

## **REDUCCIÓN DE CRECIDAS URBANAS DEBIDO AL USO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUAS LLUVIAS DISTRIBUIDOS ESPECIALMENTE: MODELACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES**

PEDRO RIVERA I., JOSÉ P. MONTT M. Y BONIFACIO FERNÁNDEZ L.

Centro de Aguas Urbanas. Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental

P. Universidad Católica de Chile.

Av. Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile.

Teléfono: 3544227; Fax: 3545876

[www.centroaguasurbanas.cl](http://www.centroaguasurbanas.cl)

e-mail: [privera@ing.puc.cl](mailto:privera@ing.puc.cl)

### **RESUMEN**

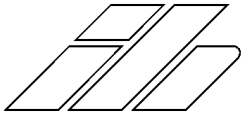
Se desarrolló un modelo simple para evaluar la reducción del caudal máximo en una zona urbana con sistemas de infiltración distribuidos espacialmente que drenan las viviendas. El modelo se basa en el análisis de la ecuación diferencial de continuidad aplicada sobre un plano, despejada en la condición de máximo caudal generado. Los resultados se presentan en forma adimensional, parametrizados con el porcentaje de techos, coeficiente de escorrentía, y características de las obras de infiltración, como tamaño de techo aportante, capacidad de infiltración de la obra y volumen de almacenamiento. La capacidad de infiltración de las obras determina el porcentaje del área total de techos que sirve, definido como el porcentaje de desconexión de techos.

Además se presentan los resultados experimentales de caudales medidos en una cuenca con sistemas de infiltración, y otra similar sin ellos. Los resultados obtenidos indican un valor del caudal máximo con obras distribuidas del 60% en promedio del caudal máximo sin obras. El modelo desarrollado entrega una reducción similar a la observada experimentalmente.

### **ABSTRACT**

A simple model for evaluate the performance of infiltration facilities spatially distributed for management of urban stormwater generated by the roof was developed. It is based on the analysis of the continuity differential equation on an overland, in the time of the peak. The results are presented as adimensional curves, parameterized by some variables like percentage of roofs in the catchment, size of the facilities, runoff coefficient, and infiltration and detention capacity. Infiltration capacity fixes a fraction of the roof discharging to the facilities, defined as a roof disconnection parameter.

Also, experimental results about the reduction of peak discharge in a pilot catchment with infiltration facilities spatially distributed are presented. The observed values were in average 60% the peak discharge without infiltration facilities. The results of the model was 69%, very close to the observed values.



## REDUCCIÓN DE CRECIDAS URBANAS DEBIDO AL USO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN DE AGUAS LLUVIAS DISTRIBUIDOS ESPACIALMENTE: MODELACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 1 Introducción

Se ha propuesto en la literatura técnica el uso de soluciones distribuidas espacialmente para la gestión de aguas lluvias (Rushton, 2001), principalmente para evitar el impacto de la urbanización y no alterar el ciclo hidrológico. Estas soluciones se diseñan para pequeñas cuencas, con pequeñas lluvias, por lo que las soluciones son también pequeñas.

En Chile se han usado elementos de infiltración, principalmente pozos profundos y zanjas, para controlar las aguas lluvias de sectores urbanos relativamente grandes, de hasta 170 ha. Se ha estudiado que su capacidad de infiltración no es suficiente como para contribuir al control de crecidas (MOP-DICTUC S.A., 2001). Pero si se consideran obras de infiltración distribuidas encargándose de pequeñas superficies, éstas podrían presentar un desempeño completamente distinto a las grandes obras de infiltración.

En este estudio se estudia el desempeño de pozos de infiltración de pequeñas dimensiones para drenar los techos de las viviendas, y se desarrolla un modelo simple que explique la reducción del caudal máximo en base a parámetros del estanque de infiltración y de la cuenca. Se propone una metodología adimensional que considera el almacenamiento en las superficies urbanas y la utilización del suelo. Este modelo puede usarse para evaluar eventos específicos de lluvias, y entrega una herramienta para diseñar sistemas distribuidos y evaluar sus efectos.

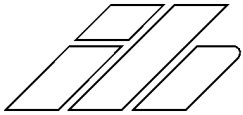
Se describe también una instalación piloto de obras distribuidas de infiltración en una pequeña cuenca urbana en Santiago, y se entregan algunos resultados experimentales. Los resultados validan el modelo propuesto, y respaldan la eficiencia de los sistemas de infiltración distribuidos para la reducción del caudal máximo, y por lo mismo para colaborar en la mitigación del impacto hidrológico debido a la urbanización.

