

Elementos traza en el agua de poro de suelos bajo producción intensiva de bovinos de carne

Trace Elements in Soil Pore Water under Cattle Beef Production

Olga S Heredia ^{a,b,*}, Hernán Mengoni ^{a,c}, Alicia Fernández Cirelli ^d

Palabras clave:
Hapludoles,
composición
química, pampa
arenosa, engorde a
corral
Keywords:
Hapludoll, chemical
composition, sandy
soil, feedlot

ABSTRACT

La composición iónica del agua de poro, que está en contacto con el suelo, puede ser una herramienta útil para predecir el comportamiento ambiental de los elementos, los cuales, pueden ser almacenados en la zona no saturada del suelo y desde allí transmitirse a los acuíferos. Los objetivos de este trabajo fueron: (i) evaluar la presencia de elementos traza y otras especies iónicas mayoritarias en agua de poro y su evolución en columnas de suelo no disturbadas; (ii) caracterizar las relaciones existentes entre las distintas variables edáficas analizadas y estudiar la influencia que tienen sobre las mismas la posición topográfica y el tiempo de confinamiento animal. Se realizaron determinaciones de pH, CE y concentración de elementos traza y otros iones mayoritarios tanto en suelo como en el agua de poro asociada. Como resultado se encontró que la cantidad de elementos traza lixiviados fue del 2.1 % del total de iones lixiviados. A su vez, con el aumento de lixiviados el suelo se desalinizó y en consecuencia se observó una disminución del pH en la solución del suelo. En la zona donde se encuentran los comederos, topográficamente en las lomas, es donde se encontraron las mayores concentraciones de elementos traza. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en la masa total de los mismos según el tiempo de ocupación, aunque en masa el total de elementos minoritarios que se lixiviarían en las lomas fue de 161 kg.ha⁻¹.año⁻¹ y 204 kg.ha⁻¹.año⁻¹ en los corrales de menor y mayor ocupación respectivamente. El hierro y el cinc son los metales componentes traza que aparecieron con mayor abundancia en los lixiviados.

RESUMEN

Pore water, which is in contact with soil, can be a useful tool to predict the environmental behavior of different soil components. These can be stored in unsaturated zones and then can be transmitted to aquifers.

The aims of this study were: (i) to assess the presence of trace elements and other ionic species in pore water and its evolution in undisturbed soil columns; (ii) to characterize the relationships between the different variables analyzed and to study the topographic position and animal confinement times influence over each variable. Soil undisturbed columns were sampled in Hapludoll in three topographical situations and two animal confinement times. pH, EC and trace elements in soil were analyzed and water chemical speciation in pore water was determined. It was found that the amount of trace elements leached was 2.1% of the total ion leaching. As ion leaching increased, the soil was desalted and, consequently, the pH of the soil solution decreased. The highest concentrations of trace elements were found in the area where there were feeders - topographically, on the hills-. However, no significant differences were found in trace elements total mass according to the occupancy time. But the total mass of trace elements leached into the hills positions was 161 kg.ha⁻¹.year⁻¹ and 204 kg.ha⁻¹.year⁻¹ in pens of lower and higher occupancy, respectively. Iron and zinc were the abundant trace elements in leachates.

^a Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

^b heredia@agro.uba.ar

^c hmengoni@agro.uba.ar

^d Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires. Av San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. afcirelli@fvvet.uba.ar

* Autor para correspondencia: heredia@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el productor agropecuario se enfrenta a diversos desafíos para cubrir los requerimientos exigidos por el consumidor y los mercados globalizados. En este nuevo contexto existe la necesidad de considerar la calidad del agua dentro de un manejo integrado del suelo, del agua y de los efluentes dentro del mismo establecimiento rural.

Las sustancias que ingresan al suelo sufren distintos procesos a través de los cuales pueden ser: neutralizadas, degradadas, volatilizadas, adsorbidas, complejadas, precipitadas, bioasimiladas o transportadas por erosión, disolución o escurrimiento. Esto depende de la interacción entre el tipo de suelo, régimen hídrico y tratamiento previo del estiércol y efluentes (Heredia *et al.*, 2009). El agua que infiltra a través de los suelos y sedimentos porosos podría conservar un registro de los procesos de meteorización y de las variaciones climáticas. En cuanto a las últimas, esto sucedería a través de modificaciones en el balance hidrológico, la humedad del suelo, o alterando las tasas de lavado. Asimismo, podría considerarse como un indicador de las actividades humanas. En consecuencia, pueden ser una herramienta útil para predecir el comportamiento ambiental de los distintos componentes que puede almacenar la zona no saturada y transmitir a los acuíferos (Kanfi *et al.*, 1983; García, 2005).

La cantidad de agua que ingresa al suelo puede ser evaluada desde distintos puntos de vista. Por un lado, porque condiciona el almacenamiento hídrico y, por consiguiente, la posibilidad de producción agropecuaria, tanto en calidad como en cantidad. Por otra parte, los procesos de evolución de los suelos son determinados por los excesos o déficit hídricos. A su vez, podría modificarse la traslocación

de diversos tipos de sustancias que van a perderse desde el sistema edáfico y llegar al agua subterránea. Las propiedades edáficas son utilizadas para controlar los riesgos de liberación repentina de contaminantes de los suelos hacia el agua, afectando la calidad del agua intersticial y por último el agua subterránea (Mengoni & Heredia, 2011).

El conocimiento de las formas y concentraciones en que pueden encontrarse los elementos en perfiles edáficos y los mecanismos físico-químicos que los controlan son herramientas que permitirán mejorar los modelos de predicción de la contaminación de acuíferos. De la misma manera, contribuyen a la toma de decisiones para un adecuado ordenamiento territorial de acuerdo a la potencialidad del uso de la tierra y su impacto en la calidad del agua subterránea y el ambiente.

Las formas solubles e intercambiables de diversos elementos químicos presentes en los suelos reflejan la fracción de rápida biodisponibilidad para la plantas. También representa su potencial movimiento hacia los acuíferos, por lo que su estudio puede ser considerado fundamental para evaluaciones ambientales (McLean & Bledsoe, 1992). La evaluación de estas formas en el agua de poro y en perfiles de suelos podrían ser de gran utilidad para conocer su concentración y evaluar la especiación química de los mismos que influye marcadamente sobre el transporte, la biodisponibilidad y la ecotoxicidad de los mismos (Reilly & Baerh, 2006).

Los objetivos de este trabajo fueron: (i) evaluar la presencia de elementos traza y otras especies iónicas mayoritarias en agua de poro y su evolución en columnas de suelo no disturbadas en suelo de corrales de sistemas de engorde intensivo de bovinos; (ii) caracterizar las relaciones existentes entre las distintas variables edáficas analizadas y estudiar la influencia que tienen sobre las mismas la posición topográfica y el tiempo de confinamiento animal.

METODOLOGÍA

Sitio de Estudio

En cuanto a las características geomorfológicas, el área de estudio se encuentra ubicada en la zona conocida como Pampa interior o arenosa, la cual se encuentra configurada con una pendiente regional suave de oeste a este, siendo el gradiente promedio de 25 cm. km⁻¹. La región de influencia se encuentra surcada por médanos que entorpecen el drenaje superficial, los cuales forman un sistema de drenaje arreico. Esto genera que el agua sólo pueda ser infiltrada en profundidad o evaporada y, en algunos casos, acumulada en cuerpos de agua someros. Los suelos se han desarrollado a partir de materiales arenosos

recientes de espesor variable. Los que se encuentran asentados sobre sedimentos arenosos también de espesor variable, con una textura fina, poco permeables que hacen apoyo a la capa freática. Las precipitaciones de la zona son de 900-950 mm.año⁻¹.

Las muestras de suelo fueron obtenidas en el establecimiento Nueva Castilla ubicado en el partido de Trenque Lauquen, (latitud= -36.039326 °; longitud= -63.049004 °), al Oeste-Noroeste de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Para la toma de muestras se seleccionaron 2 lotes con distinta historia de uso bajo feedlot, Corral 1 (C1), con 1 año de ocupación hasta el momento de la toma de muestras y Corral 2 (C2), con 8 años de ocupación animal. En el C1, la pendiente es aproximadamente del

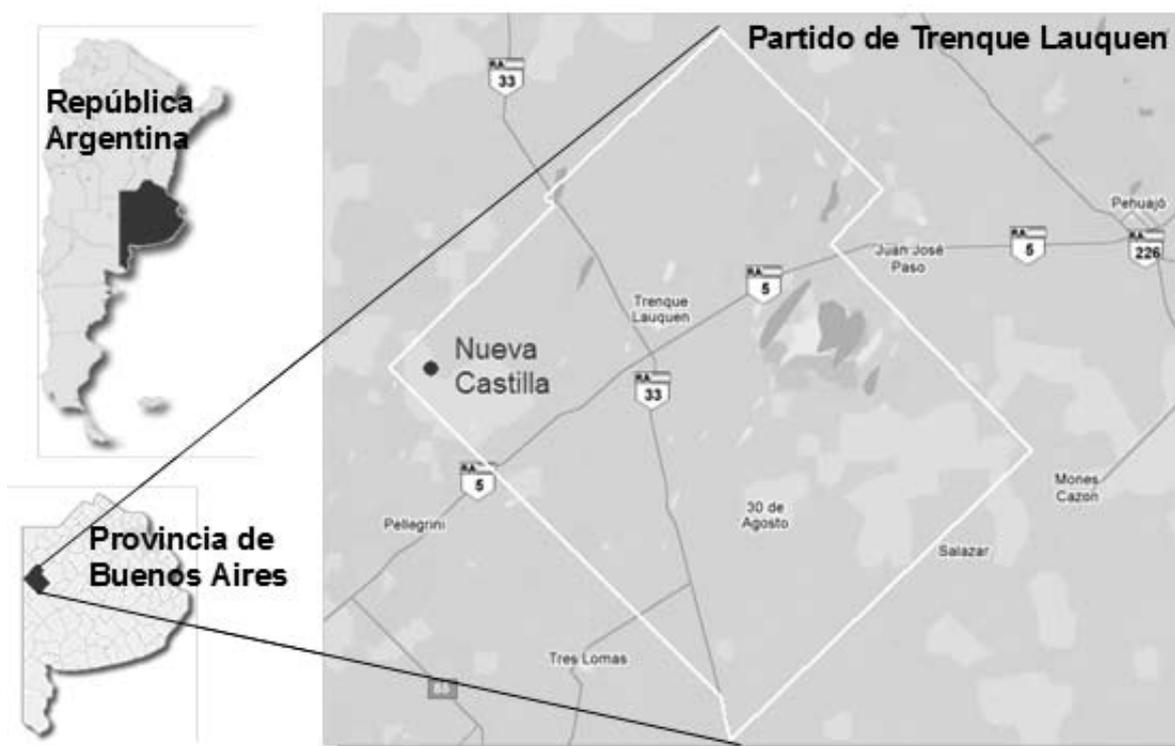


Figura 1. Ubicación del lugar de toma de muestras. Fuente del mapa: Adaptado de Google Maps (2011).

