

**DISEÑO DE ZANJAS CON VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN VARIABLE  
PARA CONSERVACIÓN DE AGUAS Y SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO  
PURAPEL (CHILE)**

**J.P. Flores<sup>a</sup>**  
**J.V. Giráldez<sup>b</sup>**  
**J.L. Ayuso<sup>c</sup>**

**RESUMEN**

Se desarrolló un procedimiento para dimensionar zanjas de infiltración dependiendo de un balance hídrico en la ladera, el cual está focalizado en dos elementos centrales; eventos extremos de precipitación y capacidad de infiltración variable. Este modelo de infiltración incorpora el análisis regional de frecuencia, técnicas geoestadísticas, la ecuación de infiltración de Green- Ampt para superficies con pendientes y un modelo de balance hídrico propuesto por Akan (2002). Los resultados del modelo de zanjas de infiltración con tasas variables de infiltración y diferentes texturas del suelo, permitieron obtener mediante métodos numéricos, los parámetros de diseño de una zanja: altura máxima de agua (calado) y el tiempo de almacenamiento. Este estudio proporciona una extensión práctica de las relaciones intensidad-duración frecuencia para zonas sin registro continuo de la lluvia y con escasez de datos hidrológicos y climatológicos, con el propósito de dimensionar estructuras de conservación de aguas y suelo. El modelo fue aplicado a la cuenca del Río Purapel en Chile central, para demostrar la facilidad del procedimiento sugerido.

**Palabras claves:** capacidad de infiltración, intensidad-duración-frecuencia, zanja de infiltración, cuenca del Purapel.

---

<sup>a</sup> Jefe de proyecto, Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). Santiago, Chile..

<sup>b</sup> Catedrático, Departamento de Agronomía (ETSIAM). Universidad de Córdoba. España.

<sup>c</sup> Catedrático, Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Córdoba. España.

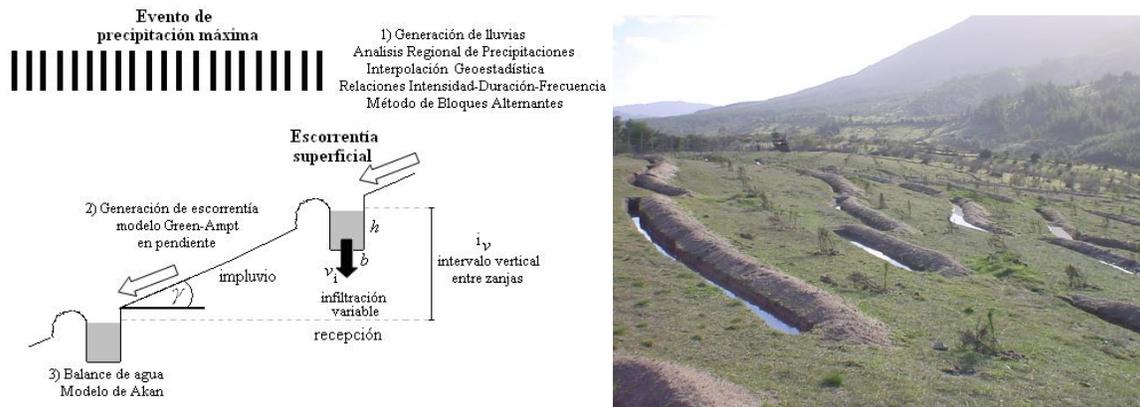
## ABSTRACT

A procedure was developed for sizing infiltration trench depending on the water balance of a hillslope, which is focused on two main elements; extreme rainfall events and variable infiltration capacity. Because, the shortage of hydrological data close to the site of the water resources project, this infiltration model incorporates regional frequency analysis, analysis of rainfall distribution, storm index method and the application of geo-statistical techniques. The results allow obtaining an extension of the Intensity-Duration-Frequency relationships to non-recording rain gauges and the sizing for water and soil conservation structures. The model was applied to the Purapel River Basin located in central Chile to demonstrate the ease of the suggested procedure.

**Keywords:** infiltration capacity, intensity-duration-frequency, infiltration ditches, Purapel river basin.

## INTRODUCCIÓN

Existen diferentes estudios ligados al efecto positivo que presentan las zanjas de infiltración, para mantener o aumentar la biomasa vegetal en sitios erosionados y/o degradados (Verbist, 2011). En zonas de secano de Chile central, la inserción del sistema de captura de aguas lluvias “water harvesting system”, mediante zanjas de infiltración, ha permitido reducir los actuales índices de desertificación, y también pueden mejorar las futuras condiciones edafo - climáticas desfavorables en el manejo de los bosques nativos de la zona central de Chile. Sin embargo, estas estructuras de infiltración requieren diseños confiables y efectivos que incorporen elementos hidrológicos y de suelos para obtener un óptimo aprovechamiento de los recursos agua y suelo (Flores, 2008).



**Figura 1.** (Izquierda) Esquema del diseño de zanjas de infiltración (Fuente: Flores, 2008) y (derecha) una plantación de *Pinus radiata* D.Don con zanjas en Chile. (Fuente: <http://eias.utralca.cl>).

