

Evaluación de campo y simulación de cloruros en solución en un suelo afectado por la actividad de Feedlot

Emiliano A. Veizaga^{1,2}, Leticia Rodríguez², Carlos J. Ocampo³

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CCT Santa Fe. Colect. Ruta Nacional N°. 168 - Km 472 Paraje "El Pozo". (3000) Santa Fe.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe.

³ University of Western Australia. 35 Stirling Highway Crawley WA 6009 Perth, Australia.

Mail de contacto: e.veizaga@conicet.gov.ar

RESUMEN

El objetivo del trabajo es evaluar el flujo y el transporte de cloruros en la zona no saturada (ZNS) de una parcela de suelo adyacente a un corral de engorde entre el 18-08-2012 y el 26-01-2013 mediante simulaciones numéricas con el software Hydrus 1D calibrado con datos de campo. Para ello, se instrumentó un sitio experimental y se obtuvieron observaciones continuas de parámetros de interés en relación al perfil del suelo, distribución de humedad y cloruros en solución del suelo.

Hydrus 1D consiguió representar satisfactoriamente la variación de humedad en todo el perfil de suelo, mientras que el transporte de cloruro se vio afectado por las características texturales. Las desviaciones encontradas entre la concentración simulada y la observada podrían estar indicando la presencia de flujo lateral y preferencial a través de macroporos, no tenidos en cuenta en este caso.

Palabras clave: Feedlot, Cloruro, Hydrus 1D, Modelación.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate flow and transport of chloride in the unsaturated zone (ZNS) of a parcel of land adjacent to a feedlot between 18-08-2012 and 26-01-2013 by numerical simulations with Hydrus 1D calibrated with field data. To do this, experimental site was instrumented and continuous observations of parameters of interest were obtained in relation to the soil profile, moisture and chloride distribution in soil solution.

Hydrus 1D satisfactorily represents the moisture evolution throughout the soil profile, while chloride transport was affected by the textural characteristics. Deviations found between the simulated and observed concentrations could indicate the presence of lateral flow or preferential flow through macropores not taken into account in this case.

Keywords: Feedlot, Chloride, Hydrus 1D, Modeling

Introducción

La demanda de carne vacuna en los 90' ha intensificado la producción mediante sistemas controlados denominados feedlots. Estos establecimientos se caracterizan por la concentración de animales en corrales de engorde, la alimentación mediante dietas con alto grado de digestibilidad y la acumulación de grandes volúmenes de estiércol sobre el suelo. Estimaciones de producción de estiércol sostienen que un bovino de 450 kg excreta entre un 3,4% y 3,8% de su peso en heces frescas y 1,2% a 1,8% de orina (Pordomingo, 2003). La salinización del perfil de suelo es uno de los impactos principales de esta actividad (Andriulo et al., 2003).

Parte de los residuos generados en los feedlots se utiliza como fertilizante orgánico, el

resto queda depositado sobre el suelo de los corrales o apilados fuera de ellos, sin una adecuada disposición y sujeto a factores climático/ambientales. En consecuencia, una cantidad no controlada de este residuo orgánico es arrastrado por el lavado superficial después de cada evento de precipitación y depositado en los alrededores, constituyendo una nueva fuente de los mismos en forma difusa (Viglizzo, 1997).

El suelo de los corrales y alrededores experimentan cambios físicos y biogeoquímicos que los diferencian de los suelos naturales o cultivables. La compactación de los horizontes superficiales dentro de los corrales se manifiesta con elevados valores de densidad aparente, lo que se traduce en niveles muy bajos de infiltración y un contenido de humedad uniforme en el tiempo (Mielke et al., 1974), favoreciendo el escurrimiento superficial de los

residuos en dirección de la pendiente, que acaban depositándose en los alrededores.

Por el contrario, las parcelas adyacentes a los corrales presentan baja compactación y esto facilita el avance de frentes de humedad, el transporte de solutos así como también la evapotranspiración y el crecimiento de vegetación (Sommerfeldt et al., 1973).

