



SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

TRANSPORTE Y ATENUACION DE LIQUIDOS PERCOLADOS EN SUELOS NATURALES

WALTER WILMANS y CARLOS ESPINOZA

División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Chile, Casilla 228-3, Santiago, Chile

Fono: (56 2) 678 4390, Fax: (56 2) 6894171

wwilmans@ing.uchile.cl , espinoza@ing.uchile.cl

<http://cipres.cec.uchile.cl/~espinoza/>

RESUMEN

Los rellenos sanitarios son el método de disposición final de residuos sólidos más utilizado en la actualidad en Chile, por tal razón se vuelve imperante estudiar los efectos de éstos sobre el medio ambiente y en especial sobre los recursos hídricos subterráneos. En este trabajo se presentan resultados preliminares de un estudio que se aboca al análisis del movimiento de líquidos percolados en la zona no saturada del suelo y la posible atenuación de algunos compuestos contaminantes presentes en ellos. Se presenta un resumen de las experiencias de laboratorio (diseño, construcción y seguimiento) en 16 columnas de suelo, así como también resultados preliminares de la modelación numérica de flujo de líquidos percolados en la zona no saturada. Cabe señalar, que este proyecto se enmarca dentro del proyecto de investigación FONDECYT 1010526 y de una línea de investigación acerca del impacto de rellenos sanitarios sobre el medio ambiente.

ABSTRACT

Sanitary landfills are the most utilized method for final disposition of solid waste in Chile and Latin America. Because of this, it is very important to study their effects on the environment, especially the effect of leachate over groundwater resources. Preliminary results generated in a study, which focuses on the transport and natural attenuation of leachate on the unsaturated zone of a soil, are presented in this paper. A summary of laboratory experiments developed using 16 soil columns, over a one-year period, is presented. In addition, some preliminary results of a numerical model used to predict the migration of leachate on the soil column are also presented.



TRANSPORTE Y ATENUACION DE LIQUIDOS PERCOLADOS EN SUELOS NATURALES

1. Introducción

En la actualidad, el potencial de infiltración de líquidos lixiviados o percolados generados por la descomposición de la basura se controla a través de la impermeabilización del fondo del relleno sanitario mediante sellos de arcilla, a través del uso de materiales geotextiles altamente impermeables, y la mayoría de las veces a través de una combinación de ambas soluciones. Cada una de estas alternativas de impermeabilización tiene asociado un costo bastante elevado, el que se agrega al costo total de construir y operar el relleno sanitario. Esta protección pasiva se complementa con la recirculación del líquido percolado y con la construcción de plantas de tratamiento que permiten mejorar las condiciones de calidad de este líquido y cumplir con las normativas ambientales vigentes para su descarga.

En muchas situaciones reales el costo de la protección ambiental que otorga cada una de estas soluciones puede ser un porcentaje muy alto del costo total del proyecto, con lo cual éste se encarece más allá de las posibilidades de pequeñas ciudades, las que ven impedidas sus posibilidades de utilizar este método de disposición de residuos sólidos, por lo que mantienen vertederos o basureros que no cumplen con estándares mínimos de diseño.

Los elementos anteriormente descritos son los fundamentos de un proyecto de investigación en el que se está estudiando aspectos relativos al impacto de los líquidos percolados sobre el suelo y las aguas subterráneas cercanas a un sitio de disposición de residuos sólidos, de tal manera de evaluar la capacidad de los suelos naturales de atenuar o al menos retardar el avance de líquidos percolados descargados sobre ellos. Estos líquidos percolados podrían llegar hasta el suelo por diferentes eventos: un derrame accidental, la falla del sistema de impermeabilización, o simplemente debido a la inexistencia de sistemas de impermeabilización en el relleno. En todos los casos anteriores sería interesante conocer la longitud del avance del percolado en el suelo y la posible atenuación natural de contaminantes en él. Lo anterior permitiría evaluar el impacto real de la contaminación debido al líquido percolado y utilizar esta información para el diseño de nuevos sitios de disposición o el diagnóstico de los existentes.