### 2 Modelo de reducción del caudal máximo

A nivel de un sector urbano, los sistemas de infiltración distribuidos producen una disminución del caudal máximo,  $R_D$ , definida como:

$$R_D = \frac{Q_c}{Q_0} \quad (1)$$

En que  $Q_c$  es el caudal máximo generado por una tormenta en una zona con sistemas distribuidos, y  $Q_0$  corresponde a la condición sin control. Se desarrolló un modelo simple para determinar este factor en base a características de las lluvias, del desempeño de las obras y del tipo de urbanización.



## 2.1 Modelación del caudal máximo

Para la caracterización hidrológica de un sector urbano, se ha usado ampliamente el modelo que utiliza el programa computacional SWMM de la EPA (Huber y Dickinson, 1983). Este considera una cuenca como un plano inclinado con pendiente igual al cociente entre la máxima longitud de escurrimiento y el desnivel. Las áreas las divide en tres tipos: permeables, impermeables con detención superficial e impermeables sin detención superficial.

Se consideran superficies permeables aquellas que permiten la infiltración al suelo como plazas, patios y jardines. Las superficies impermeables con detención corresponden a superficies con poca pendiente o con alta rugosidad como calles, estacionamientos y en general áreas pavimentadas. Las superficies impermeables sin detención superficial son zonas impermeables con mayor pendiente y menor rugosidad, y se consideran en esta categoría principalmente los techos.

Se ha propuesto cambiar la representación de la cuenca para incluir la conexión entre techos y patios (Huber, W., 2001, Rivera, P., 2000), a partir de un nuevo plano de tamaño igual al área de los techos que aportan a zonas permeables. El área de este plano es  $D_t \cdot A_t$ , en que  $D_t$  es el porcentaje de techos que aporta a zonas permeables, conocido como porcentaje de desconexión de techos, y  $A_t$  el área total de techos en la cuenca.

Para evaluar la respuesta hidrológica de una zona urbana, el SWMM utiliza el método del almacenamiento no lineal para modelar la transformación lluvia escurrimiento. Este considera que el escurrimiento sobre los planos se comporta en forma uniforme, por lo que la ecuación de continuidad en el plano se puede expresar como:

$$A \frac{dh}{dt} = A * I^{ef} - Q \quad (2)$$

En que  $Q$  es el caudal de salida,  $I^{ef}$  es la lluvia efectiva,  $h$  es la altura de agua en el plano, y  $A$  el área total de éste. Definiendo  $q$  como el caudal de salida por unidad de área, la ecuación anterior se puede reescribir como:

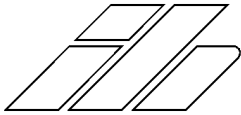
$$q = I^{ef} - \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

El caudal  $q$  se puede estimar con la relación de Manning aplicada a un plano inclinado, en que  $W$  es el ancho del plano,  $S$  su pendiente y  $n$  su rugosidad. Entonces,  $q$  se puede calcular como función de la altura con:

$$q = \frac{W \cdot S^{1/2}}{A \cdot n} h^{5/3} \quad (4)$$

El caudal máximo,  $q_m$ , se produce en el tiempo  $t_m$  en que el almacenamiento unitario, la derivada temporal de la altura, es cero. Entonces:

$$q_m = I_m^{ef} - \frac{dh_m}{dt} = I_m^{ef} \quad (5)$$



En que el subíndice m indica el valor de la variables en el tiempo en que el caudal es máximo. Se observa que  $q_m$  es igual a la lluvia que se produce en el tiempo máximo. Este resultado es sumamente importante, ya que dice que si la cuenca es capaz de retener y amortiguar la lluvia máxima en un cierto tiempo, que depende de las características físicas de la cuenca, entonces la intensidad máxima de escurrimiento será igual a la intensidad de lluvia efectiva en ese tiempo. La ecuación anterior se puede aplicar a toda la zona, considerando que el tiempo máximo es aquel en que la cuenca en su totalidad aporta su máximo escurrimiento,  $t_m^*$ . Entonces, este caudal máximo se puede calcular como:

$$Q_{m^*A} = I_{m^*A}^{ef} \cdot A \quad (6)$$

En que  $Q_{m^*A}$  es el caudal máximo de toda la cuenca de área A.

Si se desprecia el almacenamiento en los techos, el caudal en esta superficie se puede expresar como:

$$q_{At} = I_{At}^{ef} \quad (7)$$

En que  $q_{At}$  es el caudal aportado por la superficie de techos  $A_t$ . En el tiempo  $t_m^*$ , éste es igual a  $I_{m^*A_t}^{ef}$

## 2.2 Desconexión de techos

Adoptando una representación similar a como se modela el aporte de los techos a las zonas permeables, se puede modelar el funcionamiento de los techos aportando a un obra de infiltración.

