

Funcionamiento del sistema hidrogeológico en el área del Sector Industrial Planificado de la localidad de Tornquist (Buenos Aires, Argentina)

Claudio Lexow^{1,2}, René Albouy², Jorge Carrica² y Daniela Lafont²

¹ PAID Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Provincia de Buenos Aires, Argentina.

² Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. San Juan 670, 8000 Bahía Blanca, Argentina.

Mail de contacto: lexow@uns.edu.ar

RESUMEN

Próximo a la localidad de Tornquist, se proyecta instalar un Sector Industrial Planificado (Ley N° 13744). Hidrológicamente se localiza en la cuenca superior del río Sauce Chico. La zona no saturada (ZNS) del área de estudio está caracterizada por sedimentos loésicos y una capa de tosca prácticamente impermeable y discontinua en su techo. El acuífero freático se encuentra contenido en los Sedimentos Pampeanos. A fin de determinar la potencialidad de que un evento de contaminación afecte el subsuelo y el acuífero se evaluó, en primera instancia, la recarga en tránsito (Balshort V.3). Con el programa HYDRUS 2D/3D se consideró dicho vector de flujo para evaluar el transporte de solutos no reactivos y reactivos en la ZNS. Se definieron tiempos de tránsito lo suficientemente prolongados como para garantizar la degradación de las sustancias contaminantes. El sistema hidrogeológico presenta características físicas que admiten el desarrollo de ciertas actividades industriales en el sector.

Palabras clave: balance hidrológico, flujo no saturado, vulnerabilidad.

ABSTRACT

A Planned Industrial Sector (Law 13744) is projected to be installed near Tornquist city. Hydrologically is located in the Sauce Chico river basin. The vadose zone (VZ) of the studied area is characterized by loessic sediments and an impermeable and discontinuous layer of calcareous sediments at the upper portion. The phreatic aquifer is contained in the Sedimentos Pampeanos. To determine the potentiality of a contamination event affecting the subsoil and the aquifer, the transit recharging was evaluated by Balshort V.3 program. To evaluate the transport of non-reactive and reactive solutes in the VZ, with HYDRUS 2D/3D program, the transit recharging was considered. Enough long transit times to warrant the pollutant degradation were defined. The physical characteristics of the hydrogeological system support the development of certain industrial activities in the studied area.

Keywords: water balance, unsaturated flow, vulnerability.

Introducción

La futura implantación de un parque industrial en proximidades de la localidad de Tornquist dentro del marco de la Ley 13.744, que establece el régimen de creación y funcionamiento de Agrupamientos Industriales en todo el territorio de la provincia de Buenos Aires, trajo aparejado el desarrollo de un proyecto de investigación. El mismo tiene por objetivos incrementar el conocimiento científico para la preservación del recurso hídrico subterráneo en el área, tomando como base la evaluación del riesgo de contaminación del acuífero por actividad industrial y determinar los potenciales focos de contaminación de las aguas subterráneas por actividades urbanas.

Estudios previos han permitido alcanzar un conocimiento fehaciente del comportamiento hidrológico e hidrogeológico a nivel de cuenca (Albouy, 1994 y 1997), como así también de otros aspectos hidrogeológicos (recarga, zona no saturada, suelos, etc.) que pueden ser extrapolables para toda la región pedemontana sudoccidental de las sierras Australes (Carrica, 1998; Lexow, 2002 y 2010).

El desarrollo actual de modernos y cada vez más complejos programas de computación para el cálculo de flujo y transporte de solutos en el medio no saturado, como es el caso del HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) entre otros, permite, a partir de un modelo conceptual hidrogeológico fidedigno, su implementación

como herramienta interpretativa. Utilizado de esta manera permite estudiar la dinámica del sistema, organizar datos de campo recavados y planificar futuras medidas a implementar tendientes a la preservación del recurso. El objetivo del presente trabajo es evaluar la potencialidad de contaminación del subsuelo y del acuífero en el sector del Parque Industrial Projectado en proximidades a la localidad de Tornquist.