Figure 1. Location of sampling. Map source: adapted from Google Maps (2011)

2.9 % decreciendo en dirección noroeste-sureste, mientras que en el C2 es del 1.5 % decreciendo de oeste a este (Márquez Molina et al., 2009).

Manejo de los lotes

C1: tiene una ocupación de 6 meses en el año. Comenzó a ser utilizado en el 2008, con una carga instantánea de 5 cab.ha⁻¹. día⁻¹, con un peso promedio de 200 kg por animal y una carga variable de 201 a 336 cab.ha⁻¹.

C2: este lote tiene mayor variabilidad en el tiempo de permanencia de los animales en el mismo, siendo en promedio de 3 meses en el año, la ocupación comenzó en el 2001 y continúa a la fecha. El peso promedio de los animales es de 211 kg y una carga instantánea de 3.4 cab.ha⁻¹. día⁻¹ y una carga que varió de 65 a 247 cab. ha⁻¹.

En ambos lotes, al finalizar la estadía de los animales, el estiércol se compacta y mezcla con la capa superficial del suelo a fin de crear una capa sellante que disminuye la infiltración y por consiguiente la migración vertical de contaminantes. En la Tabla 1 se resume las características de los corrales. Muestreo de suelos dentro de los corrales

La ubicación de los lugares donde

se tomaron las muestras y columnas se determinó según situaciones topográficas: loma, media loma y bajo. En función lo anterior, en el C1 las situaciones fueron: loma, media loma y bajo; y en el C2: loma y media loma. Se eligió como testigo un lugar sin uso fuera de los corrales. Su ubicación fue una loma cercana al C1 (Figura 2).

A fin de caracterizar los suelos, se realizaron seis calicatas, una por cada situación incluyendo el testigo. Los perfiles de suelo fueron descriptos y clasificados taxonómicamente siguiendo los criterios de la Soil taxonomy (Soil Survey Staff, 2006) por Heredia et al. (2009). Los suelos corresponden al orden Molisol pero a distintos subgrupos de suelos (Tabla 2).

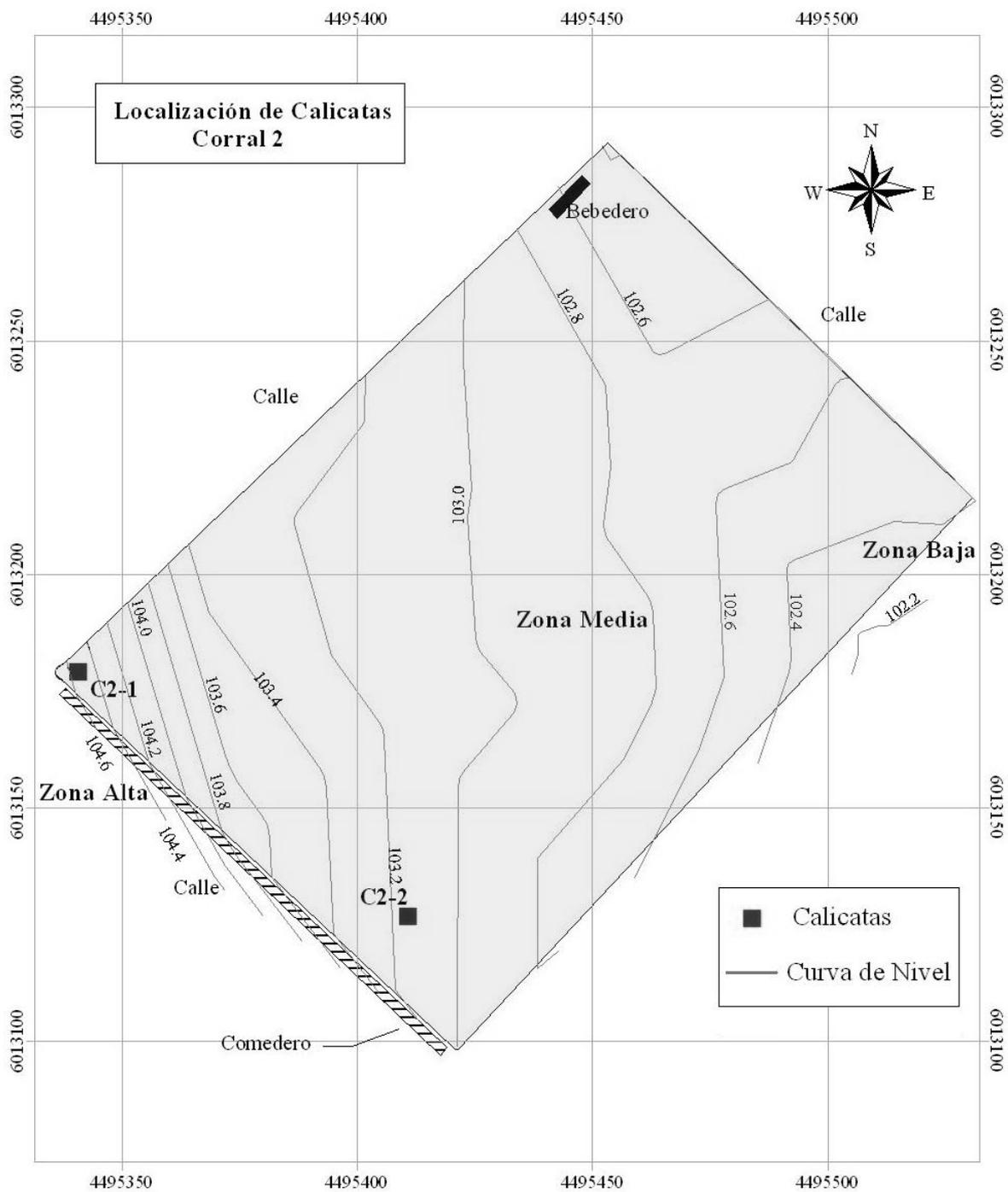
Evaluación de suelos

Con el propósito de conocer la situación de los suelos antes de realizar el ensayo de percolaciones se tomaron muestras disturbadas compuestas de los primeros 20cm del perfil en cada una de las calicatas descriptas anteriormente y se analizaron química y físicamente. Las determinaciones químicas fueron: carbono fácilmente oxidable (Cox) por Walkley & Black, cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺),

Característica	Corral 1	Corral 2
Años de uso	1	
Tiempo de ocupación anual (meses)		8
Carga (cabezas.ha ⁻¹)	6	3
Peso medio de animales (kg)	201-336	65-247
	200	211

Tabla 1. Características de uso de los lotes.

Table 1. Usage characteristics of pens



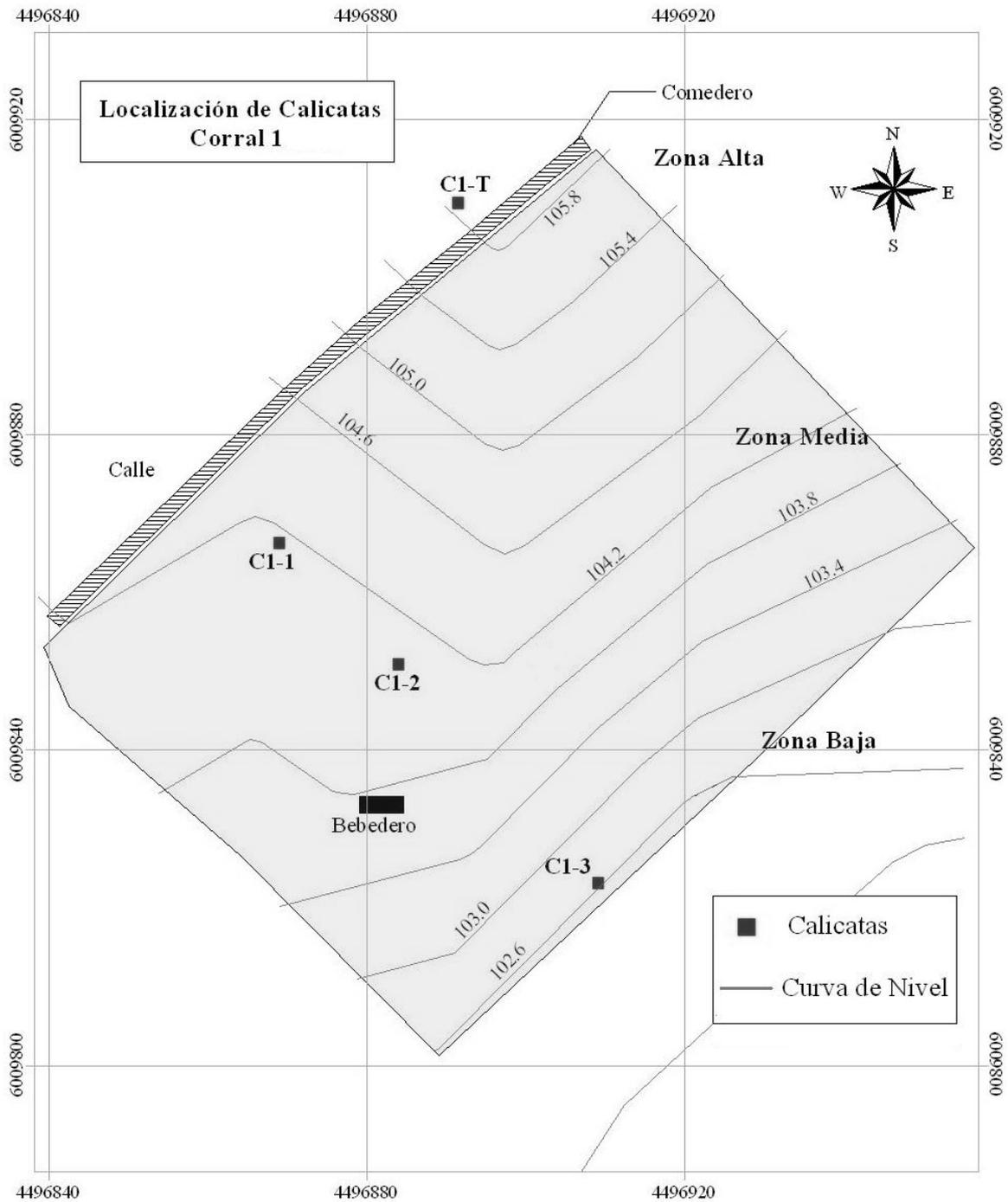


Figura 2. Lotes, calicatas y puntos de extracción de columnas con muestra no disturbada. Referencias: CT: calicata testigo, C1-1: loma del C1, C1-2: media loma del C1, C1-3: bajo del C1, C2-1: loma del C2, C2-2: media loma del C2, W: pozos de muestreo de agua subterránea realizados por Márquez Molina *et al.* (2009).