Usualmente, un modelo matemático de cosecha de aguas considera la generación de lluvia y escorrentía en la zona de impluvio y el balance de agua dentro de zona de recepción. Diversos autores han propuesto modelos de infiltración para almacenar un volumen de captura, a partir de una escorrentía y un periodo específico de tiempo de almacenamiento (Martínez de Azagra, 2000; Falco et al, 1997; Akan, 2002). La mayoría de estos modelos presuponen que toda el agua de escorrentía generada por el área de impluvio se infiltra en el área de recepción, situación que dista mucho de lo real, para lo cual se propone trabajar con factores de captura o aprovechamiento. En la práctica, la formulación del balance de agua en un punto de la ladera se obtiene de la combinación de 7 u 8 variables de entrada, por ejemplo: se supone constante, la superficie del área de impluvio y del área de recepción, capacidad máxima de la zanja de infiltración mientras que el resto de parámetros varían en el tiempo. La particularización más simple es trabajar con tasas constante de lluvia e infiltración, aunque conllevaría a resultados de menor precisión. Asimismo, el efecto de la pendiente en el proceso de generación de escorrentía es un aspecto fundamental de estos acercamientos, y no siempre es considerado. Por ello, este estudio presenta un modelo de zanjas con tasa de infiltración variable considerando sólo la variabilidad espacial de la lluvia, mientras que, las propiedades hidráulicas del suelo son obtenidas de forma indirecta. La formulación del modelo contempla conceptos de hidrología de superficie, la ecuación de infiltración de Green y Ampt para superficies con pendiente (Fox et al., 1997) y un procedimiento propuesto por Akan (2002). El modelo puede ser aplicado a zonas con baja disponibilidad de datos hidrológicos.

## 2. Formulación del modelo

La caracterización hidrológica y topográfica de la ladera, así como las precipitaciones y los parámetros hidráulicos del suelo son fundamentales para cuantificar la escorrentía superficial y la disponibilidad hídrica en un punto de la ladera (Pizarro et al., 2008). El área esta subdivida en un gran número de unidades sistematizadas, el cual asume que tiene un único conjunto de propiedades hidráulicas del suelo. El modelo considera que el suelo está desnudo, por consiguiente, la escorrentía se hace máxima. Como se muestra en la figura 1, el modelo puede determinar la máxima altura de agua y el tiempo de almacenamiento en una estructura de infiltración basado en el esquema precipitación-escorrentía-infiltración;

1) Generación de Lluvias, mediante análisis tipo regional (Hosking y Wallis, 1997) de la distribución de precipitaciones máximas, un índice de tormenta (Di Baldassarre et al, 2005) y la aplicación de técnicas geoestadísticas para la presentación de la variabilidad espacial de la lluvia (Cheng et al, 2003) de krigeado ordinario. Luego, la lluvia de diseño, queda expresado como:

$$I_i^T = k \times I_{diaria}^T \quad (1)$$

Donde:  $I_i^T$  = intensidad de precipitación [ $LT^{-1}$ ] a la hora  $i$  ( $i = 1, 2, 6, 12$  y  $24$  horas);  $k$ = índice de tormenta;  $I_{diaria}^T$  = intensidad de precipitación diaria [ $LT^{-1}$ ]. Los valores de intensidad de lluvia son ajustados a un modelo de intensidad-duración-frecuencia (IDF).

2) Generación de escorrentía, mediante modelo de Green y Ampt (1911) que describe la infiltración de agua en un suelo bajo condiciones de encharcamiento permanente siguiendo las hipótesis (Muñoz-Carpena y Gowdish, 2005). Con estas hipótesis de partida y aplicando la Ley de Darçy, el modelo Green-Ampt para superficie en pendiente sobre la condición de encharcamiento puede ser expresado, como:

$$f_t = i_c = K_s \frac{z_* f \cos \gamma + s_f + H}{z_* f} \quad (2)$$

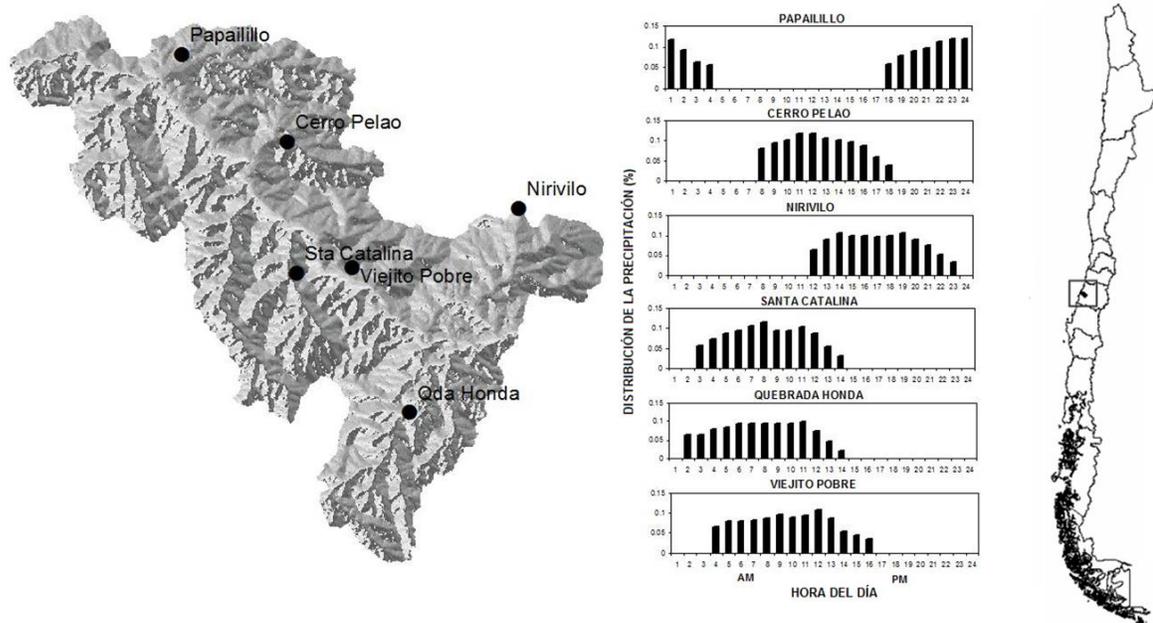
Donde  $i_c$ = infiltrabilidad igual a la tasa de infiltración  $f_t$  [ $LT^{-1}$ ];  $K_s$ = conductividad hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ];  $z_*$ = profundidad del frente húmedo en la dirección normal a la superficie [L];  $s_f$ = frente húmedo de succión [L];  $H$ = altura de agua encharcada sobre la superficie [L];  $\gamma$ = pendiente del terreno. Todas las variables se asumen que permanecen constante en la dirección aguas abajo.

3) Balance de agua, mediante la propuesta de Akan (2002) en la zanja de infiltración contempla dos etapas; llenado y vaciado (Flores, 2008).

La integración se lleva a cabo numéricamente en términos de varios parámetros adimensionales, mediante el método de diferencias finitas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio comprende a la cuenca del río Purapel, (35°34'LS; 72°05'LO), de clima de tipo mediterráneo, con seis meses secos y seis meses húmedos, y está ubicada en la Cordillera de la Costa de la Región del Maule, Chile (figura 2). Cuenta con un área de 264.6 km<sup>2</sup> Nirivilo (Pizarro et al 2006).



**Figura 2.** Ubicación de la Cuenca del Río Purapel (Chile) y la red de estaciones de medición pluviométrica.

La obtención del hietograma de diseño se obtuvo mediante el siguiente procesamiento de la información: (1) el filtrado y la exploración de los datos primarios de observaciones, contempló la detección de datos incorrectos y outliers (Grubbs y Beck), independencia y estacionariedad (Wald-Wolfowitz) de los datos, y tendencia monótona (Mann-Kendall) (2) El análisis regional de 36 estaciones pluviométricas (1965 – 2002) ubicadas en la guión central de Chile y el análisis de frecuencia de la Estación Nirivilo

(1956 – 2007) para las precipitaciones máximas mediante el ajuste de la función de distribución de probabilidad General de Valores Extremos (García, 2000). La generación de escurrentía se estimó con el modelo de Green-Ampt para superficie en pendiente. La información de las propiedades físicas del suelo se obtuvo del Estudio Agroecológico de Suelos realizado para la cuenca del Purapel (CIREN, 1997). Los parámetros del modelo de Green-Ampt para cada caso se seleccionaron a partir de su textura según Rawls y Brakensiek (1983).

Finalmente, la recarga y vaciado de agua en la zanja se reproducirá mediante el modelo de Akan y su resolución por medio de métodos numéricos de diferencias finitas y Runge-Kutta de 4to Orden.

La aplicación SIG de este modelo se lleva a cabo mediante un programa elaborado en MATLAB. La construcción de un modelo de elevación digital de la cuenca, obtenido de la información digitalizada de una Ortofoto del Centro de Información de Recursos Naturales 1:20.000 (CIREN, CHILE) y de Cartas Digitales del Instituto Geográfico Militar 1:50.000 (IGM, CHILE). Se utiliza ArcGis® de ESRI, para el geoprocésamiento de la información biogeofísica de la cuenca y la visualización gráfica de los resultados.

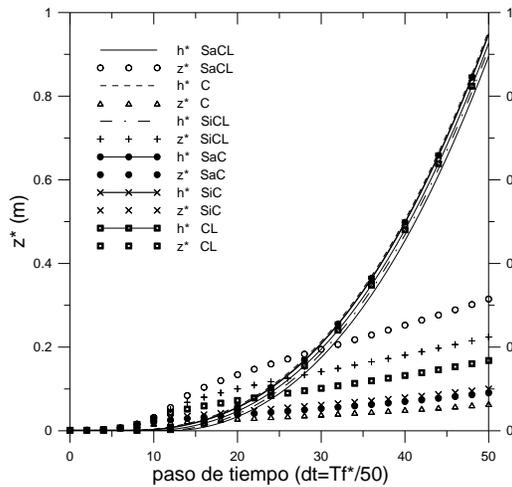
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las series de precipitaciones máximas cumplen el requisito de independencia, estacionariedad y sin tendencias monótonas. En cuanto al análisis exploratorio de la serie de la estación pluviométrica (diaria) Nirivilo, el test de de Grubbs y Beck, si detectó un outlier (a un nivel de significancia del 10%), en la lluvia del día 26/04 del año 1957, por lo que se entiende que es un dato anómalo registrado al comienzo de la serie, en consecuencia, se eliminó este dato. Los estimadores de los parámetros para la distribución GVE obtenidos, tienen un insesgamiento mínimo. Los modelos matemáticos ajustados presentan excelentes resultados (mayoritariamente  $R^2 > 90\%$ ), entregando una excelente bondad de ajuste, lo cual hace posible realizar una estimación confiable de las intensidades máximas que se pudiesen esperar, para una determinada duración y período de retorno. Para la cuenca del río Purapel el mejor modelo fue Temez (1978):

