

TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA APLICADA A LA CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS EN TAMBOS

BEATRIZ N LOSINNO¹; CLAUDIA M SAINATO¹; HORACIO J MALLEVILLE¹ & GRISELDA GALINDO²

¹ Cátedra de Física. FAUBA Av. San Martín 4453 (1417) DSQ. Bs. As.

² Cátedra de Hidrogeología. FCEN. UBA. Ciudad Universitaria. Pab. II

Correspondencia a: bnlosinno@fibertel.com.ar; csainato@agro.uba.ar

Recibido: 05/07/07

Aceptado: 01/09/08

RESUMEN

La calidad del agua subterránea en los tambos, utilizada para consumo animal, puede tener incidencia en la calidad de la leche, por lo cual es importante conocer el efecto de los lixiviados sobre el suelo y el agua subterránea. El objetivo fue detectar anomalías de conductividad eléctrica (CE) en zona no saturada y saturada por medio de la tomografía de resistividad eléctrica, en sitios potencialmente contaminados en dos tambos, uno en Venado Tuerto y otro en Carmen de Areco y su relación con las propiedades físico-químicas del suelo y agua subterránea. En Carmen de Areco, en un suelo franco limoso con la presencia de un horizonte arcilloso (Bt) el sitio más comprometido resultó el corral de encierre cercano a la zona de ordeño, con anomalía de conductividad eléctrica del 60% en la zona no saturada respecto a sondeos testigos, mientras que la zona de alimentación, que periódicamente se traslada de lote, no se vió afectada.

En Venado Tuerto, en un suelo franco arenoso de textura más gruesa, la zona de alimentación, con una anomalía del 84% y con una carga animal prolongada en el tiempo y las inmediaciones de la laguna de efluentes, presentaron un alto contenido de sales. En ambos casos la salinidad estuvo asociada con alto contenido de nitratos, fósforo y sulfatos provenientes de los efluentes ganaderos.

Palabras clave. Tomografía eléctrica, tambo, contaminación, suelos, agua subterránea.

ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY APPLIED TO THE CHARACTERIZATION OF CONTAMINATED SITES AT DAIRIES

ABSTRACT

Groundwater quality at dairies, used for animal consumption, may have incidence on milk quality, for which it is important to know the effect of wastes lixiviation on soil and groundwater. The aim was to detect anomalies of electrical conductivity at non saturated and saturated zone, by means of electrical resistivity tomography, at potentially contaminated sites at two dairies at Venado Tuerto (Santa Fe Province, Argentina) and at Carmen de Areco (Buenos Aires Province, Argentina), and its relationship with physico-chemical properties of soil and groundwater.

In Carmen de Areco, a silty loamy soil with clay horizon (Bt), the most critical site, the corral near the milking house had an anomaly of electrical conductivity of 60% at non saturated zone relative to the background soundings, while the feeding zone which is periodically moved within the lots was not affected.

In Venado Tuerto, a sandy loamy soil of thicker texture, the feeding zone with an anomaly of 84% and an animal charge prolonged in time, and the surroundings of the lagoon of effluents had great content of salts. In both cases, the salinity was associated with high concentration of nitrates, phosphorous and sulphates from the animal effluents.

Key words. Electrical resistivity tomography, dairy farm, contamination, soils, groundwater.

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación generada por las excretas y/o efluentes de la actividad ganadera intensiva ha sido objeto de preocupación en el ámbito mundial. Nuestro país, como importante productor, no debe soslayar el estudio de los problemas que ponen en riesgo nuestros recursos naturales: suelo y agua subterránea. Por lo tanto, en estos establecimientos ganaderos, se

hace necesario generar el conocimiento del efecto relativo sobre la contaminación del suelo y el agua subterránea que tienen los distintos sectores habitados por los animales. El agua subterránea es la fuente de bebida de los animales y generalmente también se la utiliza para consumo humano por cuanto su calidad puede tener incidencia en la producción y la salud (Herrero *et al.*, 2002). El suelo actúa como atenuador de parte de los contami-

nantes, sin embargo los nitratos y cloruros debido a su solubilidad y movilidad, lixivian con facilidad hacia el agua subterránea.

Existen varios trabajos relacionados con el impacto que las actividades ganaderas intensivas pueden tener sobre el suelo y el agua superficial y subterránea (Andriulo *et al.*, 2003; EPA-USDA, 1987, entre otros).

Hay algunos estudios de contaminación por nitratos del agua subterránea en el sector de las instalaciones de ordeño de los tambos, utilizando métodos geoelectrónicos y electromagnéticos como el de Darling (1992), Drommerhausen *et al.* (1995) y Sainato *et al.* (2006a), los cuales han logrado determinar los límites de la zona afectada mediante la detección de valores anómalos de conductividad eléctrica. La ventaja de estas metodologías es la exploración rápida, no "invasiva" y de bajo costo de las situaciones más comprometidas que pueden requerir un muestreo posterior exhaustivo.

El objetivo de este trabajo fue detectar, a través de la tomografía eléctrica, anomalías de conductividad asociadas con lixiviados de los efluentes de la actividad lechera en suelo y agua subterránea. Paralelamente, se

determinó la influencia relativa de sectores de los tambos con distinta carga y permanencia de animales, sobre la contaminación.

Se trabajó sobre la hipótesis de que los sectores con alta carga animal presentarían anomalías de conductividad eléctrica (CE) relacionadas con la elevada concentración de iones asociados con los efluentes de la actividad ganadera.

MATERIALES Y METODOS

Para el presente estudio se dispuso de dos establecimientos lecheros, uno ubicado en las afueras de Carmen de Areco (Pcia. de Bs. As.) y el otro en las inmediaciones de Venado Tuerto, en la localidad el Chapuy (Pcia. de Santa Fe), Figura 1, los cuales poseen distintas características en la Zona No Saturada (ZNS).

En la Tabla 1 se describen las características hidrogeológicas y clasificación de los suelos de las zonas donde se ubican los dos establecimientos en estudio.

La textura del suelo en Carmen de Areco es franco limosa con la presencia de un horizonte arcilloso (Bt) de 73 cm, mientras que en Venado Tuerto es franco arenoso, más suelto en profundidad.

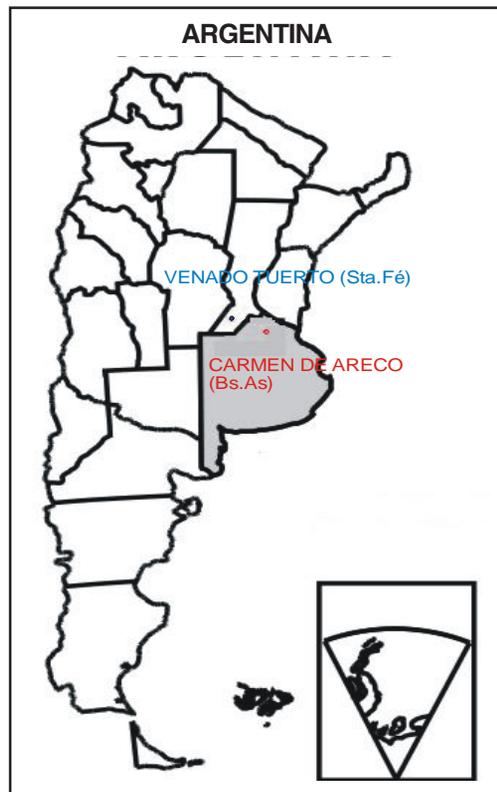


Figura 1. Mapa de Argentina, con las localidades donde se ubican los establecimientos.
Figure 1. Map of Argentina with the towns where the dairy-farms are placed.