Figure 2. Lots, pits and column extraction points. References: CT: control pit, C1-1: hill of C1, C1-2: mean slope of C1, C1-3: low of C1, C2-1: hill of C2, C2-2: mean slope of C2. W: groundwater sampling wells performed by Márquez Molina *et al.* (2009)

Denominación de las muestras	Ubicación	Posición topográfica	Clasificación taxonómica
Testigo	Fuera de los corrales	Loma	Hapludol éntico
Corral 1-loma	C1	Loma	Hapludol éntico
Corral 1-media loma		Media loma	Hapludol éntico
Corral 1-bajo		Bajo	Hapludol éntico
Corral 2-loma	C2	Loma	Hapludol éntico
Corral 2-media loma		Media loma	Hapludol típico

Tabla 2. Características de ubicación, posición topográfica y clasificación taxonómica de los lugares de muestreo de suelos y columnas. Adaptado de Heredia *et al.*, 2009c.

Table 2. Location characteristics, landscape position and taxonomic classification of soil and column sampling sites. Adapted from Heredia *et al.*, 2009c

capacidad de intercambio catiónico (CIC) por el método de acetato de amonio (NH_4OAc 1N pH 7) medido por espectrofotometría de absorción atómica y llama (Metrolab 250 AA, rango 185 a 900 nm; los valores son expresados en $\text{cmol}_{\text{carga}} \cdot \text{kg}^{-1}$), pH (1:2.5 agua:suelo), conductividad eléctrica (CE) en pasta (1:1 agua-suelo), fósforo extractable (Pext) mediante el método Bray-Kurtz N° 1, azufre de sulfatos (S-SO_4^{2-}) por el método de extracción en fosfato diácido de potasio y turbidimetría (con Cl_2Ba), y nitratos (NO_3^-) por el método de extracción con sulfato de cobre y colorimetría con SNEDD (Page *et al.*, 1986).

Desde el punto de vista físico se realizaron determinaciones de contenido de arcilla, limo, arena y clase textural por el método de Bouyoucos, densidad aparente (Dap) por el método del cilindro, humedad equivalente (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) mediante olla y membrana de presión de Richards (Klute, 1986).

Composición del agua de poro

Para obtener y analizar el agua de poro se tomaron muestras de suelos no disturbadas

alrededor de las calicatas en columnas de tubo de PVC de 63 mm de diámetro interno y 25 cm de alto de los primeros 15 a 20 cm del perfil, por cuadruplicado. Con estas muestras se realizó el ensayo de lixiviado. El agua intersticial o agua de poro, se obtuvo por medio de ensayos de columnas de lixiviación (Candela & Varela, 1993; Beltrán *et al.*, 1995). Se evaluó la composición del agua de poro en iones mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), pH, CE, azufre de sulfatos (S-SO_4^{2-}), (datos publicados en Heredia *et al.*, 2012) y elementos traza (As, Cr, Fe, Ni, Se, V y Zn). Las mediciones de iones mayoritarios en agua intersticial se hicieron por espectrofotometría de absorción atómica y llama (Metrolab 250 AA, rango 185 a 900 nm; los valores son expresados en $\text{cmol} \cdot \text{l}^{-1}$) y las determinaciones de metales por ICP-OES. El azufre de sulfatos por turbidimetría y carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) y cloruros (Cl^-) por tritrimetría (APHA, 1998).

Los límites de detección del ICP-OES, para los metales medidos son: As: 10 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$); Cr: 7 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$); Fe: 7 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$); Ni: 15 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$); Se: 8 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$); V: 8 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$) y Zn: 2 ($\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$).

Se realizaron cálculos teniendo en cuenta el volumen de agua lixiviado, la superficie

de la columna y la concentración del ion extraído (ionX) para expresar todas las variables en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ que se lixiviarían por año [1].

$$\text{Masa del ionX (kg}\cdot\text{ha}^{-1}) = [(V \times C)/S] \cdot 10^{-1} \quad [1]$$

Siendo: V volumen en ml del lixiviado; C la concentración en ppm del elemento en dicho lixiviado y S la superficie en cm^3 del cilindro.

Determinación de láminas de lixiviación

La lámina a aplicar surgió a partir de los excesos hídricos anuales arrojados por los balances hidrológicos calculados con el programa BALUBA (Hurtado *et al.*, 1996). Los datos utilizados fueron: humedad equivalente media del suelo analizado, datos climáticos de temperaturas y precipitaciones medias mensuales para el período 1986-2006 (Servicio Meteorológico Nacional, 2006). Del balance se tomó el exceso anual en milímetros (mm) y se calculó el volumen de agua destilada a aplicar en cada columna. El resultado expresado en lámina fue de $257 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$. El volumen de agua calculado para dicha situación fue de 852 ml.

Obtención de lixiviados

La aplicación de la lámina total se dividió en varios riegos de similar volumen a fin de evaluar la evolución de la composición de los lixiviados a medida que el agua va drenando por el suelo de las columnas. El volumen total (852 ml) se suministró en cuatro riegos: tres (L1, L2 y L3) de 250 ml y uno (L4) de 102 ml. Para realizar las percolaciones, se dispuso a cada columna un filtro inerte de tela y rejilla plástica en su parte inferior de manera de contener el suelo dentro.

Luego, en función del dato de humedad

equivalente, se proporcionó a cada columna el contenido volumétrico de agua destilada necesario para llevar al suelo a una situación cercana a capacidad de campo. Una vez humedecido el suelo de las columnas, se aplicaron los riegos y se recogieron los lixiviados en embases plásticos. El criterio de aplicación de riegos sucesivos fue esperar a que no drene más agua desde la columna antes de aplicar el siguiente riego. Las muestras fueron rotuladas y refrigeradas. Una submuestra acidificada con H_2NO_3 , para la determinación de los elementos traza. En la Figura 3 se esquematiza el procedimiento.

Índices de saturación

Se realizó un análisis de índices de saturación de los distintos elementos presentes en el agua intersticial para obtener las especies salinas presentes en el agua de lixiviados. Se utilizó el programa phreeQC versión 2.11 (Appelo & Parkhurst, 2006).

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y test de comparación de medias (test de Duncan) entre los tratamientos estudiados según posición en el paisaje, años de ocupación. Para cumplir con los supuestos del método estadístico ANOVA se realizaron transformaciones a los datos que así lo requirieron. También se realizaron análisis de regresión y correlación entre las variables estudiadas para suelos y aguas. El programa utilizado para los análisis estadísticos fue INFOSAT versión 2010 (Di Rienzo *et al.*, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Suelos

En la Tabla 3 se presentan los parámetros fisicoquímicos de los suelos correspondientes de los corrales 1 y 2. Como puede verse los

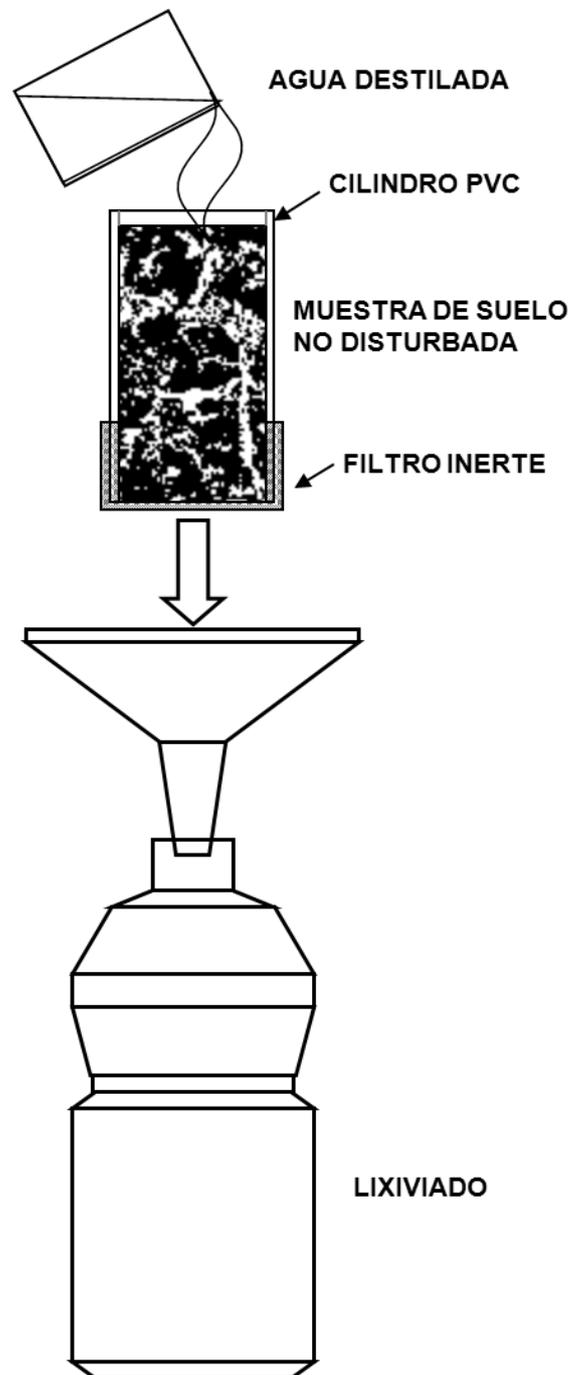


Figura 3. Esquema del percolador utilizado en la obtención del agua de poro

Figure 3. Percolator scheme used to obtain pore water

Muestra	pH	CE	MO	NO ₃ ⁻	Pext.	S-SO ₄ ⁻²	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	CIC
Unidades		ds.m ⁻¹	%	ppm	ppm	ppm	meq.100g ⁻¹				
TESTIGO	6.7	0.1	1.7	51	8.1	9	8.7	1.5	0.4	0.8	14.1
CORRAL 1- LOMA	7.4	2.7	4.6	123	68	29	18.6	1.8	1.3	2.3	24.8
CORRAL 1- M. LOMA	6.8	0.9	2.9	91	24	23	10.9	1.5	0.8	1.4	15.9
CORRAL 1- BAJO	6.9	1.2	3.6	82	103	26	14.1	1.6	1.0	2.3	20.3
CORRAL 2- LOMA	8.0	2.2	3.9	160	227	31	16.4	1.5	1.0	1.5	21.0
CORRAL 2- M. LOMA	7.2	1.2	3.0	102	285	20	9.5	1.5	0.7	1.0	15.9

Tabla 3. Características químicas de los primeros 20 cm del suelo. CE: Conductividad eléctrica, MO: materia orgánica, PExt: fósforo extractable. CIC: capacidad de intercambio catiónico.