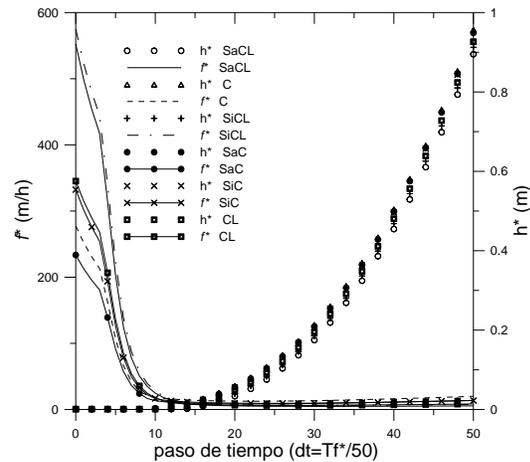
$$I_t^T = \frac{19.37 \cdot T^{0.2109}}{t^{0.5501} + 0.5677}$$

Donde T= periodo de retorno en años; t= duración del la lluvia en horas.

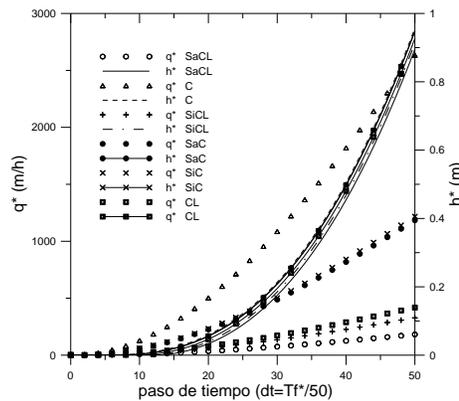
Seguindo los resultados de Chen y Young (2006), para tormentas intensas de larga duración (12 horas) la pendiente del terreno no produce efectos significativos en el proceso de infiltración, y por ende, en el dimensionamiento del calado de la zanja, aún cuando la escorrentía y los volúmenes de impluvio aumenten cuando la pendiente se incrementa. Una diferencia de 4 cm en el diseño de la zanja, no refleja en la práctica de trazado y construcción ningún cambio notorio. Cabe destacar que los tiempos de almacenamiento son altos, por lo que, el proceso de vaciado de la zanja debe considerar, además de la infiltración, la evaporación del agua al interior de está.



**Gráfico 1.** Comportamiento de profundidad de la zona húmeda y la altura (normalizados) de la zanja, para un tiempo de llenado  $T_f = 2$  h, bajo distintas texturas de suelos.



**Gráfico 2.** Comportamiento de la infiltración y la altura (normalizados) de agua dentro de la zanja, para un tiempo de llenado  $T_f = 2$  h, bajo distintas texturas de suelos.



**Gráfico 3.** Comportamiento de la escorrentía de entrada y la altura (normalizados) de agua dentro de la zanja, para un tiempo de llenado  $T_f = 2$ h, bajo distintas texturas de suelos.

Los gráficos 1, 2 y 3 muestran el comportamiento, obtenido por diferencias finitas, del proceso de llenado de la zanja de infiltración para distintas texturas de suelo. Siguiendo, los estudios de Maryland Dept of Resources (1984), Akan (2002) y basado en el análisis del Hidrograma SCS, el tiempo efectivo de llenado para la mayoría de las zanjas de infiltración generalmente es menor a 2 h. Este diseño permitió establecer la altura máxima de agua en la zanja propuesta si el tiempo estimado de llenado es  $T_f = 2$  h.

Las ecuaciones que gobiernan el proceso de llenado para una zanja de infiltración considera que si en algún paso de tiempo  $(h^*)^j = 0$  y  $(f^*)^j > (q^*)^j$ , entonces  $(f^*)^j = (q^*)^j$ , en otras palabras, si la zanja está vacía y la capacidad de infiltración excede la tasa de entrada de agua, entonces se igualan ambas tasas. Bajo algunas configuraciones de diseño de zanjas, los suelos con texturas arenosas y francas no requieren zanjas de infiltración ya que los volúmenes de lluvia generados en el área de impluvio son mayoritariamente infiltrados en el suelo, obteniendo calados demasiado bajos. Sin embargo, la modificación de uno o varios de los parámetros de diseño (p.e, incrementando el distanciamiento entre zanjas de 10 a 20 m) la captura del volumen de impluvio generado requerirá la construcción de una estructura de infiltración. Asimismo, en la práctica las paredes de zanjas de infiltración construidas en laderas, tienen una menor estabilidad mecánica, a los eventos extremos de precipitación y por lo general, se producen derrumbes o daños a la estructura de la zanja. Para otras texturas de suelo, los calados de diseño varían significativamente, siendo altamente sensible a variaciones de los valores de la conductividad hidráulica del suelo,  $K_s$  (tabla 1).