El ion cloruro (Cl⁻) es comúnmente utilizado como trazador natural para evaluar el movimiento del agua proveniente de los corrales gracias a que el mismo constituye un elemento móvil en el suelo y además no está sujeto a reacciones biológicas (Vaillant et al., 2009; García et al., 2012).

Por ello, el objetivo del trabajo es: (i) caracterizar la física del perfil de suelo y la química de la solución del suelo, con énfasis en la concentración de cloruros; (ii) analizar la variación vertical tanto del flujo de agua como del transporte de cloruros mediante mediciones sistemáticas para diferentes eventos de precipitación; (iii) verificar las mediciones de campo mediante simulación numérica.

Materiales y Métodos

Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo en la localidad de San Justo, provincia de Santa Fe, dentro de un feedlot cuya capacidad máxima es de 8000-9000 cabezas de ganado (Fig. 1). La superficie total del feedlot es de 23,7 Has, de las cuales 11,4 Has pertenecen a corrales de engorde.

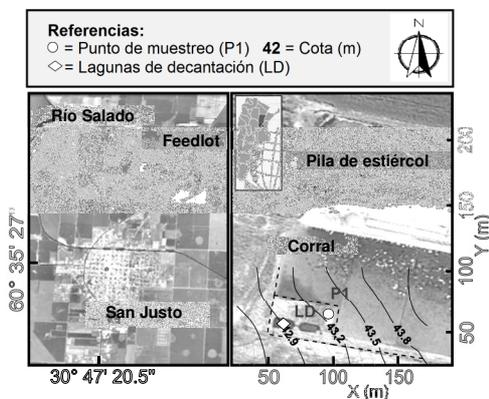


Figura 1. Ubicación del establecimiento y sitio de estudio.

El establecimiento se encuentra situado en una zona de pendientes suaves a moderadas, donde los excedentes pluviales son

interceptados por dos lagunas de decantación. Los excedentes pluviales convertidos ya en un efluente luego del ingreso y consecuente desborde de las lagunas de decantación escurren libremente en dirección del gradiente topográfico (NE-SO) por las vías preferentes de flujo originadas por la erosión, que acaban infiltrando en el suelo (Fig. 1 y 2).

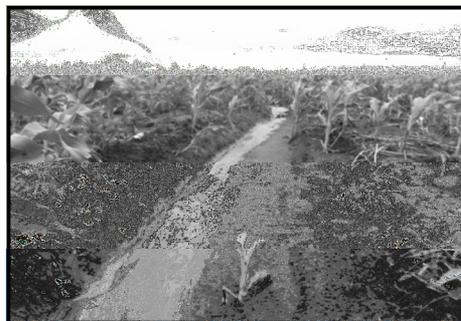


Figura 2. Escurrimiento superficial de estiércol luego del desborde de la laguna de decantación.

Características del suelo

La Tabla 1 muestra el resultado del análisis de la calicata excavada en el sitio de estudio. La región se caracteriza por un perfil moderadamente profundo bien desarrollado, con un contenido de arena en los horizontes superiores que varía entre 10% y 20%.

Tabla 1. Propiedades texturales de los horizontes de suelo encontrados.

H (cm)	D _{ap} (g.cm ⁻³)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura (USDA)
5-10	1,07	24,03	48,18	27,79	CL
10-15	1,27	18,13	48,11	33,76	SCL
15-20	1,57	17,70	46,32	35,97	SCL
20-25	1,37	13,76	48,29	37,95	SCL
25-30	1,43	12,13	34,52	53,36	C
30-55	1,54	4,91	39,54	55,55	C
55-84	1,58	5,49	36,47	58,04	C
84-106	1,50	6,12	44,09	49,79	SC
106-146	1,43	5,40	46,64	47,97	SC

(CL: Clay Loam; SCL: Silty Clay Loam; C: Clay; SC: Silty Clay).