Según la capacidad de infiltración de las obras, la lluvia, y el tamaño de los techos, el área de techos se puede dividir en 2 superficies: la que efectivamente aporta al escurrimiento y la que entrega al sistema de infiltración. La razón entre esta última y el área total del techo es el porcentaje de desconexión de techos,  $D_t$ .

Independiente de la capacidad de infiltración de la obra, existe una cantidad de precipitación que puede ser almacenada en el volumen del pozo,  $V_p$ . Para una magnitud crítica de lluvia,  $P_c$ , la desconexión de techos es del 100%. El comportamiento de  $P_c$  se presenta en la Figura 1a.

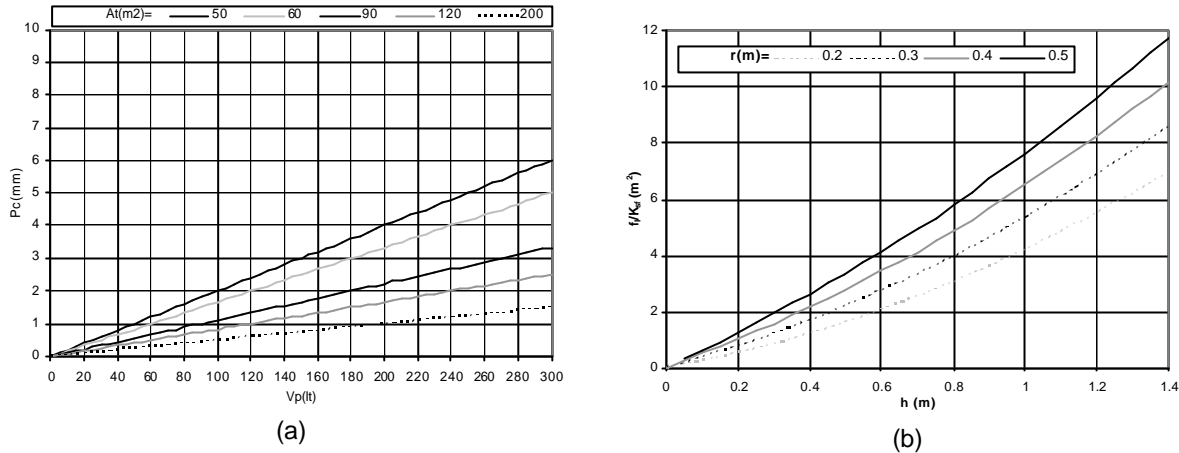
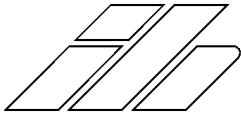


Figura 1. Valor de la precipitación crítica y de la capacidad de infiltración para diferentes condiciones.

Según esto, el volumen del pozo permite almacenar lluvias pequeñas. Para lluvias de mayor magnitud e intensidad, la capacidad de infiltración del pozo es la que define el valor de  $D_t$ .

El funcionamiento en condiciones reales de un pozo de infiltración depende de parámetros del suelo que representen su estado de humedad, su resistencia al escurrimiento y el movimiento del frente húmedo a medida que el suelo se satura. Para efectos de modelar una condición de diseño, si embargo, se suele considerar un comportamiento en régimen permanente con el suelo saturado, en cuyo caso la capacidad de infiltración del pozo depende solamente de la conductividad hidráulica saturada del suelo,  $K_{sf}$ .

Glover (Zangar, 1953 y Reynolds y Elrick, 1983) desarrolló un modelo para estimar la capacidad de infiltración de una obra,  $f_i$ , considerando que el flujo se produce por las paredes y por el fondo. Este modelo tiene como parámetros del suelo la capacidad hidráulica saturada, estimada de pruebas de terreno,  $K_{sf}$ .

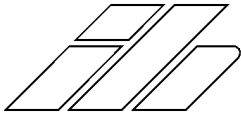
Considerando que la obra de infiltración es un estanque de radio  $r$  y altura de agua máxima  $y$ , el modelo de Glover estima  $f_i$  como:

$$f_i = \frac{2 \cdot p \cdot y^2 \cdot K_{sf}}{m} \quad (8)$$

$$m = \frac{r}{y} + \operatorname{asinh}\left(\frac{y}{r}\right) - \sqrt{\left(\frac{r}{y}\right)^2 + 1} \quad (9)$$

Se aprecia que para un pozo dado, la capacidad máxima de infiltración es lineal con el valor de  $K_{sf}$  en condiciones saturadas. En la Figura 1b se presenta el valor de  $f_i/K_{sf}$  para pozos de diferentes radios y alturas.