Tabla 1. Características hidrogeológicas y clasificación de los suelos en los dos establecimientos. (Gonzalez, 2005; Palazzo *et al.*, 2003; Santa Cruz, 1995).

Table 1. Hydrogeological characteristics and soil classification at both dairy farms.

	Carmen de Areco	Venado Tuerto
Formaciones hidrogeológicas en orden creciente de profundidad	<ul style="list-style-type: none"> • Pospampeano constituido por limos, arenas limosas, limos arcillosos y conchillas, Espesor 8 m. • Pampeano superior: limos finamente arenosos, calcáreos. • Pampeano inferior: limo arcillosos. Espesor del Pampeano variable entre 20 y 120 m <ul style="list-style-type: none"> • Puelche: arenas medianas a finas Se encuentra a 80 m de profundidad con espesor de 20 a 35 m. <ul style="list-style-type: none"> • Paraná: arcillas verdes, verde azuladas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Loess pospampeano, limo arcilloso, arenas finas y muy finas con intercalaciones de arcilla y carbonato de calcio, de origen eólico. Espesor aproximado 4 a 12 m. • Pampeano: limo arcilloso y arenas finas, con permeabilidad de baja a moderada. Aprox. 60 m de espesor. • Puelche: arenas finas y gruesas, gravilla. Buena permeabilidad. • Paraná: pelitas y psamitas (origen marino).
Recarga	Autóctona directa (freática, Pampeano) Autóctona indirecta (Puelche)	Autóctona directa
Suelos	Argiudol ácuico (franco-limoso) Moderadamente drenado Horizonte: A1, muy provisto de MO, espesor 25 cm; B1 con más arcillas y bloques, de 17 cm de espesor; Bt de 73 cm	Hapludol típico (franco arenoso) Bien drenado. Horizonte: A1, bien provisto de MO, espesor 36 cm; B2 permeabilidad moderada, menos arcilla, más suelto a los 100 cm.

Se realizaron sondeos geoelectrónicos del tipo de tomografía de resistividad eléctrica con dispositivos multielectrónicos (Orellana, 1972; Sainato *et al.*, 2006b) en distintos sectores de los dos establecimientos de producción lechera.

Para el diseño de ubicación de los sondeos, se utilizó una distribución sistemática de los mismos, en forma de gradiente, siguiendo las pautas dadas para estudios ambientales (IHOBE, 2003). Es decir, los sondeos se distribuyeron a lo largo de la dirección supuesta de máxima variación de la CE, teniendo en cuenta la topografía asociada con el escurrimiento superficial de los efluentes del tambo y la dirección del flujo subterráneo. Se tomaron como testigo zonas aledañas, sin presencia de animales por largo tiempo y que se encontraran en situación más elevada topográficamente respecto a la fuente potencial de contaminación.

Se seleccionaron sitios potencialmente contaminados o críticos, tales como corrales de ordeño, zonas de alimentación, laguna de efluentes, calle de tránsito, etc.

Tomografía de resistividad eléctrica con dispositivos multielectrónicos

Los sondeos consisten en colocar, en el terreno, un perfil lateral de electrodos separados por una distancia "a" de 2 m, con una distancia máxima entre el primer y el último electrodo que puede ser de 50 o de 100 m. Estos electrodos funcionan alternativamente como inyectores de corriente en la tierra o como medidores

de potencial eléctrico. Se utilizó un resistímetro SARIS (SCINTREX) que hace circular la corriente de intensidad "i" entre los electrodos de corriente A y B. A través de dos electrodos M y N se mide la diferencia de potencial que se originó (ΔV) (Telford *et al.*, 1990).

Para las distintas posiciones de los electrodos AB y MN, se calcula la resistividad aparente ρ_a , con el valor de corriente, la diferencia de potencial originada y un factor geométrico que depende de la ubicación de los electrodos. Esas posiciones se obtienen tomando los cuatro electrodos secuencialmente a lo largo de una línea recta en el terreno, constituyendo lo que se llama un perfil lateral. Luego, incrementando la distancia entre electrodos de corriente y de potencial se vuelve a registrar en el perfil, obteniéndose la ρ_a correspondiente a niveles del subsuelo a mayor profundidad. Los valores de ρ_a en el perfil constituyen la seudo sección de resistividad aparente en profundidad de los datos observados. Se utilizó un programa de inversión bidimensional (2D) (Oldenburg & Li, 1994) para obtener el modelo de resistividad eléctrica del subsuelo en el sitio. Este modelo es aquél cuya respuesta de resistividad aparente es la que mejor ajusta a los datos experimentales, en el sentido de los cuadrados mínimos. Los contrastes de resistividades se interpretaron en función de los antecedentes geológicos e hidrogeológicos de la zona. La profundidad del nivel freático y espesor de zona no saturada fueron determinados a través de los modelos geoelectrónicos del sitio testigo, por la primera disminución en la resistividad de la tierra.

Se determinó en los sitios críticos una imagen de la resistividad eléctrica (o conductividad CEB, que representa un promedio de

la conductividad aparente de los estratos) que, comparada con los valores obtenidos en los sitios testigos, permite la detección de anomalías en la zona no saturada (ZNS) y en la saturada (ZS). Se estableció entonces la extensión "areal" y en profundidad de la anomalía de resistividad eléctrica relacionada con la posible contaminación. Se utilizó la configuración Wenner en Carmen de Areco y Dipolo Dipolo en Venado Tuerto, que se diferencian en la forma de distribuir los electrodos (Orellana, 1972).

La configuración Wenner presenta una mayor profundidad de penetración de la corriente eléctrica que circula por el dispositivo que el arreglo Dipolo-Dipolo (Edwards, 1977; Losinno & Sainato, 2007). Si la granulometría del suelo es más gruesa, como ocurre en Venado Tuerto, lo que representa valores de resistividad eléctrica más altos y mayor poder de penetración de la corriente eléctrica (Sainato *et al.*, 2006b), es apropiado utilizar la configuración Dipolo Dipolo, que prioriza la resolución lateral más que la obtenida en profundidad para obtener un modelo apropiado. Para granulometría más fina, un arreglo que proporcione mayor profundidad de penetración como el Wenner es más conveniente (Carmen de Areco).

