, con excepción de Cd y V, que resultaron los únicos dos con balances positivos. En el caso de Cd, esto se debió a la baja tasa de exportación que presentan S, T y M, 0,03 g Mg⁻¹ de grano. Además, en M-T/S, la fuente de fertilizantes fosforada más utilizada fue el SFT,

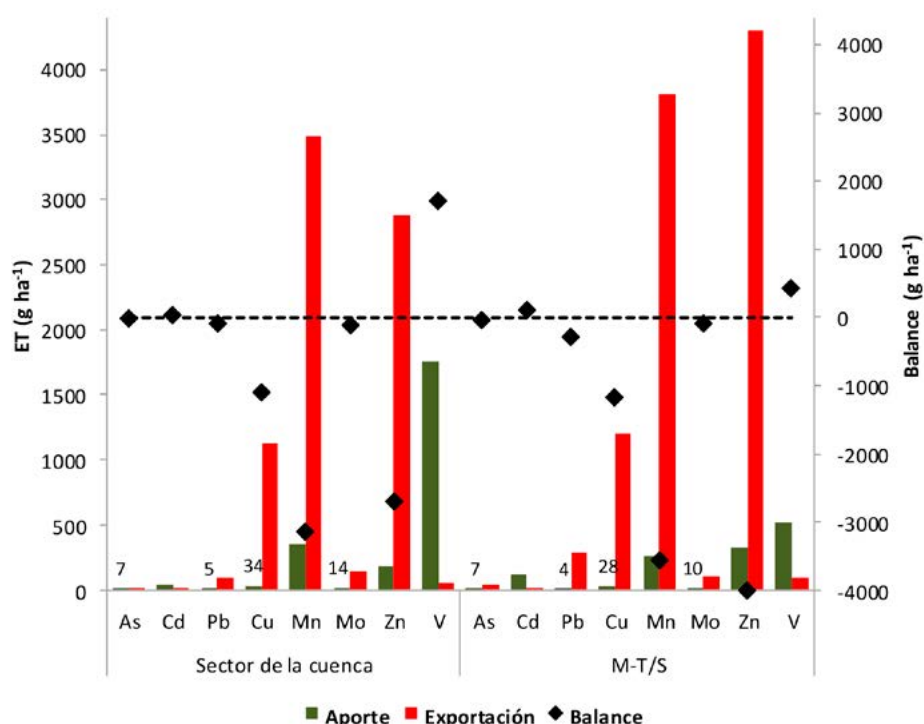


Figura 3. Aporte acumulado de elementos traza (ET) por fertilizantes, exportación y su balance luego de 25 años a nivel del sector de la cuenca analizado y en el tratamiento M-T/S.

Figure 3. Accumulated contribution of trace elements (TE) from fertilizers, exportation and their balance after 25 years at the analyzed sector level of the basin and in the MT/S treatment.

que presentó la mayor concentración de Cd. Esto hizo que en M-T/S, el balance fuera más elevado que en la cuenca (**Figura 3**). En el caso de V, la encuesta reveló que en el sector de la cuenca, la fuente de P más utilizada es MAP, el cual es mucho más rico en este ET que otras fuentes fosforadas (**Figura 3**).

Los balances de Cu, Mn y Zn resultaron altamente negativos debido a que los tres ET son muy demandados por los cultivos estudiados para su crecimiento (**Figura 3**). El Zn fue exportado aproximadamente 5 veces más por M y T en M-T/S (3290 g ha^{-1}) que en el sector de la cuenca (633 g ha^{-1}). Por su parte, en la cuenca la S exportó el doble (2250 g ha^{-1}) que en M-T/S (1008 g ha^{-1}).

Las concentraciones de As, Pb y Mo no mostraron diferencias entre las situaciones analizadas y, aunque con valores negativos, se aproximaron a un balance neutro. Tanto As como Pb fueron exportados mayormente en M-T/S debido a la mayor presencia de gramíneas en la secuencia de cultivos. En el caso del Mo, el cultivo de S exporta 4 veces más que las gramíneas, explicando la mayor exportación sucedida en la cuenca (**Figura 3**).

Las cantidades presentes en el suelo son el resultado del balance entre las cantidades ingresadas al suelo, provenientes de la meteorización del material originario y de los fertilizantes minerales, y las exportadas por los cultivos y por drenaje externo e interno (no considerados en este trabajo). Como se puede deducir, el aporte de ET resultó muy bajo en las dos aproximaciones utilizadas y no puede explicar las cantidades existentes en el suelo, a pesar de los 25 años que lleva la agricultura con aplicación de fertilizantes. Sin embargo, la concentración de ET en el suelo es importante para conocer la fertilidad potencial para la nutrición vegetal y constituye una información básica en estudios ambientales y edafogenéticos.