2. Estudio Experimental

La instalación experimental utilizada consta de 16 columnas en PVC, cada una de las cuales tiene un diámetro interno de 10 cm y una altura de 1.5 m. Para llenar las diversas columnas se consideró ocho suelos de características diferentes, de tal manera que existan dos columnas similares para cada tipo de suelo. Las 16 columnas fueron preparadas de manera similar, colocando un estrato de gravilla en el fondo, seguido por un suelo de aproximadamente 1 m de largo. Sobre el suelo se colocó una capa de suelo arcilloso reconstituido en base a una mezcla de arena y bentonita. Finalmente, sobre el suelo se mantuvo una lámina de percolado (30 a 40 cm) para generar una carga hidráulica constante. Esta carga o altura de percolado es la máxima recomendada por la EPA en los EEUU para efectos de diseño de rellenos sanitarios.



Para los distintos suelos se dispone de la siguiente información: densidad aparente, humedad, permeabilidad saturada, curva granulométrica, curvas de retención (condición no saturada), capacidad de intercambio catiónico, ecotoxicidad (*Daphnia*, *Hydra* y *Lactuca* en condiciones iniciales) y recuento de bacterias heterótrofas.

Luego del armado se realizó un seguimiento semanal de las diferentes columnas el que incluyó: nivel de carga de percolado sobre la columna, volumen de percolado saliente, temperatura ambiente y densidad de percolado. Además, se monitoreó la calidad del percolado que se agregó, así como información a la salida de las distintas columnas.

3. Modelo Conceptual

El modelo conceptual para una columna experimental se presenta en el Cuadro 1. Como se mencionó anteriormente, existen dos capas de suelo. La capa de arcilla reconstituida y el suelo natural. El flujo no saturado a través de las capas de suelo se aseguró por la existencia de una zona inferior de alta permeabilidad que permite un drenaje libre, lo que impide la acumulación de líquido en los poros.

La carga de percolado se modeló como una infiltración por la parte superior de la columna, en forma de pulsos de precipitación efectiva en el tiempo, sobre la capa de arcilla. Esto último permite que los fenómenos de colmatación puedan ser despreciados, lo que a su vez permite utilizar conductividades hidráulicas promedio, fijas en el tiempo, para el estudio de flujo en la zona no saturada. Durante la duración de esta experiencia (600 días) se ha llevado un control semanal del volumen de percolado agregado a la columna, así como del extraído a través el fondo de la misma.

Cabe señalar que a pesar de todas las precauciones que se mantuvo durante la parte experimental de este trabajo, se observó que tanto en la parte superior de la columna de suelo como en los receptáculos ubicados en su parte inferior se produjo un cierto monto de evaporación de los líquidos percolados, lo que ha sido incorporado en el análisis de la información del balance de masas y volumétrico en cada una de las columnas. Para este propósito se estimó que la evaporación desde cada columna es un porcentaje de la evaporación del punto de referencia (Cerro Calán). El valor de la evaporación fue estimado durante la etapa de calibración de los modelos numéricos.