Se determinaron porcentajes de anomalías de resistividad $\Delta\rho\%$ en ZNS en los distintos sectores de cada establecimiento, como:

$$\Delta\rho\% = \frac{\rho' - \rho_t}{\rho_t} \cdot 100$$

Donde ρ' es la resistividad de ZNS en el sitio analizado, ρ_t es la resistividad de ZNS en el sitio testigo.

Análisis de suelo y agua subterránea

Se complementó el estudio con análisis fisicoquímicos de agua y de suelo en sitios testigo y críticos afectados por este tipo de fuentes puntuales de contaminación.

En cada establecimiento se extrajeron muestras de agua de perforaciones preexistentes a distintas profundidades pero con acceso al mismo acuífero (Pampeano) configurando una etapa exploratoria a fin de confirmar la presencia o no de contaminantes. En los pozos a la freática se introdujo una sonda para determinar la profundidad del nivel. Se analizó, en todos los casos la conductividad eléctrica del agua de pozo (CEp) y los elementos mayoritarios: sodio, potasio, calcio, magnesio (espectrofotometría de absorción atómica) pH, cloruros, bicarbonatos, sulfatos, nitratos (AOAC, 1995). Se realizaron análisis físico-químicos de muestras de suelo (Page, 1982), utilizando las técnicas de Walkey y Black para Carbono orgánico, Bray y Kurtz N° 1 para Fósforo, microkjendhal para Nitrogeno Total, La CE pasta de saturación 1:2,5, pH 1:2,5, bases de intercambio extracción con AcNH4 1N pH7 y Nitratos : ácido fenoldisulfónico.

En ambos establecimientos, se procedió seleccionando los sitios de acuerdo a las anomalías de CEB encontradas en la exploración geoelectrica, un sitio testigo y un sitio de los más críticos. La CEB obtenida del análisis de las muestras de suelo se comparó con el resultado geoelectrico CEB.

Carmen de Areco

El establecimiento tiene una superficie de 158 ha (Fig. 2) con siete potreros de los cuales cinco se utilizan para el pastoreo de los animales. La historia de estos últimos es de una rotación de un año de maíz para silaje y tres años de pastura. En los dos restantes potreros se cultivó maíz, considerándolos como testigos por no haber tenido la presencia de animales. En total posee 300 vacas, 226 estaban en ordeño al momento de este estudio. La producción es de 5.000 L de leche por día.

A lo largo de la calle de acceso al establecimiento se encuentra un canal de efluentes del tambo perpendicular a la Ruta 7. La topografía, de suave pendiente, disminuye desde el este hacia el oeste.

Se realizaron diez sondeos geoelectricos según se observa en la Figura 2 (ampliación), y análisis físico-químicos de muestras de agua obtenidas de dos perforaciones ubicadas en la sala de ordeño P1 y P2, de alrededor de 50 m de profundidad. Se midió con una sonda en pozo el nivel freático en un molino P3 (testigo) ubicado lejos de la zona de tránsito y permanencia de animales, perforación de alrededor de 12-15 m de profundidad.

Se realizaron análisis físico-químicos de muestras de suelo compuestas por tres submuestras cada una (Fig. 2). En el potrero testigo se tomaron cinco muestras a una profundidad de 0 a 20 cm, extraídas a lo largo de una transecta de 700 m cada 150 m (M1), dos muestras (M2) cercanas al sondeo S6 en el corral (0-20 cm) y dos adyacentes al sondeo S9 en las inmediaciones del Tambo (0-20 cm y 20-40 cm). La Tabla 2 muestra el promedio en cada sitio de muestreo de los valores de las propiedades estudiadas.

Venado Tuerto

El establecimiento tiene una superficie de 257 ha (Fig. 3) con siete potreros de los cuales uno, considerado como testigo presentaba barbecho de soja, otro está asignado a la residencia y el resto a pasturas. En total posee 230 vacas, 140 de las cuales estaban en ordeño al momento de este estudio. La producción es de 3.080 L de leche por día. Al SO de la sala de ordeño se encuentra la laguna de efluentes.

El tambo se encuentra entre dos altos topográficos y las curvas de nivel señalan, en general, una suave pendiente, existiendo una "hoya" hacia el SO de la sala de ordeño. Se realizaron ocho sondeos geoelectricos (Fig. 3, ampliación).

Las muestras de agua analizadas se obtuvieron de un molino p1 (profundidad: 3 m) ubicado aguas abajo según la pendiente topográfica, lejos de la zona de tránsito actual de los animales, pero donde con anterioridad funcionó un bebedero; de una perforación (bomba sumergible) en la sala de ordeño p2 (profundidad: 12 m), de un molino p3 que fue seleccionado como testigo por su ubicación aguas arriba y por no registrar presencia de animales (profundidad: 2 m) y de dos perforaciones (bombas manuales) ubicadas aguas arriba, cerca de la residencia p4 y p5 (profundidad: 20 m).

Teniendo en cuenta los resultados geoelectricos, se seleccionaron dos sitios para realizar un muestreo de suelo en profundidad. La muestra M1 se obtuvo de un sitio cerca del sondeo s1, considerado como testigo y la M2 cercana al sondeo s3 de la zona de alimentación. En ambos sitios se muestreó de 0 a 100 cm, cada 20 cm.