Considerando lo que pasa a nivel de una vivienda de área de techos  $A_t$ , si es que  $f_i$  es mayor o igual que el aporte de techos, entonces  $D_t=100\%$  y todo el techo aporta al pozo. Si no, el valor de la mínima desconexión de techos  $D_t$  se estima como:



$$D_t = \frac{f_1}{a_T \cdot I_m} \quad (10)$$

En la Figura 2 se presenta  $D_t$  para diferentes condiciones de lluvia, de tamaños de techos  $a_T$  y de capacidad de infiltración del pozo,  $f_1$ .

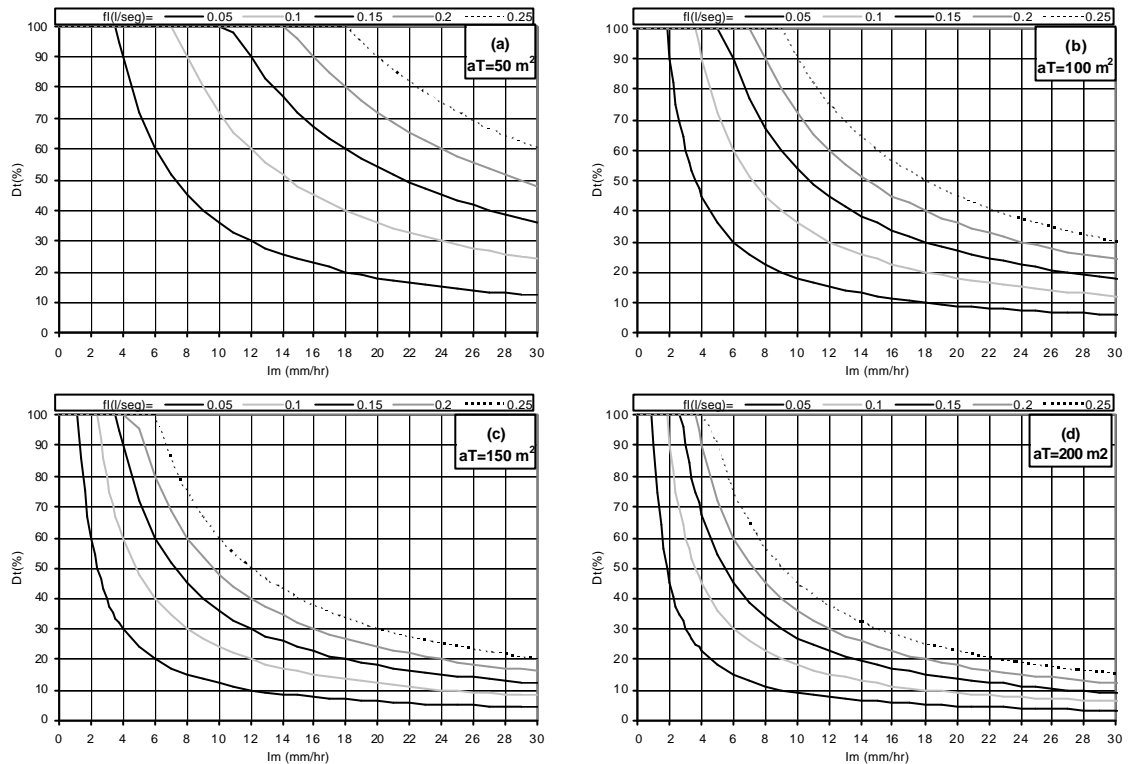


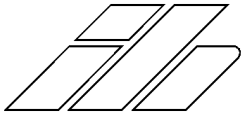
Figura 2. Desconexión de techos mínima esperada para diferentes condiciones.

Si bien el volumen de almacenamiento de un pozo de pequeñas dimensiones es pequeño en relación al volumen total que genera un techo debido a la lluvia, el caudal máximo que genera un techo puede ser del orden de la capacidad máxima de infiltración del pozo, por lo que para un pozo la capacidad de infiltración resulta mucho más eficaz para la desconexión de techos que la capacidad de almacenamiento. Como se observa en la Figura 2a, un techo de 50m<sup>2</sup> drenando a un pozo de  $f=0,2$  l/s, desconecta el 100% del techo para lluvias de intensidad menor que 14 mm/hr.

### 2.3 Estimación de $R_D$

Si todas las viviendas de un sector urbano poseen sistemas de infiltración para los techos que permiten una desconexión de  $D_t$  promedio, el caudal máximo que aporta la superficie de techo es  $q(1 - D_t)A_t$ .