**Tabla 1.** Dimensionamiento de la zanjas de infiltración bajo distintas texturas de suelo.

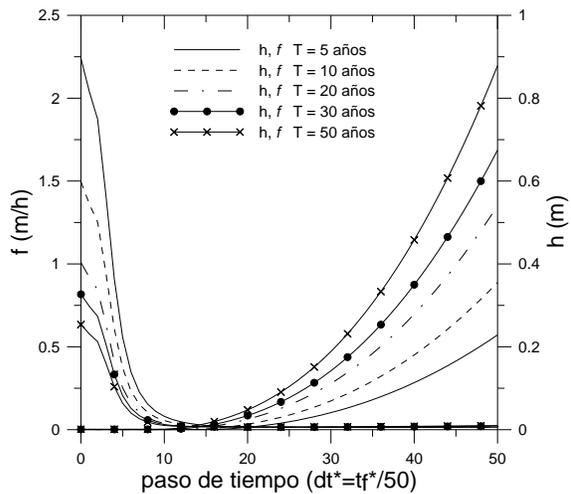
Periodo de retorno (años)	Distanciamiento entre zanja (m)	Textura de suelo (USDA)	Volumen de captura (R) por unidad horizontal de área zanja (m)	Calado zanja (h) (m)
10	10	SaCL	0.4	0.36
10	10	SiCL	0.48	0.43
10	10	CL	0.61	0.56
10	10	SiC	0.88	0.84
10	10	SaC	1.03	0.98
10	10	C	1.15	1.1

( $h^* = h/R$ ; Duración promedio tormenta= 12 h; Pendiente del terreno= 10%; Tamaño celda= 200 m; ;  $b = 0.5$  m;  $t_f = 2$  h).

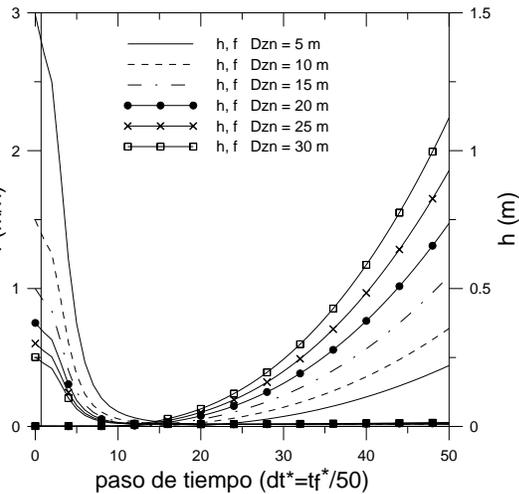
De las gráficas de los valores normalizados de  $h$ , se pueden obtener los diferentes calados de diseño ( $h^* = h/R$ ) para cada una de las texturas estudiadas. Los valores de los volúmenes de diseño de escorrentía no se ven influenciados por la pendiente del terreno,

pero sí de las propiedades hidráulicas del suelo y la configuración de la obra. Dentro de una textura de suelo determinada (p.e. franco areno-arcilloso), el factor más determinante en la variación de la altura de la zanja de infiltración, es el distanciamiento entre zanjas de infiltración (Dzn), seguido del periodo de retorno de las precipitaciones (T). Al aumentar Dzn y T, los respectivos volúmenes de captura (R) aumentan hasta casi 4 o 5 veces en un rango de 5 – 30 m y 5 – 50 años, respectivamente (gráficos 4 y 5).

En la práctica, el rango de altura del calado de la estructura de infiltración no debe superar 0.6 m de altura, porque no debe alterar demasiado la estructura edáfica, suponer nuevas inestabilidades físicas del terreno, no exceder el volumen de material removido y facilitar la incorporación de maquinaria (tractores, subsoladores) en la faena de construcción. Para lo cual, se recomienda modificar algunos parámetros de la configuración de la zanja, en especial, el distanciamiento entre obras.

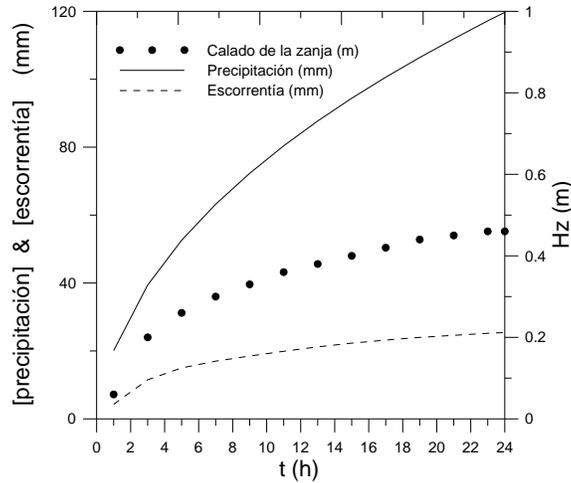


**Gráfico 4.** Comportamiento de la infiltración y la altura de la zanja, para un tiempo de llenado  $T_f = 2$  h, bajo distintos periodos de retorno (textura de suelo= SaCL).