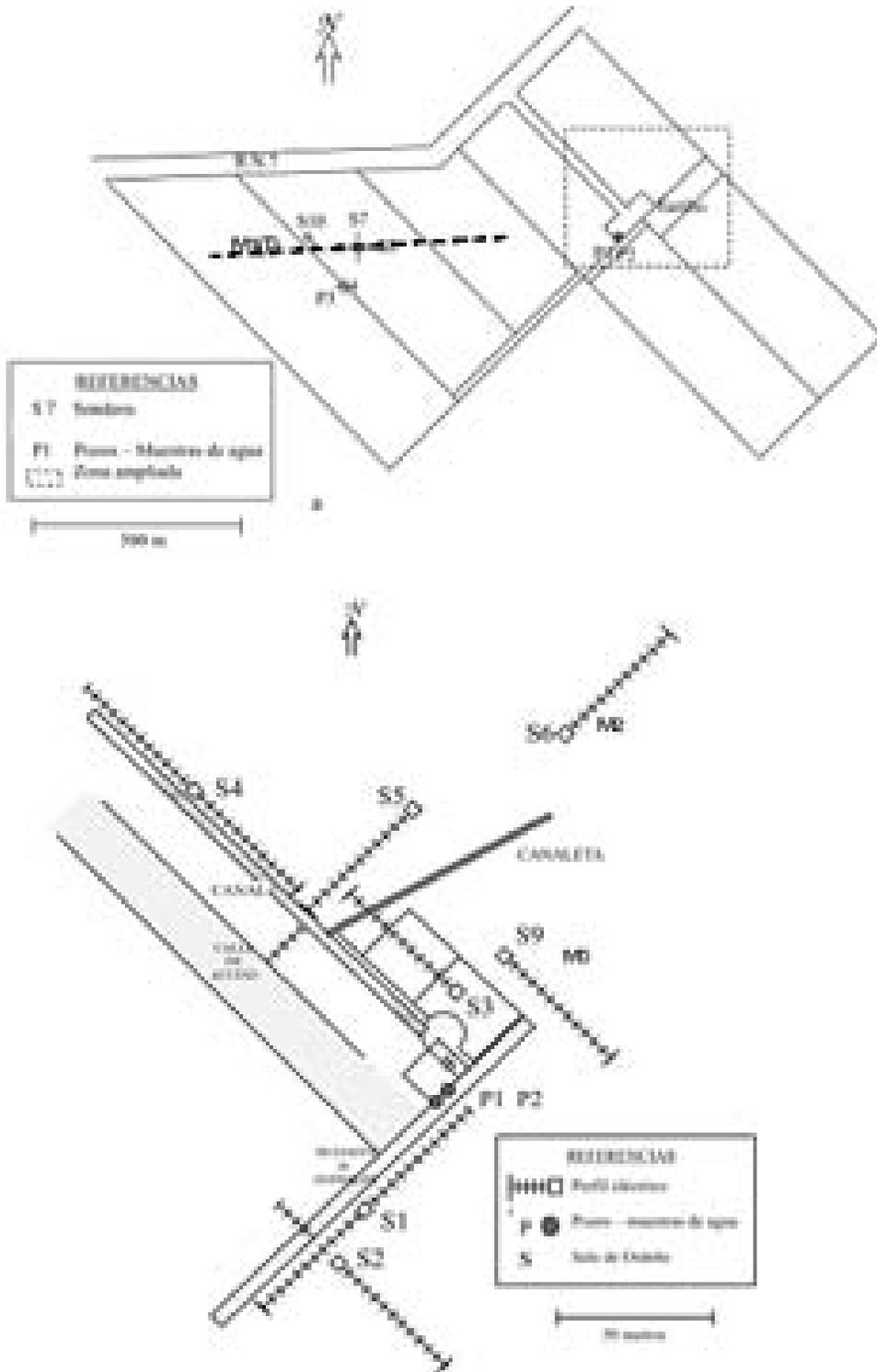


Figura 2. Plano general del establecimiento en Carmen de Areco. Zona ampliada cercana a la sala de ordeño. Se muestran los perfiles laterales de tomografía de resistividad eléctrica con su orientación y las perforaciones preexistentes.

Figure 2. General map of dairy at Carmen de Areco. Enlarged zone near the milking house. Lateral profiles of Electrical resistivity tomography with the orientation and the wells are shown.

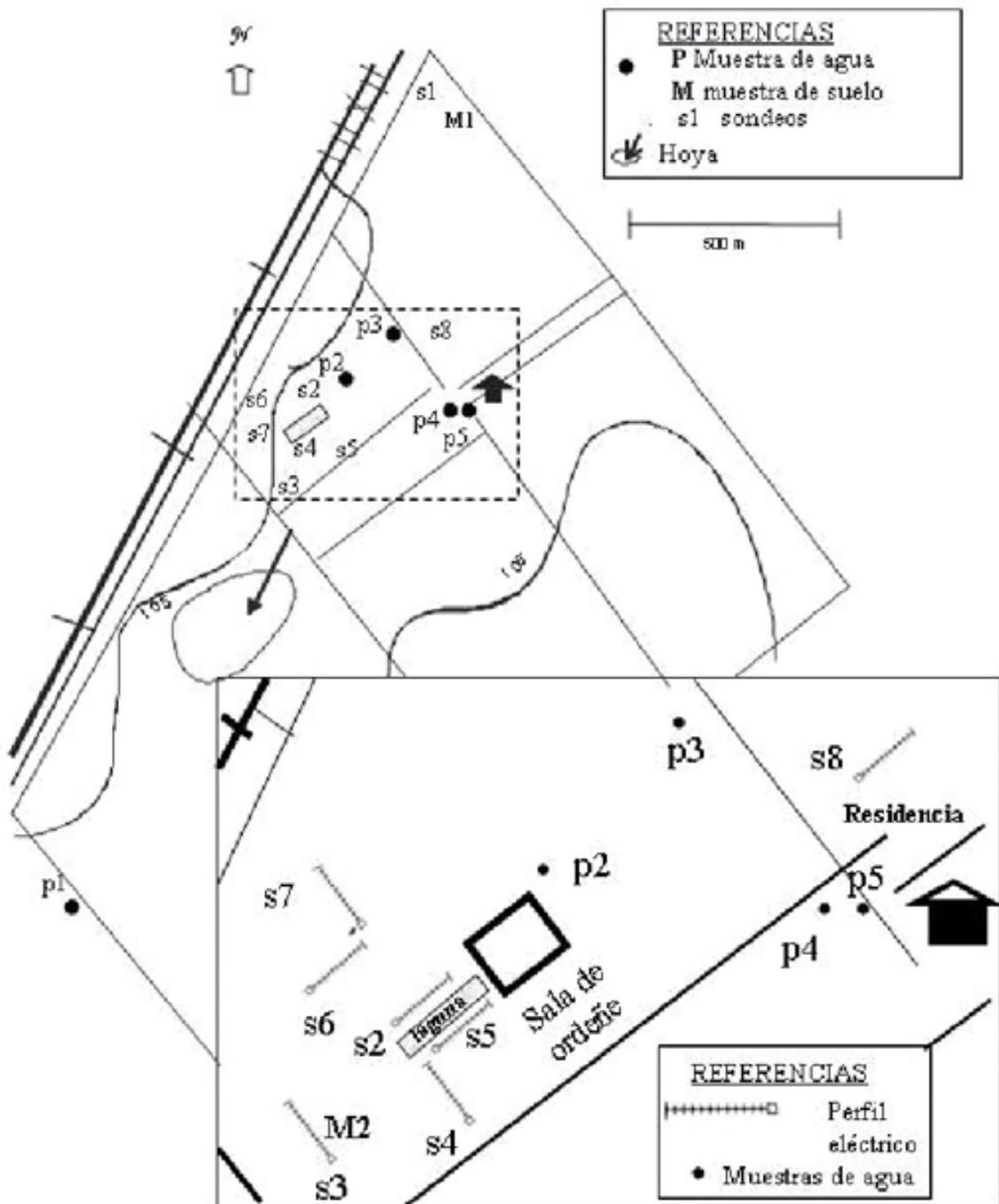


Figura 3. Plano general del establecimiento en Venado Tuerto, con las curvas de nivel. Se muestran los perfiles laterales de tomografía de resistividad eléctrica con su orientación y las perforaciones preexistentes.

Zona ampliada del área cercana a la sala de ordeño con la orientación de los sondeos.

