

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

MODELO DE JARDÍN DE INFILTRACIÓN BASADO EN LA ECUACIÓN DE RICHARDS BIDIMENSIONAL, USANDO VOLÚMENES FINITOS

JAZMÍN ARAVENA I.¹
ALEJANDRO DUSSAILLANT J.²

4 RESUMEN

El control de fuentes es el principio fundamental del manejo sustentable de las aguas lluvias. Los jardines de biorretención son una alternativa de infiltración que provee no sólo de control de volumen, calidad del agua y recarga al agua subterránea, sino que provee de múltiples beneficios paisajísticos, ecosistémicos y económicos. El cumplimiento de estos múltiples objetivos requiere del conocimiento del funcionamiento integral de este tipo de dispositivos, tanto en la distribución de agua para eventos y el balance de largo plazo, así como herramientas para su diseño. Para ello, se ha construido una herramienta de modelación, basada en la ecuación de Richards con un algoritmo en volúmenes finitos bidimensional. Éste permite la simulación de condiciones de borde alternantes, de carga, flujo y encharcamiento; siendo esta última una condición no abordada por modelos bidimensionales disponibles y que además permite reproducir distribuciones no homogéneas de agua, así como heterogeneidades de tipo estratos o parches en el subsuelo, y también terrazas en la superficie, para estimar sus efectos en la infiltración y percolación profunda. Además, la metodología utilizada tiene un algoritmo conservativo, lo que representa una ventaja si se lo compara con métodos populares tradicionales de diferencias y elementos finitos. Se presentarán validaciones del modelo con resultados de la literatura y con datos experimentales de un jardín de biorretención instalado en un lisímetro (de dos estratos de suelo preparado, con una depresión de 10 cm, plantado con especies nativas y que recibe aguas lluvias de una techumbre), así como simulaciones para diferentes diseños de jardines de infiltración.

¹Magíster en Ciencias de la Ingeniería PUC, estudiante Ph.D. U Nevada-Reno - mail: jearaven@uc.cl

²Ph.D., Profesor Asociado, Departamento de Ing. Civil, Universidad de Concepción - mail: ale.dussailant@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La urbanización se ha ligado a alteraciones hidrológicas y deterioro de la calidad de los recursos hídricos. El desarrollo urbano altera el régimen hídrico, lo que lleva a la modificación del aspecto físico e impactos ecológicos, cambios en el uso del suelo y alteraciones del mismo (Belhadj *et al.*, 1995), incremento de la proporción de área impermeable y disminución del almacenamiento de agua en el suelo. Como resultado, hay un aumento en los gastos máximos que escurren por la cuenca y, eventualmente, inundación de las zonas que se encuentran en las partes más bajas de la misma. Otra consecuencia de esta dinámica poblacional, es la disminución de la recarga del acuífero (Ku *et al.*, 1992), por la impermeabilización de las superficies infiltrantes y por la extracción del recurso para el uso de la población, ya sea para consumo, riego u otro tipo de actividades. Además, se produce un incremento en la erosión de cauces, transporte de sedimentos y aumento del lavado de compuestos tóxicos: metales pesados (Appleyard, 1993; Mikkelsen *et al.*, 1994; Mikkelsen *et al.*, 1996; Mikkelsen *et al.*, 1997; Mason *et al.*, 1999), pesticidas, lubricantes y nutrientes como nitrógeno y fósforo (Pitt, 1996; Bucheli *et al.*, 1998; Koob *et al.*, 1999; Lloyd *et al.*, 2002; Morzaria-Luna *et al.*, 2004).

Por muchos años el manejo de aguas lluvias sólo ha considerado su transporte desde las zonas generadoras hacia cauces naturales, a través de colectores, de manera de retirar el agua del sitio lo más rápido posible (Coffman, 1995). El aumento de la escorrentía genera problemas en los colectores existentes, los que, al ser sobrepasados en sus condiciones de diseño, ocasionan inconvenientes como inundaciones de calles, anegamientos de casas y destrucción o deterioro de zonas públicas. El sobredimensionamiento de colectores no parece ser una solución sustentable en el tiempo, debido al alto costo que significaría y considerando que la mayor parte del tiempo serían utilizados por debajo de condiciones de diseño (Butler y Parkinson, 1997).

El control de fuentes es el principio fundamental del manejo sustentable de las aguas lluvias, reducir los problemas causados por ellas en el punto de generación a través del uso de estructuras y estrategias no estructurales de manejo. Una de las grandes ventajas del control de fuentes es la reducción de la escorrentía, tanto en términos de volúmenes como de caudales máximos, esto conlleva a la reducción de la necesidad de inversión en estructuras aguas abajo. Entonces, son parte de una estrategia integrada de solución al manejo de aguas lluvias, más que la aplicación individual de ellas. (Göbel *et al.*, 2004).