Table 3. Chemical characteristics of the 20 first centimetres of soil. CE: Electric conductivity, MO: organic matter, PExt: extractable phosphorus, CIC: cation exchange capacity.

valores de pH de los suelos de las calicatas (Tabla 3), son neutros a ligeramente ácidos a excepción de la zona de la loma de C2 donde el pH es alcalino. En ningún caso son salinos. Por otro lado, ambos corrales tienen una acumulación de carbono semejante, lo que varía con el mayor tiempo de confinamiento es el espesor de depósito del Cox que es mayor en el corral de 8 años de uso (datos no mostrados).

En todos los casos los valores obtenidos de los elementos analizados fueron superiores a los hallados en la zona testigo, siendo mayores los encontrados en el corral con mayor tiempo de ocupación. Dentro de los cationes intercambiables, el calcio es el que se ve mayormente impactado en su incremento y en todos los casos, el complejo de cambio se encuentra saturado mayoritariamente por dicho catión. Lo que representa un efecto positivo para el suelo. En tanto, el magnesio no parece ser afectado por el tipo de uso del suelo ni tampoco varía con el tiempo de confinamiento.

Tal como se observa en la Tabla 4, la textura de todos los suelos es similar ya que pertenecen a la misma clase textural (franco arenosa). A pesar de esto, la densidad

aparente (Dap) de las situaciones bajo feedlot, en general, son inferiores respecto al testigo.

También, se observa una relación directa entre la MO y las propiedades de humedad: capacidad de campo (CC) y coeficiente de marchitez permanente (PMP). De estas, el valor más afectado es el de humedad a capacidad de campo. Los valores de humedad son excesivamente elevados teniendo en cuenta que los valores de Cox y arcillas no son altos. Sin embargo, esto puede deberse a la existencia de estiércol (materia orgánica fresca) que presenta altos valores de retención y que no son reflejados por el método de Walkley & Black, método que parecería no adecuado en estas circunstancias.

Agua de poro. Comportamiento de las variables analizadas en función de lixiviados sucesivos

Comportamiento de las variables analizadas en función de lixiviados sucesivos.

En base a resultados previos el agua de poro podría clasificarse como clorurada magnésica (Heredia *et al.*, 2012). Los

Muestra	Dap	CC	PMP	Arcilla	Limo	Arena	Clase Textural
Unidades	Mg.m ⁻³	%H ₂ O	%H ₂ O	%	%	%	
TESTIGO	1.4	20.4	1.2	13.9	16.0	70.1	Franco Arenoso
CORRAL 1- LOMA	1.0	28.7	5.0	14.5	15.7	69.9	Franco Arenoso
CORRAL 1- M. LOMA	1.1	37.1	3.4	13.1	25.0	61.9	Franco Arenoso
CORRAL 1- BAJO	1.0	31.6	12.7	14.0	24.1	61.9	Franco Arenoso
CORRAL 2- LOMA	1.3	35.3	18.1	14.5	14.1	71.4	Franco Arenoso
CORRAL 2- M. LOMA	0.9	40.5	25.9	12.5	25.6	61.9	Franco Arenoso

Tabla 4. Características físicas de los primeros 20cm del suelo. Datos de muestra compuesta.

Table 4. Physical characteristics of the first 20 cm of soil. Compound sampled data

valores de relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CSR) y porcentaje de sodio soluble (PSS) nos permitirían inferir la calidad del agua y en este caso la calidad del posible intercambio de iones entre el suelo y el agua (Tabla 5). Analizando estos parámetros se observó que en ninguna de las muestras analizadas, las aguas adquieren valores de sodio elevados que comprometan la calidad de las aguas freáticas a las que aportan. Los niveles de calcio son lo suficientemente altos en el agua como para no permitir el ingreso del sodio al complejo de intercambio y sodificar el suelo (Heredia et al., 2012).

pH y conductividad eléctrica

La variación del pH en función de los lixiviados sucesivos pareciera tener, en general, una tendencia hacia la acidificación (Figura 4-a). Lo cual, podría deberse al consecutivo lavado de bases.

El comportamiento observado de la concentración de sales solubles en función de los lixiviados sucesivos en la Figura 4-b, toma una forma parecida, gráficamente, a

una parábola invertida. Esto podría responder a que en la primera aplicación de agua (L1) no se llega a cumplir el tiempo necesario para que se establezca el equilibrio iónico entre el intercambiador y la solución del suelo por la alta velocidad de percolación en dicha aplicación. La aplicación siguiente (L2), que drena a menor velocidad que la primera, arrastraría agua remanente en la cual podría haberse establecido dicho equilibrio. Luego, en los siguientes lixiviados (L3 y L4), se aprecia como disminuye la concentración salina por acción del lavado paulatino de las mismas. Un comportamiento similar fue encontrado por Miretsky et al., (2006) donde describe que el equilibrio del contaminante en el agua de poro se establece a un flujo de agua bajo en ensayos con columnas de suelo arenoso.

Lo mencionado en el párrafo anterior ocurre en situaciones con gran cantidad de sales, como es caso de la situación de loma (Figura 5-a) y el caso del corral con más años de uso (Corral 2) (Figura 5-b). No así en los casos con menor salinidad. Las aguas obtenidas en los lixiviados en situación de feedlot se clasifican como de alta y muy alta salinidad (C3 y C4) según lo propuesto por

MUESTRA	RAS	PSS	CSR
TESTIGO	0.10	2.51	-7.03
CORRAL 1-LOMA	1.53	8.44	-131.99
CORRAL 1-M. LOMA	0.97	5.48	-138.29
CORRAL 1-BAJO	0.47	2.47	-162.32
CORRAL 2-LOMA	0.69	3.64	-132.97
CORRAL-2 M. LOMA	0.82	5.50	-81.73

Tabla 5. Valores de la calidad del agua de poro. (Heredia et al., 2012)

Table 5. Pore-water quality values. (Heredia et al., 2012)

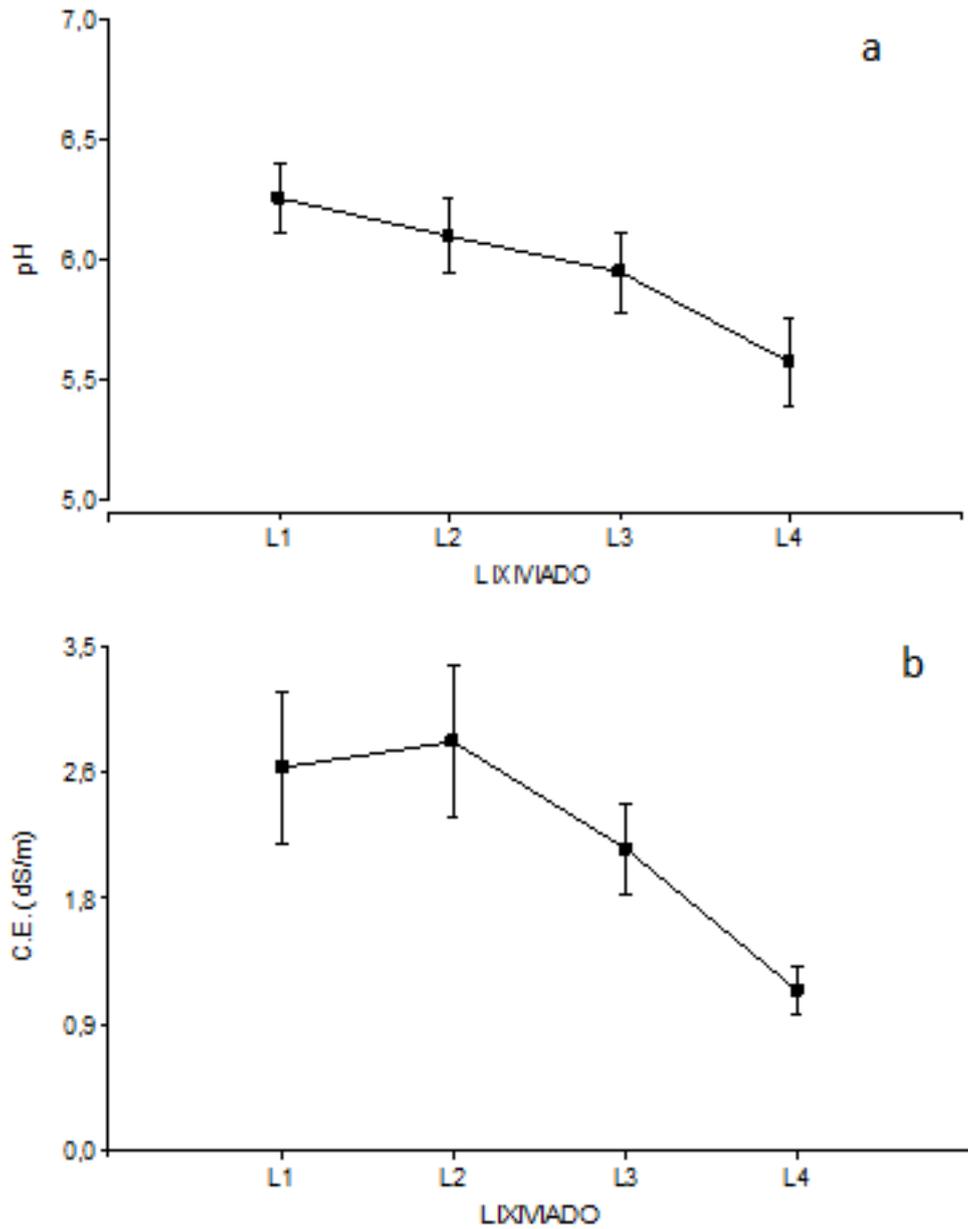


Figura 4. Tendencia general del pH (a) y conductividad eléctrica (b) del agua de poro obtenida de los lixiviados sucesivos.