El valor de  $R_D$  depende de  $D_t$ . El caudal  $Q_c$  de la ecuación (1) es función de  $D_t$ . Mayor  $D_t$  produce un menor  $R_D$ , o sea un menor porcentaje del caudal sin obras distribuidas.



$$Q_c(D_t) = Q_0 - I_{m^*At}^{ef} \cdot A_t \cdot D_t \quad (11)$$

Entonces  $R_D$  de la ecuación (1) es igual a:

$$R_D = \frac{Q_c(D_t)}{Q_0} = 1 - \frac{I_{m^*At}^{ef}}{I_{m^*A}^{ef}} \cdot r_{At} \cdot D_t \quad (12)$$

En que  $r_{At}$  es la proporción de superficie de techos en la cuenca,  $I_{m^*At}^{ef}$  es la lluvia efectiva de los techos en el tiempo en que se genera el caudal máximo en la cuenca, e  $I_{m^*A}^{ef}$  es la lluvia efectiva sobre la cuenca en  $t_{m^*}$ . Definiendo  $C_e$  como:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{I_{m^*At}^{ef}}{I_{m^*A}^{ef}} \quad (13)$$

La reducción es:

$$R_D = 1 - \frac{r_{At}}{C_e} \cdot D_t \quad (14)$$

El parámetro  $C_e$  representa el coeficiente de escorrentía para la intensidad de la lluvia en el tiempo en que se produce el caudal máximo de la cuenca. En la Figura 3 se presenta el valor de  $R_D$  para distintos  $D_t$ ,  $C_e$  y  $r_{At}$ .  $D_t$  se obtiene directamente de las ecuaciones (8), (9) y (10), mientras que  $C_e$  y  $r_{At}$  son parámetros de la cuenca urbana.

### 3 Aplicación a una cuenca piloto

Se instalaron pozos de infiltración para captar el agua de los techos en un sector de una urbanización ubicada en la comuna Puente Alto, Santiago.

Se midió el caudal de salida de la cuenca piloto con intervalos de 5 minutos para dos eventos de lluvia ocurridos en Agosto del 2003. Paralelamente se obtuvo el caudal en otra cuenca similar a la cuenca piloto, pero sin pozos de infiltración distribuidos espacialmente.

#### 3.1 Características de la cuenca

La cuenca piloto corresponde a un sector residencial con viviendas unifamiliares de aproximadamente  $55m^2$  de techos. El área total de la cuenca es de aproximadamente  $1500 m^2$ . El uso del suelo se presenta en la Figura 4, según antecedentes recopilados en terreno del estado de la cubierta de patios y veredas.

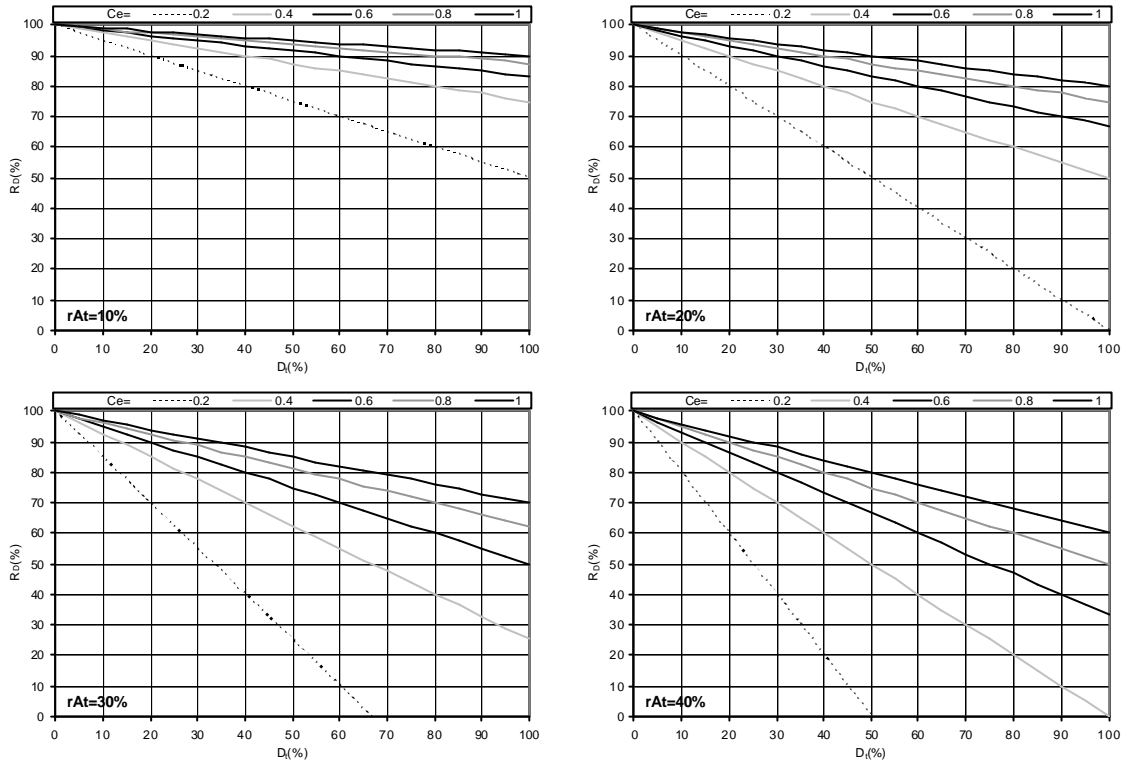
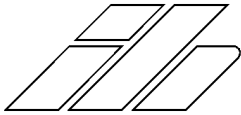