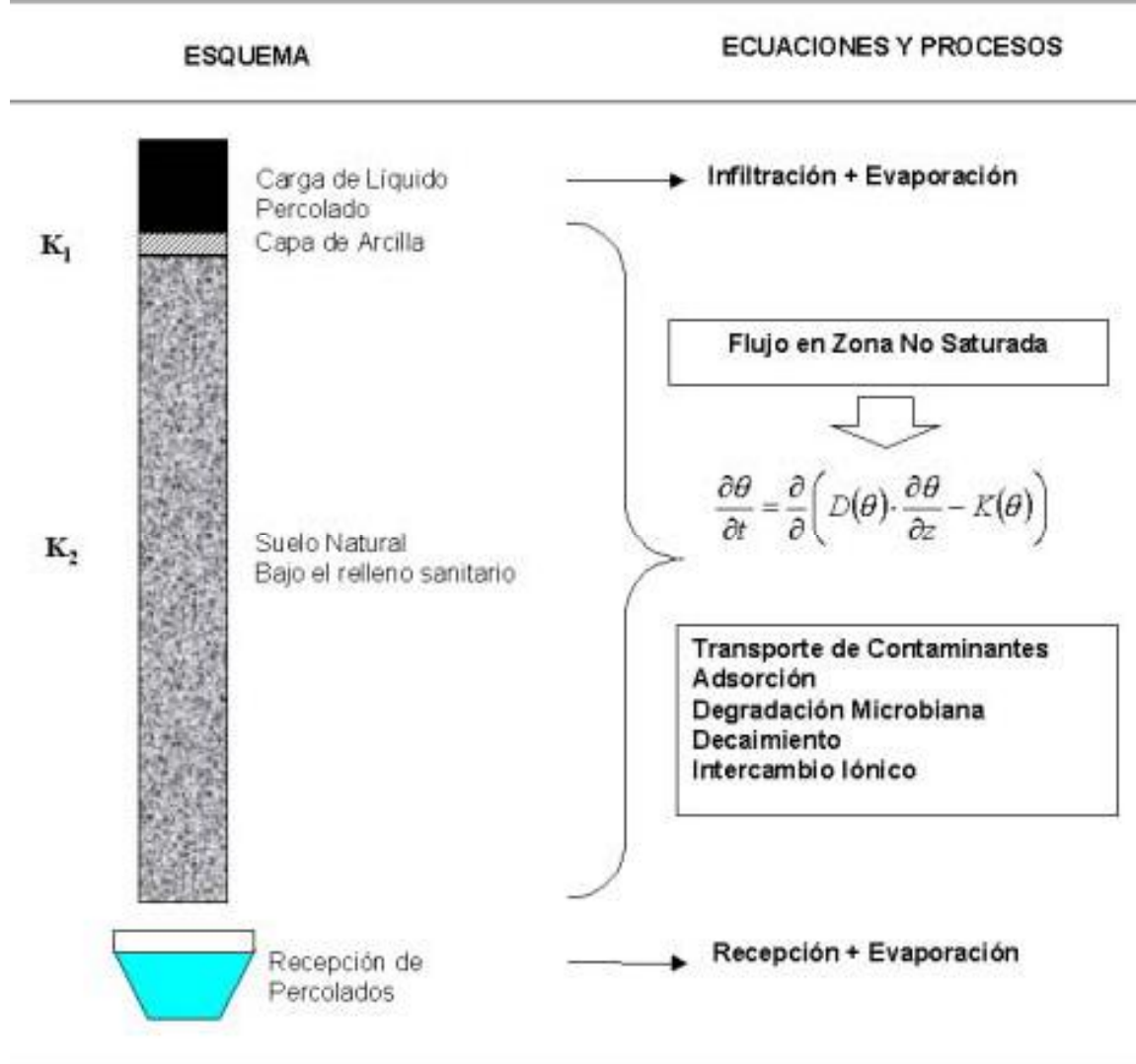
Uno de los supuestos importantes realizados fue que la densidad del líquido percolado es muy parecida a la del agua. Mediciones realizadas en terreno indican que la densidad del líquido percolado, varía entre 1.012 y 1.018 gr/cm³, lo que significa un error de entre 1.2% y 1.8%, lo que es despreciable y se puede incluir dentro de los errores de aforo y medición de niveles.

4. Modelo Numérico

El modelo numérico utilizado correspondió al HYDRUS1D (J. Šimůnek, M. Šejna and M. Th. Van Genuchten), que fue diseñado para analizar el flujo de agua, calor y solutos en medios porosos no saturados, parcialmente saturados y completamente saturados. El movimiento del agua y solutos en un medio poroso saturado se pueden representar a través de la ecuación de Richards (Ecuación 1) en función de la humedad (θ) y la succión(Ψ):



Cuadro 1 Modelo Conceptual Utilizado



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\theta) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (1)$$

La resolución de la ecuación de Richards, requiere que se conozcan previamente las curvas de retención de agua $\theta(\Psi)$ y la conductividad hidráulica en un medio poroso no saturado, $K(\Psi)$ o $K(\theta)$.

