

Aplicación del modelo Topsimpl a la cuenca del estero Coihueco, Provincia de Ñuble, Chile

Juan Stella^{1*}, José Arumi² y Luis Salgado²

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT, USA.

² Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Casilla 537 Santiago de Chile, Chile.

RESUMEN

En este trabajo se aplicó el modelo de simulación hidrológica Topsimpl en la cuenca de los ríos Niblinto y Miraflores, Provincia de Ñuble, sur de Chile, en los periodos 1982-1983 y 1987-1988. Topsimpl es una versión simplificada del modelo de simulación hidrológica Topmodel, para cuencas de superficie media de 100 km². En la cuenca del río Niblinto se aplicó, calibró y verificó el modelo, se hicieron análisis estadísticos y de variación de los parámetros para poder analizar el comportamiento del modelo bajo esas condiciones de trabajo. Posteriormente, con los parámetros calibrados en la cuenca del río Niblinto se aplicó el modelo Topsimpl en la cuenca de Miraflores que es vecina a la del Niblinto. Los resultados conseguidos en la cuenca de Miraflores se compararon con los obtenidos por el modelo de Brown y Ferrer en la misma zona. Los resultados obtenidos por el modelo de simulación Topsimpl en la aplicación, calibración y verificación en el río Niblinto muestran una alta correlación entre los caudales simulados y los observados. La comparación del Topsimpl con el modelo de Brown y Ferrer en el río Miraflores muestra que hay una alta correlación entre los caudales simulados por Topsimpl y este modelo. Sobre la base de este estudio se concluye que el modelo Topsimpl, además de ser un modelo simple en su aplicación, se puede usar para simular y predecir caudales medios diarios y mensuales con alta exactitud en las cuencas precordilleranas de Chile.

Palabras clave: Topmodel, Topsimpl, calibración, Chile

Application of the Topsimpl model to the basin of the Coihueco creek, Province of Ñuble, Chile

ABSTRACT

The hydrologic simulation model Topsimpl was applied in the basin of the rivers Niblinto and Miraflores, Province of Ñuble, South of Chile, during the periods 1982-1983 and 1987-1988. Topsimpl is a simplified version of the hydrologic simulation model Topmodel, for basins of average surface area of 100 km². Topsimpl was applied, calibrated, and verified in the basin of the Niblinto. Statistical analysis and variation of the parameters were conducted to analyze the behavior of the model under the working conditions. The calibrated parameters obtained in the basin of the Niblinto river were applied in the Miraflores basin that is a neighbor to Niblinto basin and the results compared with the obtained in other research by the model of Brown and Ferrer in the same zone. The results obtained for the application, calibration, and verification of Topsimpl in the Niblinto river showed a high correlation between the discharges simulated and observed. The comparison of Topsimpl with the model of Brown and Ferrer in the Miraflores river showed a high correlation between the discharges simulated by both models. On the base of this study, it is concluded that the Topsimpl model, besides being a simple model in its application, can be used to simulate and predict daily media and monthly discharges with high accuracy in the basins of Andes mountains of Chile.

Key words: Topmodel, Topsimpl, calibration, Chile

*Autor de correspondencia: Juan Stella

E-mail: juan.stella@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población y de la calidad de vida ha creado una creciente presión sobre los recursos hídricos, con el objeto de satisfacer las necesidades vitales del hombre. Esto genera la necesidad de construir más obras hidráulicas (embalses, bocatomas, canales, etc.) y de optimizar su servicio para satisfacer futuras demandas de agua (para riego, uso doméstico, generación eléctrica, etc.).

En la Provincia de Ñuble, Chile, se maneja la idea de construir varios embalses. Con ellos se busca solucionar los problemas ocasionados por la falta de agua para riego que se vienen registrando en los últimos años, ampliando y asegurando el área de los cultivos bajo riego. Esto mejoraría las condiciones de producción en la agricultura, de tal forma que pueda ser más competitiva, pues provocaría las condiciones favorables para producir la reconversión a rubros más rentables de consumo interno o exportación.

El embalse Coihueco es el único que existe en la Provincia. Este embalse, cuya construcción finalizó en 1971, está ubicado en las cercanías de la ciudad del mismo nombre en la comuna de Coihueco. El embalse riega aproximadamente 4 600 ha con seguridad de riego de un 85% y tiene una capacidad de almacenamiento de 28,8 millones de m³. Este embalse se llena en los meses de invierno mediante un canal alimentador desde el río Niblinto. Entre otros posibles proyectos de embalses están el Miraflores sobre los esteros Coihueco y Relbuncó, el Káiser sobre el estero del mismo nombre, El Esperanza sobre el río Chillán, La Punilla sobre el río Ñuble y el San Fabián en los esteros el Carmen y el Valiente.

Un embalse en la cuenca de Miraflores podría poner adicionalmente 7 000 ha bajo riego, con lo que se llegaría a casi 12 000 ha bajo riego regulado. Además, esta obra podría operar en forma conjunta con el embalse Coihueco, con lo cual se maximizaría los recursos disponibles en el área.

Para el diseño de un embalse es necesario disponer de por lo menos treinta años de registros de caudales medios mensuales. Cuando en un cauce no se dispone de dichos datos, es indispensable generar un registro para cuyo efecto los modelos de simulación hidrológica se transforman en una herramienta fundamental. En los últimos años, en Chile se han registrado una sucesión de sequías estacionales con el consecuente déficit hídrico y los problemas que ello trae para los cultivos, energía y uso doméstico.

Por otra parte, desde hace varios años existe la idea de construir algunos embalses en la Provincia de Ñuble, como son: Miraflores, Kaiser, La Punilla, Esperanza y San Fabián de Alico. La posibilidad de que se construya

alguno de estos embalses hace importante disponer de modelos de simulación hidrológica probados en la zona, por lo cual se eligieron dos cuencas de esta provincia para evaluar el comportamiento del modelo Topsimpl.

Las cuencas de los ríos Niblinto y Miraflores son contiguas geográficamente y presentan similares condiciones topográficas, geológicas y climatológicas. Como en el río Niblinto se cuenta con información de caudales medios diarios (en un punto en que esta situada la bocatoma del canal alimentador del embalse Coihueco) es posible utilizar esta información para calibrar un modelo hidrológico que sería utilizado para estimar el aporte de agua que generará la cuenca del Miraflores.

En los últimos años, con los importantes avances que se han hecho en computación, en los métodos numéricos y la física de suelos, se ha producido un verdadero cambio en la metodología de simulación, en especial en la simulación hidrológica. Por esta razón en los estudios es necesario utilizar las nuevas herramientas de que se dispone. Consecuente con lo anterior, este trabajo se centra en el uso del modelo de simulación hidrológica Topsimpl. Este Modelo fue creado por Saulnier (1996) en el Instituto Politécnico de Grenoble, y se desarrolló en el Laboratorio de Estudio de las Transferencias en Hidrología y Medioambiente (LTHE) en Francia, una versión simplificada del modelo de simulación hidrológica Topmodel, el cual fue llamado Topsimpl.

Topsimpl es un modelo de base física, relativamente nuevo, el cual se adaptó a las necesidades y condiciones de la zona para la generación de registros hidrológicos necesarios para un estudio definitivo del embalse Miraflores, aplicando un modelo de simulación hidrológica para la predicción de caudales medios diarios y mensuales en la cuenca de Miraflores en la Provincia de Ñuble, Octava Región.

El objetivo de este estudio es aplicar, calibrar y verificar el modelo hidrológico Topsimpl en la cuenca del río Niblinto. Posteriormente, con los parámetros calibrados en la cuenca del río Niblinto aplicar el modelo a la cuenca de Miraflores y comparar estos resultados con los obtenidos por el modelo de simulación hidrológica de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Públicas, 1994) que fue aplicado en la misma zona en años anteriores.