El contenido de arena disminuye rápidamente a los 21 cm de profundidad, con la aparición del horizonte B1 de 11-15 cm de espesor, seguido por un B2t extremadamente

duro y muy firme, que se extiende hasta los 84-95 cm, con un contenido de arcilla que supera el 50%. Este horizonte le confiere al suelo una conductividad hidráulica muy baja en húmedo y la posibilidad de generar grietas en periodos secos que actúan como canales de flujo preferencial, donde es posible encontrar raíces de la vegetación.

Instrumentación del sitio

Con el objetivo de capturar las variaciones temporales en la dirección vertical (1D) de las variables de estado del sistema (humedad de suelo, temperatura) se instalaron sensores de potencial matricial tipo Watermark® a 30 cm, 60 cm y 100 cm de profundidad conectados a un datalogger Wachdog® para el monitoreo continuo de la humedad del suelo a través de los valores de succión, entre otros. El periodo de estudio comprende 162 días comenzando el 18-08-2012 hasta el 26-01-2013.

Estos sensores se constituyen de una cápsula granular que consta de dos electrodos introducidos en una matriz de referencia, la cual está envuelta por una membrana que lo protege. Presenta a su vez una malla metálica exterior agujereada que permite el paso de la humedad, a la vez que proporciona rigidez al conjunto. El movimiento de agua a través del suelo y la cápsula es captado como cambios en la resistencia eléctrica ($K\Omega$) entre los electrodos que posee internamente el dispositivo. Estos valores son luego convertidos a un valor de potencial matricial mediante el uso de fórmulas de calibración (por lo general provistas por el fabricante).

La fórmula de Shock et al. (1998a) (ecuación 1) es la recomendada por el fabricante para convertir la medida de resistencia eléctrica en tensión o potencial matricial.

$$SMP [kPa] = \frac{4.093 + (3.213 \cdot K\Omega)}{(0.009733 \cdot K\Omega) - (0.01205 \cdot T_s)} \quad (1)$$

donde SMP es el potencial matricial del suelo en kPa y T_s es la temperatura del suelo en $^{\circ}C$ medida a la profundidad donde se encuentra el sensor. El sensor tiene una calibración de fábrica realizada a $21,1^{\circ}C$. El rango de medición va de 0 kPa para un suelo completamente saturado a 200 kPa , situación intermedia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento (1500 kPa).

En forma paralela a los sensores de potencial se instalaron extractores de succión a las mismas profundidades, con el objeto de extraer muestras de la solución del suelo

durante y después de los eventos de precipitación más importantes cuando la infiltración de agua consiguió saturar el perfil. Debido al alto contenido de finos que presentó el perfil de suelo en estudio, la operación de extracción de agua estuvo siempre controlada por el monto precipitado y la humedad antecedente. Las muestras de agua fueron analizadas "in situ", con sonda multiparamétrica para conocer el valor de temperatura (T_w), pH, conductividad eléctrica (CE_w), sólidos disueltos totales (TDS_w), y luego analizadas en laboratorio mediante técnicas estandarizadas para obtener la concentración de cloruros (Cl^-), entre otras determinaciones.

Se instaló un pluviógrafo al que se le incorporó un registrador continuo (datalogger) para capturar la duración e intensidad de los eventos de precipitación ocurridos y un sensor de temperatura a 10 cm de profundidad para medir las variaciones temporales de esta variable. Se accedió a los datos de dos estaciones meteorológicas completas situadas en la zona con las cuales se pudo calcular la evapotranspiración diaria [ET_d] para el periodo estudiado. La profundidad de agua del acuífero freático también fue monitoreada de forma continua a través de la instalación de un sensor-datalogger. Durante el periodo de medición (162 días) la profundidad del nivel freático osciló entre 6 y 7 m. La Figura 3 muestra el esquema de instalación de los instrumentos de medición, los cuales se ubicaron fuera del corral de engorde a una distancia inferior a 1 metro.