Para los diferentes suelos se construyeron experimentalmente las curvas de humedad versus succión (θ v/s Ψ). A continuación se procedió a ajustar, a los datos experimentales, el modelo de curva de retención de Van Genuchten de $m = 1-1/n$ parámetros (Ecuación 2). Posteriormente, se construyó la curva de humedad versus



permeabilidad (θ v/s K). Para el cálculo de la permeabilidad saturada, se utilizaron permeámetros convencionales.

$$\theta(\Psi) = \begin{cases} \theta_R + \frac{\theta_s - \theta_R}{\left[1 + (\alpha \cdot |\Psi|)^n\right]^m} & \text{para } \Psi < 0 \\ \theta_s & \text{para } \Psi \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e(\Psi) = \frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$K_r(\Psi) = S_e(\Psi)^\ell \cdot \left[1 - \left(1 - S_e(\Psi)^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (4)$$

Siendo θ_R la humedad residual (L^3L^{-3}), θ_s la humedad saturada (L^3L^{-3}), α inverso de la presión de entrada de aire (1/L) y Ψ corresponde a la succión (L), con n, m, y l constantes adimensionales.

5. Experiencias Realizadas

Para este artículo se eligieron dos columnas de experimentación: **Columna 1**, donde el suelo natural es una arena y la **Columna 2** que corresponde a un suelo arcillo arenoso. Las principales características de las columnas se presentan en la Tabla 1. Las condiciones iniciales de humedad de cada columna se presentan en la Tabla 2. En la Tabla 3, se presenta el ajuste de los parámetros para el modelo de curva de retención de Van Genuchten de $m = 1 - 1/n$ parámetros (Ecuación 2). En la Figura 1 se pueden apreciar las curvas de humedad versus succión y permeabilidad relativa versus succión para ambos suelos en estudio.

Tabla 1 Características Constructivas Iniciales Columna 1 y 2

Suelo	Δh Suelo [m]	ρ Suelo [Ton/m ³]	Δh Arcilla [m]	ρ Arcilla [Ton/m ³]	Peso Total [kg]	Largo Total [cm]
Columna 1	1.004	1.732	0.018	2.829	18.30	102.2
Columna 2	1.000	1.721	0.023	2.214	18.42	102.3

Tabla 2 Condiciones Iniciales del Suelo

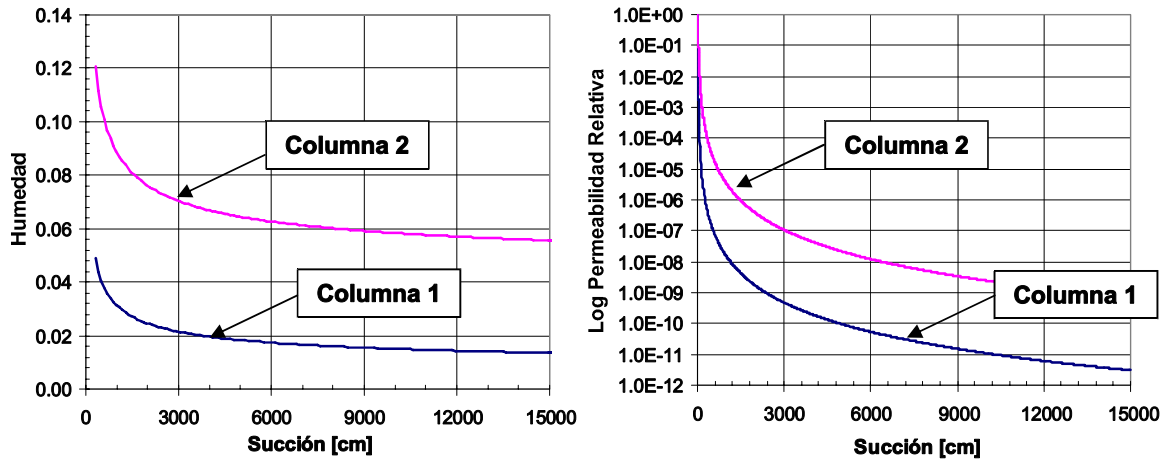
Suelo	θ_{medida} (%)	θ_{Modelo} (%)
Arcilla	15.0	15.0
Columna 1	10.0	10.0
Columna 2	6.92	6.92