La gestión tradicional del agua lluvia, basada fuertemente en el almacenamiento, no mitiga el descenso del agua subterránea y del flujo base, que resulta del bombeo para usos humanos y de la reducción de la recarga por la impermeabilización del suelo (Ferguson, 1990; Huhn y Stecker, 1997; Fischer *et al.*, 2003). De hecho, las prácticas de infiltración y de recarga artificial se están haciendo cada vez más interesantes como una estrategia de manejo del agua subterránea (Alley *et al.*, 2002), pero hace falta investigación sobre la recarga localizada en zonas urbanas (Lerner, 2002). Las zonas de biorretención o jardines de infiltración son una nueva alternativa en pos de la recarga artificial.

La modelación del fenómeno de infiltración se realizó utilizando la ecuación de Richards (1931), para un dominio con condiciones de borde conocidas. Se utilizó un enfoque de modelación continua de las condiciones de precipitación, siendo posible, en el caso de que así se requiriese, la modelación de eventos de lluvia.

Lo anterior se fundamenta en los objetivos de los jardines; es decir, para poder afirmar que se está maximizando la recarga al acuífero, es necesario obtener un balance en el largo plazo de sucesos puntuales, como son los eventos de lluvia. Así es necesario contar con información de tormentas, para poder reflejar el comportamiento general de las celdas vegetadas y contabilizar posteriormente el volumen de agua que finalmente logró infiltrarse en el suelo.

Se propone la utilización de un modelo bidimensional, ya que permite dar flexibilidad al diseño de jardines, al posibilitar, por ejemplo, diferentes geometrías como podrían ser terrazas; además de la existencia de estratos o sectores no homogéneos, cuya modelación no podría llevarse a cabo en un modelo unidimensional. Otra ventaja que posee, es la posibilidad de analizar distribuciones no simétricas de estímulos, tales como, caudal de riego asimétrico.

2. JARDÍN DE INFILTRACIÓN

El jardín de infiltración es una superficie vegetada, construida para recolectar e infiltrar el agua de lluvia proveniente de áreas impermeables. En general, consiste en una depresión pequeña de unos 10-20cm de profundidad, con un área mucho más pequeña que la superficie impermeable que conecta, de suelo preparado que permite la rápida infiltración del agua lluvia y un tratamiento parcial de la misma. El objetivo de diseño de estos dispositivos es maximizar la infiltración y/o la recarga; por ejemplo, en sectores del medio oeste de los Estados Unidos, dependientes del agua subterránea, se diseñan para maximizar la recarga potencial al acuífero (Dussaillant *et al.*, 2004). Su operación es similar a la de zanjas y estanques de infiltración, pero difieren en tamaño y son visualmente agradables y simples de construir (Kercher y Zedler, 2004; Dussaillant *et al.*, 2005).

El jardín posee un perfil de suelo previamente diseñado consistente en 2 capas (Figura 1). La primera capa es una zona de raíces, activa biológicamente que mantiene la infiltrabilidad y la porosidad del suelo. Las raíces crean macroporos que actúan como caminos preferenciales para el agua, lo que permite aumentar la infiltración. Los sólidos suspendidos acumulados en las superficies de los poros del suelo o en los primeros centímetros, provocan la colmatación del suelo (Dechesne *et al.*, 2004), sin embargo, en los sistemas de biorretención el crecimiento y degradación de raíces ayuda a mantener la porosidad natural del suelo, además de incrementar la actividad biológica (Davis *et al.*, 2001; Winogradoff, 2002; Davis *et al.*, 2006) impidiendo así que el suelo se colmate por acumulación de finos; nótese que esta misma acción puede ser provocada por lombrices y otros organismos que viven junto a las especies vegetales. El uso de vegetación, además, parece ser muy efectivo atrapando y barriendo contaminantes (Barraud *et al.*, 1999; Ammann *et al.*, 2003), por lo que se puede deducir que la intervención de factores hidráulicos, físicos y biológicos determinan directamente el desempeño de la técnica alternativa (Parkinson y Mark, 2004).

La capa inferior es una zona de almacenamiento, compuesta por arena, que permite acumular temporalmente el volumen captado por el jardín. Su rol junto con el de la depresión, es importante, ya que potencia la recarga, y aminora la ocurrencia de condiciones anóxicas para las plantas.

Las plantas del jardín ayudan a mejorar la calidad del suelo, ya que estabilizan, dan estructura y coherencia al mismo, atenúan la velocidad del flujo y permiten la sedimentación de partículas suspendidas, previniendo la erosión. Las herbáceas, el césped y la vegetación del suelo actúan como filtros que reportan eficiencias de sedimentación de sólidos suspendidos en el rango de 25-80%, dependiendo de los sólidos del agua lluvia (Barrett *et al.*, 1998; Wright, 2002; Fletcher *et al.*, 2003).