Figure 3. General map of dairy at Venado Tuerto, with the level curves. Lateral profiles of Electrical resistivity tomography and the wells are shown. Enlarged zone near the milking house with the orientation of soundings.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambos establecimientos, el nivel freático obtenido de la tomografía eléctrica coincide con el medido en la perforación más cercana.

Carmen de Areco

La Figura 4 muestra los modelos de resistividad eléctrica de la tierra para el establecimiento en Carmen de Areco, representándose con tonos grises más claros las

zonas más conductoras. Las Tablas 2 y 3 presentan los resultados de los análisis de las muestras de suelo y agua, respectivamente. El nivel freático obtenido es de 3,2 m cerca de la sala de ordeño (P1 y P2) y de 1,35 m en el sitio testigo, P3. En este último sitio, la resistividad de la zona no saturada, según el sondeo S7, es de alrededor de 20 ohmm (0,50 dSm⁻¹ de conductividad CEb), siendo la CEs promedio de 0,37 dSm⁻¹ (Tabla 2). La resistividad de la zona saturada en S7 resultó entre 10 y 15 ohmm, que es del mismo orden que la del agua del pozo P3, 7,2 ohmm (1,38 dSm⁻¹).

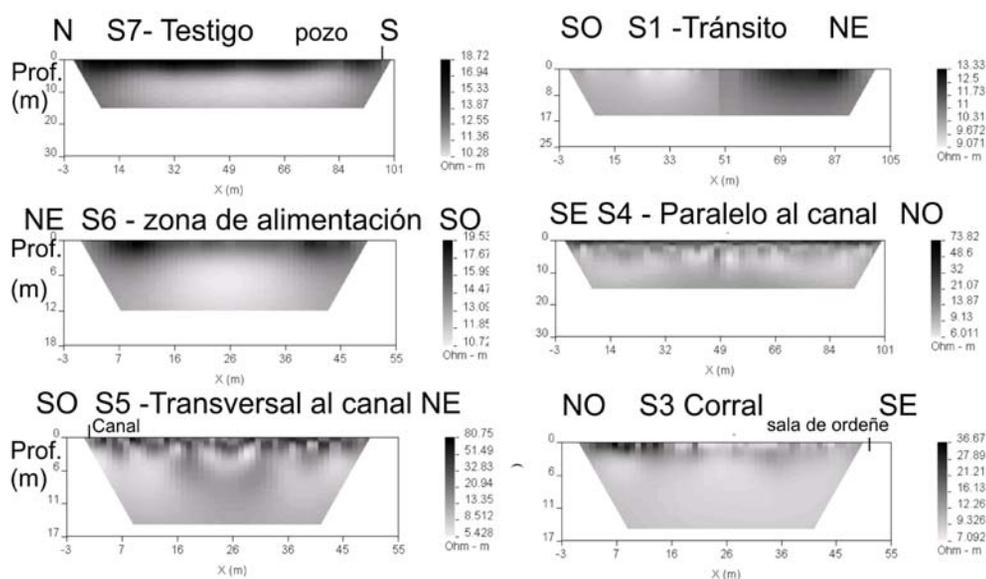


Figura 4. Modelos de resistividad eléctrica de la tierra (en ohm m en escala de grises) en cada sitio para el tambo de Carmen de Areco. Los grises más claros corresponden a mayor conductividad eléctrica.

Figure 4. Models of electrical resistivity of the earth (in ohm m in grey shadow scale) at each site for the dairy at Carmen de Areco. The light grey correspond to higher electrical conductivity.

Tabla 2. Análisis de las muestras de suelo del establecimiento de Carmen de Areco.

Table 2. Analysis of soil samples at the dairy farm of Carmen de Areco.

Ubicación de las muestras	pH	CEs dSm ⁻¹	MO %	Nt %	Pext ppm	Na meq (100g) ⁻¹	K meq (100g) ⁻¹	Ca meq (100g) ⁻¹	Mg meq (100g) ⁻¹
M1(T) 0-20 cm	5,7	0,376	4,1	0,2	30,6	0,60	4,99	12,5	4,25
M2 (comedero) 0-20 cm	7,1	0,368	6,3	0,28	48,0	0,18	1,35	12,80	6,15
M3 (corral) 0-20 cm	7,8	1,770	16,3	0,93	370,5	0,56	1,59	15,27	24,0
M3 20-40 cm	8,8	1,226	1,7	0,09	26,5	0,50	1,52	22,16	0,99

CEs : conductividad eléctrica del suelo, MO. Materia orgánica, Nt : nitrógeno total. Pext .fósforo extractable.

Tabla 3. Análisis de agua de perforación en el establecimiento de Carmen de Areco, indicando la calidad del agua.

Table 3. Analysis of groundwater at the dairy farm of Carmen de Areco, showing the water quality

Muestra de agua	CEp dSm ⁻¹	NO ₃ ⁻ mgL ⁻¹	Cl ⁻ mgL ⁻¹	Na mgL ⁻¹	SO ₄ ²⁻ mgL ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹
P1 (bomba Tambo-20 m)	1,21	13,2	68	198	58	546	23	36	25
P2 (bomba Tambo-30 m)	1,42	21	114	206	62	616	28	38	27
P3 (Testigo-12-15 m)	1,38	8	68	238	74	597	17	27	30

CEp: conductividad eléctrica del agua de perforación.

A lo largo de la calle de tránsito cercana a un bebedero, S1, donde la densidad de animales es mayor, las resistividades fueron más bajas. Dicho modelo muestra dos zonas claramente diferenciadas, una de baja resistividad y otra contrastante de alta resistividad atribuible a la presencia de tosca, colocada para evitar encharcamientos (Fig. 4). En la zona de alimentación, S6, tanto las conductividades obtenidas de los sondeos como las CE fueron similares a las del testigo. Esto implica que no se observa deterioro del suelo, dado que los animales no son alimentados en el mismo sitio durante períodos largos y que el pastoreo se realiza en distintos lotes alternativamente, lo cual configura una estrategia de rotación. Esto, junto a la reutilización del exceso de excretas, distribuyéndolas como abono en los otros lotes contribuye a disminuir los posibles lixiviados. En el S5, transversal al canal de efluentes, se observaron heterogeneidades en la resistividad de la ZNS, la cual disminuyó en las cercanías de dicho canal. En S4 los valores fueron similares a los de S5, resaltándose en ambos casos la mayor conductividad del agua freática respecto al testigo. Hay que tener en cuenta la presencia de una leve pendiente topográfica desde el corral hacia ese potrero por lo cual no se descarta un movimiento superficial de efluentes en esa dirección.

En S3, la resistividad de la ZNS y por debajo del nivel freático es más baja que el testigo indicando que las excretas de los animales en este sitio contiguo a la sala de ordeño produjo un incremento en la conductividad que se extendió hasta el límite con el potrero lindante. Esta situación fue la más crítica. Las anomalías de alta conductividad que presentaron los modelos tanto en el sondeo S3 como en el S9 (Fig. 4, ambos en el corral) coincidieron con altos valores de la CE, atribuible a los residuos de los animales que podrían causar un incremento en el lixiviado de nitratos y fósforo al suelo en los primeros veinte centí-

metros de profundidad como se muestra en la Tabla 2 (muestra M3). Por debajo de los 20 cm los valores decrecen posiblemente debido a la alta compactación del terreno.