Características generales del área de estudio

El área de estudio (Figura 1) se ubica aproximadamente a unos 3 Km al NO de la localidad de Tornquist (Provincia de Buenos Aires, Argentina). El clima de la zona es subhúmedo, transicional a árido y de tipo mesotermal. Según Albouy (1997) presenta una precipitación media anual de 781,5 mm y una temperatura media anual de 14,7°C. Morfológicamente, el área corresponde a una llanura periserrana cuyo desarrollo areal está limitado hacia el N por los afloramientos cuarcíticos de las Sierras Australes. González Uriarte (1984) designa a estas cuarcitas como área de piedemonte. La misma, se eleva unos 300 msnm y presenta una baja pendiente topográfica (<5%). Los Sedimentos Pampeanos (Fidalgo et al., 1975), que se distribuyen en toda la llanura Chaco Pampeana, contienen al acuífero libre de la zona. Están constituidos por limos arenosos compactos con cemento de carbonato de calcio, que culminan con un manto de tosca discontinuo, de 1 a 3 m de espesor. Hidráulicamente conforman una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos que se comportan como un sistema único de transmisión de agua. En inmediaciones de las sierras estos sedimentos se apoyan directamente sobre las cuarcitas paleozoicas y en el ambiente de llanura sobre arcillas marinas del Mioceno (Albouy, 1997). La zona de estudio se caracteriza por presentar una zona no saturada potente, de material loésico que, en el ámbito de la cuenca aumenta progresivamente de espesor hacia el sur. Es frecuente encontrar afloramientos de la capa de tosca o bien soterrada por debajo de los suelos de la zona que conforman una asociación de Haplustoles típicos y petrocálcicos y Argiudoles típicos de textura limo-arcillosa (INTA, 1989). Los suelos Haplustoles petrocálcicos se ubican en las partes más altas donde la tosca subaflora, mientras que los Argiudoles sepultan a la topografía preexistente destacándose en los sectores más bajos.

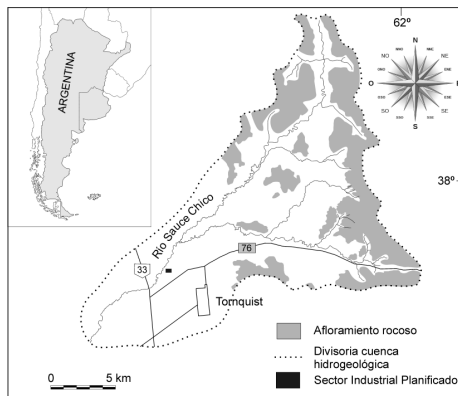


Figura 1. Cuenca superior del río Sauce Chico y ubicación del Sector Industrial Planificado.

Los niveles freáticos más someros (3-10 m) están relacionados a la proximidad de los cauces de la red superficial de agua. La capa acuífera se asemeja a un cuerpo que se acuña y cierra hacia sus bordes de cabecera y aumenta progresivamente de espesor en dirección a la llanura hasta alcanzar máximos de 200 m. En el sector de estudio la profundidad del nivel freático se encuentra entre 10 y 15m. La recarga (R) del acuífero freático se produce en forma preferencial en los sedimentos permeables modernos del piedemonte, pero también se verifica en toda la superficie de la cuenca, por infiltración directa del agua de lluvia. Representa en término medio una recarga del 15% de las precipitaciones (Albouy, 1997). El sentido general de circulación del flujo subterráneo es NE-SO convergiendo hacia el curso principal del río Sauce Chico y tributarios, lugar donde se produce la descarga natural del flujo local del acuífero.

Metodología

En primera instancia se elaboró el balance hidrológico diario del suelo para un período de 16 años por medio del programa Balshort V.3. (modificado de Carrica, 1993) a fin de determinar la recarga en tránsito, factor fundamental como condición del transporte de las sustancias potencialmente contaminantes. Posteriormente con el programa HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) se consideró dicho vector de flujo para evaluar el transporte de solutos para la totalidad de la zona no saturada. El tratamiento más proteccionista, en cuanto a la toma de decisiones futuras en el control, fue considerar el transporte advectivo. También fueron evaluadas condiciones con carga hidráulica constante, que emulan pérdidas de

tanques o depósitos con diversos coeficientes de distribución o retardo. Se definieron tiempos de tránsito que fueron contrastados con las valoraciones de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación (Albouy et al., 2012) previamente determinada para el sector.