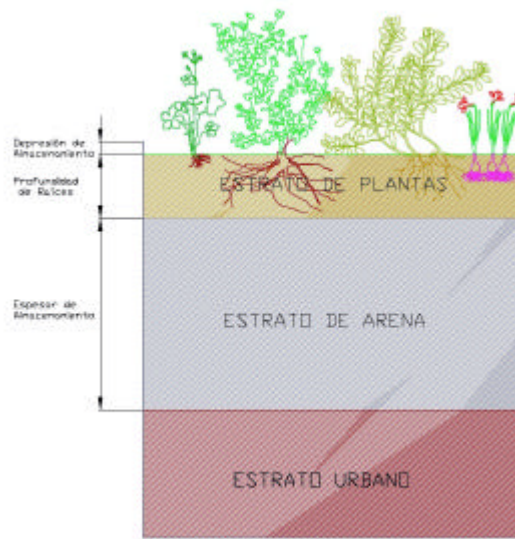


Figura 1: Perfil de Suelo de un Jardín de Infiltración.

3. MÉTODOS

3.1 Modelo numérico

La típica expresión diferencial de la ecuación de Richards (1931), que modela la infiltración de agua en medios porosos, válida tanto para flujo saturado como para flujo en la zona vadosa, se puede escribir:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] + S_w \quad (1)$$

De manera generalizada, la ecuación de Richards (1931) se puede escribir, de forma integral, como sigue:

$$\int_{\forall} C(h) \frac{\partial h}{\partial t} d\forall - \int_{\forall} \nabla \cdot (K(h) \nabla H) d\forall + \int_{\forall} S_w d\forall = 0 \quad (2)$$

La idea básica del esquema de volúmenes finitos es la siguiente: cuando se integra la ecuación diferencial parcial en cada volumen de control, se pueden aproximar los flujos a través de los bordes del dominio. El dominio se divide en un número de volúmenes de control de manera tal que un volumen de control rodea a cada punto de la malla del dominio. La ecuación diferencial a resolver es integrada sobre cada volumen de control, de esta manera se obtiene una ecuación conservativa. Lo atractivo de la formulación en volúmenes finitos es que la solución implicaría la conservación integral de masa, moméntum y energía, tanto para los volúmenes de control como para el dominio completo (Versteeg y Malalasekera, 1995).

Si se considera un volumen de control, Ω , con condiciones de bordes $\partial\Omega$ y vector normal unitario, \hat{n} , positivo hacia fuera, la formulación integral de la ecuación de Richards aplicando el teorema de Green a la ecuación es:

$$\int_{\Omega} C \frac{\partial H}{\partial t} d\Omega - \int_{\partial\Omega} (K \nabla H) \cdot \hat{n} ds + \int_{\Omega} S_w d\Omega = 0 \quad \text{en } (x, z) \in \Omega, \text{ para } t > 0 \quad (3)$$

donde las condiciones de borde del dominio pueden ser de la forma:

$$\begin{cases} K \nabla H = q_{borde}(t) \\ \quad \quad \quad \acute{o} \\ H = H_{borde}(t) \end{cases} \quad \text{si } (x, z) \in \partial\Omega, \text{ para } t > 0 \quad (4)$$

Si se considera un esquema de segundo orden,

$$\int_{\Omega} g(\cdot) d\Omega = g_i \cdot \Delta\Omega_i \quad (5)$$

donde g_i es el valor de la función evaluada en el centroide del volumen de control, se tendrá:

$$C_i \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \Big|_i \cdot \Delta\Omega_i + \sum_{\partial\Omega_i} \underbrace{-K \nabla H \cdot \hat{n}}_{f(H)} \cdot \partial\Omega_i + S_{wi} \cdot \Delta\Omega_i = 0 \quad (6)$$

donde

$$f(H) = -K(H) \nabla H \quad (7)$$

Nótese que los términos en el volumen de control se evalúan en el centroide correspondiente, mientras que los términos de flujos se evalúan en los bordes del dominio, por lo que la sumatoria tendrá tantos términos como bordes tenga el volumen de control utilizado.