Figure 4. General trend of pH (a) and electrical conductivity (b) in pore water obtained in successive leachates

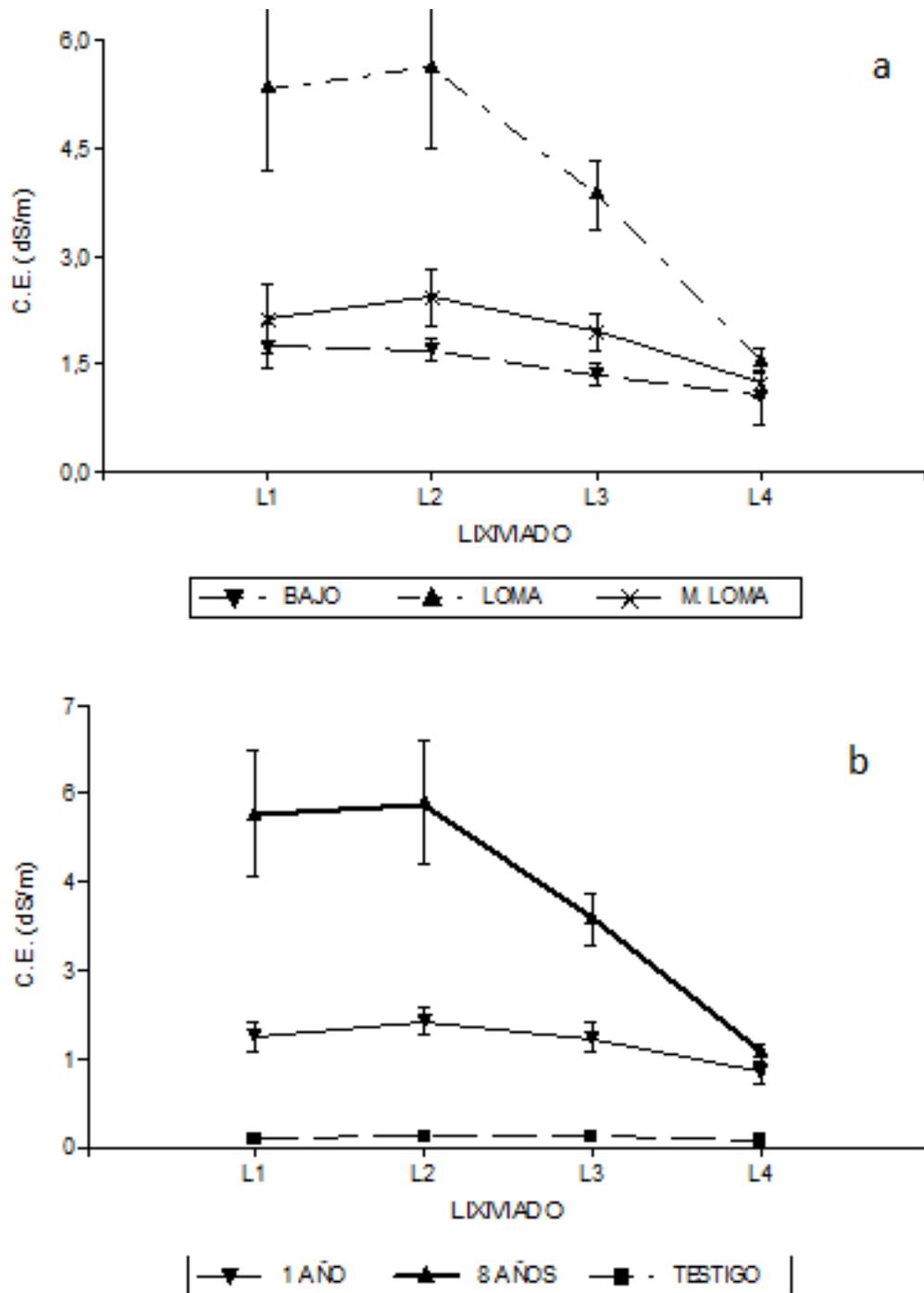


Figura 5. Conductividad eléctrica en función de lixiviados sucesivos. (a) corresponde a situaciones topográficas. (b) corresponde a situaciones de tiempo de ocupación.

Figure 5. Electrical conductivity in successive leachate: (a) topographic situations. (b) situations of occupancy time.

Riverside (Richards, 1954).

Elementos traza

En la Figura 6, se observa que los componentes minoritarios presentes en el agua de poro solo constituyen el 2.1 % del total de los iones presentes en la misma. El hierro es el dominante en el agua de poro con un 70.7 % de participación seguido por el cinc (27.5 %) y luego níquel, vanadio, arsénico, selenio y cromo que sumados no llegan a un 2 % del total de metales medidos. Este hecho se contrapone con lo determinado por Polo Gómez *et al.*, (2001) en columnas de suelo arenoso donde el cinc se lixivió en mayor cantidad que el hierro.

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes

de asociación lineal entre la CE y el pH con los componentes minoritarios del agua poro. En el caso de los metales, el vanadio es el elemento muestra una alta correlación con la CE en función de los lixiviados sucesivos que los demás metales analizados. El hierro, posee una correlación directa con el cinc ($p < 0.001$).

Dentro de los metales, el vanadio posee una alta asociación lineal y positiva con la CE y las concentraciones de As, y Ni. La correlación entre níquel y vanadio también fue descrita por Quintana (2007) en la cuenca del Río Conchos en México. Igualmente, Heredia & Fernández Cirelli (2009), encontraron una correlación lineal y positiva entre el arsénico y el vanadio en el agua de poro de suelos del norte de la

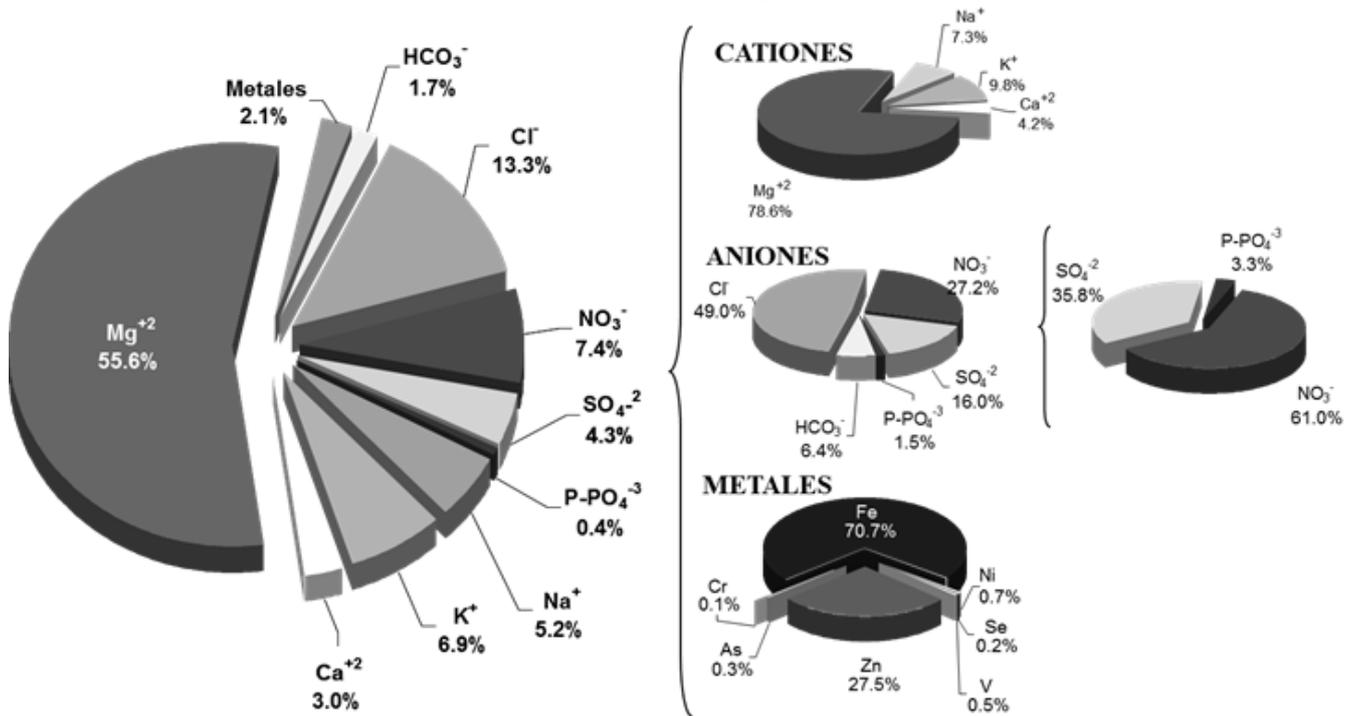


Figura 6. Distribución porcentual de los metales traza presentes en el agua de poro en el corral 1. Los datos de cationes y aniones restantes fueron tomados de Heredia *et al.* (2012).

Figure 6. Percentage distribution of trace metals in pore water in pen 1. Data about the remaining cations and anions were taken from Heredia *et al.* (2012)

n= 84	pH	CE (dS.m ⁻¹)	As (µg.l ⁻¹)	Cr (µg.l ⁻¹)	Fe (µg.l ⁻¹)	Ni (µg.l ⁻¹)	Se (µg.l ⁻¹)	V (µg.l ⁻¹)	Zn (µg.l ⁻¹)
pH	1.00	5.84 · 10 ⁻⁰³	5.49 · 10 ⁻⁰²	4.79 · 10 ⁻⁰¹	3.12 · 10 ⁻⁰²	2.57 · 10 ⁻⁰¹	8.52 · 10 ⁻⁰¹	1.23 · 10 ⁻⁰¹	5.48 · 10 ⁻⁰²
CE (dS.m ⁻¹)	0.30*	1.00	1.79 · 10 ⁻⁰¹	2.92 · 10 ⁻⁰¹	4.45 · 10 ⁻⁰¹	3.44 · 10 ⁻⁰⁵	1.90 · 10 ⁻⁰¹	1.98 · 10 ⁻⁰¹	8.15 · 10 ⁻⁰²
As (µg.l ⁻¹)	0.21	0.15	1.00	7.17 · 10 ⁻⁰¹	7.11 · 10 ⁻⁰¹	6.23 · 10 ⁻⁰³	9.01 · 10 ⁻⁰¹	4.47 · 10 ⁻⁰¹	2.82 · 10 ⁻⁰¹
Cr (µg.l ⁻¹)	0.08	0.12	-0.04	1.00	9.25 · 10 ⁻⁰¹	7.75 · 10 ⁻⁰¹	6.90 · 10 ⁻⁰¹	6.70 · 10 ⁻⁰¹	2.53 · 10 ⁻⁰¹
Fe (µg.l ⁻¹)	0.24*	0.08	-0.04	-0.01	1.00	7.52 · 10 ⁻⁰¹	3.90 · 10 ⁻⁰¹	5.72 · 10 ⁻⁰¹	4.20 · 10 ⁻⁰⁹
Ni (µg.l ⁻¹)	0.13	0.44**	0.30**	-0.03	0.03	1.00	2.93 · 10 ⁻⁰¹	9.51 · 10 ⁻⁰¹	8.58 · 10 ⁻⁰²
Se (µg.l ⁻¹)	-0.02	-0.14	-0.01	-0.04	-0.09	-0.12	1.00	8.59 · 10 ⁻⁰¹	3.70 · 10 ⁻⁰¹
V (µg.l ⁻¹)	0.17	0.53**	0.31**	-0.05	0.06	0.51**	-0.02	1.00	5.83 · 10 ⁻⁰²
Zn (µg.l ⁻¹)	0.21	0.19	0.12	0.13	0.59**	0.19	-0.10	0.21	1.00

Tabla 6. Correlación Pearson entre pH, CE y elementos traza en el agua de poro.