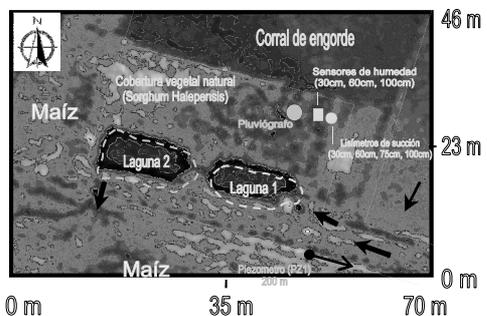


Figura 3. Diagrama en planta de la instalación de sensores de potencial matricial, lisímetros y pluviógrafo.

Ecuaciones de gobierno

El movimiento del agua a través de un medio poroso, rígido y parcialmente saturado, está caracterizado por la ecuación de Richards (Richards, 1931).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(h) \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S(h) \quad (2)$$

$$K(h, x, y, z) = K_s(x, y, z) \cdot K_r(h, x, y, z)$$

donde $S(h)$ es un término de pérdida de agua que representa la toma de agua por las raíces de las plantas [$L^3 L^{-3} T^{-1}$], t es el tiempo [T], z es la profundidad medida positiva hacia arriba desde la superficie freática [L], $K(h)$ es la conductividad hidráulica no saturada [$L T^{-1}$] y $h(\theta)$ o PM, es el potencial matricial [L]; ambas varían con la posición z y con el tiempo a través de θ , siendo θ el contenido volumétrico de agua [$L^3 L^{-3}$]; K_{ij}^A es la componente adimensional del tensor anisotrópico, el cual se reduce a la unidad si el medio es isotrópico, K_r la conductividad relativa y K_s la saturada.

La ecuación general de transporte para solutos se deriva de la ecuación de balance de masa, que aplicada a la zona no saturada del suelo, resulta de la siguiente forma:

$$\frac{\partial (\rho_b s + \theta c + a g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{eij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(a D_{eij}^s \frac{\partial g}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (q_i)}{\partial x_i} - r_a - \phi \quad (3)$$

$$\phi = (\mu_w + \mu_w') \theta c + (\mu_s + \mu_s') \rho_b s + (\mu_g + \mu_g') a g -$$

$$\rho_b \gamma_s - \theta \gamma_w - a \gamma_g$$

donde ρ_b [ML^{-3}] es la densidad aparente del suelo, a [$L^3 L^{-3}$] el contenido volumétrico de aire, c , s y g , son concentraciones del soluto en el líquido [ML^{-3}], sólido [MM^{-1}] y gas [ML^{-3}], respectivamente, q [$L T^{-1}$] el flujo volumétrico de agua, D_{eij} [$L^2 T^{-1}$] es el tensor de dispersión para la fase líquida, D_{eij}^s [$L^2 T^{-1}$] es el tensor de difusión para la fase gaseosa, r_a es el término de toma de nutrientes por las plantas [$ML^3 T^{-1}$] el cual se transforma en el producto de $S(h)$ de la ecuación de flujo y la concentración máxima a la cual la raíz extrae nutrientes en forma pasiva c_r [ML^{-3}], y ϕ es un término que puede representar varias reacciones químicas o biológicas siendo μ_w , μ_s y μ_g las constantes de reacción de primer orden para solutos en el agua, suelo y aire, respectivamente, mientras que μ_w' , μ_s' y μ_g' representan constantes de reacción de primer orden pero asociadas a una cadena de reacción de una especie individual, γ_w , γ_s , γ_g , representan las constantes de reacción de orden cero para el soluto en el agua, el sólido y el aire, respectivamente. Para el caso de solutos no volátiles y no reactivos como el Cl⁻ el cual se

transporta con el agua, la ecuación para el transporte 1D es la siguiente:

$$\frac{\partial (\theta C_l)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_e \frac{\partial C_l}{\partial z} \right) - \frac{\partial (q C_l)}{\partial z} \quad (4)$$