Balance de agua en el suelo

El balance hidrológico, tanto a nivel regional o de cuenca como del suelo, sigue siendo el método más difundido y utilizado para el cálculo de recarga. El balance hidrológico del suelo en zonas áridas y semiáridas solo puede emplearse si se realiza a paso diario, puesto que, cuando la precipitación diaria (P) supera el valor de evapotranspiración diaria (ETR), da lugar a un exceso de agua factible de constituirse en recarga (Carrica, 2009; Healy, 2010). Además, en estas zonas las lluvias, si bien son ocasionales, suelen ser de corta duración e intensas, lo cual favorece la situación antes mencionada.

Para el cálculo del balance hidrológico diario del suelo se aplicó el programa Balshort V.3. (Carrica, 1993) que utiliza datos diarios de P y calcula la ETR diaria en función de la evapotranspiración potencial diaria (ETP), la humedad del suelo y la textura del suelo. Dispone de tres funciones básicas que relacionan la ETR/ETP con la humedad antecedente y la textura de los suelos, resaltando la importancia de la retención de agua en función de ésta. El programa también estima la interceptación vegetal (Iv) basándose en el método de Horton para cuatro cultivos básicos. Limita el valor de Iv a 5 mm diarios, sobre la base conceptual que la interceptación alcanza un valor final constante que depende de la capacidad de almacenamiento del dosel vegetal y es independiente de la cantidad de lluvia caída (Linsley et al., 1982; López Rodríguez y Giraldez Cervera, 1997). En el presente estudio se asumió una cobertura vegetal (pastos) de 30 cm de altura.

Los valores de infiltración básica obtenidos en estos suelos fueron de 16 y 22 mm/hora (Carrica, 1998). Burgos y Forte Lay (1978) determinaron capacidades de campo entre 152 y 169 mm en un Haplustol petrocálcico de 60 cm de profundidad y textura franca en los alrededores de Tornquist. Carrica (1998) estimó una capacidad de almacenaje media de éstos suelos en 160 mm para la vecina cuenca superior del Aº Napostá Grande, valor que se utilizó como parámetro para el cálculo de los excesos de agua del suelo estudiado.

Los balances diarios se plantearon para un período de 16 años (1997-2012) durante el cual

existen registros pluviométricos continuos de la localidad de Tornquist. La evapotranspiración potencial (ETP) mensual se calculó con la fórmula de Penman - Monteith (FAO, 1993) a partir de los datos recolectados de una estación meteorológica propia instalada en la cuenca del Aº de Aguila, ubicada a unos 20 Km al SE de Tornquist (Carrica y Lexow, 2004).

Modelo de simulación HYDRUS 2D/3D

El flujo de agua y transporte de solutos en la ZNS se simuló mediante la aplicación del código HYDRUS 2D/3D (Simunek et al., 2006) que es ejecutable en ambiente Windows. Es un modelo de elementos finitos que resuelve numéricamente, en dos dimensiones, las ecuaciones de Richards para el flujo de agua en el medio no saturado - saturado y las ecuaciones de Fick (advección - dispersión) para el transporte de calor y solutos. La ecuación de flujo incluye un término sumidero que hace referencia a la extracción de agua por parte de las raíces de las plantas. Para la aplicación del método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de flujo y transporte se emplea el método Galerkin a partir de las condiciones iniciales y de contorno definidas por el usuario.

Se construyó un dominio geométrico de 800 cm de ancho y de 800 cm de altura (Figura 2). La malla de elementos finitos consistió en 435 nodos y 804 elementos triangulares de un tamaño medio específico de 50 cm. Se distinguieron dos materiales cuyos espesores se han señalado precedentemente y sus propiedades físicas y químicas se asumen uniformes dentro de cada uno. Los valores de los parámetros hidráulicos (humedad residual θ_r , humedad en saturación θ_s , α y n parámetros empíricos condicionantes de la forma de la curva de retención y K_s permeabilidad saturada) calculados por medio de la función de pedotransferencia *Rosetta*, suministrada por el mismo programa se presentan en la Tabla 1. Dichas estimaciones fueron comparadas con datos de campo en terrenos de características similares (Lexow y Bonorino, 2003; Lexow, 2010).

Tabla 1. Parámetros hidráulicos.