Table 6. Pearson's correlation between pH, EC and trace elements in pore water

provincia de Buenos Aires.

En la Figura 7, se ve la distribución del hierro y el cinc según posiciones topográficas. La tendencia de ambos iones es semejante disminuyendo hasta el tercer lixiviado para luego tener un leve ascenso, las mayores concentraciones se encuentran en general en la posición de

loma.

No hay un efecto de la sumatoria de concentraciones de Fe y Zn con el pH. No obstante, el logaritmo de la sumatoria de hierro y cinc en función del pH, muestra un modelo de regresión parabólica pero invertida, significativa ($p < 0.05$ y $r^2 = 0.33$) (Figura 8). En un valor de pH de alrededor de 6 se obtiene, según las regresiones, la

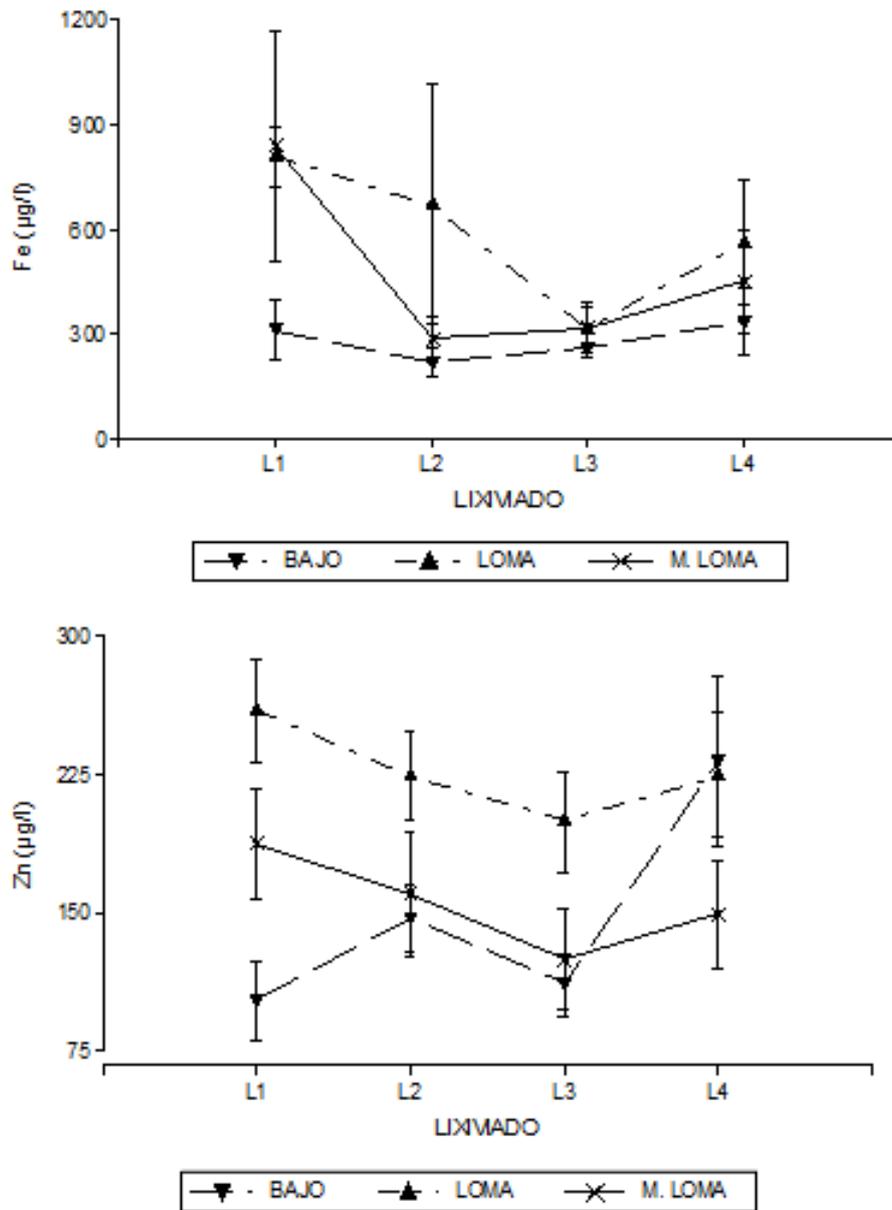


Figura 7. Variación en los contenidos de Fe y Zn en función de la posición topográfica.

Figure 7. Variation in Fe and Zn content based on topographic position

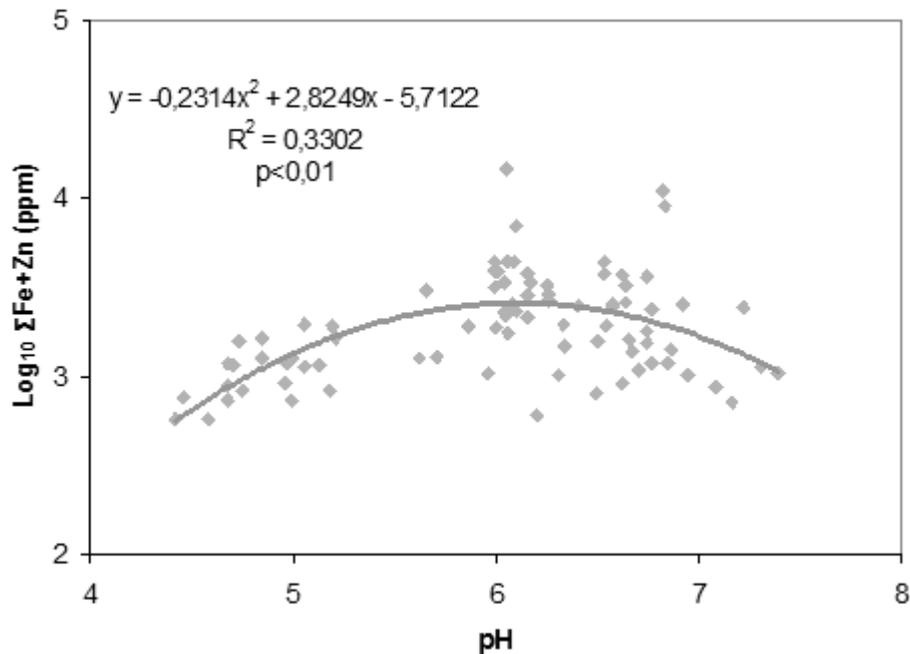


Figura 8. Regresión logarítmica entre la suma de Fe y Zn y el pH del agua de poro.

Figure 8. Logarithmic regression between the sum of Fe and Zn and pH in pore water

máxima concentración de hierro y cinc.

Si bien el pH del agua de poro ya es leve a moderadamente ácido, cuando el pH baja, la solubilidad del hierro y el zinc aumenta y se encuentra presente en mayor concentración en el agua de poro obtenida de lixiviados sucesivos. Algo similar ocurre con la disponibilidad de estos metales en suelos (Rivera Ortiz *et al.*, 2003; Roca *et al.*, 2007), donde el pH es el regulador de la solubilidad de estos metales. Sin embargo, en casos como los evaluados en este estudio, podría ser que la regulación de la solubilidad del hierro y el cinc este asociada más a el efecto de la acción de otros iones que regulan el pH de la solución del suelo.

Evaluación de los elementos traza

- *Comparación entre situaciones topográficas*

En cuanto a los componentes minoritarios,

el análisis de la varianza (Tabla 7) sólo pudo realizarse para el hierro y el cinc. Para el resto de los elementos ocurrió que no en todos los riegos fue detectado y en otros, si bien se detectó su valor estaba por debajo del límite de detección del equipo.

En el C1, la mayoría de los metales se encuentran en mayor cantidad en la posición de loma, lugar donde se encuentran los comederos. En el caso del cromo no se tienen valores y para el selenio, la media loma presenta mayor valor que la loma. Para el Fe y el Zn las diferencias entre las situaciones son significativas. En este corral, al igual que sucede con los iones mayoritarios, en la loma es donde se obtuvieron los mayores valores ($161 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), seguida por el bajo ($85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y luego la media loma ($73 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Las medias lomas son zonas con mayor pérdida de material por escurrimiento superficial por lo que es normal que el valor

a

C1	As	Cr	Fe	Ni	Se	V	Zn	TOTAL
LOMA	1.39 n/c	0 l/d	105 a	0.86 n/c	0.57 n/c	1.41 n/c	52 a	161
M. LOMA	0.17 n/c	0 l/d	50 b	0 l/d	0.86 n/c	0.18 n/c	22 b	73
BAJO	0.20 n/c	0 l/d	57 ab	0 l/d	0 l/d	0 n/c	28 b	85

b

C2	As	Cr	Fe	Ni	Se	V	Zn	TOTAL
LOMA	0.55 n/c	0 l/d	149 a	4.2 n/c	0 n/c	2.1 n/c	48 a	204
M. LOMA	0 l/d	0.96 n/c	154.9 a	0 l/d	0 l/d	0 l/d	47 a	203

Tabla 7. ANOVA y test de comparación de medias (Duncan) de (a) componentes minoritarios entre situación topográfica del Corral 1 y (b) entre situación topográfica del Corral 2. Los valores están expresados en kg.ha⁻¹. año⁻¹. Letras distintas indican diferencias significativas entre posición topográfica (p<0.05). l/d: debajo del límite de detección del equipo. n/c: no cumple con los supuestos del ANOVA.

Table 7. ANOVA and mean comparison test (Duncan) of (a) minor components between Corral 1 topographic situation and (b) between Corral 2 topographic situation. Values are expressed in kg ha⁻¹.year-1. Different letters indicate significant differences between topographic position (p <0.05). l/d: below equipment detection limit. n/c: not agree with ANOVA assumptions

de las concentraciones sea mas bajo por menos acumulación superficial.

En el C2, no se encontró diferencia entre las posiciones de loma y media loma para hierro y cinc, si para arsénico, níquel y vanadio donde es en la loma donde se encontraron los mayores valores. El cromo se encontró solamente en la media loma. El hecho de que en algunos casos se detecte presencia de elementos traza y en otros no, se debería a que la distribución en el suelo de estos es heterogénea y muy localizada, debido a la heterogeneidad en la distribución del estiércol generado por los animales.

En el C1, según la Figura 9, el mayor aporte de metales, provendría de la loma constituyendo el 50 % del total. Siguiendo la tendencia antes descrita, le sigue el bajo en importancia con 27 % y por último la media loma con 23 %.

Respecto al C2, no habría diferencias entre la loma y la media loma. Ambas situaciones participan en igual magnitud. Una explicación factible para esta distribución podría ser que el C1 posee mayor pendiente que el C2 (Márquez Molina *et al.*, 2009).