Modelo numérico

Se utilizó el modelo Hydrus 1D (Šimunek et al., 1998) para reproducir el flujo de agua y transporte de cloruros (Cl⁻) de la solución del suelo estudiado. Hydrus 1D simula el movimiento de agua, calor y solutos en un medio parcialmente saturado/saturado, resolviendo las ecuaciones respectivas (2 y 3), mediante el método de elementos finitos. El perfil de suelo puede ser discretizado en una o varias capas. Las propiedades hidráulicas de la zona no saturada del suelo (relaciones constitutivas) pueden ser descritas usando las funciones analíticas de van Genuchten (1980), entre otras. Incorpora también un término de toma de agua y solutos por las plantas. El software utiliza una interface gráfica para la gestión de entrada de datos, la edición y discretización de nodos, la asignación de parámetros, la simulación del escenario adoptado y la visualización de resultados, incluyendo un pequeño catálogo de propiedades hidráulicas de suelos no saturados (Cassel y Parish, 1988), y un conjunto de funciones de pedotransferencia basado en redes neuronales. Es posible también llevar adelante simulaciones inversas con el propósito de ajustar los parámetros del modelo; esto se lleva a cabo mediante una función objetivo que minimiza las discrepancias respecto de los datos observados.

Resultados

Características de la solución del suelo

Se realizaron cuatro campañas sucesivas (Tabla 2) durante y en los días posteriores a eventos de precipitación, en las que se recolectaron muestras de agua cada 24 hs a diferentes profundidades para su análisis y se midieron parámetros fisicoquímicos in situ.

La concentración de cloruros [Cl⁻] en las muestras de agua colectadas en las cuatro campañas muestra un incremento con la profundidad (Fig. 4). Como se observa en la Fig. 5, la conductividad eléctrica de la solución del suelo [CE_w] mostró una buena correlación con la concentración de cloruros. Una relación inversa se observa entre la concentración de cloruros [Cl⁻] y la precipitación. Entre la primera campaña (y toma de muestras) y la siguiente se

registraron tres eventos similares de 35 mm aproximadamente (Fig. 6), es decir un total de 111 mm de lluvia caída y cuyos efectos en el perfil de suelo en términos de concentraciones no fue medido.

Tabla 2. Fechas de las campañas de medición y condiciones de campo

Fecha	Monto precipitado (mm)	Potencial Matricial antecedente (cm)
06-10-2012/ 10-10-2012	228	-958.2
22-11-2012	40	-336.4
03-12-2012/ 04-12-2012	56	-366.9
18-12-2012/ 21-12-2012	89	-509.7

Teniendo en cuenta la intensidad y duración de los episodios de lluvia registrados, podrían haberse producido procesos de concentración y dilución dentro del perfil de suelo entre las tomas de muestras colectadas que demuestran la variabilidad temporal de la concentración de cloruros (Cl⁻). No obstante, la concentración de cloruros (Cl⁻) medida en el agua del piezómetro (PZ1) nunca superó los 30 mg l⁻¹. Dada la profundidad a la freática, y la constancia de la concentración de Cl⁻ medida en el acuífero, podría pensarse que el mismo no será afectado por el feedlot, al menos para los datos recolectados.

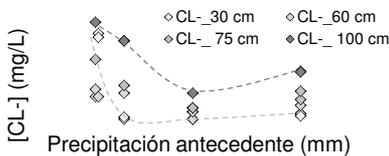


Figura 4. Influencia de la lluvia en la concentración de cloruros [Cl⁻].

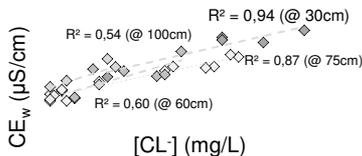


Figura 5. Correlación entre la conductividad eléctrica [CE_w] y la concentración de cloruros

[Cl⁻] para las diferentes profundidades (ver explicación de símbolos en Fig. 4).

Simulaciones

Se simuló el flujo de agua y el transporte de cloruro (Cl⁻) a lo largo del periodo de estudio. Las primeras muestras de agua se tomaron el día 10-10-2012 (día 53). El perfil de suelo se representó mediante cuatro horizontes cuyos espesores se incluyen en la Tabla 3. Una particularidad de destacar del suelo estudiado es su alto contenido de arcilla, superior al 55 %, a partir de los 25 cm de profundidad, lo que condiciona fuertemente el flujo y el transporte en las capas inferiores del perfil.