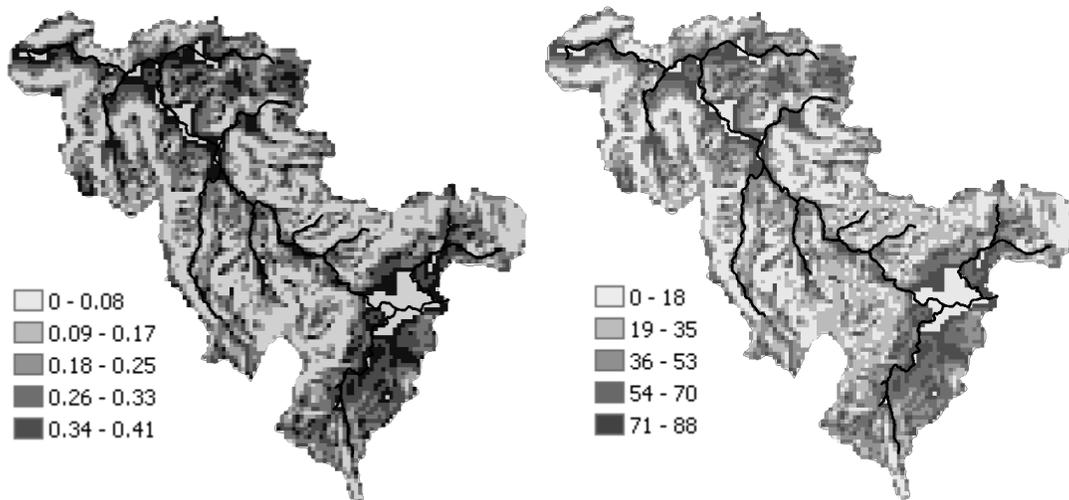
**Gráfico 5.** Comportamiento de la infiltración y la altura de la zanja, para un tiempo de llenado  $T_f = 2$  h, bajo distintos distanciamiento entre zanjas (textura de suelo= SaCL).

Finalmente, se establece que el calado aumenta, cuando la duración de la tormenta intensa elegida aumenta, ya que los montos precipitados caídos en la zona de impluvio lógicamente aumentan. Para duraciones de tormentas de tipo intensa sobre las 16 horas el dimensionamiento del calado comienza a estabilizarse, aún cuando los montos precipitados aumenten, pero las intensidades de precipitación son mucho menores.



**Gráfico 6.** Calado de la zanja de infiltración en función de la duración de la tormenta intensa de diseño ( $D_{zn} = 10 \text{ m}$ ;  $b = 0.5$ ;  $T_f = 2 \text{ h}$ ;  $T = 10 \text{ años}$ ; textura suelo = SaCL).

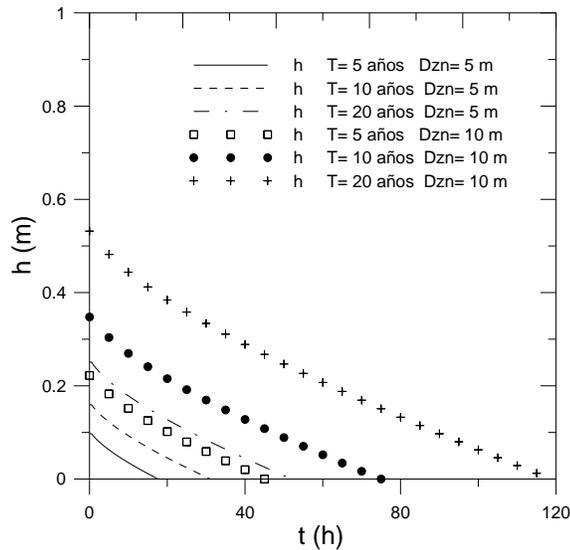
Los resultados del modelo de balance de agua permiten obtener para cada unidad de la cuenca del río Purapel (figura 3), el dimensionamiento del calado de la estructura de infiltración (h en metros) y el tiempo estimado de almacenamiento (en horas). Se comprende que las posibilidades de diseño son numerosas, por lo que se muestra una sola configuración de diseño. En este caso un 34% de las unidades sistematizadas dentro de la cuenca tiene un calado entre los 34 y 41 cm, mientras que el 66% tienen una altura de calado menor a 25 cm de altura. Resulta beneficioso que para calados pequeños, la cosecha de aguas se consigue sin necesidad de construir zanjas de infiltración, sino con una buena preparación de suelo en el área de impluvio. Para tormentas sobre 10 horas de duración en la cuenca del Purapel es difícil que la estructura de infiltración cumpla ser endorreica, más aún cuando considera intensidades máximas promedio superior a 8 mm/h. Por ello, la modelación incorpora un factor de aprovechamiento hídrico (Flores, 2008). Conviene señalar por último que debido a mayores duraciones de tormenta y bajas tasas finales de infiltración provoca que se dilaten los tiempos de almacenamiento/infiltración entre 1 y 5 días, lo que podría provocar problemas de anoxia en las raíces de los cultivos cercanos a la obra.