Tabla 3 Parámetros Modelo de Retención de Van Genuchten de $m = 1-1/n$

Suelo	θ_r	θ_s	α	n	l
Arcilla	0.095	0.410	0.019	1.310	0.5
Columna 1	0.006	0.250	0.150	1.453	0.5
Columna 2	0.042	0.250	0.026	1.457	0.5

Figura 1 Curvas de Permeabilidad y Humedad Versus Succión



6. Calibración de Modelo de Flujo

Dentro de los parámetros utilizados en el proceso de calibración del modelo numérico para el flujo de líquido percolado tenemos los siguientes: permeabilidad saturada (punto de partida es la estimada en laboratorio), y los porcentajes de evaporación de percolado en la parte superior de la columna y del percolado recolectado en la parte inferior de la misma.

El proceso de calibración se llevó a cabo variando los parámetros antes señalados, compatibilizando un ajuste gráfico de los valores observados y calibrados de los volúmenes de entrada y salida a cada columna, y el valor del coeficiente de correlación (R^2). Los principales resultados de este proceso se presentan en las Figuras 2, 3, 4 y 5, siendo los escenarios de calibración los presentados en la Tabla 4.

Tabla 4 Escenarios de Calibración.

Columna N°	Escenario	Permeabilidad Arcilla (K_1) [cm/hr]	Permeabilidad Suelo (K_2) [cm/hr]	Evap Sup [%]	Evap Infe [%]	R^2 [%]
1	Escenario 1	0.03	5	0	27	99.83
	Escenario 2	0.03	5	5	22	99.82
2	Escenario 1	0.03	0.3	0	16	99.90
	Escenario 2	0.03	0.3	5	11	99.12

Al comparar los valores arrojados de la calibración de las permeabilidades con la literatura especializada, Tabla 5, tenemos que: suelo natural de la Columna 1, está



dentro del rango esperado para arenas finas, el suelo natural de la Columna 2 cabe dentro del rango arena limosa, y en el caso de la arcilla, que corresponde a una reconstitución de bentonita con arena en proporciones de 50% y 50%, tenemos que el valor está dentro de lo esperado, es decir entre limo y arcilla.

Tabla 5 Valores Típicos de Permeabilidades

Material	Kmin	Kmax
	[cm/hr]	[cm/hr]
Grava limpia	3600	
Arena Gruesa	36	3600
Mezcla de Arena	18	36
Arena Fina	3.6	18
Arena Limosa	0.36	0.72
Limo	0.036	1.8
Arcillas		0.0036

Fuente: Hidrología Subterránea. E. Custodio y M.R. Llamas. 1983

Tal como se muestra en las Figuras 2 a 5, se logra un ajuste bastante adecuado entre los volúmenes de salida medidos y los generados mediante el modelo de simulación. En el caso indicado en la Figura 2 se obtuvo que un monto de evaporación equivalente al 27% de la evaporación de referencia, permite ajustar en forma adecuada el volumen de salida medido y acumulado. Al analizar el efecto de la evaporación sobre el percolado que se acumula en la parte superior de la Columna 1 se observa que el mejor ajuste se logra para un valor equivalente al 5% de la evaporación de referencia, pero manteniendo la evaporación total (superior e inferior) en un monto igual al 27%. Un procedimiento similar fue aplicado a la Columna 2, para la cual se obtuvo un ajuste muy adecuado para un valor de evaporación total equivalente al 16% de la de referencia. Al incluir el efecto de la evaporación desde el percolado ubicado en la parte superior del suelo se mantiene el monto total de la evaporación (16% de la de referencia) con una

Todo lo anteriormente expuesto, sumado al buen ajuste gráfico y los altos coeficientes de correlación, valida el modelo de flujo que se ha planteado para este sistema experimental, el que se apoya en la información medida en dos columnas de experimentación a lo largo de casi 600 días de experimentación continua.