La condición de borde superior adoptada para la simulación del flujo estuvo representada por datos meteorológicos y para la condición de borde inferior se adoptó el flujo libre, la que se considera apropiada, dada la profundidad del nivel freático relevada en las cercanías del sitio de estudio. Se calculó la evapotranspiración potencial [ET_o] mediante la ecuación propuesta por FAO (1990), la cual calcula la ET_o mediante la combinación de términos aerodinámicos [ET_{rad}] y de radiación solar [ET_{aero}]. Para ello fue necesario introducir al modelo los datos meteorológicos de radiación solar, temperatura, velocidad de viento y humedad relativa del aire a paso diario.

Además se incorporó el término de toma de agua por las raíces de las plantas y se adoptó una profundidad de raíces constante de 25 cm, la cual fue medida en campo. En el periodo simulado se registró el crecimiento de la vegetación sobre la parcela de estudio y se incorporó también al modelo haciendo una interpolación lineal a paso diario entre las alturas registradas el día de medición. De la rutina de simulación en gabinete, se observó que los datos correspondientes a la vegetación juegan un papel primordial en la partición de la evapotranspiración [ET_o] en la evaporación del suelo y la transpiración de la planta que se calculó a través del coeficiente de área foliar (LAI), teniendo este último una fuerte sensibilidad al ajuste de los datos de potencial matricial medidos. En este caso se adoptó la ecuación siguiente:

$$LAI = 0.24 * \text{Altura de la planta} \quad (5)$$

El potencial matricial simulado se ajustó satisfactoriamente a los datos registrados por los sensores ubicados a 30 cm, 60 cm y 100 cm (Figuras 7, 8 y 9, respectivamente). A 30 cm los procesos de humedecimiento/desecamiento son

notorios en respuesta a los patrones de la precipitación (Figura 6), observándose un marcado desecamiento del suelo desde fines de diciembre de 2012 hasta el final del período simulado. A 60 cm se observa un patrón similar aunque la fluctuación del potencial matricial entre estadios secos/húmedos es menor que a 30 cm debido a la mayor cantidad de material fino que posee el suelo a esa profundidad. A los 100 cm el potencial se mantiene prácticamente constante, cercano a las condiciones de saturación, en consonancia con el alto porcentaje de arcilla que caracteriza a este horizonte (49 %), sólo registrando variaciones notorias cuando la precipitación supera cierto umbral o el período sin lluvias es prolongado. Los parámetros ajustados del modelo de van Genuchten se muestran en la Tabla 3, los que son coherentes con los esperables para el tipo de suelo presente en el perfil acorde a la bibliografía consultada.

Tabla 3. Parámetros calibrados del modelo constitutivo.

H (cm)	Θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α (cm^{-1})	η (-)	K_s ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)
0-10	0.086	0.44	0.0135	2.1	3.44
10-25	0.088	0.42	0.0012	1.92	3
25-84	0.095	0.40	0.00107	1.18	1
84-146	0.096	0.41	0.00672	1.13	1



Figura 6. Registro de precipitaciones.

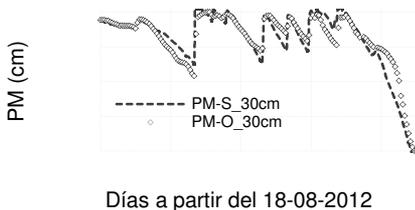


Figura 7. Potencial matricial a 30 cm de profundidad.

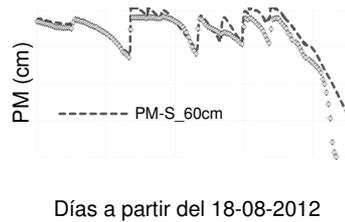


Figura 8. Potencial matricial a 60 cm de profundidad.