MATERIALES Y METODOS

El modelo Topsimpl

El modelo Topsimpl está diseñado para cuencas de superficie media (100 km²) donde se dispone de escasa información, como: topografía del terreno, precipitaciones y cubierta vegetal. Para su calibración el modelo necesita de caudales medios diarios registrados y precipitaciones

medidas con un intervalo de por lo menos 8 h (Saulnier, 1996). Para Beven *et al.* (1995), la teoría de Topmodel se basa en una simplificación del ciclo hidrológico sustentada en cuatro hipótesis:

- Un fenómeno dinámico, como es la respuesta hidrológica, que se puede expresar como la suma de una serie de fenómenos estáticos en cada una de las celdas en que se divide la cuenca.
- El gradiente hidráulico de la zona saturada el cual puede ser aproximado a la pendiente de la superficie topográfica local en cada celda.
- La infiltración que se rige por la siguiente ley de índice de conductividad hidráulica saturada definida por Franchini *et al.* (1996):

$$K = K_o \cdot e^{-\frac{z_i}{M}} \quad (1)$$

donde:

- K índice de conductividad hidráulica saturada, m/h
 K_o índice de conductividad hidráulica saturada superficial, m/h
 Z_i profundidad de la zona saturada, m
 M tasa de decrecimiento de la conductividad hidráulica saturada, m

- La combinación de la ecuación 1 con la ley de Darcy (ecuación 2) para flujo subsuperficial, permite calcular un índice topográfico (IT) que se utiliza para simular la escorrentía subsuperficial. El IT se calcula en base a una discretización de la cuenca en celdas regulares. Este IT se calcula para cada celda, mediante ecuación 3:

$$q_i = T_i(z_i) \cdot \text{tg}(\beta_i) \quad (2)$$

donde:

- q_i descarga por unidad de ancho, m²/h
 T_i(z_i) transmisividad hidráulica, m/h
 tg(β_i) pendiente de la celda

$$IT = \ln\left(\frac{a_i}{\text{tg}(\beta_i)}\right) \quad (3)$$

donde:

- IT índice topográfico
 a_i ancho de la celda, m

Con estas hipótesis de trabajo, la simulación hidrológica se realiza fundamentalmente en base a dos componentes (Saulnier, 1996):

a) Balance hídrico

El modelo realiza un balance hídrico en cada una de las celdas en que se divide la cuenca y en un mismo período, llamado tiempo base del evento (frecuencia con que se ingresan las precipitaciones). En este balance se supone que la escorrentía superficial se produce cuando la intensidad de precipitación (P) es mayor que el K_o y su valor es igual a P-K_o. La infiltración (h) es igual a los valores de intensidad de precipitación caída (P_o) menores o iguales que K_o. El agua infiltrada aumenta hasta la altura de agua útil a profundidad de raíces (SR_{max}). Si el nuevo contenido de agua es mayor que SR_{max}, el excedente pasa a la zona no saturada de las celdas con igual índice topográfico. El modelo calcula las pérdidas de agua por interceptación y evapotranspiración utilizando el parámetro Inter que se debe calibrar; este valor se le resta a la altura de agua infiltrada que sea mayor que SR_{max}.

El balance hídrico total de la cuenca se hace ponderando por clase de IT. De acuerdo a esta clase, se calcula el déficit y la recarga de la zona no saturada. Si el déficit es menor o igual a cero, significa que las celdas están saturadas. Si la celda no está saturada, se calcula el valor de la recarga. La recarga total es la suma de las recargas locales ponderadas por clase de IT.

b) Función de transferencia

Cuando finaliza el balance hídrico en cada celda, el transporte de agua en la cuenca se simula utilizando dos funciones: el hidrograma unitario y una función basada en los tiempos de concentración de la cuenca. Estas funciones de transferencia actúan de la siguiente manera: la escorrentía superficial, que se produce (como se indicó en el balance hídrico) de la diferencia entre la P y K_o, cuando P es mayor que K_o. El aporte de la escorrentía superficial a la descarga se calcula para cada período de tiempo base, utilizando directamente el hidrograma unitario y el volumen de agua infiltrada al final del balance hídrico es transformado en escorrentía subsuperficial usando la suposición de que las celdas con mayor índice topográfico están en la parte baja de la cuenca y por lo tanto tienen un menor tiempo de concentración. Por esta razón es necesario ingresar los tiempos de concentración de la cuenca para distribuir la escorrentía subsuperficial en forma proporcional a los tiempos de concentración. Posteriormente esta escorrentía subsuperficial así ponderada se transfiere al hidrograma unitario.

Descripción del área en estudio

La cuenca del río Niblinto posee una superficie

de 165,20 km² y presenta una orientación de SW-NE, ubicándose entre 71°46'-71°25' S y los 36°38'-36°49' O. La cuenca del estero Miraflores, ubicada adyacente a la anterior, posee una superficie de 160,65 km², también presenta una orientación SW-NE, ubicándose entre 71°49'-71°35' S y los 36°39'-36°49' O. En ambos casos la vía principal de acceso a las cuencas es la ruta Chillán-Coihueco.

Las cuencas del Niblinto y del Miraflores están constituidas básicamente por dos formaciones del cuaternario no consolidado (Salvo, 1974): 1) Coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticas y basálticos asociados a volcanes antiguos bien conservados o activos que en general no presentan características acuíferas y 2) Coladas, brechas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de lutitas, calizas, arenizas y conglomerados, en general impermeables. Se consideran basamento de los rellenos acuíferos.

Los suelos que predominan dentro de ambas cuencas son de origen volcánico, en especial de la serie Arrayán. Estos suelos se caracterizan por ser profundos, con alto porcentaje de materia orgánica con una textura y estructura adecuada para la agricultura (Ministerio de Obras Públicas, 1994). La zona precordillerana es de origen sedimentario y forma una acumulación caótica de materiales glaciales, volcánicos, y fluviales dispuestos al pie de la cordillera. Corresponde a un territorio de difícil penetración por las características topográficas abruptas de las laderas, ríos encajonados y una vegetación mesomórfica densa.

La cordillera de los Andes se presenta deprimida, teniendo su mayor altura en el volcán Chillán (3.122 msnm). El relieve de esta zona se dispone de una manera un tanto anárquica apareciendo cadenas transversales, tales como los Nevados de Chillán, orientados en un eje Noroeste-Sureste y la Meseta del Gato en orientación Norte-Sur (Ingendesa, 1992).

En la precordillera andina se encuentra la formación vegetal conocida como "matorral preandino de hojas luciformes", de carácter abiertamente mesofítico. Tiene un aspecto de matorral denso que en las quebradas es reemplazado por una asociación de árboles siempre verdes. Entre las especies arbustivas más importantes se encuentran *Fabiana imbricata* (pichi), *Proustia pungens* (huañil) y *Ephedra andina* (pingo pingo). Entre las especies de mayor verdor, que se mezclan con las anteriores, se encuentran *Peumus boldus* (boldo), *Cryptocarya alba* (peumo) y *Persea lingue* (lingue) (Salvo, 1974).

En los pisos inferiores de la cordillera andina hay abundantes bosques de roble (*Nothofagus obliqua*), mientras en el piso superior se encuentran bosques de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*), bosques de coigue (*Nothofagus puvilio*) y de ñirre (*Nothofagus*

antártica), los que constituyen un último cinturón arbóreo en los andes (Ingendesa, 1992).

Desde el punto de vista climático la zona se puede caracterizar por un clima mediterráneo con período estival de cinco meses de duración (noviembre-marzo), con alta radiación solar de 561 cal/cm²/día y evapotranspiración de 7,2 mm/día, y un período invernal lluvioso de tres meses que concentra el 50% de las precipitaciones anuales (Ingendesa, 1992). Según Salvo (1974) y de acuerdo con la metodología de Thornthwaite, el clima se puede clasificar en la categoría de húmedo mesotermal, con deficiencia de precipitación en verano. En el Cuadro 1 se indican algunos datos climáticos durante el período en que se realizó el estudio.