Para el caso bidimensional, donde se tienen flujos en 2 direcciones, el término del gradiente contiene un elemento más y es de la forma:

$$\nabla H_{i-\frac{1}{2},j}^n = (1-d) \left(\frac{H_{i,j}^n - H_{i-1,j}^n}{\Delta z} \right) + d \left(\frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta z} \right) \quad (8)$$

$$\nabla H_{i,j-\frac{1}{2}}^n = (1-d) \left(\frac{H_{i,j}^n - H_{i,j-1}^n}{\Delta x} \right) + d \left(\frac{H_{i,j}^{n+1} - H_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x} \right) \quad (9)$$

Luego:

$$C_{i,j} \cdot H_{i,j}^{n+1} = C_{i,j} \cdot H_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\nabla C_i} \left(F_{i+\frac{1}{2},j}^n - F_{i-\frac{1}{2},j}^n + F_{i,j+\frac{1}{2}}^n - F_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) + \Delta t \cdot S_{wi,j}^n \quad (10)$$

donde

$$\begin{array}{c} H_{j,i}^n \rightarrow x \\ \downarrow \\ z \end{array}$$

Desarrollando los términos presentados en la sección anterior y agrupando según la siguiente notación:

$$\begin{array}{lll} N = j+1, i & E = j, i+1 & P = j, i \\ S = j-1, i & W = j, i-1 & \end{array}$$

El sistema lineal a resolver es de la forma:

$$\begin{aligned} & \left(C_{j,i} + \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta z} \cdot a_P \right) \cdot H_{j,i}^{n+1} + \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta z} \cdot \left(a_N \cdot H_{j+1,i}^{n+1} + a_S \cdot H_{j-1,i}^{n+1} + a_E \cdot H_{j,i+1}^{n+1} + a_W \cdot H_{j,i-1}^{n+1} \right) \dots \\ & = C_{j,i} \cdot H_{j,i}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot \Delta z} \cdot b_1 + \Delta t \cdot S_{wj,i}^n \end{aligned} \quad (11)$$

Se observa que la matriz del sistema lineal a resolver es de tipo bandada con 5 diagonales diferentes a cero.

La condición de borde superior es fluctuante entre:

- i. **Condición Tipo Dirichlet:** se enfrentará este tipo de condición cuando el agua empiece a apozarse en la depresión del jardín, es decir, a partir del tiempo de encharcamiento. Se tendrá en este caso una condición de carga constante para el nodo superior, pero variable en el tiempo.

$$H_{j,i}^k = d^k + z_{j,i} \quad (12)$$

donde d^k es la altura de agua en la depresión del jardín y $z_{j,i}$ es la cota del nodo de la superficie.

- ii. **Condición Tipo Neumann:** se enfrentará este tipo de condición, para tiempos anteriores al encharcamiento y posteriores al drenaje. El flujo será constante e

igual a la tasa de ingreso de agua al sistema, es decir, intensidad de lluvia más caudal proveniente del techo (q_o^{k+1}). Así

$$q_o^{k+1} = -K \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \quad (13)$$

$$q_o^{k+1} = -K_{J-\frac{1}{2},i}^{k+1} \left[\frac{H_{J,i}^{k+1} - H_{J-1,i}^{k+1}}{\Delta z} \right] \quad (14)$$

donde $q_o^{k+1} = pp + q_{techo}$, es conocido. Luego

$$H_{J,i}^{k+1} = H_{J-1,i}^{k+1} + \Delta z \cdot \frac{q_o^{k+1}}{K_{J-\frac{1}{2},i}^{k+1}} \quad (15)$$

Nótese que dado que la ecuación de flujo es altamente no lineal, se debe resolver de manera iterativa. Se optó por la utilización de un método de bisección, para resolver la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en cada nodo superior del dominio. La elección de esta metodología se debe a las discontinuidades en la derivada de las relaciones constitutivas del suelo, lo que impide la utilización de métodos más sofisticados como, por ejemplo, Newton.

Para la condición de borde inferior, se propone una modelación del tipo flujo libre, es decir, flujo gravitacional equivalente a la permeabilidad del suelo. El modelo computacional, admite además otros tipos de condiciones

Si se asume la existencia de un punto fijo en el dominio Ω , para el conjunto de ecuaciones considerado, se puede estudiar la convergencia de este enfoque, a partir del sistema de ecuaciones algebraicas obtenido como consecuencia del proceso de discretización - este método es conocido como iteraciones de punto fijo o de Picard..