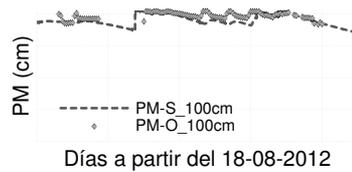


Figura 9. Potencial matricial a 100 cm de profundidad.

Una vez ajustadas las variables inherentes al flujo en el espacio y en el tiempo, se simuló el transporte de cloruros, una sustancia conservativa, con el fin de calibrar parámetros como el coeficiente de dispersión, tortuosidad, entre otros (Tabla 4) que servirán para simular el transporte de otros compuestos no conservativos como el nitrato (NO_3^-). Se utilizó el esquema temporal de Crank-Nicholson para la discretización del tiempo y un esquema tipo Galerkin para la discretización espacial. Se simuló en condiciones de equilibrio y se incorporó el factor de tortuosidad propuesto por Millington y Quirk, (1961) (ecuación 6), el cual interviene en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal propuesto por Bear, (1972) (ecuación 7):

$$\tau_w = \frac{\theta^{7/3}}{\theta_s^2} \quad (6)$$

$$\theta D^w = D_L |q| + \theta D_w \tau_w \quad (7)$$

siendo $D^w [L^2T^{-1}]$ el coeficiente de dispersión en la fase líquida, $D_L [L]$, el coeficiente de dispersividad longitudinal, $Iq [LT^{-1}]$, representa la densidad de flujo de fluido, $D_w [L^2T^{-1}]$, el coeficiente de difusión molecular y T_w el factor de tortuosidad adimensional.

Tabla 4. Parámetros utilizados para la ecuación de transporte para cada horizonte de suelo.

H (cm)	ρ_b ($mg.cm^{-3}$)	D_L (cm)	D_w ($cm^2.d^{-1}$)	$T_w (sat)$ (-)
0-10	1.07	26	1.19	0.761
10-25	1.4	25	1.19	0.749
25-84	1.51	5	1.19	0.737
84-146	1.47	5	1.19	0.743

(ρ_b : Densidad aparente; D_L : Dispersividad longitudinal; D_w : Coeficiente de difusión; T_w : Factor de tortuosidad)

Para la ecuación de transporte se utilizó como condición inicial el perfil de concentración obtenido el día 53 correspondiente a la primera toma de muestras. Como condición de borde superior se adoptó la condición de Dirichlet (ecuación 8) correspondiente a la concentración de cloruros $[Cl^-]$ medida a los 30 cm de profundidad debido a la imposibilidad de capturar y analizar el agua de escurrimiento superficial. Como condición de borde inferior, se adoptó la condición tipo Neumann (ecuación 9).

$$[Cl^-]_z(z,t) = [Cl^-]_b(z,t) \quad \text{para } z=0 \quad (8)$$

$$\theta D \frac{\partial [Cl^-]}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z=L \quad (9)$$

Respecto del transporte, fue difícil obtener un buen ajuste entre las concentraciones observadas y simuladas. Los pulsos de concentración medidos son suavizados por el modelo a medida que aumenta la profundidad, para valores de los parámetros adoptados, consistentes con la textura del suelo estudiado. La causa del ajuste deficiente podría deberse a procesos de flujo preferencial a través de macroporos o flujo lateral en dirección del escurrimiento, no tenidos en cuenta en esta ocasión. Por otro lado, los eventos de precipitación intermedios a las campañas realizadas, de los cuales no se cuenta con valores de concentración, indudablemente tienen su efecto diluyente de la concentración de cloruros en el perfil de suelo. No obstante, la facilidad de implementación del

modelo numérico, hace de él una herramienta sumamente importante para el entendimiento de la dinámica de la zona no saturada en pos de deducir posibles efectos sobre el recurso hídrico subterráneo.

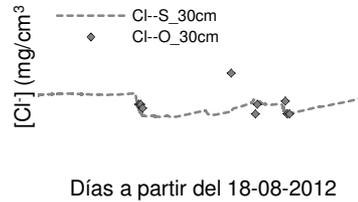


Figura 10. Concentración de cloruros $[Cl^-]$ a 30 cm de profundidad.