En la Figura 10, se ve la distribución de Cr, Ni, Se, V. El cromo sólo se encontró en la media loma, el níquel sólo en la loma. Ni el selenio, ni el vanadio fueron encontrados en los lixiviados del suelo del bajo.

- Comparación entre tiempo de uso de la tierra

En cuanto a los iones traza, el Fe y el Zn se encuentran en todas las situaciones sin diferencias significativas según el tiempo de ocupación (p > 0.05).

En la Figura 11, se puede apreciar distribución porcentual de los iones traza según posición en el paisaje.

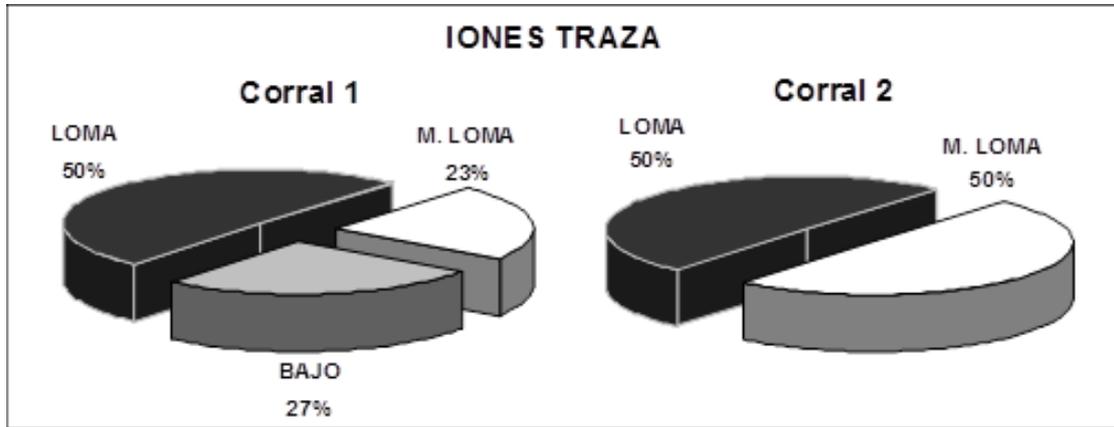


Figura 9. Distribución porcentual del total de componentes minoritarios que lixivian del perfil de suelo en un año, respecto a la posición en el relieve para los dos corrales evaluados.

Figure 9. Percentage distribution of all trace elements leaching the soil profile in a year in relation to topographic position for the studied pens.

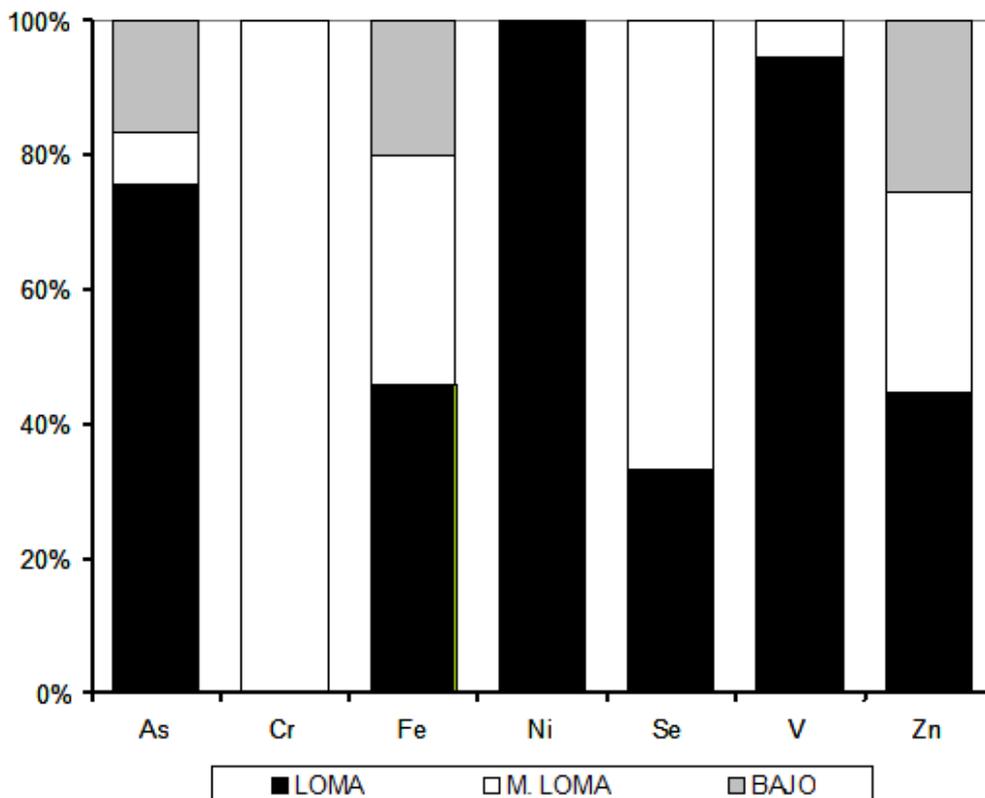


Figura10. Distribución porcentual de cada ion traza que lixiviaría el perfil de suelo en un año según posición en el relieve.

Figure 10. Percentage distribution of each trace ion that leave the soil profile in a year according to topographic position

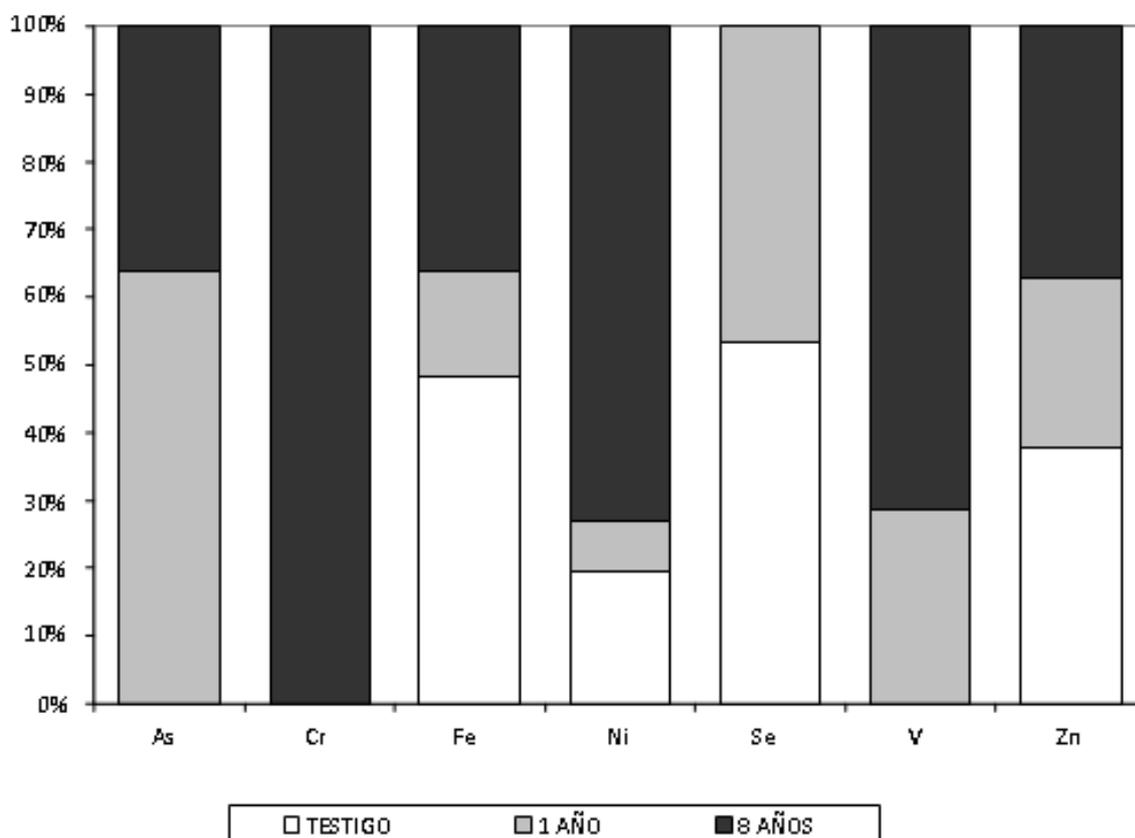


Figura 11. Distribución porcentual de cada ión que lixiviaría el perfil de suelo en un año según tiempo de uso de la tierra bajo feedlot.

Figure 11. Percentage distribution of each ion leaching the soil profile according to the time of land use for feedlot

El As, el Cr y el V sólo se encontraron en situaciones con animales (no en el testigo). Lo que lleva a pensar que estos estarían presentes en las dietas (Moscuza & Fernández Cirelli, 2009) y en sus excretas.

Índices de saturación

En la Tabla 8 se presentan las especies químicas y el índice de saturación obtenido del procesamiento de los datos analíticos mediante el programa PhreeQC (Appelo & Parkhurst, 2006). Las sales de calcio se encuentran saturadas. El resto se encuentra en un estado de insaturación que determina que se encuentran en formas disueltas en el agua y que el sistema es capaz de seguir disolviéndola.