Las precipitaciones que afectan a las cuencas de Miraflores y del Niblinto se caracterizan por ser producto de sistemas frontales provenientes del Pacífico, determinando así precipitaciones de tipo frontal con un marcado efecto orográfico. Como consecuencia de la ubicación cordillerana de las unidades hidrográficas utilizadas en este estudio, existen precipitaciones de tipo pluvial en Miraflores y mixta (aunque principalmente pluvial) en la cuenca del río Niblinto. La precipitación media anual en esta zona es de 1.492 mm.

Los cursos principales de la cuenca de Miraflores son los esteros Coihueco y el Relbuncó (Figura 1). El estero Coihueco tiene como tributarios de cierta importancia a los esteros Salto y Kaiser. El estero Relbuncó carece de tributarios de importancia. La cuenca de Miraflores tiene una superficie de 160,65 km², longitud máxima de 23,5 km y un ancho máximo de 9 km.

El curso principal de la cuenca del Niblinto es el propio río Niblinto, como muestra la Figura 1, careciendo de tributarios de importancia, pero incluyendo dentro de ella la laguna El Baúl en el sector cordillerano. El río Niblinto es tributario del río Cato. Esta cuenca tiene una superficie de 165,20 km², una longitud máxima de 30,3 km. y un ancho máximo de 8,5 km.

Cuadro 1. Datos climáticos de la zona durante los años hidrológicos 1982-1983 y 1987-1988.

Datos	1982-1983	1987-1988
Precipitación total anual (mm)	2.319,9	1.374,8
Promedio mensual de precipitación (mm)	195,71	114,1
Mes más lluvioso	Junio	Junio
Temperatura mínima (°C)	-3,0 (Mayo)	-5,5 (Mayo)
Temperatura máxima (°C)	34,7 (Marzo)	41,0 (Marzo)



Figura 1. Cuencas de los ríos Niblinto y Miraflores

Información para la aplicación del modelo Topsimpl

Precipitaciones y caudales

Para la calibración y aplicación del modelo se usaron los datos de precipitaciones diarias de la estación meteorológica de Coihueco, registradas por la Dirección General de Aguas (DGA). Se usó un factor de corrección espacial (Ministerio de Obras Públicas, 1991) que permite incluir el efecto orográfico sobre las precipitaciones de la cuenca. Como las cuencas son relativamente pequeñas, vecinas y con orientaciones perpendiculares a las isoyetas, se determinó un factor de corrección espacial común de 1,6, que permite estimar en forma adecuada la precipitación sobre las cuencas del río Niblinto y de la zona de Miraflores. No se consideró el aporte nival porque ambas cuencas son principalmente pluviales (Ministerio de Obras Públicas, 1994).

El modelo Topsimpl trabaja con precipitaciones horarias, los datos disponibles corresponden a la precipitación total ocurrida durante un día. Puesto que se desconoce la duración de los eventos, se decidió que cada evento tendría una duración de 24 h. Así entonces, la precipitación total diaria se dividió en períodos de 6 h cada una (cuatro períodos por día). Esta distribución se basó en el trabajo de Varas (1987) quien propone que la distribución más probable para la zona es aquella que reparte el evento en cuatro períodos (Cuadro 2), donde la mayor precipitación ocurre en el primer o segundo cuarto. En nuestro caso se consideró que la mayor precipitación ocurre en el segundo

cuarto. Se supuso este criterio, en base al carácter de la zona y de acuerdo a la experiencia observada, de testimonios recogidos en el área, quienes describieron como era la forma más probable como se distribuye la lluvia durante un día. También en este caso se decidió acumular en el segundo período el 70% de la precipitación total caída y en el resto de los períodos se repartió en forma similar la precipitación restante. Esto se hizo así sobre la base del trabajo de Varas (1987), quien le atribuye una probabilidad de 50% a que 80% de la precipitación total se produzca en el 50% del tiempo acumulado.

El modelo Topsimpl calcula los caudales instantáneos según el período de tiempo con el que se ingresaron las precipitaciones, que en este caso fue cada 6 h. Los caudales así calculados se transformaron en caudales medios diarios y se compararon con los caudales medios diarios medidos.

Para la aplicación, calibración y verificación del modelo se usaron los caudales medios diarios de los años hidrológicos 1982-1983 y 1987-1988, respectivamente. El caudal inicial para iniciar el proceso de simulación fue el caudal medio diario del día anterior. Esto se consideró así ya que los caudales al comienzo del año hidrológico son

Cuadro 2. Distribución de precipitación diaria.

Período de tiempo diario	Precipitación total diaria (%)
1°	10
2°	70
3°	10
4°	10

muy bajos, por lo que se supone que el error con respecto al caudal medido es despreciable. Los caudales iniciales utilizados para los años hidrológicos 1982-1983 y 1987-1987 fueron 0,99 y 1,23 m³/s, respectivamente.

Hidrograma unitario

La aplicación del modelo exige utilizar un hidrograma unitario adimensional. Para los efectos de esta calibración se utilizó el modelo de Benítez y Arteaga (1974), con las constantes recomendadas para el área. Se seleccionó este hidrograma unitario debido a que fue desarrollado en Chile, además de tener un amplio uso a nivel nacional. Con los datos geomorfológicos de las cuencas utilizadas, los hidrogramas unitarios sintéticos generados se muestran en las Figuras 2 y 3 a partir del modelo de Benítez y Arteaga (1974).

Tiempo de concentración

Otro de los requisitos para aplicar el modelo es definir los tiempos de concentración de la cuenca, expresadas en porcentaje del tiempo requerido para el transporte del agua. Los tiempos de concentración se calcularon en base a la metodología descrita por Chow *et al.* (1994). Según estos autores, la velocidad de desplazamiento de una gota de agua en la superficie de una cuenca depende de la pendiente del suelo y su capa vegetal. Conociendo la velocidad y la distancia entre zonas de similar cubierta vegetal, sobre la que se desplaza la gota de agua, a partir de la ecuación 4 es posible conocer el tiempo que tarda en cubrir esa distancia.

donde: $d = v t$ (4)

d	distancia entre zonas, m
v	velocidad del agua, m/s
t	tiempo de concentración, s

Puesto que la cubierta vegetal no es uniforme en toda la cuenca, se asumió que está compuesta por pastizales, bosques y cultivos. El Cuadro 3 indica el cálculo de los tiempos de concentración.

Índice topográfico

El índice topográfico se calculó a partir de la ecuación 3. Para su cálculo se utilizaron cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar de Chile, escala 1:50.000, con curvas de nivel cada 25 m. La cuenca se dividió en celdas de 200 x 200 m, se calcularon las cotas en cada nodo y se ingresaron estos datos a la subrutina (DTM9501) que realiza el cálculo.

Parámetros

En la sección, se definen y calculan los cuatro parámetros con los que trabaja el modelo Topsimpl. Para su calibración es necesario disponer de esos valores calculados y hacer el análisis correspondiente.

a. Índice de conductividad hidráulica saturada superficial (K_o)

Para el cálculo del K_o, que interviene en la ecuación 1, es necesario determinar la conductividad hidráulica saturada superficial (K_o^{*}), para lo cual es necesario tomar muestras de suelo y posteriormente analizarlas en laboratorio. En este trabajo se utilizaron 21 muestras, provenientes de siete puntos dentro de la cuenca y con