7. Discusión de Resultados

De las diferentes simulaciones presentadas anteriormente se puede apreciar claramente el buen ajuste y comportamiento del modelo de flujo de líquido percolado a través de un medio poroso no saturado, lo cual valida los supuestos realizados para la modelación conceptual y numérica.

Se puede apreciar que la evaporación en la parte inferior de la columna es la que más influye dentro del comportamiento de los volúmenes salientes. De los datos experimentales de infiltración, se aprecia que la permeabilidad en el tiempo se ve afectada, produciéndose una constante y continua disminución de los volúmenes entrantes a la columna para una misma carga hidráulica, tendiendo a cero para tiempos grandes.



Figura 2 Columna 1. Escenario 1. (Evap. Sup. = 0%, Evap. Inf. = 27%)

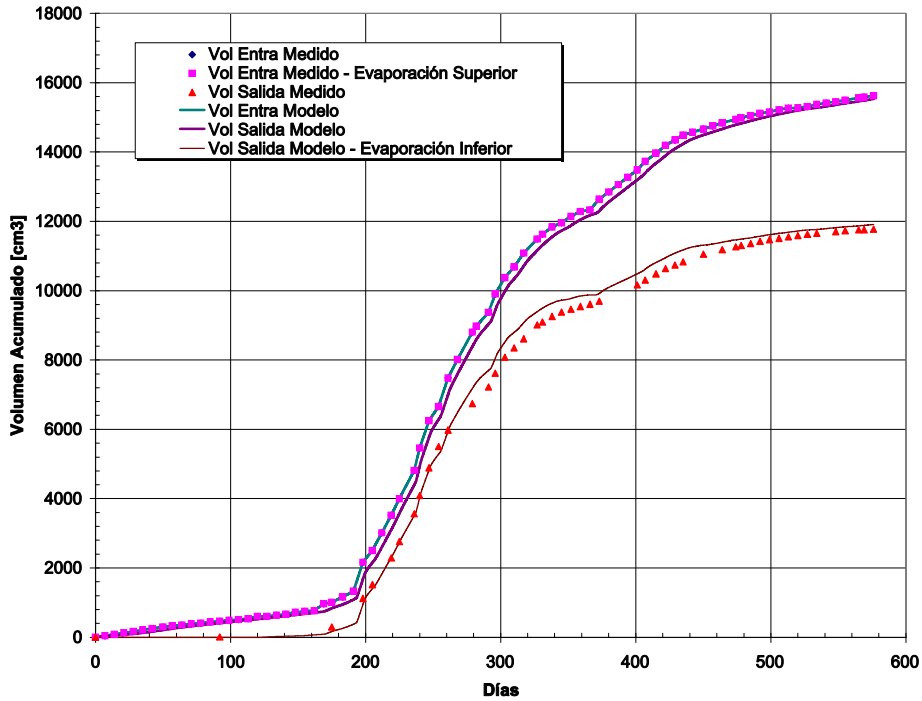


Figura 3 Columna 1. Escenario 2. (Evap. Sup. = 5%, Evap. Inf. = 22%)