El oxígeno muestra un alto grado de instauración. Esto quiere decir que existe un medio reductor. Lo cual podría ser explicado por la materia orgánica no descompuesta, o por la saturación en agua a la que fueron sometidas las muestras en el ensayo. Inicialmente la materia orgánica utiliza, en su oxidación, el oxígeno disuelto en el agua y, posteriormente, cuando este se agota, toma el mismo de otros agentes oxidantes (Pulido Bosch & Vallejos Izquierdo, 2003)

La oxidación total de los componentes orgánicos de cómo resultado la formación de CO_2 (Pulido Bosch & Vallejos Izquierdo, 2003). Este, al igual que el oxígeno, se encuentra insaturado en todas las situaciones evaluadas, lo que es indicio de la existencia de dicha oxidación y de la respiración de los microorganismos. La atmósfera del suelo

Especie Química	Fórmula Química	Testigo	Corral1 Loma	Corral 1 Media loma	Corral 1 Bajo	Corral 2 Loma	Corral 2 Media loma
Anhidrita	CaSO ₄	-3.48	-2.83	-2.86	-2.76	-2.35	-2.75
Aragonita	CaCO ₃	-3.34	-2.3	-2.3	-2.97	-1.79	-2.13
Calcita	CaCO ₃	-3.2	-2.16	-2.16	-2.83	-1.65	-1.98
CO2(g)	CO ₂	-2.03	-1.57	-2.08	-1.34	-1.73	-1.68
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	-5.49	-2.64	-2.65	-4.05	-1.67	-2.13
Fe(OH)3(a)	Fe(OH) ₃	1.52**	1.1**	1.69**	-0.85*	1.87**	2.21**
Goethita	FeOOH	7.41**	6.99**	7.58**	5.04**	7.76**	8.1**
Gipsita	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-3.26	-2.61	-2.64	-2.54	-2.14	-2.53
H ₂ (g)	H ₂	-20.2	-20.2	-20.8	-19.2	-20.8	-20.8
H ₂ O (g)	H ₂ O	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51	-1.51
Halita	NaCl	-8.64	-5.58	-6.18	-6.25	-6.09	-6.35
Hematita	Fe ₂ O ₃	16.82**	16**	17.16**	12.08**	17.53**	18**
Hidroxyapatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	-10.76	-6.92	-5.4	-9.12	-0.23	-2.47
Jarosita-K	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-2.26	-2.13	-1.56	-6.55	1.01	1.73
Melanterita	FeSO ₄ ·7H ₂ O	-4.81	-5.16	-5.41	-5.64	-4.88	-4.55
O ₂ (g)	O ₂	-42.79	-42.79	-41.59	-44.79	-41.59	-41.59
Siderita	FeCO ₃	0.03*	0.08*	-0.14*	-1.14	0.39*	0.78*
Smithsonita	ZnCO ₃	-1.63	-1.42	-1.62	-2.63	-1.07	-0.92*
Vivianita	Fe ₃ (PO ₄) ₂ ·8H ₂ O	1.49**	0.88*	1.03**	-1.97	4.51**	5.31**
Zn(OH)	Zn(OH) ₂	-2.95	-3.2	-2.89	-4.63	-2.7	-2.59

Tabla 8. Análisis de especiación química e índices de saturación según situaciones evaluadas. ** estado saturado. * estado de equilibrio. Los valores negativos menores a -1 indican instauración.

Table 8. Chemical speciation analysis and saturation index of assessed situations. ** saturated salt state. * steady salt state. Negative values less than -1 indicate unsaturated salt state.

se enriquece de CO₂, el cual es disuelto en el agua de poro como ácido carbónico generando una disminución del pH de esta. La cantidad de dióxido disuelto dependerá de la presión parcial del mismo en la atmósfera del suelo, del bicarbonato disuelto y del pH del agua (Rodríguez Mellado & Marín Galvín, 1999).

La mayoría de los compuestos formados por hierro se encuentran saturados o en equilibrio. Lo cual quiere decir que están precipitados aunque ante alguna variación del pH podrían cambiar de estado. Los niveles más altos de instauración de estos compuestos se han encontrado en el C2

que es el que posee el pH más alto. De hecho, la jarosita (sulfato de potasio y hierro hidratado) se encuentra saturada solamente en dicho corral. Además del pH más alto, se encontraron grandes concentraciones de sulfatos y de potasio que estarían formando dicha sal junto con el hierro en forma precipitada (Heredia et al, 2012). La melanterita (FeSO₄·7H₂O) es el compuesto formado por hierro que se encuentra siempre insaturado. Se puede afirmar que el pH del agua juega un papel importante en la determinación del estado de las especies salinas férricas.

La existencia de variadas especies

de hidrólisis del hierro como $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ o FeOOH desempeñan un papel importante en el control de la solubilidad de hidróxidos y óxidos metálicos (Rodríguez Mellado & Marín Galvín, 1999). Este complejo comportamiento del hierro podría explicar, en parte, la causa de la variabilidad en la detección de los metales hallados en el presente estudio. Muchos autores como Miretzky *et al.* (2006), Schwartz & Kgomanyane (2007) y Bernard *et al.* (2007) entre otros, han descrito la relación que tienen los óxidos, los hidróxidos o los diversos compuestos formados por hierro con la solubilidad y el acomplejamiento de ciertos metales. En este trabajo se han encontrado grandes cantidades de hierro en las aguas de lixiviado y el análisis de especiación manifiesta la heterogeneidad de compuestos en que se puede encontrar dicho elemento.

CONCLUSIONES

En suelos Hapludoles bajo producción intensiva de carne vacuna, la cantidad de elementos traza lixiviada durante el periodo de un año seguido el balance hidrológico de la zona fue del 2.1 % del total de iones lixiviados.

Con el aumento del número de lixiviados disminuye el pH de la solución del suelo y se desaliniza.

Topográficamente en las lomas, en coincidencia con los comederos fue donde hay mayor presencia de elementos traza.

No hay diferencias significativas en contenido de los mismos según el tiempo de ocupación, aunque en masa el total de elementos traza que se lixivian en las lomas fue de $161 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el C1 y $204 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el C2.

El hierro y el cinc fueron los metales componentes minoritarios que aparecen en mayor abundancia en los lixiviados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appelo C AJ & Parkhurst DL. 2006. *User´s Guide to phreeQC (Version 2.11). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations*, Waters Resources Investigations, United States Geological Survey (USGS), Denver, Colorado, USA
- APHA(American Public Health Association). 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. AWWA, WPCF, Washington, DC
- Beltrán J, Hernández F & Morell I. 1995. Estudios de adsorción de plaguicidas en suelos mediante experiencias en columnas. *Avances en la Investigación en la zona no saturada* (Barcelona): 269-281
- Bernard D, El Khattabi J, Lefevre E, Serhal H, Bastin-Lacherez S & Shahrour I. 2008. Origin of nickel in water solution of the chalk aquifer in the north of France and influence of geochemical factors. *Environmental Geology*, 53(5): 1129-1138
- Candela L & Varela M. 1993. *La zona no saturada y la contaminación. Teoría, medición y modelos*. CINME, Center, Lincoln, NE, USA, Barcelona, España: 322 p
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M & Robledo CW. 2010. *InfoStat versión 2010*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina
- García I. 2005. Vulnerabilidad y autodepuración de los suelos. <http://edafologia.ugr>.
- Google Maps. 2011. Google Maps Argentina Beta. <http://maps.google.com.ar>
- Heredia OS, Mengoni H, Marquez JJ & Sainato C. 2009. Caracterización de suelos bajo feedlot y su evaluación para la protección de agua subterránea. P 552-557 En: Di Leo N, Montico S & Nardón G (eds) *Avances en Ingeniería Rural 2007-2009*. Rosario, Argentina
- Heredia OS & Fernández Cirelli, A. 2009. Trace elements in soil, pore water and groundwater in Buenos Aires, Argentina. *Geoderma*, 149: 409-414
- Heredia OS, Mengoni H, & Maerquez Molina JJ. 2012. Relación cronoespacial de la calidad de suelo y agua bajo producción intensiva de ganado bovino. P 99-120 En Gallardo Lacho (ed), *Aguas, suelos y vegetación en cuencas iberoamericanas*. SiFyqa. España

- Kanfi Y, Ronen D & Magaritz M. 1983. Nitrate trends in the Coastal Plain of Israel. *Journal of Hydrology*, 66: 331-341
- Klute A. 1986. *Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd edition. Monograph 9 (Part 1). American Society of Agronomy-Soil Science Society of America Publishers, Madison, Wisconsin, USA
- Márquez Molina JJ, Sainato CM & Losinno B. 2009. Effect of time of confinement over groundwater contamination at a feedlot: its evaluation through electrical resistivity tomography. N. *11th International Congress of Brazilian Geophysical Society. Salvador Bahia, Brasil*.
- McLean JE & Bledsoe BE. 1992. *Behaviour of Metals in Soils*. EPA/540/S-92/018. Washington DC, EEUU: 1-20
- Mengoni HD & Heredia O. 2011. Cambio de la composición del agua de poro bajo feedlot en Hapludoles. P 89 *En Actas del Congreso de Ciencias Ambientales COPIME 2011, Buenos Aires*
- Mengoni HD & Heredia OS. 2012. Composición catiónica en agua de poro, suelo y agua subterránea en hapludoles bajo feedlot. *Actas del XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires: comisión de fisicoquímica de suelos, formato CD: 6 p*
- Miretzky P, Muñoz C & Carrillo-Chávez A. 2006. Experimental Zn(II) retention in a sandy loam soil by very small columns. *Chemosphere*, 65: 2082-2089
- Moscuza CH & Fernández Cirelli A. 2009. Trace elements in confined livestock production systems in the Pampean plains of Argentina. *World Applied Sciences Journal*, 7: 1583-1590
- Page AL, Miller AH & Keeney DR. 1982. *Methods of Soil Analysis. Chemical and microbiological properties*. 2º ed. (Part 2), Agronomy series. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America Publishers, Madison, Wisconsin, USA: 1159 p
- Polo Gómez MJ, Domínguez García-Baquero E & Giráldez Cervera JV. 2001. Lixiviación de metales desde puntos con contaminación residual en la cuenca del Guadimar. P 3-11 En: López JJ & Quemada M (eds). *Temas de Investigación en Zona no Saturada del suelo*. Universidad de Navarra. ETSIA -Pamplona, España
- Pulido Bosch A & Vallejos Izquierdo A. 2003. *Gestión y contaminación de recursos hídricos*. Editorial Universidad de Almería Servicio de Publicaciones, Almería España: 292 p

- Quintana Martínez EC. 2007. *Comportamiento de la contaminación por Plomo, Níquel, Vanadio, Arsénico, Cromo y Hierro en la cuenca del Río Conchos*. Tesis doctoral de la Facultad de Zootecnia de Chihuahua de la Universidad Autónoma de Chihuahua, México: 61 p
- Reilly TJ & Baehr AL. 2006. *Methodology to evaluate the effect of sorption in the unsaturated zone on the storage of nitrate and other ions and their transport across the water table, southern New Jersey*. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5074: 22 p
- Richards LA. 1954. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Manual de agricultura Nº 60. United States Salinity Laboratory Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América: 171 p
- Rivera-Ortiz P, Etchevers JD, Hidalgo Moreno C, Castro Meza BI, Rodríguez Alcázar J & Martínez Garza A. 2003. Dinámica de hierro y zinc aplicados en soluciones ácidas a suelos calcáreos. *Terra Latinoamericana*, 21: 341-350
- Roca N, Pazos MB & Bech J. 2007. Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, cinc en suelos del NO argentino. *Ciencia del Suelo*, 25 (1): 31-42
- Rodríguez Mellado JM & Marín Galvín R. 1999. *Fisicoquímica de aguas*. Editorial Díaz de Santos, Madrid, España: 466 p
- Soil Survey Staff. 2006. *Claves para la taxonomía de suelos*. 10a ed, USDA, Natural Resources Service: 332 p
- Schwartz MO & Kgomanyane J. 2007. Modelling natural attenuation of heavy-metal groundwater contamination in the Selebi-Phikwe mining area, Botswana. *Environmental Geology*, 54(4): 819-830
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) 2006. Temperaturas y precipitaciones medias mensuales 1986-2006. <http://www.smn.gov.ar/>