Capa	θ_r	θ_s	α (cm^{-1})	n	K_s (cm/d)
1	0,072	0,50	0,0075	1,56	101,2
2	0,078	0,43	0,036	1,56	24,9

De manera tal que se represente conceptualmente la realidad del sector, se

demarcó arbitrariamente la capa de tosca de características irregulares en su forma y discontinua en su expresión lateral, entre los 1 y 2,5 m de profundidad (Figura 2). La permeabilidad nula, que obedece a la fuerte cementación de carbonato, se aplicó por medio de la valoración en cero de las componentes primera y segunda de anisotropía local de los respectivos elementos finitos.

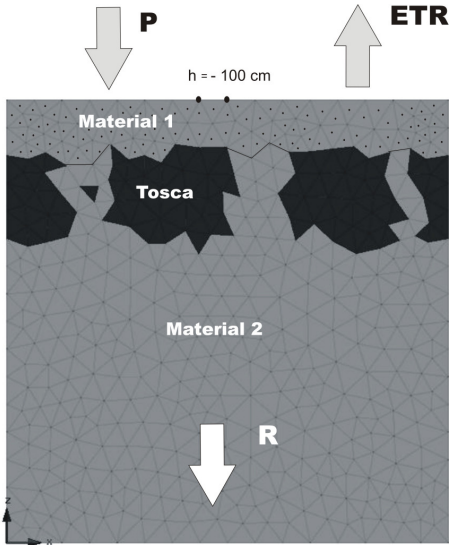


Figura 2. Representación del modelo conceptual del sistema subsuperficial.

El período de simulación consistió en 5844 días. La discretización del tiempo fue la siguiente: paso de tiempo inicial de 0,0001 (día), paso mínimo $1e^{-005}$ (día) y máximo 1 (día) (brindados por defecto por el programa).

Las funciones hidráulicas del suelo fueron estimadas según el modelo de van Genuchten-Mualem, una de las alternativas que brinda el programa, sin considerar el fenómeno de histéresis.

Las condiciones de contorno para el flujo de agua se establecieron con el límite superior del modelo, superficie del suelo, dependiente de las condiciones atmosféricas, variable en el tiempo, dominado por las precipitaciones diarias medidas y la evapotranspiración potencial de referencia estimada. Solo para las simulaciones de transporte de solutos se seleccionaron dos nodos (7 y 8) que actúan como un sitio de carga constante, humedad entre saturación y capacidad de campo ($h = -100$ cm) (Figura 2)

que representa la pérdida o filtración de algún depósito en superficie.

A partir de las observaciones de campo se estableció la existencia de vegetación herbácea con una profundidad máxima de raíz de 30 cm, a partir de las observaciones de campo, y para el cálculo de la extracción de agua, término sumidero, se aplicó el modelo de Feddes et al. (1978, en Simunek et al., 2006) que es una de las opciones que proporciona el mismo programa.

Los límites laterales son nodos con ausencia de flujo, mientras que la superficie inferior ($z = 0$) se estableció como un límite de drenaje libre a fin de poder ajustar con precisión la valoración de la recarga en tránsito.

En función de estudios previos (Lexow, 2010) y dado que el programa HYDRUS 2D/3D no considera la interceptación vegetal, se ajustó un porcentaje de cobertura vegetal del 57%, de manera tal que los resultados de ETR calculados sean compatibles con la ETR más la interceptación vegetal considerada en el programa Balshort V.3.

Para el cálculo del flujo advectivo se consideró el transporte de partículas que es un método que calcula el movimiento sin dispersión de las partículas de agua a través de un sistema de flujo subterráneo simulado. El modelo de transporte de partículas calcula la posición de una partícula en la zona no saturada después de algún periodo de tiempo, usando la distribución del campo de velocidades del flujo subterráneo, determinada por el modelo de flujo. Las líneas de la trayectoria de las partículas imaginarias que se mueven a través del sistema de flujo simulado son denominadas líneas de flujo.

El coeficiente de distribución (K_d) no es constante y depende fundamentalmente del tipo de suelo, sobre todo del contenido de materia orgánica y de arcillas, y de la velocidad de flujo. Es de suma importancia en el transporte reactivo, representando el término fuente sumidero, y explica la diferencia de desplazamiento entre dichos elementos o sustancias con respecto a la velocidad del agua. Para simular el transporte de sustancias con comportamiento advectivo y reactivo se consideraron valores de $K_d = 0$ y $K_d = 2$, respectivamente. Este último coeficiente se seleccionó como representativo, a partir de diversas publicaciones, tanto de metales (Hostetler y Erikson, 1993; Ambrose, 1999) como de sustancias orgánicas (Vrba y Romijn, 1986; Beltrán et al., 1995; Montgomery, 1996). Aunque estudios en terrenos similares han definido para ciertos elementos valores mucho

más elevados, por ejemplo Zn, $K_d = 19,5$ (Mascioli et al., 2005) y glifosato, $K_d = 43$ (Lexow et al., 2005).