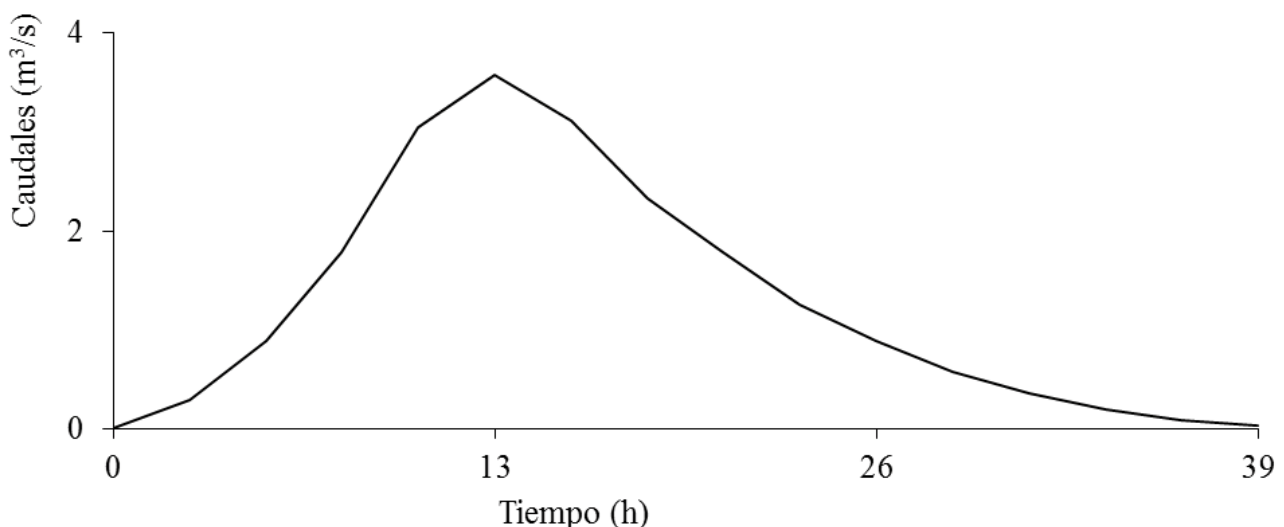


Figura 2. Hidrograma unitario del río Niblinto.

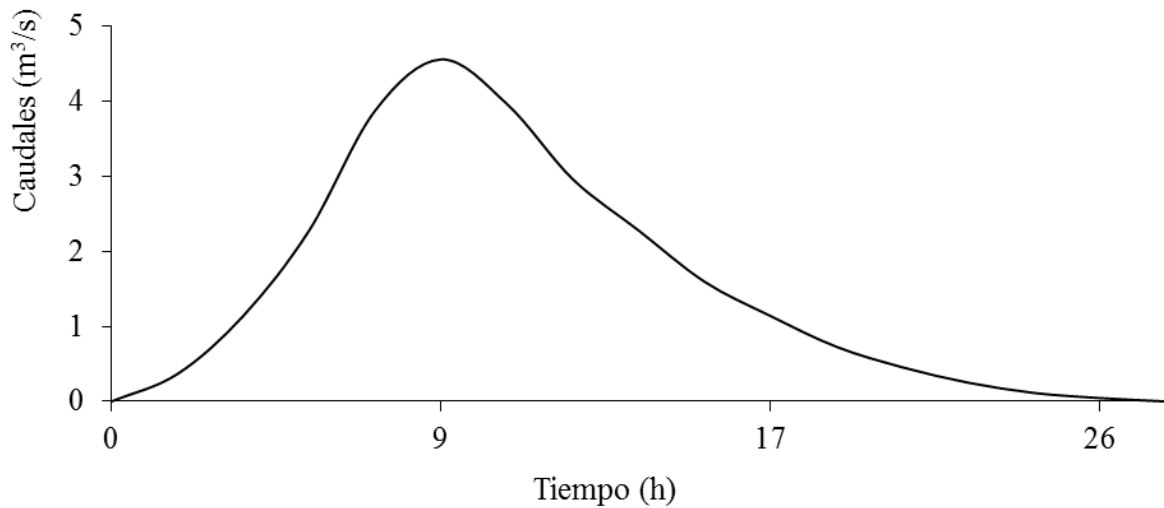


Figura 3. Hidrograma unitario del río Miraflores.

tres repeticiones. Los resultados obtenidos en laboratorio fueron procesados mediante el método del permeámetro de carga constante, para este rango de medidas de K_o^* se tiene una media aritmética de 0,051 m/h (0,122 m/d).

Es necesario tener presente que la medición de la K_o^* se hace en forma puntual; sin embargo, en el modelo se considera la variable K_o en toda la celda. Para obtener el K_o , se usa la metodología propuesta por Franchini *et al.* (1996). Para aplicar dicho procedimiento es necesario disponer del índice topográfico promedio (l) para diferentes medidas de celda (GS). Con estos datos se hace una correlación, la cual debe dar como resultado una función logarítmica, de acuerdo a la expresión general que tiene el índice topográfico representado por la ecuación 3. Con este valor se obtuvo el índice topográfico promedio correspondiente (l_o), cuyo resultado se presenta en el Cuadro 4.

Posteriormente se aplicó la ecuación 5 propuesta por Franchini *et al.* (1996) para poder obtener el K_o .

$$\lambda_{200} - \lambda_o = \ln \left(\frac{K_o^*}{200} \right) \quad (5)$$

donde:

- K_o^{200} K_o para una celda de 200 m de lado
- K_o^* conductividad hidráulica saturada superficial para una celda de 1 m de lado
- l_{200} índice topográfico promedio para una celda de lado 200 m
- l_o índice topográfico promedio para una celda de lado 1 m

Con los datos anteriores se obtuvo que el K_o para cada celda de 200 m de lado, para los efectos de la aplicación del modelo, fue 0,094 m/h.

b. Tasa de decrecimiento de la conductividad (M)

Esta se calcula mediante la ecuación (6) (Saulnier, 1996).

$$M = \frac{t - t_o}{\frac{1}{Q(t)} - \frac{1}{Q(t_o)}} \quad (6)$$

donde:

- M tasa de decrecimiento del índice de conductividad hidráulica saturada, m
- $Q(t)$ caudal del río en el tiempo t, m³/s
- $Q(t_o)$ caudal del río en el tiempo t_o , m³/s

Cuadro 3. Cálculo de los tiempos de concentración de las cuencas de los ríos Niblinto y Miraflores.

Cuenca	Cultivo	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Porcentaje (%)
Niblinto	Pastizal	6 000	1,27	4 724,4	0,104
	Bosque	21 000	0,60	35 000	0,776
	Cultivo	4 000	0,75	5 333,3	0,118
Miraflores	Pastizal	2 000	1,40	1 428,5	0,031
	Bosque	18 000	0,50	36 000	0,792
	Cultivo	4 000	0,50	8 000	0,176

Cuadro 4. Dimensión de la celda (GS) en función del índice topográfico promedio (λ_0).

GS (m)	λ_0
1	1,02
200	7,95
1000	9,01

Para el cálculo de M se utilizaron los caudales medios diarios observados que se obtienen cuando $Q(t_0) > Q(t)$, o sea, cuando se produce una disminución en el caudal, por la propia definición de la tasa de decrecimiento del índice conductividad hidráulica saturada y porque M debe ser positivo, de lo contrario no tiene significado. Los valores considerados para el cálculo de la tasa de decrecimiento de la conductividad fueron los caudales medios diarios medidos en el año hidrológico seleccionado (1982-1983).

Considerando períodos de tiempo de un día ($t_0 = 0$ y $t = 86\ 400$ s) se obtiene la media aritmética de los valores de M calculados para ese año en toda la superficie de la cuenca. Este resultado se divide por dicha superficie expresada en metros cuadrados ($165,2 \times 10^6$ m²). Para los efectos de la aplicación del modelo para el año hidrológico 1982-1983, este valor fue 0,094 m.

c. Altura máxima de agua útil a profundidad de raíces (SRmax)

Este parámetro se obtuvo a partir de las investigaciones realizadas por Huber *et al.* (1998) quienes llegan a la conclusión de que el agua edáfica (SRmax) es equivalente a una proporción de la precipitación total anual caída, para una determinada densidad de árboles. Para efectos del cálculo se supuso que esta cuenca tiene una densidad homogénea de 1.200 árboles por ha (Sanhueza, comunicación personal, 1999).