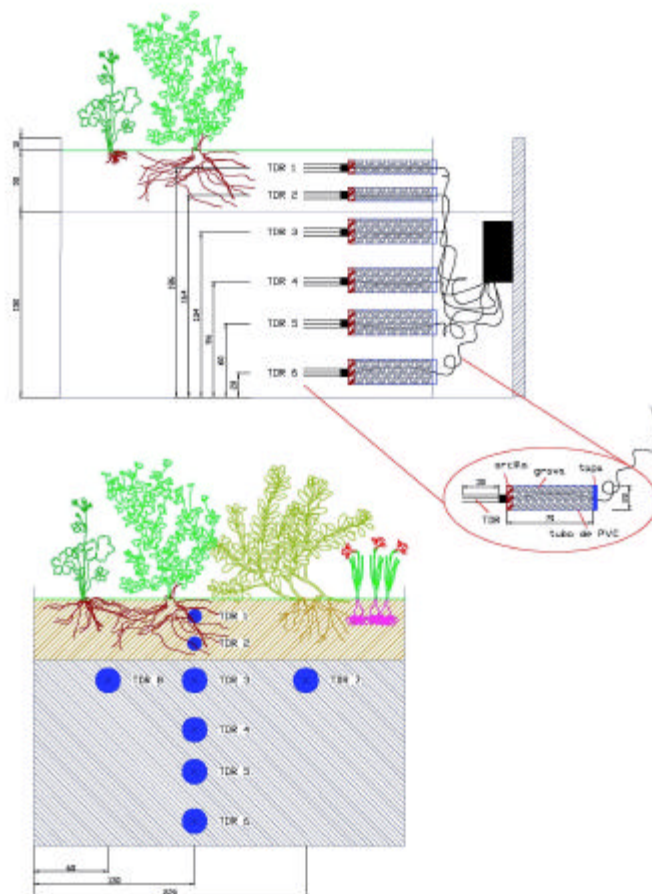
3.2 Experimento de terreno

Se construyó un lisímetro de hormigón armado (Figuras 2 y 3) con las siguientes características: celda impermeable 2,1 metros de profundidad, dividida en dos secciones, 60cm de pared de acrílico transparente y 1,5 m de hormigón, con área de 2,0 x 3,0 m²;; estrato de arena 1,5m espesor, en la zona más baja, con pared de hormigón; otro estrato de mezcla de 50% de tierra de hojas con 50% de arena, con una profundidad de 50cm; el cual fue plantado con especies nativas; una depresión de almacenamiento de unos 10cm de altura en el sector sobrante de acrílico.

Para evitar el flujo preferencial de agua por los lados de la caja de hormigón, se intercalaron anillos de arcilla por los costados del lisímetro, en los distintos estratos, de manera que el agua que tomase este camino, fuese interrumpida en su paso y desviada hacia las zonas más centrales del mismo.



Figura 2: Lisímetro Experimental Instalado en San Joaquín (Abril, 2005).



* Todas las unidades en cm.

Figura 3: Ubicación de los sensores de humedad.

4. VALIDACIÓN DEL MODELO

4.1 Validación con datos de la literatura

Para la validación de la condición de carga constante, se utilizó el problema propuesto por Celia (Celia *et al.*, 1990), el cual considera una columna de suelo de New Mexico, con relaciones constitutivas de van Genuchten, donde los parámetros toman los siguientes valores:

Tabla 1: Parámetros de van Genuchten, Celia.

Parámetros	Suelo New Mexico
q_s	0.368
q_r	0.102
$a_v (cm^{-1})$	0.0355
n	2.00
$K_s (cm s^{-1})$	0.00922

Fuente: (Celia *et al.*, 1990)

Sometida a condiciones de carga conocida, $h_{superior} = -75$ cm y $h_{inferior} = -1000$ cm. La condición inicial de la columna de suelo, de $L = 100$ cm, es $h_o = -1000$ cm. Con discretización espacial de 100 nodos, y discretización temporal $\Delta t = 10$ s, para un tiempo de simulación de 24 horas.

Los resultados de este problema, de distintos modelos se presentan en la Figura 4:

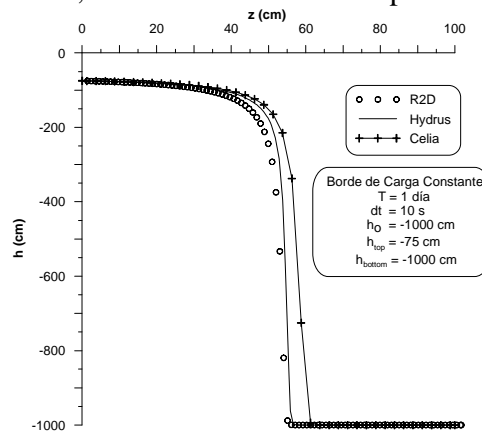


Figura 4: Perfil de presiones, problema de Celia.

Nótese que si bien existen diferencias entre los diferentes modelos, estas no son significativas y pueden tener su origen en el método utilizado para la resolución de la ecuación de Richards: Celia *et al.* (1990) resuelven la ecuación utilizando diferencias finitas; Hydrus con elementos finitos; y R2D utiliza volúmenes finitos para el mismo efecto.