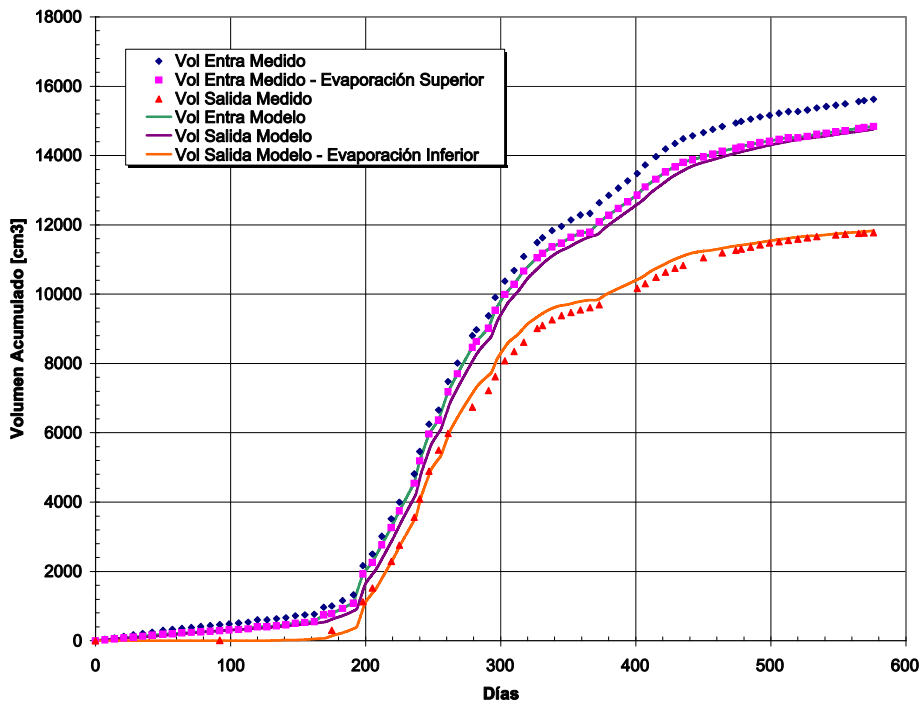




Figura 4 Columna 2. Escenario 1. (Evap. Sup. = 0%, Evap. Inf. = 16%)

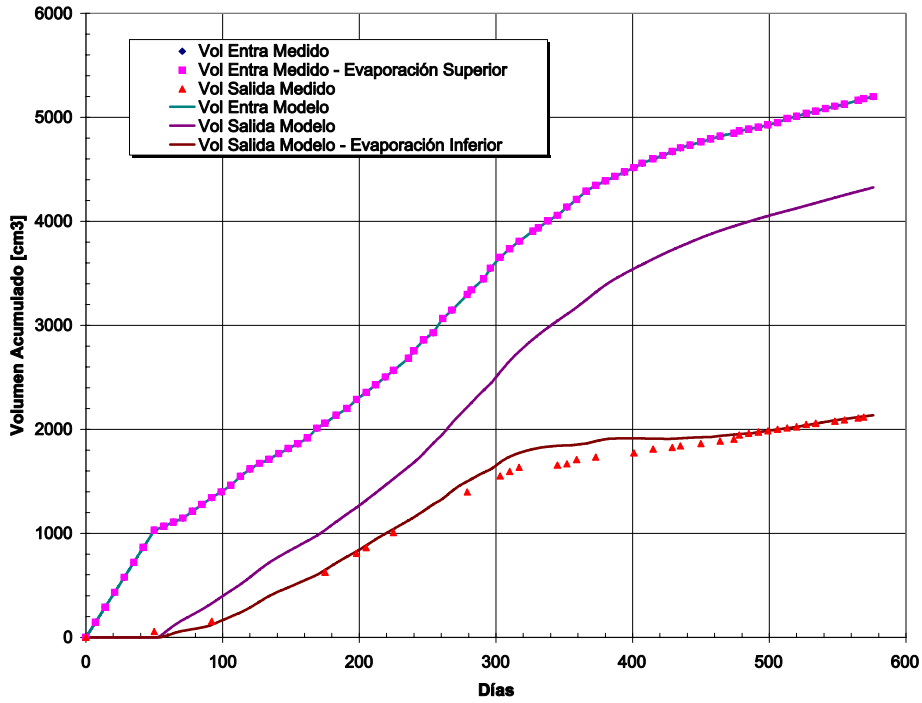
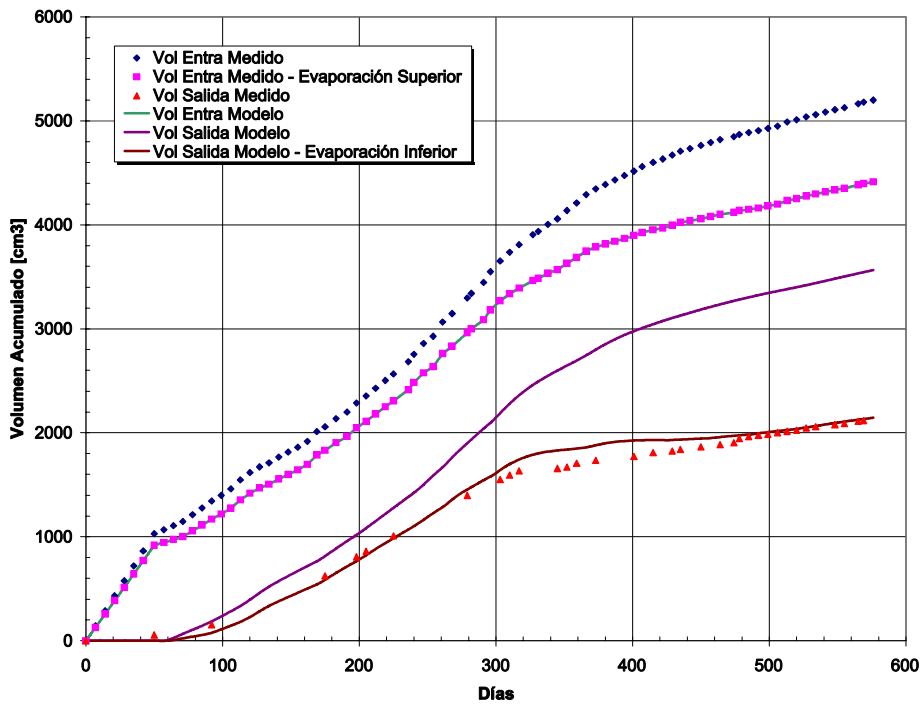