Figura 3. Reducción del caudal máximo en una urbanización debido a la desconexión de techos promedio y sus características.



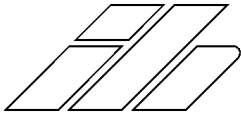
Superficie	Area (m <sup>2</sup> )	
	Impermeable	Permeable
Techos	274	-
Calles	256	-
Veredas	74	75
Patios	187	229
Plazas	-	400

Figura 4. Características de la Cuenca Piloto.

### 3.2 Capacidad de infiltración y de almacenamiento de los pozos

Ensayos de infiltración realizados en la zona a la profundidad en que operan los pozos de infiltración instalados, revelan una permeabilidad de terreno de aproximadamente 0,7m/día, considerando un ensayo con el método de Glover a carga constante.





Se instalaron dos pozos por cada vivienda, cada uno de radio de 0.4 m y altura de 1m. La capacidad máxima de infiltración estimada según los ensayos de terreno es de 0,052 l/seg por cada pozo, o sea  $f=0,1$  l/seg por vivienda. La desconexión de techos,  $D_t$ , estimada con estos valores se muestra en la Figura 5a, para distintos valores de intensidad máxima de lluvia.

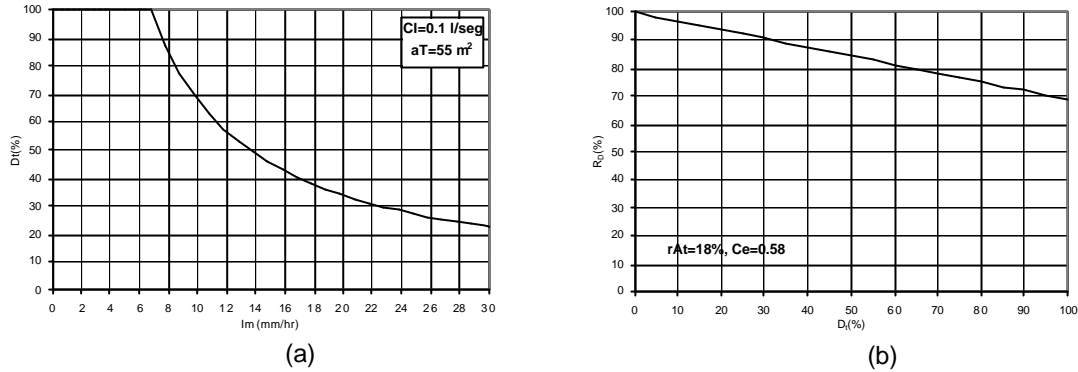


Figura 5. Desconexión mínima de techos estimada en la cuenca piloto y  $R_D$  para diferentes  $D_t$ .

Cada estanque tiene un volumen de 190 litros, por lo que por casa existe un volumen total de 380 litros disponible para almacenamiento. La precipitación crítica de almacenamiento,  $P_c$ , en estas condiciones es de 7 mm.

### 3.3 Lluvias medidas

Se cuenta con los registros de dos lluvias ocurridas en agosto del 2003. Estas fueron tormentas pequeñas, pero en las que de todas formas se observó escurrimiento en la cuenca piloto. Las características de estas tormentas se presentan en la Tabla 1

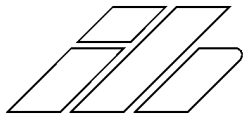
Tabla 1. Características de las lluvias monitoreadas en la cuenca piloto.

	01/08/03	04/08/03
Magnitud (mm)	2,7	2,2
In. Max. 5 min (mm/hr)	2,4	1,2
Duración (hrs)	2,7	8,3
Intensidad media (mm/hr)	1,0	0,3

Se observa que en ambas tormentas la magnitud es menor que la precipitación crítica, por lo que el 100% de los techos fueron desconectados en ambas situaciones.