Para la validación de la condición de flujo constante, se utilizó el problema propuesto por Pan & Wierenga (Pan y Wierenga, 1995), el cual considera una columna de suelo estratificado, con 2 tipos de suelo tipo Berino, uno de arena y otro de arcilla, sometidos a una condición de borde superior de flujo constante, igual a $q_{top} = 1.25 \text{ cm h}^{-1}$, y una condición de flujo nulo en el fondo. El suelo se prepara de la siguiente manera: suelo arenoso entre 0 y 60 cm y entre los 90 y 100 cm y un estrato arcilloso entre los 60 y 90 cm. Los parámetros de van Genuchten, son los que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros hidrodinámicos suelo tipo Berino, Pan & Wierenga.

Parámetros	Arena Berino	Arcilla Berino
q_s	0.3658	0.4686
q_r	0.0286	0.1060
$a_v (\text{cm}^{-1})$	0.0280	0.0104
n	2.2390	1.3954
$K_s (\text{cm h}^{-1})$	22.54	0.5458

Fuente:(Pan y Wierenga, 1995)

La condición inicial de la columna de suelo, de $L = 100 \text{ cm}$, es $h_o = -1000 \text{ cm}$. Con discretización espacial de 100 nodos, y discretización temporal $\Delta t = 0.001 \text{ h}$, para un tiempo de simulación de 5 horas.

Los resultados de este problema, de distintos modelos se presentan en la Figura 5:

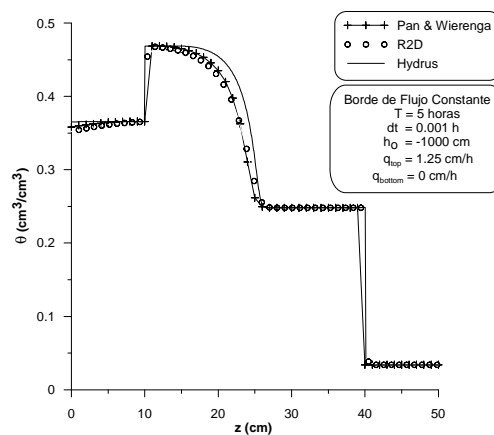


Figura 5: Perfil de humedades, problema de Pan & Wierenga.

Nótese que existe un buen ajuste entre los diferentes modelos, sin embargo, el ajuste obtenido por el modelo Hydrus no es tan bueno como el que se obtiene con el modelo propuesto de volúmenes finitos. Las diferencias que aquí se presentan tienen su origen en los balances de masa obtenidos.

Si se considera el balance de masa del modelo, los errores cometidos por el modelo de volúmenes finitos implementado, son mucho menores que los del modelo de elementos finitos (Figura 6) esto debido a la naturaleza integral del método utilizado.

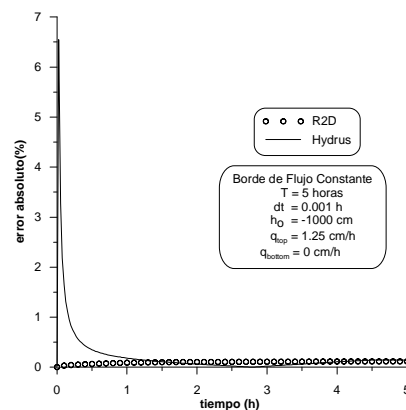


Figura 6: Error absoluto porcentual en el balance de masa, problema de Pan & Wierenga.

5.2 Validación con datos del lisímetro experimental

Si bien se realizaron experimentos con lluvia artificial controlada, se reporta aquí un evento de lluvia real, acontecido entre los días 12 y 13 de octubre de 2006. El episodio se caracterizó por una amplia variedad de intensidades y un gran volumen de agua entregado.

La lluvia registrada en el pluviógrafo, instalado en San Joaquín, es la que se presenta en la Figura . Se considera que el evento de lluvia se extiende entre las 15:35 del día 12 de octubre y finaliza a las 23:15 del día siguiente, aportando 59,26 mm de precipitación a lo largo de su duración. El jardín se conecta al techo del DIHA, el que tiene un área de 116m², en comparación con los 6m² del jardín.

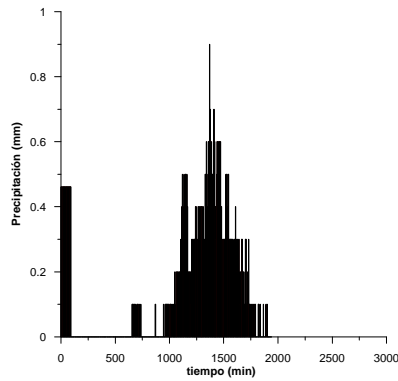


Figura 7: Lluvia 12-13 Octubre de 2006, San Joaquín.