En el estudio mencionado, Huber *et al.* (1998) deducen que SRmax representa el 13,6% de la precipitación para una densidad de 1 560 árboles/ha y un 19,5% para una densidad de 850 árboles/ha. En nuestro caso (1 200 árboles/ha) se tomó el promedio de esos porcentajes dando como resultado que SRmax equivale a un 16,55% de la precipitación total caída en el año hidrológico 1982-1983. A la vez este parámetro se debe calcular para el período de simulación de 6 h seleccionado, el cual fue 0,00026 m.

d. Evapotranspiración e intercepción (Inter)

De acuerdo con Saulnier (1996), este parámetro es de baja influencia en la aplicación del modelo por lo cual se decidió simplificar su cálculo tomando una cubierta vegetal homogénea para toda la cuenca. Este parámetro también se estimó a partir de los trabajos realizados

por Huber *et al.* (1998) en bosques con características semejantes a los de las cuencas estudiadas. El parámetro Inter depende directamente de la densidad de árboles en la zona estudiada.

En su trabajo, Huber *et al.* (1998) llegan a la conclusión que las pérdidas por Inter son equivalentes a una proporción de la precipitación total anual caída. Para una densidad de árboles de 1 560 árboles/ha se tiene que Inter es equivalente al 79% de la precipitación y para 850 árboles/ha equivale al 77%. En este caso, haciendo el promedio de los porcentajes anteriores Inter representa el 78% de la precipitación para el año hidrológico 1982-1983; a su vez este parámetro se debe calcular para el período de simulación de 6 h. El resultado correspondiente para el año hidrológico 1982-1983 fue 0,00123 m/h.

e. Nash - Sutcliffe

Las descargas simuladas y observadas entre los caudales medios diarios obtenidos mediante el proceso de calibración y los observados en la cuenca del río Niblinto en los períodos 1982-1983 y 1987-1988 fueron comparados utilizando los coeficientes de regresión, correlación, pendiente de la recta de regresión y Nash - Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) dado por la ecuación 7.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

donde:

O_i	Caudales observados
\bar{O}	Media de los caudales observados
S_i	Caudales simulados
n	Numero de pasos en la simulación

RESULTADOS

Aplicación y calibración en la cuenca del río Niblinto

Para la aplicación del modelo Topsimpl en la cuenca del río Niblinto, durante el período 1982-1983, se usaron como parámetros los calculados con datos de terreno resumidos en el Cuadro 5.

El modelo Topsimpl calcula los caudales instantáneos según el período de tiempo con el que se ingresaron las precipitaciones, que en este caso fue cada 6 h. Los caudales así calculados se transformaron en caudales medios diarios y se compararon con los caudales medios diarios observados. La simulación realizada con

Cuadro 5. Parámetros para la aplicación del Topsisimpl, 1982-1983.

Parámetro	Valor
Ko (m/h)	52
M (m)	0,094
SRmax (m)	0,00026
Inter (m/h)	0,00123

los parámetros obtenidos a partir de datos calculados en terreno para el año hidrológico 1982-1983 durante 365 días se presenta en la Figura 4.

La optimización de los parámetros para la calibración se hizo de tal forma que el coeficiente de Nash-Sutcliffe fuera máximo. Se consideró que la calibración fue aceptable cuando los caudales medios diarios, simulados y observados, siguieran las mismas tendencias en el tiempo. A través del proceso de calibración se determinó que los valores de los parámetros con los cuales se obtuvo la mejor correlación entre caudales observados y generados son los que se indican en el Cuadro 6. La simulación realizada con los parámetros calibrados para el año hidrológico 1982-1983 durante 365 días se presenta en la Figura 5.

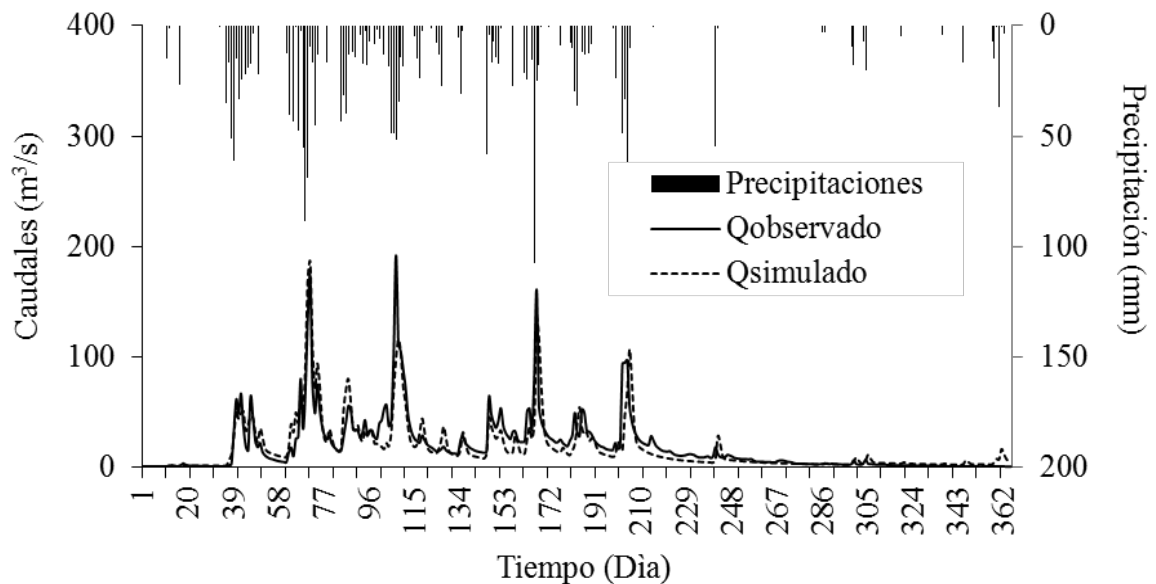
Con el propósito de verificar la bondad del proceso de calibración realizado anteriormente se aplicó el modelo con los parámetros calibrados y los datos de precipitación del año hidrológico 1987-1988, durante 365 días y se obtuvieron los resultados que se indican en la Figura 6.

Cuadro 6. Parámetros para la calibración del Topsisimpl, 1982-1983.

Parámetro	Valor
Ko (m/h)	75
M 8 (m)	0,086
SRmax (m)	0,00015
Inter (m/h)	0,004

Aplicación en la cuenca de Miraflores

Una vez aplicado, calibrado y verificado el modelo en la cuenca del río Niblinto durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988, este se aplicó a la cuenca de Miraflores durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988 con los parámetros calibrados anteriormente (Cuadro 5). Los resultados obtenidos se compararon con los generados por el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Públicas, 1994) para esos mismos períodos obtenidos por Gálvez y Pizarro (1983). Este proceso tiene como propósito establecer un cierto grado de confiabilidad del modelo al comparar sus resultados con los generados por otro modelo de gran aceptación en Chile. Para comparar los resultados de ambos modelos, los caudales generados cada 6 h por el modelo Topsisimpl se transformaron en caudales medios mensuales que es el mínimo período de tiempo con el que trabaja el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Públicas, 1994). La Figura 7 muestra los caudales medios mensuales obtenidos de la simulación de los modelos Topsisimpl y por Gálvez y Pizarro

**Figura 4.** Caudales medios diarios, simulados y medidos, utilizando parámetros calculados en terreno, año hidrológico 1982-1983.