A los nodos 7 y 8 del borde superior (Figura 2) se les asignó una carga hidráulica constante ($h = -100$ cm) y un aporte (pulso) constante de 1 mmol/cm^3 durante todo el período de simulación ($t = 365$ d). Las condiciones de borde para el transporte de soluto son del tercer tipo, indicadas para estos casos por el programa, pues representan condiciones físicamente más reales y preservan la masa del soluto en el sistema simulado (Simunek et al., 2006). Durante el año de simulación del transporte de soluto el resto de los nodos del borde superior se establecieron dependientes de las condiciones atmosféricas.

Resultados

Balance de agua en el suelo

Los resultados del balance hidrológico diario y seriado del suelo en valores anualizados promedio son: $P = 723,9$ mm; Interceptación vegetal = $42,9$ mm; $ETR = 673,0$ mm; $R = 51,9$ mm (7,2 % de la lluvia); Variación de la reserva ~ 0 . Los años con los valores de R extremos de la serie resultaron ser el 2001 con $P = 1186$ mm y un valor de $R = 209,9$ mm (18% de P) y en el año 2005 con $P = 495$ mm y $R = 0$ mm (0% de la P).

Flujo en la zona no saturada

En esta etapa el objetivo fue ajustar el valor de la R en tránsito para definir al mismo como vector de flujo condicionante de la movilidad de solutos en la ZNS bajo condiciones sin carga hidráulica adicional. El resultado hidrológico de la interacción de los parámetros impuestos al sistema, las condiciones de borde y, fundamentalmente las entradas (P) y salidas de agua (ETR) por el condicionamiento atmosférico se encuentra representado en la Figura 3. El total de lluvia acumulada es de 11.589 mm mientras que la R alcanza, para todo el período, 682 mm, que representando un 5,8% de la P. Equivale a un flujo anual promedio que atraviesa el límite inferior (drenaje libre) de aproximadamente $0,043 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

El flujo no saturado advectivo se calculó a partir de la incorporación de dos partículas de flujo en los nodos 155 (x: 254 cm, z: 760 cm) y 265 (x: 481 cm, z: 761 cm), prácticamente a 40 cm de profundidad, algo por debajo del límite de la franja de acción radicular. Las posiciones (x) fueron arbitrarias, una de ellas por sobre una porción impermeable de la capa de tosca, y la

otra sobre uno de los sectores donde la tosca está ausente.

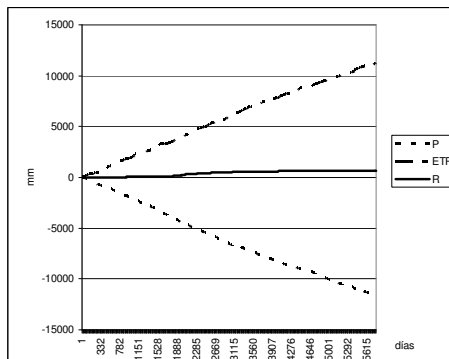


Figura 3. Flujos acumulados de entrada (Precipitación) y salidas (Evapotranspiración real y Recarga) del sistema.

Para la totalidad del período de simulación ($t = 5844$ días) la primera de las partículas se desplazó sobre el eje vertical 185 cm, aunque gran parte del tiempo se movilizó por sobre la capa de tosca. La velocidad media de la partícula, con respecto de z, fue de $v = 0,03$ cm/d. La segunda partícula recorrió prácticamente todo el trayecto en sentido vertical y alcanzó a transitar una distancia de 550 cm, lo que representa una velocidad media $v = 0,09$ cm/d. Asumiendo un espesor aproximado de 15 m de la ZNS del sector, el tiempo de tránsito, si se considera solo el flujo advectivo, sería de $45,6$ años.