### 3.4 $R_D$ observada y calculada con el modelo

Se calculó un coeficiente de escorrentía de la cuenca piloto de 0,58, según lo recomendado en la literatura técnica (MINVU-DICTUC S.A., 1996). Por su parte, el valor de  $r_{At}$  se estima en un 18%. En la Figura 5b se muestra el comportamiento de  $R_D$  en la cuenca piloto, considerando diferentes  $D_t$ . Con  $D_t=100\%$  el valor de  $R_D$  esperado según el modelo propuesto es del 69%, lo que quiere decir que el caudal máximo considerando la desconexión es en teoría 0,69 veces el caudal máximo sin desconexión.



Se calculó experimentalmente el valor de  $R_D$  para los dos eventos señalados. El caudal considerando los pozos se midió directamente a la salida de la cuenca piloto, mientras que el caudal sin pozos se estimó en base a las mediciones de caudal de otra cuenca un poco más grande que la piloto. Los caudales medidos en esta cuenca se ponderaron por la razón de los coeficientes de escorrentía calculados de igual forma. Se obtuvieron valores representativos de la cuenca piloto. Las mediciones obtenidas para la situación con y sin pozos se muestran en la Figura 6

En la Tabla 2 se muestra el caudal máximo medido en ambas lluvias y el valor de  $R_D$  observado en cada caso. Se aprecia la consistencia del modelo propuesto en este estudio con los datos experimentales. El modelo estima un valor teórico de  $R_D$  de 69%, estableciendo este valor como cota superior de los valores reales debido a los supuestos de la modelación.

Tabla 2. Caudal máximo con y sin pozos de infiltración y valor de  $R_D$  medido en cada evento.

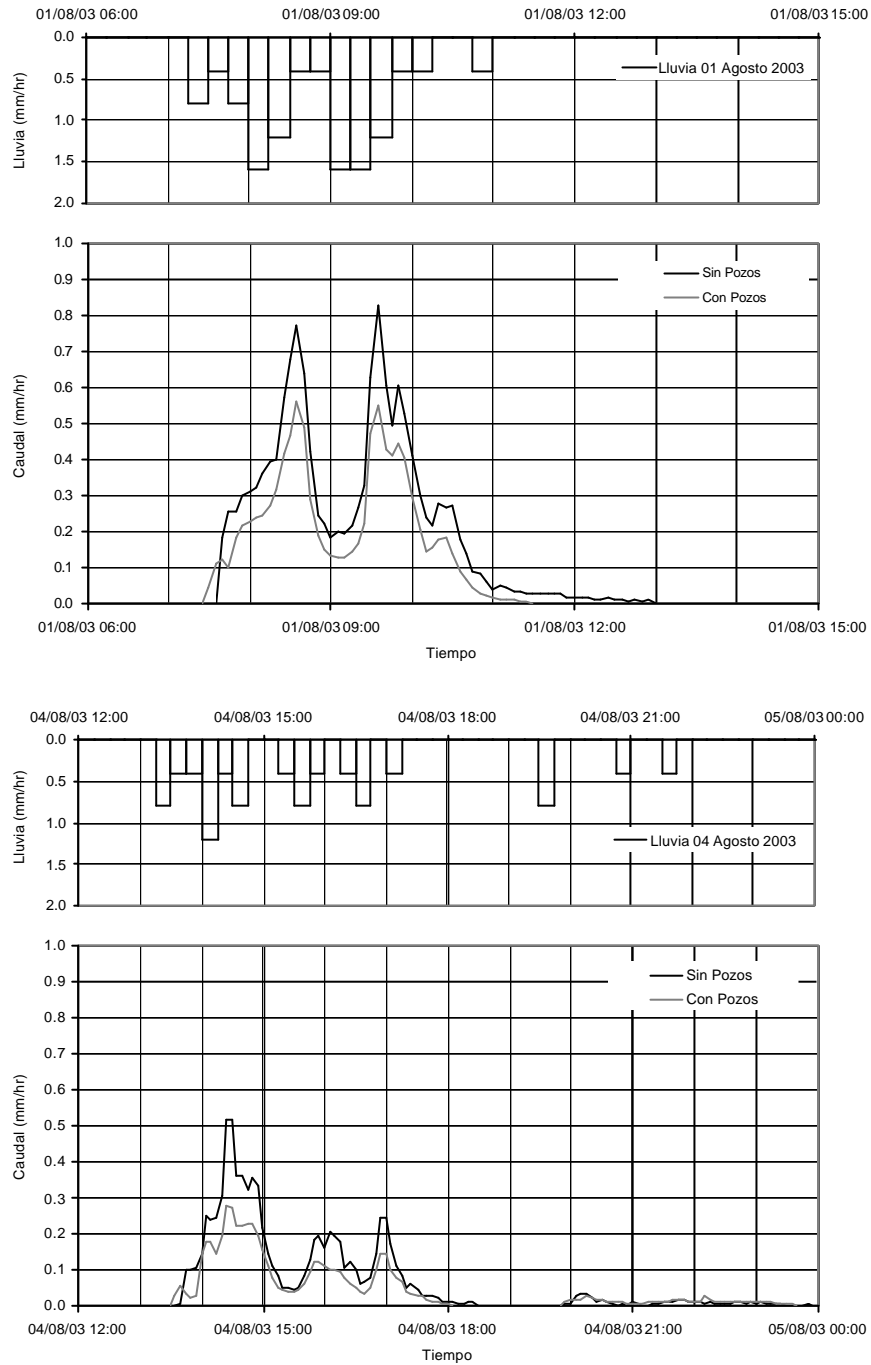
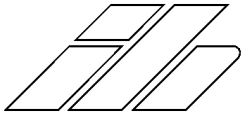
	Caudal max. sin Pozos (mm/hr)	Caudal max. con Pozos (mm/hr)	$R_D$ (%) Observada
Lluvia 01/08/03	0,8	0,6	67
Lluvia 04/08/03	0,5	0,3	54