Dado lo intenso del evento y considerando que el caudal entregado al jardín, por la desconexión del techo, hizo que los volúmenes aportados fuesen 21 veces mayores, se registraron inconvenientes en el drenaje del jardín, lo que provocó que durante varias horas funcionase de manera ahogada; y por tanto influyera de manera no deseada sobre la condición de borde inferior del dominio. Sin embargo, una vez que las intensidades de lluvia amainaron, el drenaje pudo volver a su normal funcionamiento.

Se procedió a la modelación del evento de lluvia, utilizando los valores de parámetros de suelo obtenidos en el laboratorio y la condición inicial entregada por los TDR. Nótese que para representar las succiones en los 2 estratos, se consideró un ajuste lineal de dos tramos en el perfil de tierra y un perfil lineal simple en el caso del estrato de arena. Posteriormente se compararon los resultados de la simulación con las mediciones de terreno. Se presentan resultados típicos:

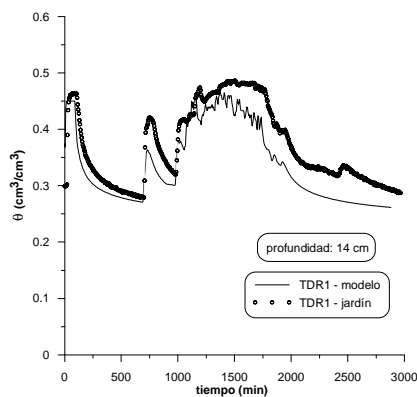


Figura 8: Comparación de contenidos de humedad, 14cm de profundidad.

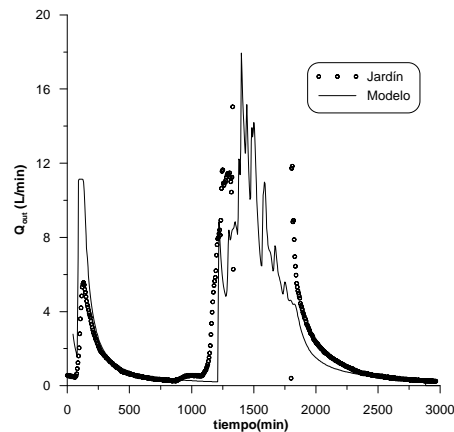


Figura 9: Comparación Drenajes del sistema, caudal de salida.

El drenaje del lisímetro se logra modelar de buena manera (Figura 9), durante el tiempo en que está funcionando. Dado que en los períodos en los cuales estuvo sumergido bajo el agua no se contó con registros, no se puede comparar el caudal en dicho intervalo de tiempo. Para el cálculo del volumen acumulado drenado, en el caso de jardín, se considero que el flujo entre los minutos 1300 y 1800 se mantuvieron constantes e iguales al último caudal registrado, esto debido a que el ahogo del caudalímetro de cazoleta impidió el registro de los caudales de drenaje.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo consistió en el estudio de procesos que interfieren en la modelación de un jardín de infiltración, para lo cual se implementó un modelo bidimensional en volúmenes finitos, que permitió modelar el comportamiento de esta técnica alternativa, inicialmente de modo unidimensional.

El modelo obtenido resultó mejorar los balances de masa que se obtuvieron en la comparación de ejemplos de la literatura, siendo los errores cometidos mucho menores que los reportados por modelos basados tanto en diferencias como en elementos finitos.

Se desarrolló un modelo novedoso, ya que la mayoría de los acercamientos a este tipo de problemas se había realizado con otros métodos numéricos. El modelo permite caracterizar el perfil de suelo modelado, tanto en condiciones de presión, como contenido de humedad, en el tiempo y permite mediante un post-procesamiento ver la evolución de dichas características en la malla del dominio, como en nodos de observación definidos en la malla por el usuario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer el apoyo financiero brindado por los proyectos Fondecyt 1050668, Fundación Andes, y DIPUC. Así como el apoyo del Depto de Ingeniería Hidráulica de la P. Universidad Católica de Chile, en particular Bonifacio Fernández, Rodrigo Cienfuegos y Pablo Pastén, así como la ayuda desinteresada de muchas personas que resultaría largo listar aquí, pero que saben estamos agradecidos.