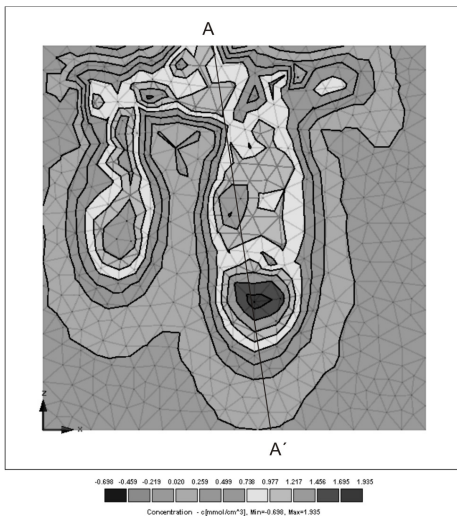
Transporte de solutos en la zona no saturada

Puesto que el tipo de industrias que se pretenden radicar en el parque industrial corresponden a un amplio espectro de actividades (alimenticia, construcción, textil y maderera) y de bajo impacto (fábricas de embutidos y chacinados, cemento y hormigón, ropa blanca, muebles, etc.), la evaluación de basó sobre el supuesto de pérdidas a partir de cañerías o depósitos superficiales de sustancias probablemente asociadas a las mismas. Con el propósito de cubrir el amplio espectro de posibilidades se simuló el transporte de sustancias no reactivas o conservativas (cloruros, nitratos) así como también de sustancias reactivas disueltas en agua (solventes, combustibles, metales, etc.).

Transporte de sustancias no reactivas

En el caso del transporte de una sustancia no reactiva o conservativa, es decir que no se ve afectada por el proceso de adsorción sobre las partículas sólidas ($K_d = 0$), se podría considerar como ejemplo el del ión nitrato en un ambiente oxidante. Físicamente, se planteó una pérdida o filtración de un depósito en superficie que, a partir de los nodos seleccionados, generaría una porción de terreno donde el contenido de humedad es constante, entre la saturación y capacidad de campo ($h = -100$ cm), mientras que el resto de la superficie está bajo las condiciones atmosféricas variables. Para la simulación ($t = 365$ d) se utilizó, por defecto, para ambos sedimentos la ZNS, una dispersividad longitudinal y transversal igual a 0,5 y 0,1 cm respectivamente.

El desarrollo alcanzado por la pluma de soluto en la ZNS para el tiempo de simulación $t = 139$ d se muestra en la Figura 4. Se observa que el soluto se desplazó parcialmente sobre la capa de tosca y comenzó a moverse hacia abajo conformando dos plumas o frentes condicionados por las “ventanas” definidas en la tosca. Debido al proceso de dispersión la llegada de las primeras manifestaciones del soluto alcanzan los 8 m de profundidad a los 139 días.



Project tomquist soluto 1
Results, Concentration, Time 38 - 138.7 days

Figura 4. Distribución del soluto no reactivo en el entorno simulado ($t = 139$ d).

Un perfil vertical A-A' indicado en la Figura 5 denota la expresión longitudinal y permite

visualizar la distribución de concentración $c(z)$ desde el punto de aplicación (1 mmol/cm^3) hasta el límite inferior del entorno simulado para ese tiempo (Figura 4).

Concentration, Time 38 - 138.7 days

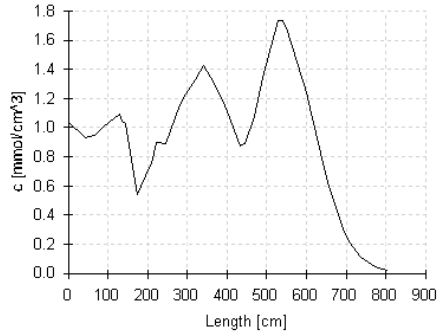


Figura 5. Perfil A-A' de concentración del soluto ($t = 139$ d).

El pico máximo de concentración alcanzó la profundidad de 8 m para $t = 222$ días (Figura 6).