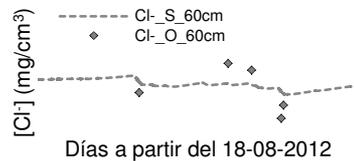


Figura 11. Concentración de cloruros $[Cl^-]$ a 60 cm de profundidad

Conclusiones

De la caracterización del suelo efectuada se pudo determinar la presencia de un horizonte B muy firme que condiciona el flujo de agua y el transporte de sustancias solubles en agua en profundidad. Del punto de vista de la vulnerabilidad local del acuífero freático, se puede concluir a priori que la misma estaría reducida, siempre que no existan fenómenos de jerarquización de flujo (porosidad dual) de agua en profundidad que puedan elevar el riesgo de impacto en el mismo.

Por otra parte el modelo Hydrus 1D, ampliamente usado por la comunidad científica para representar la dinámica del flujo y transporte de agua y solutos en la zona no saturada de suelos con variadas características texturales (Ventrella et al., 2000; Crevoisier et al., 2008) ha demostrado en este caso poder representar el flujo y transporte de solutos conservativos en un suelo complejo caracterizado por su alto contenido de finos. Cabe aclarar que el conocimiento detallado del funcionamiento de los horizontes del suelo de estudio en relación a la facilidad o dificultad con

que estos transfieran agua, es esencial para interpretar y definir con criterio los parámetros de flujo de los modelos constitutivos adoptados.

Referencias

- Andriulo, A., Sasal, C., Améndola, C., y Rimatori, F. 2003. Impacto de un sistema intensivo de producción de carne vacuna sobre algunas propiedades del suelo y del agua. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(3), 27-56.
- Bear, J., Dynamics of Fluid in Porous Media, *Elsevier*, New York, NY, 1972.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
- Crevoisier, D., Popova, Z., Mailhol, J. C., & Ruelle, P. 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agriculturalwater management*, 95(4), 354-366.
- FAO 1990. Penman-Monteith Formula, Rome Italy. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements, ANNEX V.
- García, A. R., Maisonnave, R., Massobrio, M. J., de Iorio, F., y Alicia, R. 2012. Field-Scale Evaluation of Water Fluxes and Manure Solution Leaching in Feedlot Pen Soils. *Journal of environmental quality*, 41(5), 1591-1599.
- Mielke, L. N., Swanson, N. P., and McCalla, T. M. 1974. Soil profile conditions of cattle feedlots. *Journal of environmental Quality*, Vol. 3, No. 1, pp. 14-17.
- Millington, R. J., and J. M. Quirk, 1961. Permeability of porous solids, *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1200-1207.
- Pordomingo, A. J. 2003. Gestión ambiental en el feedlot. Guía de buenas prácticas. *INTA Anguil*, 90.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333.
- Shock, C.C., J.M. Barnum, y M. Seddigh. 1998a. Calibration of Watermark soil moisture sensors for irrigation management, pp.139-146, *Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego, CA. Irrigation Association*.
- Šimůnek, J., M. Šejna, and M. Th. van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 2.0. IGWMC - TPS - 70, *International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado*, 162pp.
- Sommerfeldt TG, Pittman UJ, Milne RA. 1973. Effect of feedlot manure on soil and water quality. *Journal of Environmental Quality*. 2:423-427.
- Vaillant, G. C., Pierzynski, G. M., Ham, J. M., & DeRouchey, J. 2009. Nutrient accumulation below cattle feedlot pens in Kansas. *Journal of environmental quality*, 38(3), 909-918.
- Viglizzo, E. F., Roberto, Z. E. 1997. El componente ambiental en la intensificación ganadera. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 17:271-292
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Ventrella, D.; Mohanty, B. P.; Šimůnek, J.; Losavio, N.; van Genuchten, M. T. 2000. Water and Chloride Transport in A Fine-Textured Soil: Field Experiments and Modeling. *Soil Science*, 165(8), 624-631.