REFERENCIAS

- Alley, W. M., Healy, R. W., Labaugh, J. W. Y Reilly, T. E. (2002) Flow And Storage In Groundwater Systems, Science, Vol. 296, N° 1985-1990.
- Ammann, A. A., Hoehn, E. Y Koch, S. (2003) Ground Water Pollution By Roof Runoff Infiltration Evidenced With Multi-Tracer Experiments, Water Research, Vol. 37, N° 5, 1143-1153.
- Appleyard, S. J. (1993) Impact Of Stormwater Infiltration Basins On Groundwater Quality, Perth Metropolitan Region, Western-Australia, Environmental Geology, Vol. 21, N° 4, 227-236.
- Barraud, S., Gautier, A., Bardin, J. P. Y Riou, V. (1999) The Impact Of Intentional Stormwater Infiltration On Soil And Groundwater, Water Science And Technology, Vol. 39, N° 2, 185-192.
- Barrett, M. E., Walsh, P. M., Malina, J. F. Y Charbeneau, R. J. (1998) Performance Of Vegetative Controls For Treating Highway Runoff, Journal Of Environmental Engineering-Asce, Vol. 124, N° 11, 1121-1128.
- Belhadj, N., Joannis, C. Y Raimbault, G. (1995) Modeling Of Rainfall Induced Infiltration Into Separate Sewerage, Water Science And Technology, Vol. 32, N° 1, 161-168.
- Bertolazzi, E. Y Manzini, G. (2004) A Finite Volume Method For Transport Of Contaminants In Porous Media, Applied Numerical Mathematics, Vol. 49, N° 3-4, 291-305.
- Bhattacharya, R., Gupta, V. Y Sposito, G. (1976) On The Stochastic Foundations Of The Theory Of Water Flow Through Unsaturated Soil, Water Resources Research, Vol. 12, N° 3, 503-512.
- Blick, S. A., Kelly, F. Y Skupien, J. J. (2004) New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual. New Jersey Department Of Environmental Protection Division Of Watershed Management.
- Buckingham, E. (1907) Studies On The Movement Of Soil Moisture. Bureau Of Soil Bulletin 38. U.S. Department Of Agriculture, Washington, Dc.
- Butler, D. Y Parkinson, J. (1997) Towards Sustainable Urban Drainage, Water Science And Technology, Vol. 35, N° 9, 53-63.
- Celia, M. A., Bouloutas, E. T. Y Zarba, R. L. (1990) A General Mass-Conservative Numerical-Solution For The Unsaturated Flow Equation, Water Resources Research, Vol. 26, N° 7, 1483-1496.
- Coffman, L. (1995) Maryland Developer Grows "Rain Gardens" To Control Residential Runoff. U.S. Environmental Protection Agency.
- Coffman, L. S. (2002) Bioretencion Manual. Programs & Planning Division Department Of Environmental Resources Prince George's County, Maryland.
- Dallmer, L. (2002) Sqirts - An On-Site Stormwater Treatment And Reuse Approach To Sustainable Water Management In Sydney, Water Science And Technology, Vol. 46, N° 6-7, 151-158.
- Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H. Y Minami, C. (2001) Laboratory Study Of Biological Retention For Urban Stormwater Management, Water Environment Research, Vol. 73, N° 1, 5-14.
- Dussaillant, A. R., Wu, C. H. Y Potter, K. W. (2004) Richards Equation Model Of A Rain Garden, Journal Of Hydrologic Engineering, Vol. 9, N° 3, 219-225.
- Eymard, R., Gutnic, M. Y Hilhorst, D. (1999) The Finite Volume Method For Richards Equation, Computational Geoscience, Vol. 3, N° 259-294.
- Ferguson, B. K. (1990) Role Of The Long-Term Water-Balance In Management Of Stormwater Infiltration, Journal Of Environmental Management, Vol. 30, N° 3, 221-233.
- Ferziger, J. H. Y Peric, M. (2002) Computational Methods For Fluid Dynamics. Springer.
- Fujita, S. (1997) Measures To Promote Stormwater Infiltration, Water Science And Technology, Vol. 36, N° 8-9, 289-293.
- Gray, W. G. Y Hassanizadeh, S. M. (1991) Paradoxes And Realities In Unsaturated Flow Theory, Water Resources Research, Vol. 27, N° 8, 1847-1854.
- Lerner, D. N. (2002) Identifying And Quantifying Urban Recharge: A Review, Journal Of Hydrogeology, Vol. 10, N° 143-152.
- Manzini, G. Y Ferraris, S. (2004) Mass-Conservative Finite Volume Methods On 2-D Unstructured Grids For The Richards' Equation, Advances In Water Resources, Vol. 27, N° 12, 1199-1215.
- Pan, L. Y Wierenga, P. J. (1995) A Transformed Pressure Head-Based Approach To Solve Richards Equation For Variably Saturated Soils, Water Resources Research, Vol. 31, N° 4, 925-931.
- Richards, L. A. (1931) Capillary Conduction Of Liquids Through Porous Medium, Physics, Vol. 1, N° 318-333.
- Šimunek, J., Šejna, M. Y Van Genuchten, M. T. (1999) Hydrus-2d: Simulating Water Flow And Solute Transport In Two-Dimensional Variably Saturated Media. U. S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service, U. S. Department Of Agriculture Riverside, California, Usa.