Concentration, Time 61 - 222.6 days

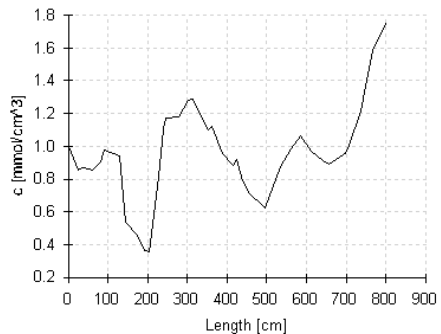


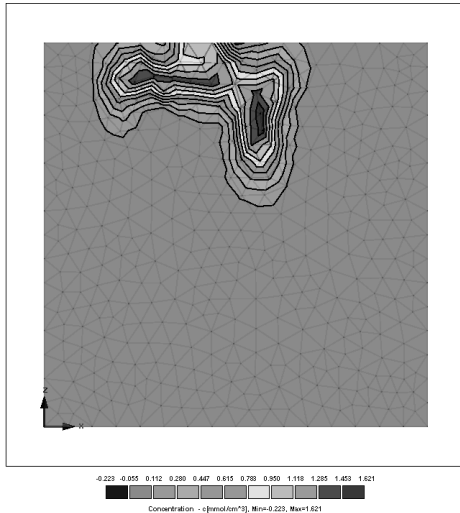
Figura 6. Perfil A-A' de concentración del soluto ($t = 222$ d).

Transporte de sustancias reactivas

Para esta circunstancia y al igual que el caso anterior se consideró una condición de carga constante ($h = -100$ cm) en los nodos 7 y 8, mientras que el resto de los nodos continúan bajo condiciones atmosféricas. Para la simulación ($t_{\text{máx}} = 365$ d) se utilizaron para ambos tipos de sedimentos los mismos parámetros de dispersividad longitudinal y transversal pero un coeficiente de partición $K_d = 2$, correspondiente a una sustancia que es

afectada por el proceso de adsorción-desorción y de naturaleza variable.

La simulación muestra (Figura 7) como al cabo de los 365 días el soluto alcanza, debido al proceso de dispersión, una profundidad de 3,5 m (Figura 7). El pico de máxima concentración se presenta alrededor de los 2 m de profundidad. Esta movilidad se observa en la zona donde la tosca está ausente, por el contrario hacia el sector izquierdo de la figura, la masa de soluto aún permanece por sobre la capa de menor permeabilidad.



Project tomsquit soluto II
Results, Concentration, Time 100 - 365.0 days

Figura 7. Distribución del soluto reactivo en el entorno simulado ($t = 365$ d).

Las determinaciones de los índices de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación realizadas en el área, señalan para el sector una valoración moderada según el método GOD (Albouy et al., 2012). Considerando el concepto de Foster et al. (2002) con respecto a la determinación del peligro de contaminación de un acuífero a la contaminación, cabe mencionar, que el mismo será cuantificado metodológicamente una vez definidas las actividades industriales específicas a implementar en el sitio.

Es importante destacar que pueden tener lugar cambios marcados en el comportamiento de algunos contaminantes, si la actividad genera suficiente carga orgánica o condiciones ácidas para producir una variación significativa en el Eh o pH del sector. También es significativo resaltar que, para el caso de contaminantes persistentes y móviles, la ZNS

provocará un retardo significativo en su llegada al acuífero freático, pero sin ninguna atenuación beneficiosa.

Conclusiones

Los parámetros físicos, hidrológicos, hidráulicos y coeficientes empíricos utilizados en los programas Balshort V.3. (fase atmosférica del ciclo hidrológico) e HYDRUS 2D/3D para la simulación del flujo en la ZNS, ponen en evidencia la baja probabilidad que un contaminante, aún conservativo, alcance el acuífero freático subyacente.

La importancia ambiental de garantizar la implantación de un sector industrial planificado radica no solo en la potencialidad de crecimiento socioeconómico implícito, sino además, en la protección del acuífero freático, eventual fuente de abastecimiento de agua.

Referencias

- Albouy, R., 1994. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral*. UNS. Bahía Blanca. 140 p. y anexos. (Inédita).
- Albouy, R., 1997. Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 52 (1): 81-92.
- Albouy, R., D. Lafont y G. Bonorino, 2012. Protección del recurso hídrico subterráneo: evaluación preliminar en el área de Tornquist (Argentina). XI Congreso Hidrogeológico Latinoamericano. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias/Resúmenes Extendidos en CD.
- Ambrose, R.B., 1999. Partition coefficients for metals in surface waters, soil and waste. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Hydrogeologic Inc., 74 p.
- Beltrán, J., Morell I. y Hernández, F., 1995. Estudios de adsorción de plaguicidas en suelos mediante experiencias de adsorción en columnas. En: *Avances en la Investigación de la Zona No Saturada*. Ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 269-279 pp.
- Burgos J. y Forte Lay, J., 1978. Capacidad de almacenaje de agua en los suelos de la región pampeana. *Taller argentino - estadounidense sobre sequías*. CONICET. Mar del Plata. Ed. J. Burgos, 122-143 pp.
- Carrica J., 1993. Balshort: Un programa de balance hidrológico diario del suelo aplicado a la región sudoccidental pampeana. XII

- Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas Tomo VI: 243-248.
- Carrica, J., 1998. Hidrogeología de la cuenca del Arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires. *Tesis Doctoral*. UNS. Bahía Blanca. 215 p. y anexos. (Inédita).
- Carrica J., 2009. Cálculo de la recarga en zonas áridas y semiáridas. *Recarga de Acuíferos. Aspectos generales y particularidades en regiones áridas*. Carrica, J., Hernández, M. y Mariño, E. (Eds). AIH-Fac. Exactas y Naturales UNLPam. 71-80.
- Carrica, J.C. y Lexow, C., 2004. Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del Arroyo Napostá Grande, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 59 (2): 281-290.
- F.A.O., 1993. CropWat. Riego y Drenaje Nro. 46. 215 p.
- Fidalgo, F., De Franceso, F. y Pascual, R., 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires: 103-108. Buenos Aires.
- Foster, S., Hirata, R., Gómez, D., D'Elia, M. y Paris, M., 2002. Groundwater quality protection. A guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. GW.MATE. 25071. The World Bank Washington, D.C. 103 pp.
- González Uriarte, M., 1984. Características geomorfológicas de la porción continental que rodea a la Bahía Blanca. IX Congreso Geológico Argentino (III): 556-576. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Healy, R.W., 2010. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press. United Kingdom. 245 p.
- Hostetler, Ch.J. y Erikson, R.L., 1993. Coupling of speciation and transport models. *Metals in Groundwater* (Allen, Perdue, Brown, Eds.) Lewis Publishers, 173-208 pp.
- INTA, 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Edipubli S.A. Talleres Gráficos. Buenos Aires. 525 pp.
- Lexow, C., 2002. Hidrodinámica de la zona no saturada aplicada al estudio del balance hidrológico y de contaminantes de los recursos hídricos subterráneos (Cuenca del A° del Águila). *Tesis Doctoral*. UNS. Bahía Blanca. 174 p. y anexos. (Inédita).
- Lexow, C., 2010. Distribución del agua en un suelo Hapludol: manejo del código Hydrus 2D/3D en la modelación del flujo no saturado. *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanuras*. (Eds. M. Varni, I. Extraigas, L. Vives) Instituto de Hidrología de Llanuras Dr. E. Usunoff (1): 279-286.
- Lexow, C. y Bonorino, A.G., 2003. Análisis del flujo no saturado en la zona no saturada loésica por medio de un trazador conservativo. *GEOACTA*, Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 28:1-7.
- Lexow, C., Morell, I. y Bonorino, A.G., 2005. Glyphosate mobility in piedmont soils of the austral ranges in the south of the Buenos Aires province. *Groundwater and Human Development* (E. Bocanegra, M. Hernández, E. Usunoff, Eds.). International Association of Hydrogeologist Selected Papers. BALKEMA Publishers, The Netherlands (6), Chapter 16: 199-206.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L., 1982. *Hydrology for Engineers* (3ed Ed.). Ed McGraw Hill, New York. 508 p.
- López Rodríguez, J.J. y Giráldez Cervera, J.V., 1997. Evaluación de la modificación de la recarga por cambios en la cobertura vegetal. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. AIH-GE, Las Palmas de Gran Canaria, 209-227 pp.
- Mascioli, S., Martínez, D. y Bocanegra, E., 2005. Determinación del coeficiente de partición de Zn en sedimentos loésicos y su utilización en la simulación de transporte reactivo. IV Congreso Argentino de Hidrogeología, Actas I: 221-230.
- Montgomery, J.H., 1996. *Groundwater Chemicals desk reference*. Lewis Publishers, Second editions. 1345 p.
- Simunek, J., van Genuchten, M. Th. and Sejna, M., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 241.
- Vrba, J. y Romijn, E., 1986. Impact of agricultural activities on groundwater. International Association of Hydrogeologist – Hannover: Heise. (Castany, Groba, Romijn Eds). Vol. 5, 332 p.