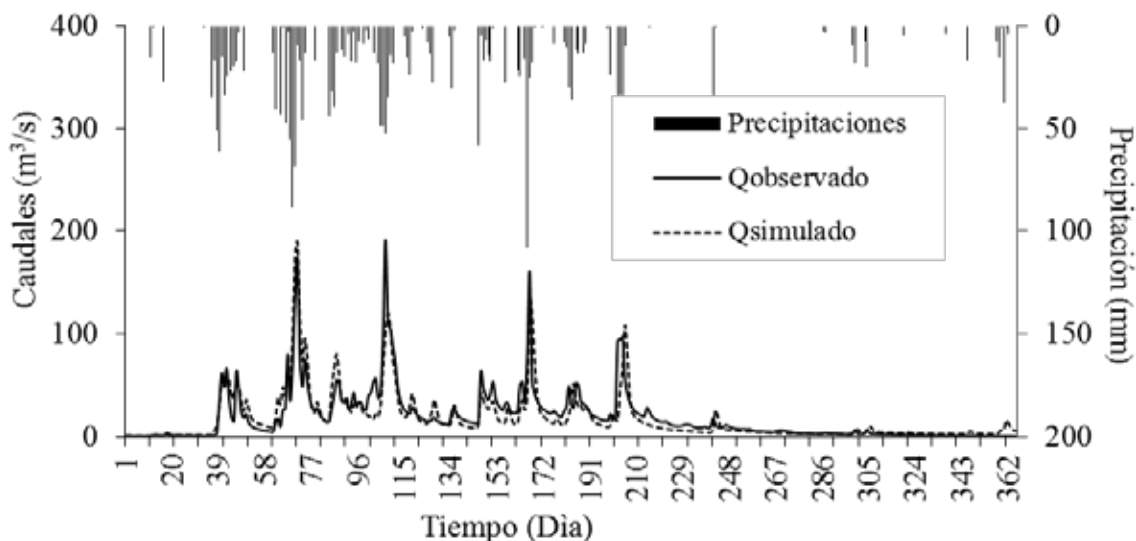


Figura 5. Caudales medios diarios, simulados y medidos utilizando parámetros calibrados, año hidrológico 1982-1983.

(1983) usando el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Publicas, 1994) en la cuenca de Miraflores, para el año hidrológico 1982-1983, durante 12 meses, con los parámetros calibrados para Topsimpl en la cuenca del río Niblinto durante el período 1982-1983.

La Figura 8 muestra los caudales medios mensuales obtenidos de la simulación de los modelos Topsimpl y por Gálvez y Pizarro (1983) usando el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Publicas, 1994) en la cuenca de Miraflores, para el año hidrológico 1987-1988, durante

12 meses, con los parámetros calibrados para Topsimpl en la cuenca del río Niblinto durante el período 1982-1983.

Análisis estadístico de los resultados

Para la aplicación, calibración y verificación del modelo durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988 en la cuenca del río Niblinto, se calcularon los coeficientes de correlación (r), coeficiente de regresión (R^2), pendiente de la recta de regresión (s) y Nash- Sutcliffe y los cuales se presentan en el Cuadro 7.

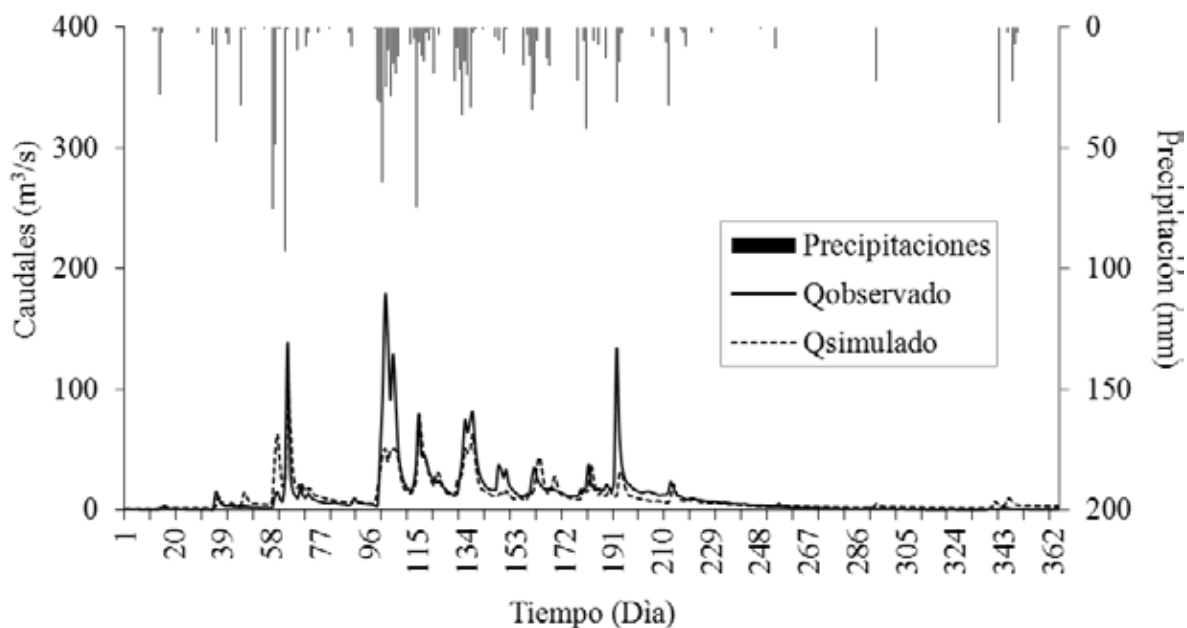


Figura 6. Caudales medios diarios, simulados y observados, año hidrológico 1987-1988.

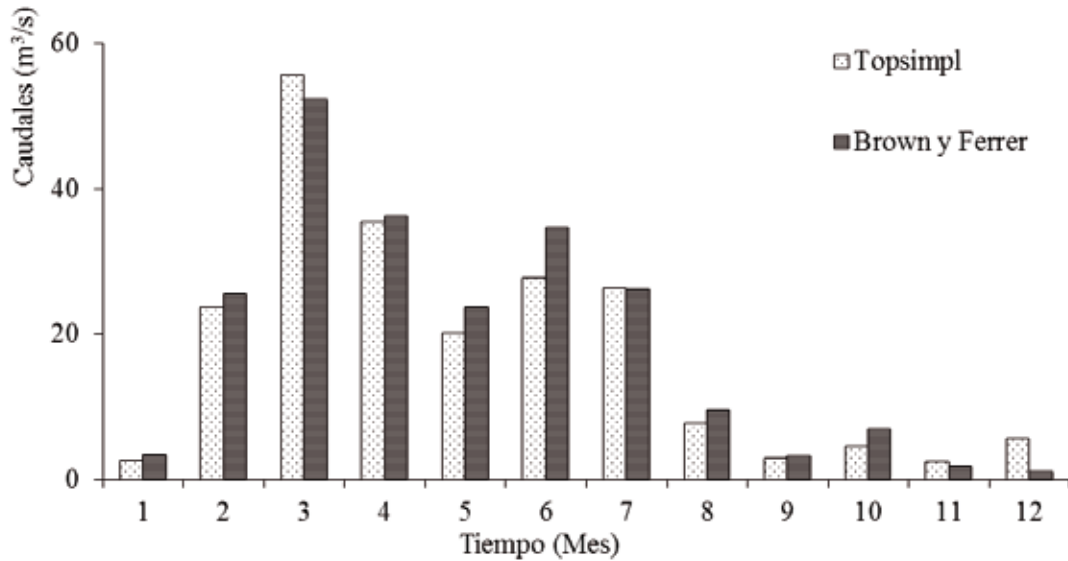


Figura 7. Caudales medios mensuales simulados mediante el modelo Topsimpl vs Brown y Ferrer, (año hidrológico 1982-1983).

Para la aplicación, calibración y verificación del modelo durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988, durante 365 días en la cuenca del río Niblinto, se calcularon la media, máxima y mínima de los caudales medios diarios simulados y observados, cuyo resultados se muestran en el Cuadro 8.

Para la aplicación del modelo Topsimpl en la cuenca del río Miraflores con los datos calibrados en la cuenca del río Niblinto, durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988 y su comparación con los resultados obtenidos por Gálvez y Pizarro (1983) usando el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Publicas, 1994) se calcularon

los coeficientes de regresión (R^2), correlación (r), pendiente de la recta de regresión (s) y Nash- Sutcliffe. Los resultados se muestran en el Cuadro 9.

Para la aplicación del modelo Topsimpl en la cuenca de Miraflores con los datos calibrados en la cuenca del río Niblinto, durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988 y su comparación con los resultados obtenidos por Gálvez y Pizarro (1983) usando el modelo de Brown y Ferrer (Ministerio de Obras Publicas, 1994) se calcularon la media, máxima y mínima de los caudales medios mensuales simulados y observados (Cuadro 10).