Figura 5 Columna 2. Escenario 2. (Evap. Sup. = 5%, Evap. Inf. = 11%)





La disminución de la tasa de infiltración en el tiempo da cuenta de una colmatación de los estratos permeables, posiblemente debido a la filtración de sólidos suspendidos en los primeros estratos de suelo. Este mecanismo de colmatación se presenta como un arma de defensa del acuífero frente a la contaminación por líquidos percolados y estaría directamente relacionada con la carga de sólidos suspendidos presente en el líquido.

Dentro de las labores futuras en este proyecto tenemos:

- Calibrar y modelar modelo numérico de transporte de contaminante en la zona no saturada, utilizando tasas de decaimiento lineales o de primer orden, que simulen degradación biológica y procesos de adsorción.
- Realizar una aplicación práctica con condiciones naturales de precipitación, carga de líquido percolado y características física y químicas naturales de algún sitio que se proyecte o este operando, utilizando un modelo en una dimensión (HYDRUS 1D).
- Evaluar la incorporación de una ley para describir el proceso de colmatación de los estratos de suelo a través del tiempo e incorporarla dentro del modelo de simulación del flujo de percolado en la columna de suelo.

Agradecimientos. – *Los autores desean agradecer el financiamiento de esta investigación a través del proyecto Fondecyt 1010526. Asimismo, los autores desean agradecer el apoyo de la empresa HIDROLAB Laboratorios de Agua en todo lo que respecta a las actividades experimentales de este proyecto.*

8. Bibliografía

- Alegría, X et all. “Estudios de Arcillas Como Sello de Fondo en los Rellenos Sanitarios”. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Santiago. Chile. 1992.
- Bruder-Hubscher, V., F. Lagarde, M.J.F. Leroy, C. Coughanowr and F. Enguehard. “Utilization of Bottom Ash in Road Construction: Evaluation of Environmental Impact”. Waste Management & Research. Official Journal of ISWA (International Solid Waste Association). Volume 19. Number 6. December 2001.
- Holsteiner, R., ÖFPZ, AU, F. Berg, K.A. Pihl, DRI, DK, O. Hjelm, VKI, DK, et all. PROJECT ACRONYM: ALT-MAT: Alternative materials in road construction. Contract No.: RO-97-SC.2238. Febrero 1999.
- Olivares, C. Generación de Líquidos Percolados en Rellenos Sanitarios. Tesis para optar al Grado de Magíster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile. 2003.
- Wilmans, C. Estudio Experimental de la Atenuación Natural de Líquido Percolado en Suelos. Tesis para optar al Grado de Magíster en Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Universidad de Chile. 2003.