#### 4 Conclusiones

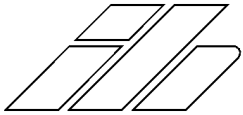
Se desarrolló un modelo simple para estimar la reducción del caudal máximo en una zona urbana que cuenta con sistemas de infiltración distribuidos espacialmente para captar el aporte de los techos, en relación al caudal máximo sin obras distribuidas. El modelo se basa en el análisis de la ecuación diferencial de continuidad aplicada sobre un plano inclinado, despejada en la condición de máximo caudal generado. El modelo entrega resultados adimensionales en base a parámetros simples de la zona, como porcentaje de techos y coeficiente de escorrentía, y de las obras de infiltración, como tamaño de techo aportante, capacidad de infiltración de la obra y volumen de almacenamiento. Además, éste puede ser usado para el diseño de redes secundarias en sectores que utilicen este tipo de obras.

Además se presentan los resultados experimentales de caudales medidos en una cuenca con sistemas de infiltración y otra similar sin. Los resultados obtenidos indican un valor del caudal máximo con obras distribuida de 60% en promedio del caudal máximo sin obras. El modelo propuesto entrega un resultado de 69%, similar al observado.

Los resultados no solo validan el modelo propuesto, sino que además destacan el desempeño de obras de infiltración distribuidas para reducir el caudal máximo y con ello contribuir a minimizar el impacto de la urbanización hacia aguas abajo, evitando las externalidades negativas del proceso de urbanización.



**Figura 6. Mediciones de caudales en la cuenca piloto con y sin pozos, para dos lluvias.**



## 5 Agradecimientos

Esta investigación fue financiada con aportes del FONDEF de CONICYT, como parte del proyecto FONDEF D00I1011 “Sistemas Estandarizados de Drenaje de Aguas Lluvias en Urbanizaciones y Viviendas”. Se agradece también la colaboración de Francisco Díaz Valdés de Inmobiliaria y Urbanizadora Manquehue Ltda., y de Alfonso Toro de Constructora Brotec, quienes hicieron posible la realización de la instalación experimental de sistemas de infiltración para las viviendas.

## 6 Referencias

- HUBER, W. y DICKINSON, J. USEPA SWMM4 User's Manual 1983.
- HUBER, W. Modeling non Directly Connected Impervious Area in Dense Neighborhoods, *IX International Conference on Urban Drainage*. Portland, OR. U.S.A. 2001.
- MINVU, PUC. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de Diseño. 1996.
- MOP, DICTUC S.A. Análisis Experimental de Pozos de Infiltración de Aguas Lluvias en Hospital Sótero del Río y Aeródromo de Tobalaba: Medición de Caudal y Análisis de la Calidad. 2001.
- REYNOLDS, W., ELRICK D. In Situ Measurement of Field Saturated Hydraulic Conductivity, Sortivity and the Parameter Using The Guelph Permeameter, *Soil Sci.*, vol. 140, núm 4, 1985, pp. 292-302. 1983.
- RIVERA, P. Modelos Lluvia Escorrentía en Cuencas Urbanas con Apoyo Experimental. Tesis de Magíster. Santiago, Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile 2000.
- RUSHTON, Betty. Enhanced Parking Lot Design for Stormwater Treatment, *IX International Conference on Urban Drainage*. Portland, OR. U.S.A. 2001.
- ZANGAR C. N. Theory and Problem of Water Percolation, *U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation*, Eng monogr. , núm. 8, Denver Colorado. 1953.