La extrapolación de los resultados surgidos de la aplicación de balances simplificados a nivel de la cuenca, debe ser tomada cuidadosamente, debido a las elevadas fuentes de variación que conllevan, tanto a nivel de los aportes como de la exportación de ET, ya discutidas. En el presente

trabajo se tuvo en cuenta el efecto de concentración y distribución de los ET en el horizonte superficial como consecuencia de la acción edafogenética y un uso agrícola del suelo. Para poder ser utilizados en programas con implicancias ambientales, resulta de gran interés tomarlos como una línea geoquímica de base, considerándolos como variables que pueden ser cuantificadas en el presente y monitoreadas en el futuro (Buffa & Ratto, 2009). En efecto, un nuevo salto tecnológico en los rendimientos de cultivos puede provocar cambios en los patrones de extracción y en las reservas edáficas.

CONCLUSIONES

Entre las cargas contaminantes de ET provenientes de fertilizantes, los fosforados, ya sean formulados puros o con nitrógeno, son los de mayor aporte en relación a los nitrogenados, formulados como puros o en mezcla con azufre. Las cantidades de ET encontrados luego de 25 años consecutivos de aporte de fertilizantes nitrogenados y fosforados en el mismo sitio resultaron ínfimas en relación a las existentes naturalmente en el suelo y éstas estuvieron muy lejos de los valores umbrales para considerar al suelo como contaminado. El procedimiento aplicado para extender la información de los suelos al sector de la cuenca analizado permitió inferir el mismo resultado aunque no pueda hacerse rotundamente, debido a la elevada incertidumbre que rodea tanto a los aportes como a las exportaciones.

Algunos nutrientes esenciales, como Cu, Mn y Zn, conllevan balances claramente negativos. Las concentraciones de Cu y, particularmente de Zn, constituyen una preocupación por una futura insuficiencia nutricional debido a que sus promedios se encuentran en el límite inferior de los promedios edáficos mundiales.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo se desarrolló en el marco de los Programas Nacionales de INTA Suelo y Recursos Naturales, Gestión Ambiental y Ecorregiones y del Proyecto Regional con enfoque Territorial para el Norte de Buenos Aires. Agradecemos a Alicia Irizar por su aporte profesional y revisión del ma-

nuscrito. A Fernando Rimatori, Diego Colombini, Fabio Villalba y Ana Paula Giannini por el apoyo en las tareas de campo y en la traducción al inglés.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernad, OI; SJ, García; DM Valdiño & VS, Fernández. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. [Artículo en línea]. Disponible en: www.madrimas.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf. Fecha de consulta: 22/04/2019
- Buffa, EV & SE, Ratto. 2009. Contenido pseudototal de Cobre, Cinc, Hierro y Manganeso como estimador del fondo geoquímico en suelos de la Llanura Chaco-Pampeana de Córdoba, Argentina. *Ciencia del suelo*, 27(2), 185-198.
- Burke, W; D, Gabriels & J, Bouma. (Eds.). 1986. Soil structure assessment. Rotterdam, A.A. Balkema. 92 p.
- Cabrini, SM & CP, Calcaterra. 2009. Sistemas de producción en el partido de Pergamino. Valoración económica del impacto sobre la capacidad productiva de los suelos. Ediciones EEA INTA Pergamino, Buenos Aires, Argentina. ISSN 1851 – 6955 N° 12.
- Camelo, L G L; S R, de Miguez, & L, Marbán. 1997. Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina. *Science Total Environ*. 204(3), 245-250.
- Cruzate, G; & R, Casas. 2003. Balance de nutrientes. Revista fertilizar INTA, 8, 7-13.
- Drinkwater, LE & SS, Snapp. 2007. Nutrients in agroecosystems: rethinking the management paradigm. *Adv. Agron*. 92:163-186.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 2004. Uso de fertilizantes por cultivo en Argentina [Artículo en línea]. Disponible en: http://www.fao.org/tempref/agl/agll/docs/fertuseargent_s.pdf. Fecha de consulta 02/11/2018.
- Glenn, J; T, Gordon & E, Florescu. 2008. State of the Future. Washington, DC: The Millennium Project, World Federation of UN Associations. ISBN 978-0-9818941-0-2.
- Hamnér, K. 2016. Micronutrients in Cereal Crops: Impact of Nutrient Management and Soil Properties. Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences.
- Instituto Nacional del Agua (INA). 2007. Estudio integral de la Cuenca del río Arrecifes. Secretaría de Obras Públicas. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Argentina. V1, 1-91.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 1972. Cartas de Suelo de la República Argentina. Hoja 3360-32 Pergamino, 106p.
- Irizar A. 2010. Cambios en las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas: efecto de la secuencia de cultivo, del sistema de labranza y de la fertilización nitrogenada. Tesis de Maestría. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires.
- Kabata-Pendias, A. 2001. Trace Elements in Soils and Plants, Alina. Kabata-Pendias and Henryk Pendias. CRC Press.
- Lavado, RS & V, Aparicio. 2019. Contaminants. En: Rubio, G; R S, Lavado &
- F X, Pereyra (ed.). The Soils of Argentina. World Soils Book Series. Pp 251-260.
- Lavado, RS & MS, Zubillaga. 2008. Efecto ambiental de la actividad industrial, la vida urbana y la producción agropecuaria. Pp. 365-394. En: Giuffré, L (ed.). Agrosistemas: Impacto ambiental y sustentabilidad. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.
- Lavado, RS. 2006. Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina). *J. environ. manage*. 80(2), 116-119.
- Lavado, RS; MS, Zubillaga; R, Alvarez & MA, Taboada. 2004. Baseline levels of potentially toxic elements in pampas soils. *Soil & Sediment Contamination*, 13(5), 329-339.
- Lavado, RS; C A, Porcelli & R, Alvarez. 1999. Concentration and distribution of extractable elements in a soil as affected by tillage systems and fertilization. *Sci. total environ*. 232(3), 185-191.
- Ley 24051 Régimen de desechos peligrosos. 1993. Decreto Nacional 831/93. Anexo II **Tabla 9** Niveles guía de calidad suelos para uso agrícola.
- Mallarino A P; & DE, Kaiser. 2017. Micronutrients for Soybean Production in the North Central Region. Iowa State University, Extension and Outreach.
- Martí, L; JN, Burba & M, Cavagnaro. 2002. Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina, 34(2), 43-48.
- Miretti, MC; M, Pilatti; RS, Lavado & S, Del Carmen Imhoff. 2012. Historia de uso del suelo y contenido de micronutrientes en Argiudoles del centro de la provincia de Santa Fe (Argentina). *Ciencia del suelo*, 30(1), 67-73.
- Neto, LM; AE, Andriulo & DG, Traghetta. 1994. Effects of cultivation on ESR spectra of organic matter from soil size fractions of a Mollisol. *Soil Science*, 157(6), 365-372.
- Neunhäuserer, C; M, Berreck & H, Insam. 2001. Remediation of soils contaminated with molybdenum using soil amendments and phytoremediation. *Water, air, and soil pollution*, 128(1-2), 85-96.