**Figura 3.** (izquierda) Calado (m) y (Derecha) tiempo estimado de almacenamiento (h) de la zanja de infiltración

(T=10 años, textura de suelo SaCL, b= 0.5 m, qq= 0.5 m) para la cuenca del río Purapel.

Por otra parte, el proceso de vaciado de la zanja fue calculado con la condición inicial ( $h = h_0$ ) y ( $Z = Z_0$ ) en  $t = 0$ , estimado para  $t = T_f$  del proceso de llenado, a través del método de Runge-Kutta de 4<sup>to</sup> orden. De igual forma, se asumió una textura común para la cuenca del río Purapel (franco areno-arcilloso). El calado aumenta, a medida que se considera mayores valores de periodo de retorno T y distanciamiento entre zanjas Dzn,. El rango de variación de tiempo de almacenamiento se incrementará de 18 – 52 h y 45 – 120 h, respectivamente (gráfico 7). Ante largas duraciones de tormentas intensas y volúmenes de impluvio cuantiosos el sistema de captura y recepción resulta ser más complejo ya que se inicia el proceso de rebosadura. Como Mongil (2004), no se puede pretender un endorreismo perfecto ni procurar cosechar un evento demasiado extremo, sino cumplir el máximo de solicitudes del cultivo durante el año hidrológico. Para ello se hace necesario cuantificar los volúmenes de esorrentía que se escapan de la unidad sistematizada, ante eventos de muy intensa y de prolongada duración, es decir, el cálculo de los excesos hídricos (Martínez de Azagra, 1996). En este contexto, puede ser necesario formular matemáticamente el diseño de cascada de zanjas lineales, donde ‘N’ zanjas están acoplados espacial y temporalmente y deben satisfacer la ecuación de balance hidráulico (Catalao *et al*, 2006).



**Gráfico 7.** Proceso de vaciado de la zanja de infiltración por el Método de Runge Kutta de orden 4to (Dzn= 10 m;  $b=0.5$ ;  $D=12$  h; textura suelo = SaCL).

Cuando el modelo asume cada tormenta intensa tiene una intensidad de la lluvia constante con distribución normal (efecto del método de bloques alternantes). Con ello, los volúmenes de escorrentía tenderían a ser más bajos, provocando que el modelo subestime el calado de la zanja de infiltración. Otro elemento de discusión es la definición de la resolución temporal de la precipitación en un punto geográfico. Ésta puede provocar resultados disímiles a los presentados, ya que la estructura que poseen las series varía muy significativamente según el intervalo de agregación utilizado, aunque se trate de información correspondiente a un suceso. Dado que la información pluviométrica tiene una resolución máxima de 1 hora, que está dentro del rango usual (10 a 120 minutos) en obras de drenaje urbano, esta discretización puede considerarse aceptable y permite la modelación adecuada del proceso de infiltración. Sin embargo, es recomendable para lluvias torrenciales evaluar diferentes resoluciones temporales de precipitación, en especial, discretizaciones de 5, 10, 20 y 30 minutos.

Usualmente ningún diseño contempla la variable *sedimentos* u otros materiales (hojas, ramas, rocas, etc.), ni tampoco la variación temporal de la configuración geométrica de la zanja después de cada tormenta o cada año hidrológico, puesto que aquello modificaría el funcionamiento de captura e infiltración y la altura final del agua dentro de la zanja. Mientras que, la vida útil de la zanja dependerá de las labores de mantención y limpieza de las estructuras.

Una de las ventajas del modelo propuesto sucede cuando se obtienen soluciones de dimensiones de zanjas poco prácticas, en términos de la construcción, el modelo permite la modificación de su configuración, dependiendo de los objetivos del proyecto.

## CONCLUSIONES

El análisis de las relaciones intensidad-duración-frecuencia expuesto en este trabajo, permiten obtener un valor confiable de  $I_d^T$ , reproduce además las propiedades estadísticas de las lluvias extremas observadas para la región de estudio. Esto permitió la construcción de las relaciones IDF para la cuenca del río Purapel, herramienta fundamental para el diseño de proyectos de conservación de aguas y suelos para zonas sin registros pluviométricos.

A partir de la modelación del proceso de captura de volumen e infiltración dentro de la zanja, bajo infiltración variable, distintas texturas de suelo y configuraciones de diseño, se pudo estimar la altura máxima de agua y el tiempo de almacenamiento mediante métodos numéricos, diferencias finitas y Runge-Kutta y demostraron ser eficientes para trabajar con un alto volumen de datos. Asimismo, se pudo constatar que la pendiente del terreno no ejerce mayor influencia en el dimensionamiento de las estructuras. Mientras que, junto con la conocida variabilidad de los parámetros hidráulicos del suelo, el factor más determinante en la variación de la altura de la zanja de infiltración, es el distanciamiento entre zanjas de infiltración (Dzn), seguido del periodo de retorno de las precipitaciones (T), debido principalmente a la acumulación de volumen de impluvio.