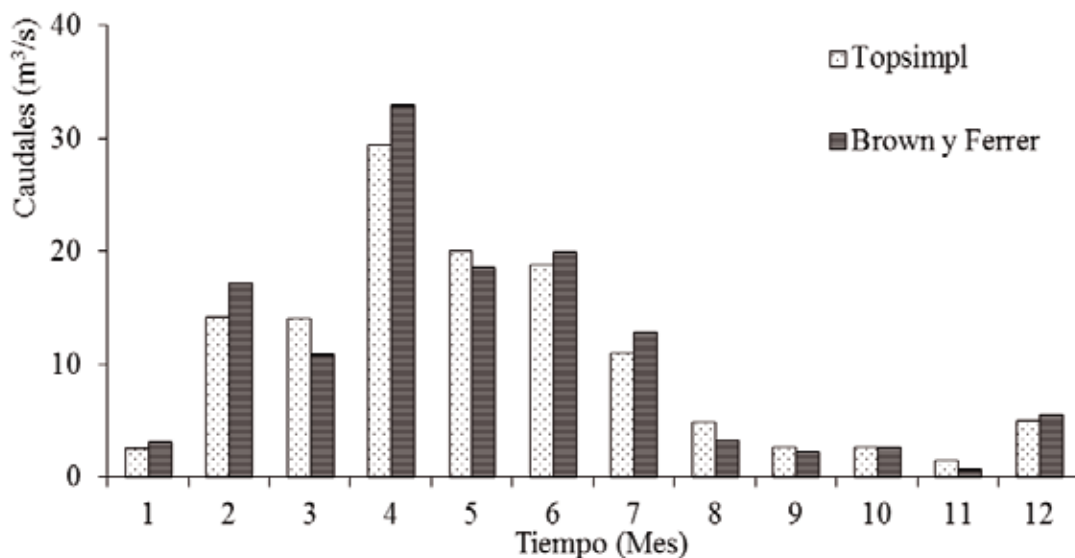


Figura 8. Caudales medios mensuales simulados mediante el modelo Topsimpl vs Brown y Ferrer, (año hidrológico 1987-1988).

Cuadro 7. Coeficientes de regresión, correlación y Nash-Sutcliffe y pendiente de la recta de regresión para la aplicación, calibración y verificación del modelo Topsimpl.

Proceso	Período	R ² †	r	s	N-S
Aplicación	1982-1983	0,76	0,87	0,90	0,76
Calibración	1982-1983	0,76	0,87	0,89	0,75
Verificación	1987-1988	0,60	0,78	1,26	0,57

† R² = coeficiente de regresión, r = coeficiente de correlación, s = pendiente de la recta de regresión, N-S = coeficiente de Nash y Sutcliffe.

DISCUSIÓN

El orden de importancia con el cual varían los diferentes parámetros, coincide con el encontrado por Saulnier (1996). La tasa de decrecimiento de la conductividad y la altura máxima de agua útil a nivel de raíces son los dos principales parámetros que inciden sustancialmente en los resultados de la simulación. En tercer lugar está el K_o que puede hacer variar los resultados de decena en decena. Por último, el parámetro que causa menos variación en los resultados es la Inter.

El valor optimizado del K_o 75 m/h que resultó del proceso de calibración fue mayor que el obtenido por cálculo con datos del terreno (52 m/h; los valores calculados y optimizados están dentro del rango que Saulnier (1996) considera adecuado para un mejor rendimiento del modelo Topsimpl (10 a 100 m/h). Se concluye que el parámetro K_o estuvo correctamente calculado y calibrado.

La M es uno de los parámetros al cual el modelo es más sensible, porque cualquier variación en él produce importantes variaciones en los caudales generados (Saulnier, 1996). El valor de M obtenido a través del proceso de calibración (0,086 m) y el obtenido por cálculo con datos del terreno (0,094 m) coincide con lo que Saulnier (1996) aconseja que M deba tener un valor de sólo unos pocos centímetros. Hay que tener en cuenta que variaciones mínimas de M (del orden de 0,01 m) produce una variación importante en los resultados de la simulación. También hay que considerar que la diferencia que se aprecia entre el valor de M calculado en terreno y el

calibrado se debe a que los valores de M fueron calculados con los caudales medios diarios (los datos disponibles) y no con los valores de caudales instantáneos como es lo aconsejable.

El valor SR_{max} obtenido con los datos calculados en terreno para el año hidrológico 1982-1983 (0,00026 m) se aparta considerablemente del valor obtenido durante la calibración (0,00015 m). Hay que tener en cuenta que el valor de SR_{max} calculado depende directamente de la precipitación y en el año 1982 se registró aproximadamente el doble de precipitación que la media anual, lo que explicaría el sobredimensionamiento (casi el doble) del parámetro calculado para ese año. Esto permite concluir que el parámetro SR_{max} está bien calculado, pero el valor que se obtuvo para el año hidrológico 1982-1983 no es representativo de la cuenca.

Según Saulnier (1996), la Inter no provoca una gran variación en los resultados de la simulación de Topsimpl; el valor obtenido para su calibración (0,004 m/h) no es muy diferente a el calculado con datos de terreno (0,00123 m/h).

Desde el punto de vista de la variación espacial de la discretización, Beven *et al.* (1995) consideran que el modelo de simulación hidrológica Topmodel tiene su óptimo funcionamiento cuando se definen celdas con un tamaño inferior a 50 x 50 m. Sin embargo, este modelo ha sido usado anteriormente, con celdas de 400 x 400 y hasta 1000 x 1000 m. En este trabajo se comenzó utilizando celdas de 1000 m de lado y posteriormente se incluyeron más puntos para hacer una interpolación y lograr una malla de trabajo con celdas de 200 m por lado. A partir de los resultados obtenidos se pudo comprobar que no hubo variación significativa. Por otra parte fue imposible trabajar con celdas de inferior tamaño ya que las cartas topográficas disponibles eran escala 1:50 000, lo que impide obtener mayor precisión.

El principal parámetro en el análisis estadístico considerado como criterio de evaluación del modelo fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe, con el cual se obtuvieron valores entre 0,76 y 0,57 para la calibración y la

Cuadro 8. Caudal medio, máximo y medio en la cuenca del río Niblinto.

Proceso	Período	Caudal mínimo		Caudal máximo		Caudal medio	
		Topsimpl	Observado	Topsimpl	Observado	Topsimpl	Observado
----- m ³ /s -----							
Aplicación	1982-1983	0,90	0,80	186,2	192,0	18,0	19,3
Calibración	1982-1983	0,90	0,80	189,5	192,0	18,1	19,3
Verificación	1987-1988	0,44	1,14	99,2	178,0	10,7	12,3

Cuadro 9. Coeficientes de regresión, correlación y Nash-Sutcliffe y, pendiente de la recta de regresión para la comparación del modelo con los resultados de Brown y Ferrer.

Periodo	R ² †	r	s	N-S
1982-1983	0,96	0,98	0,99	0,95
1987-1988	0,96	0,98	1,06	0,96

† R² = coeficiente de regresión, r = coeficiente de correlación, s = pendiente de la recta de regresión, N-S = coeficiente de Nash y Sutcliffe.

verificación, respectivamente. Si el valor de este coeficiente fuera igual a uno la simulación de los caudales observados sería exacta.

Los valores de R², r y s mostraron una consistente correlación entre los valores de las descargas simuladas y observadas, en la aplicación, calibración y verificación del modelo para los períodos 1982-1983 y 1987-1988 en el río Niblinto. El valor de R² máximo obtenido fue 0,76 para la calibración y un mínimo de 0,60 para la verificación del modelo. El valor de r máximo obtenido fue 0,87 para la calibración y un mínimo de 0,78 para la verificación del modelo. El mejor valor de la s fue 0,90 para la aplicación del modelo y el peor fue 1,26 para la verificación.

Los valores simulados por Topsimpl y observados para las máximas descargas para la aplicación y calibración en el período 1982-1983 muestran una alta correlación, 186,2 y 189,5 m³/s fueron las máximas descargas usando Topsimpl y 192,0 m³/s el valor observado para la aplicación y la calibración. El valor de la máxima descarga para la verificación durante el período 1987-1988 dio como resultado un valor simulado por Topsimpl de 99,2 m³/s para un valor observado de 178,0 m³/s.