- Restovich, SB; AE; Andriulo & SI, Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 128:62-70.
- Roberts, TL. 2009. The role of fertilizer in growing the world's food. *Better crops*, 93(2), 12-15.
- Rodríguez Ortiz, JC; JA, Alcalá Jáuregui; A, Hernández Montoya; H, Rodríguez Fuentes; FH, Ruiz Espinoza; JL, García Hernández & PE, Díaz Flores. 2014. Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 695-701.
- Rueda Saa, G; JA, Rodríguez Victoria & R, Madriñán Molina. 2011. Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta agronómica*, 60(3).
- Šimić, D; Z, Zdunić; A, Jambrović; T, Ledencan; I, Brkić; V, Duvnjak & V, Kovačević. 2009. Relations among six micronutrients in grain determined in a maize population. *Poljoprivreda*, 15(2), 15-19.
- Stewart, WM; DW, Dibb; AE, Johnston & TJ, Smyth. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.* 97(1), 1-6.
- Trossero, ME.; L, Donnet & G, Cordone. 2012. ¿Cuánto vale la pérdida de Carbono Orgánico del Suelo? XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Uriburu Quirno, M; F, Damiano; J, Borús; H, Lozza & J, Villarreal. 2010. Modelación hidrológica en modo actualizado del arroyo Pergamino. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul. Buenos Aires. Argentina.
- United States Environmental Protection Agency (U.S.E.P.A). 1994. Sample preparation procedure for spectrochemical determination of total recoverable elements. Environmental monitoring systems laboratory office of research and development, Cincinnati, Ohio 45268, 12p.
- United States Environmental Protection Agency (U.S.E.P.A). 1996. Soil screening guidance: Technical background document. Washington DC: EPA office of solid Waste and Emergency Response, 168p.
- Viglizzo, EF; FC, Frank; LV, Carreño; EG, Jobbagy; H, Pereyra; J, Clatt; D, Pincen & MF, Ricard. 2011. Ecological and Environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17, 959-973,
- World Bank. 2018. Fertilizer consumption (Kilograms per hectare of arable land). [Artículo en línea]. Disponible en: https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?end=2015&name_desc=false&start=2002&view=chart. Fecha de consulta: 09/11/2018.
- Zhao, FJ; YH, Su; SJ, Dunham; M, Rakszegi; Z, Bedo; SP, McGrath & PR, Shewry. 2009. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. *J. Cereal Sci.* 49(2), 290-295.