Las muestras de agua subterránea se obtuvieron del acuífero Pampeano, si bien la profundidad de la muestra testigo es más somera que las obtenidas cerca de la sala de ordeño, corresponden al mismo acuífero. Si la concentración por debajo de la fuente puntual de contaminación es alta a una profundidad de 20-30 m, es de suponer que el acuífero freático en este sitio se encuentra afectado de la misma manera. El agua del Pampeano es del tipo bicarbonatada sódica. Las muestras de la bomba de la sala de ordeño (P2) duplicaron los valores de cloruros y triplicaron los de nitratos respecto del testigo P3 (Tabla 3).

Venado Tuerto

La Figura 5 muestra los modelos de resistividad eléctrica de la tierra para el establecimiento en Venado Tuerto, representándose con blancos las zonas más conductoras. La Tabla 4 presenta los análisis de las muestras de agua.

El sondeo en el sitio testigo (s1) permitió determinar la profundidad de la freática en 2 m, coincidiendo con la información de la perforación más cercana, p3. Se pudo establecer una resistividad entre 12 y 40 ohm m para el acuífero, en promedio CEB = 0,38 dSm⁻¹ resultando estos valores menores a los del agua de la muestra de dicho pozo (Tabla 4). La ZNS presentó una resistividad de 70 ohm m (CEB = 0,143 dSm⁻¹) del orden de los valores hallados en la muestra de suelo M1 (CEs = 0,072 dSm⁻¹).

La calle de tránsito de los animales (s2) presentó un menor valor de resistividad en la ZNS (CEb mayor) en el extremo cercano a la sala de ordeño (Fig. 5). En la zona de alimentación (s3), la anomalía de CE en la ZNS coin-

Tabla 4. Análisis de agua de perforaciones en el establecimiento de Venado Tuerto indicando la calidad del agua.
 Table 4. Analysis of groundwater at the dairy farm of Venado Tuerto. showing the water quality.

Muestra de agua	CEp dSm ⁻¹	NO ₃ ⁻ mgL ⁻¹	Cl ⁻ mgL ⁻¹	Na mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	K mgL ⁻¹	SO ₄ ⁻ mgL ⁻¹	CO ₃ ⁻ mgL ⁻¹	HCO ₃ ⁻ mgL ⁻¹
p1(molino ex bebedero-3 m)	2,0	14,4	74,0	532	12,0	9,6	0,43	154	nd	1.174
p2 (bomba del tambo-12 m)	1,3	11,8	42,2	299	20,0	20,0	0,44	nd	nd	854
p3 (T-molino-2 m)	1,8	3,3	42,2	354	22,0	10,8	0,50	nd	nd	1.113
p4 (bomba Galpon-20 m)	2,2	2,2	62,0	438	17,6	4,5	0,43	nd	nd	1.502
p5 (bomba residencia-20 m)	3,3	23	197,3	410	12,6	12,0	0,52	nd	nd	1.819

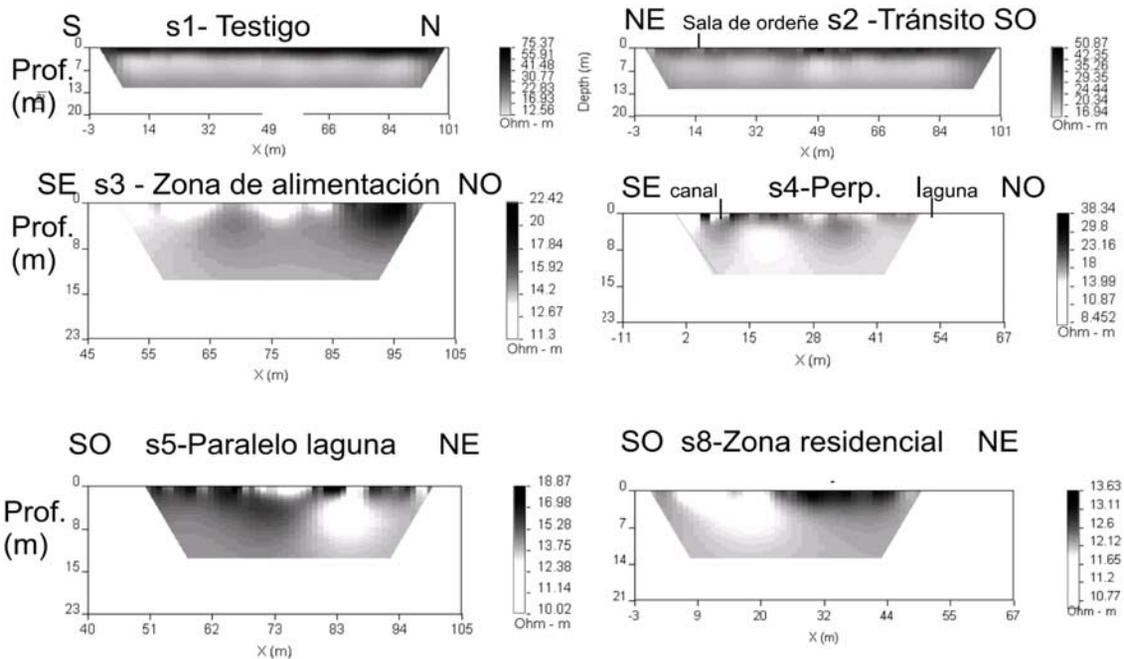


Figura 5. Modelos de resistividad eléctrica de la tierra (en ohm m en la escala de grises) en cada sitio para el establecimiento de Venado Tuerto. Los blancos señalan mayor conductividad eléctrica.

Figure 5. Models of electrical resistivity of the earth (in ohm m in grey shadow scale) at each site for the dairy of Venado Tuerto. The white zones indicate higher electrical conductivity.

cide con el ancho de la laguna y presenta menor resistividad ($CE_b = 0,9 \text{ dSm}^{-1}$) que el testigo s1. La CE en el sitio M2 promedió un valor de $1,37 \text{ dSm}^{-1}$ similar a CE_b . El agua freática estaría también afectada por la anomalía. El sondeo perpendicular a la laguna de efluentes (s4) mostró menor resistividad de la ZNS, en el extremo cercano a la laguna y en las proximidades de un canal de escurrimiento. El sondeo paralelo (s5) presentó resistividades de la ZNS menores a la del testigo, observándose una disminución hacia el NE (presumiblemente debido a un anterior desborde de la laguna con posible lixiviado en profundidad). El escurrimiento desde la laguna por desbordes podría afectar el potrero localizado en el bajo topográfico, situado al SO.