Asimismo, los valores simulados por Topsimpl y observados para las mínimas descargas para la aplicación y la calibración en el período 1982-1983 muestran una alta correlación; 0,90 fue la mínima descarga usando Topsimpl y 0,80 m³/s el valor observado para la aplicación y la calibración. El valor de la mínima descarga para la verificación durante el período 1987-1988 dio como resultado un valor simulado por Topsimpl de 0,44 m³/s para un valor observado de 1,14 m³/s.

Los valores simulados por Topsimpl para descargas máximas y mínimas durante la verificación no mostraron una alta correlación. Para ello caben dos explicaciones, una es que los datos obtenidos por la estación meteorológica de Coihueco que midió la precipitación usada por el modelo en la cuenca no es totalmente representativa de la precipitación caída dentro de la cuenca estudiada y la otra es que la hipótesis con la que se eligió la distribución de precipitación diaria no es correcta para esa tormenta.

Los valores simulados por Topsimpl y observados de los caudales medios para la aplicación y calibración en el período 1982-1983 muestran una alta correlación; 18,0 y 18,1 m³/s fueron los caudales medios usando Topsimpl y 19,3 m³/s el valor observado para la aplicación y calibración. El valor de los caudales medios para la verificación durante el período 1987-1988 dio como resultado un valor simulado por Topsimpl de 10,7 m³/s para un valor observado de 12,3 m³/s.

Para la aplicación, calibración y verificación del modelo Topsimpl durante los períodos 1982-1983 y 1987-1988, los períodos de acumulación, flujo base y recesión tienen una alta correlación con los valores observados para los tres períodos simulados.

El principal parámetro en el análisis estadístico considerado como criterio para comparar el modelo Topsimpl y el de Brown y Ferrer fue el coeficiente de Nash-Sutcliffe, con el cual se obtuvieron valores entre 0,96 y 0,95. El alto valor de lo r (0,98) para ambos períodos, R² (0,96) para ambos períodos y la s que se encuentra entre 0,99 y 1,06 confirman la gran exactitud entre los resultados encontrados entre el modelo Topsimpl y el de Brown y Ferrer.

Por otro lado los valores medios, mínimo y máximos de los caudales medios mensuales de los modelos Topsimpl y el de Brown y Ferrer para los períodos 1982-1983 y 1987-1988 dan prácticamente los mismos resultados. Los valores simulados por Topsimpl y el modelo de Brown y Ferrer para el caudal máximo de los caudales medios mensuales simulados en el período 1982-1983 fueron 56 y 56 m³/s y para el período 1987-1988, 29 y 33 m³/s, respectivamente. Los valores simulados por Topsimpl y Brown y Ferrer para el caudal mínimo de los caudales medios mensuales simulados en el período 1982-1983

Cuadro 10. Caudal mínimo, máximo y medio del río Miraflores.

Periodo	Caudal mínimo		Caudal máximo		Caudal medio	
	Topsimpl	ByF†	Topsimpl	ByF	Topsimpl	ByF
	----- m ³ /s -----					
1982-1983	3	1	56	52	18	19
1987-1988	1	1	29	33	10	11

† Brown y Ferrer

fueron 3 y 1 m³/s y para el período 1987-1988, 1 y 1 m³/s, respectivamente. Los valores simulados por Topsimpl y Brown y Ferrer para el caudal medio de los caudales medios mensuales simulados en el período 1982-1983 fueron 18 y 19 m³/s y para el período 1987-1988, 10 y 11 m³/s, respectivamente.

Para comparar el desempeño de los modelos Topsimpl y de Brown y Ferrer se consideró que el modelo de Brown y Ferrer ha sido ampliamente probado y ha demostrado su confiabilidad en el medio hidrológico chileno; el modelo Topsimpl trabaja en Windows, mientras que el de Brown y Ferrer está programado en Fortran; Topsimpl requiere de cuatro parámetros para su calibración, en tanto que el modelo de Brown y Ferrer tiene ocho parámetros. Esto significa una gran economía de tiempo en la etapa de calibración. A diferencia de Brown y Ferrer que trabaja como mínimo con datos mensuales de precipitaciones y evapotranspiración, Topsimpl necesita de datos con una importante discretización en el tiempo (precipitaciones horarias) y en el espacio (una malla de trabajo con celdas de menos de 1 000 m de lado), lo cual puede ser un inconveniente dependiendo de la información cartográfica con la que se trabaje. Por lo contrario, al requerir información horaria de precipitación, el modelo Topsimpl permite hacer otro tipo de estudios, como por ejemplo, crecidas.

CONCLUSIONES

El modelo Topsimpl tiene buenas características para lo cual fue diseñado, o sea predecir caudales, ya que los errores encontrados tanto en la aplicación, calibración y en la verificación fueron mínimos y es altamente significativa la relación entre caudales observados y simulados. Los datos necesarios para su funcionamiento son relativamente fáciles de conseguir en la mayoría de las cuencas fluviales de Chile, tales como precipitaciones y topografía del terreno. Cuanto más detallados sean estos valores en el tiempo y en el espacio, respectivamente, mayor es la posibilidad de tener un mejor rendimiento del modelo. La aplicación de los modelos Topsimpl y de Brown y Ferrer en la cuenca de Miraflores dio resultados similares con la ventaja para el modelo Topsimpl que acepta una mayor discretización temporal, pocos parámetros y un sistema operativo amigable, con lo cual tiene mayor flexibilidad para otros usos

REFERENCIAS

- Benítez, A.; F. Arteaga. 1974. Método para la determinación de hidrogramas unitarios sintéticos en Chile. Empresa Nacional de Electricidad, S.A. Santiago, Chile.
- Beven, K.J.; P. Quinn; R. Romanowicz; J. Freer; J. Fisher; R. Lamb. 1995a. Topmodel and Gridatb, a user guide to the distribution versions (95.02). CRES Technical Report 110. 2^{da} ed. Lancaster University. Bailrigg, Inglaterra.
- Beven, K.J.; R. Lamb; P. Quinn; R. Romanowicz; J. Freer. 1995b. Topmodel. In Singh, V.P. (Ed). Computer Models of Watershed Hydrology. CAB, Water Resources Publications. Boulder, EUA. pp. 627-668.
- Chow, V.T.; D.R. Maidment; L.W. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Mac Graw Hill. New York, USA.
- Franchini, M.; J. Wendling; Ch. Obled; E. Todini. 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the Topmodel. J. Hydrol. 175: 293-338.
- Gálvez, F.; M.R. Pizarro. 1983. Implementación de un modelo de simulación para la estimación de Caudales de crecida en la cuenca del estero Nilahue-VI Región. Tesis Ing. Forest. Univ. de Chile. Fac. Cienc. Agrar. Vet. Forest. Santiago, Chile.
- Huber, A.; P. Barriga; R. Trecaman. 1998. Efecto de la densidad de plantaciones de *Eucalyptus nitens* sobre el balance hídrico en la zona de Collipulli, IX Región (Chile). Bosque 19: 61-69.
- Ingendesa (Empresa de Ingeniería Ingendesa S.A.). 1992. Estudio integral de riego. Consorcio Ingendesa-Edic Ltda. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas. 1991. Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas. 1994. Análisis operacional embalse Coihueco, Informe final. Ingenieros Civiles/ Consultores en Ingeniería Civil. Dirección Nacional de Riego. Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Nash, J.E.; J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10: 282-290.
- Salvo, J.I. 1974. Clasificación de suelos de la zona de regadío embalse Coihueco. Tesis Ing. Agron. Univ. de Concepción, Fac. de Agron. Chillán, Chile.
- Saulnier, J.M. 1996. Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL. Tese, Institut National Polytechnique de Grenoble. Grenoble, Francia.
- Varas, E. 1987. Tormentas de diseño. Rev. Soc. Chile. Ing. Hidr. 2: 39-56.