Finalmente, el diseño de zanjas introducido en este trabajo constituye una herramienta fundamental de planificación y de diagnóstico para muchos proyectos agroforestales. Éste posee, además, una base física mucho más extensa que otros diseños usados en la práctica, sin embargo, requiere una mayor cantidad de información, lo que no siempre se dispone a cabalidad, en la región central de Chile.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas las personas que facilitaron el desarrollo de esta investigación, en especial, a la Universidad de Talca (Chile), Dirección General de Aguas (Gobierno de Chile) y la Agencia Española de Cooperación Internacional (España).

## REFERENCIAS

AKAN, O. Sizing Storm Water Infiltration Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol 128, No. 5, pp. 534-537; 2002.

CATALAO, J; MARIANO, S; MENDES, V. Planificación de la Operación de Corto Plazo de Sistemas de Energía Hidroeléctrica. *Inf. Tecnol.*, 2006, vol.17, no.3, p.149-155. ISSN 0718-0764. 2006.

CHEN, I; YOUNG, M. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces, *Water Resour. Res.*, 42, W07420. 2006.

CHENG, K; WEI, C; CHENG, Y; YEH, H. Effect of Spatial Variation Characteristics on Contouring of Design Storm Depth, *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 9. pp 1755-1769. 2003.

CIREN. Estudio Agrológico de la VII Región del Maule. Centro de Información de Recursos Naturales. Ministerio de Agricultura. Santiago. Chile. 212 p.; 1997.

DI BALDASSARRE, G; CASTELLARIN, A; BRATH, A. Evidences of relationships between statistics of rainfall extremis and mean annual precipitation: An application for design-storm in northern central Italy. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 10, 589-681. 2005.

FALCO, F; AFONSO, P; MOTA, M; CECON, P. Model to Design Level Terraces-*Journal of irrigation and drainage engineering*, Vol 13, No 1, USA. p 8-12; 1997.

FOX, D; BRYAN, R; PRICE, A. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions, *Geoderma*, 80, 181– 194. 1997.

GARCÍA, M. Análisis Regional de las precipitaciones máximas en Andalucía, Estimación de las relaciones IDF. Trabajo profesional fin de carrera ETSIAM. Córdoba. España. 2000.

GREEN, W; AMPT, G. Studies on Soil Physics. 1. The Flow of Air and Water Through Soils. J. Agr. Sci. 4(1):1-24. Flanagan, D. and M. A. Nearing, 1995. USDA-Water Erosion Pre. 1911.

HOSKING, J; WALLIS, J. Regional frequency Analysis, Cambridge University Press, New York. 1997.

MARTINEZ DE AZAGRA, A. Diseño de sistemas de recolección de agua para la repoblación forestal. Editorial Mundi-Prensa, Madrid, España. 87 pp. 1996.

MARTINEZ DE AZAGRA, A. Principles for designing endorheic microcatchments. Third International Congress Man and Soil at the Third Millenium, Valencia, España. Volume I: 507-520. 2000.

MARYLAND DEPT. OF NATURAL RESOURCES. Standards and specifications for infiltration practices, Water Resources Administration, Storm Water Management Division, Annapolis, Md. 1984.

MONGIL J. Desarrollo y aplicación de una metodología destinada al dimensionado de sistemas de recolección de agua para la restauración forestal en zonas áridas. Tesis doctoral de Ingeniero de Montes. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Universidad de Valladolid. Palencia. España. 381 pp. 2004.

MONTECINOS, A; ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in Central Chile and associated circulation anomalies. Journal of Climate, 16, 281-296; 2003.

MUÑOZ-CARPENA, R; GOWDISH, L. Aplicación del método de infiltración de Green-Ampt con redistribución de humedad del suelo entre encharcamientos. Actas de las VII Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo. ISBN : 84-9749-171-8. España. 2005.

PIZARRO, R; ARAYA, S; JORDÁN, C; FARÍAS, C; FLORES, J; BRO, P. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. J. Hydrol. (327)1-2: 249-257. 2006.

PIZARRO, R; FLORES, J; SANGÜESA, C; MARTÍNEZ, E; LEÓN, L. [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002008000200006&script=sci\\_arttext - a1#a1](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0717-92002008000200006&script=sci_arttext-a1#a1) 2008. Diseño hidrológico de zanjas de infiltración en el secano costero e interior de las regiones semiáridas de Chile. Bosque. vol.29, n.2, pp. 136-145.

RAWLS, W; BRAKENSIEK, D; MILLER, N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data, J. Hydraul. Eng., 109(1), 62–70. 1983.

TÉMEZ, J. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. Madrid. España. 111p. 1978.

VERBIST, K. Climatic and soil physical constraints for efficient rain water harvesting in degraded lands of Chile. PhD thesis, Ghent University. ISBN: 978-90-5989-445-7. 258 p. 2011.

XIE, M; ESAKI, T; CAI, M. A time –space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard. Environmental geology, Volume 46, pp. 840-850. 2004.