Las muestras de agua obtenidas de las perforaciones provienen del acuífero Pampeano, a distintas profundidades. El pozo p1 se encuentra fuera de la zona de actual permanencia de los animales y es el que presenta los valores más altos de nitratos respecto de la muestra p3 tomada como testigo (Tabla 4), esto lo podemos atribuir al hecho de que con anterioridad allí funcionó un bebedero. En p2, aguas abajo, el valor asciende a $11,8 \text{ mg L}^{-1}$ a 12 m de profundidad lo que hace suponer que a profundidades más someras en este sitio, el valor es aún mayor.

Cerca de la residencia, la menor resistividad en la zona de bajos topográficos puede deberse al hecho de que esta zona permaneció anegada por un período largo de tiempo. La muestra de agua subterránea con mayor contenido de nitratos y cloruros y conductividad CE_p más alta es la de la bomba de la residencia, p5 (bicarbonatada sódica clorurada) sin presencia de animales. Esto podría atribuirse a la ubicación del pozo séptico en las inmediaciones de la perforación que se desmoronó años atrás. El resto de las muestras fueron clasificadas como bicarbonatadas sódicas.

En general, las muestras de agua presentan en todas las perforaciones altos valores de As (entre $0,10 \text{ mg L}^{-1}$ y $0,20 \text{ mg L}^{-1}$) de origen natural (Schulz *et al.*, 2005), superando el nivel máximo permitido para consumo humano por el Código Alimentario Nacional (2007), establecido en $0,01 \text{ mg L}^{-1}$.

En la Figura 6 se graficó el contenido de nitratos, sulfatos, carbono orgánico, potasio, sodio, fósforo, CE y pH en función de la profundidad, en el testigo (M1) y en la zona de alimentación (M2), que en este caso tiene una permanencia constante de animales y que según el modelo eléctrico presenta anomalía de alta conductividad.

Según la carta de suelos la serie correspondiente a este establecimiento es la Santa Isabel. La muestra testigo presentó propiedades con valores similares a los de la carta. El contenido de nitrato en las muestras M2 fue sustancialmente mayor en los primeros 60 cm, respecto

al testigo. Las diferencias entre ambos sitios disminuyeron a mayores profundidades (60-100 cm). Similar comportamiento presentaron la CE, los sulfatos, carbono orgánico y el potasio. El fósforo mantiene aún más allá de los 80 cm una gran diferencia de contenido entre el testigo y la zona de alimentación, con valores mayores en este último caso.

A partir de todos estos resultados se observa que los sondeos geoelectrónicos han detectado anomalías de resistividad (conductividad) en la ZNS y en el acuífero freático asociadas con la presencia de animales, las cuales fueron corroboradas con los resultados de los muestreos.

Del análisis de las zonas afectadas por anomalías de resistividad resulta que en Areco la ZNS está más comprometida en el corral ($\Delta\rho\% = -60\%$) y en la zona de tránsito ($\Delta\rho\% = -50\%$) no así en la zona de alimentación ($\Delta\rho\% = -16\%$). Es decir, en el corral la resistividad de la ZNS disminuye en forma relativa en un 60% respecto del valor del sitio testigo. Esto se traduce en un valor mayor de la CE respecto al testigo, por lo cual el corral es la situación más crítica.

El agua freática resulta más conductora en el potrero aledaño al corral que se ubica en la dirección del escurrimiento. El canal de efluentes no presenta efectos negativos al momento actual. Estos valores de anomalías encontrados a través del método geoelectrónico coinciden aproximadamente con las calculadas a partir de la resistividad obtenida de las CE de las muestras de suelo (la resistividad disminuyó un 80% en el corral y prácticamente no hubo variación en la zona de alimentación).

En Venado Tuerto, según los sondeos, el sitio más afectado por los lixiviados fue la zona de alimentación ($\Delta\rho\% = -84\%$), que en una etapa anterior, fue utilizado como guarda de ganado.

La laguna de efluentes impacta en los alrededores, presentando plumas de anomalías de conductividad en ZNS ($\Delta\rho\%$ alrededor de -80%) y en agua freática (s4 y s5). Las anomalías calculadas a partir de CE de las muestras de suelo resultaron mayores respecto del testigo (-97%) en la zona de alimentación.

Estos valores tan altos de anomalías podrían atribuirse al bajo efecto atenuador del suelo, dadas sus características morfológicas, de textura más gruesa, la presencia de animales en comederos en forma prolongada en el tiempo y los episodios de inundación.

CONCLUSIONES

La tomografía eléctrica permitió delinear la zona no saturada afectada por los lixiviados provenientes de la

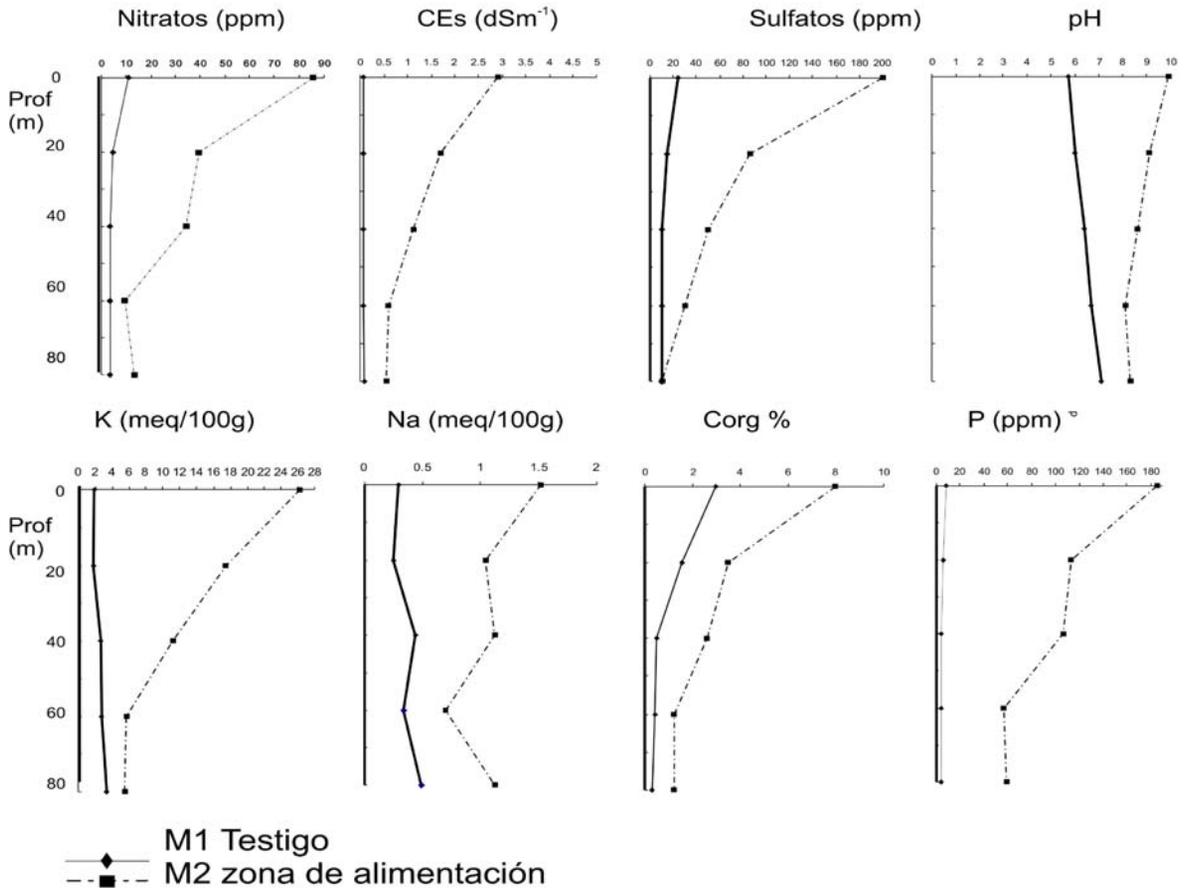


Figura 6. Distribución de distintas propiedades en profundidad en el sitio M1 testigo (cercano a s1) y en una zona crítica M2 (coincidente con el sondeo s3) en el establecimiento de Venado Tuerto.

Figure 6. Distribution of different properties with depth at background site M1 (near s1) and at a critical zone M2 (coinciding with sounding s3) at the dairy of Venado Tuerto.

actividad lechera, corroborado en forma cuantitativa en el muestreo de suelos

En el suelo franco limoso y con un horizonte Bt, Carmen de Areco, la zona aledaña a la sala de ordeñe fue la más afectada. El canal de escurrimiento no presentó gran impacto debido a la actividad, el continuo cambio de la zona de alimentación y la reutilización de los residuos como abono parecen ser una práctica apropiada para minimizar el deterioro del agua y del suelo.

En el suelo más arenoso y profundo, Venado Tuerto, la zona de alimentación fue la más crítica junto con los alrededores de la laguna de efluentes, la que ha estado sujeta a desbordes en épocas de intensa precipitación. En este establecimiento, se han encontrado valores más altos en la concentración de todos los iones estudiados en el suelo hasta el metro de profundidad en la zona de

alimentación sujeta a una carga animal en forma prolongada en el tiempo.

Si bien las concentraciones de nitratos y cloruros en el agua subterránea no exceden los límites aceptables para consumo, en general los pozos cercanos a los sectores con animales presentaron valores más altos que el testigo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de la Ing. Agr. MA Herrero.

Los análisis de agua fueron realizados en el laboratorio de Rocas del Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Exactas

y Naturales (C de Areco) y en el laboratorio de Química analítica de FAUBA (Venado Tuerto). Los análisis de suelos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía y en el Laboratorio Agrícola Venado Tuerto.

El trabajo fue subsidiado por el proyecto G089-UBACyT

BIBLIOGRAFÍA

- Andriulo, A; C Nasal; C Amándola & F Rimatori. 2003. Impacto de un sistema intensivo de producción de carne vacuna sobre algunas propiedades del suelo y del agua. *Revista de Investigaciones Agrarias* 32(3): 27-56.
- AOAC. 1995. Official methods of analysis., vol.1, 16th Ed. AOAC International USA. Waters 11: 1-28.
- Código Alimentario Nacional, 2007. Ministerio de Salud y Ambiente. Secretaria de política, regulación y relaciones sanitarias art 982 (Res.Conj SPR yRS y SAGPyA n° 68/2007 y N° 196/2007).
- Darling, W. 1992. Status of Florida regulation of dairy farm waste management. *In: Blake et al. (ed) National Livestock, Poultry and Aquaculture Waste management*. ASAE, St. Joseph, MI.
- Drommerhausen, D; D Radcliffe; D Brune & H Gunter. 1995. Electromagnetic conductivity surveys of dairies for groundwater nitrate. *J. Environ. Qual.* 24: 1083-1091.
- Edwards, LS. 1977. "A modified pseudosection for resistivity and IP" *Geophysics* 42: 1020-1036. ISSN 00168033.
- EPA-USDA, 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. 622 pp.
- Gonzalez, Nilda. 2005. Los ambientes hidrogeológicos de la provincia de Bs As. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino. La Plata. Geología y recursos mineros de la pcia de Bs. As. *Eds: R De Barrio; R Etcheverry; M Caballe & E Llambias*.
- Herrero, MA; MS Iramain; S Korol; H Buffoni & M Flores. 2002 - Calidad de agua y contaminación en tambos de la cuenca lechera de abasto sur, Buenos Aires (Argentina) - *Rev. Arg. de Prod. Anim.* 22(1): 61-70
- IHOBE 2003. Manual práctico para la investigación de la contaminación del suelo. Sociedad Pública de gestión ambiental Gobierno Vasco-España 102. pp.
- Losinno, B & C Sainato. 2007. Profundidad de Investigación en los sondeos geoelectricos realizados en sitios potencialmente contaminados de Tambos. V Congreso Argentino de Hidrogeología. Taller de geofísica aplicada a la hidrogeología 43-48. Paraná, Entre Ríos. ISBN 978-987-23936-0-1.
- Oldenburg, DW & Y Li. 1994. "Inversion of Induced Polarization Data", *Geophysics* 59: 1327-1341.
- Orellana, E. 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. *Paraninfo*. 522 pp.
- Page, E. 1982. Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and microbiological properties. *Agronomy N° 9, ASA and SSSA*. Madison, WI, USA.
- Palazzo, R; D Soza & G Bernal. 2003. Recopilación hidrogeológica de Santa Fe integrada a un GIS para la elaboración de cartografía. 1º Seminario Hispano latinoamericano Temas actuales de la hidrogeología subterránea. 483-491.
- Sainato, C; G Galindo; H Malleville & MA Herrero. 2006 a. Diagnóstico de la contaminación en suelo y agua subterránea por actividad ganadera mediante sondeos geoelectricos en la microcuenca del arroyo Cañete (Pcia. de Bs. As.). *Revista de la Facultad de Agronomía. UBA* 26(1): 73-82.
- Sainato, C; G Galindo & O Heredia. 2006 b. Agua subterránea: exploración y utilización agropecuaria. *Editorial Facultad de Agronomía. UBA* 115 pp.
- Santa Cruz, J & A Silva Busso. (1995). Disponibilidad del agua subterránea para riego Complementario en Bs. As., E. Ríos, Córdoba y Santa Fe. Proyecto Servicios Agrícolas Provinciales. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. (Arg.), 55 p.
- Schulz C; E Castro & E Mariño. 2005 Presencia de Arsénico en las aguas subterráneas de la Pampa. Acta Taller de Arsénico del IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto. 53-61.
- Telford, W; L Geldart & R Sheriff. 1990. Applied Geophysics Second Edition. Cambridge University Press. 769 pp.