

Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el Secano Interior, Chile

Hamil Uribe

INIA Quilamapu, Chile

José Luis Arumí
Liubow González
Luis Salgado

Universidad de Concepción, Chile

El Secano Interior de la VIII Región, centro sur de Chile, es una zona caracterizada por poseer suelos graníticos y un clima mediterráneo-marino, donde la escasez de agua es la principal limitante para el desarrollo local. Los agricultores obtienen agua de pozos someros, en poca cantidad, la cual alcanza sólo para consumo doméstico. En este estudio se realizaron balances hidrológicos mensuales en dos subcuencas de la cuenca San José, comuna de Ninhue, para estimar la recarga de acuíferos y cuantificar el potencial de los recursos hídricos subterráneos. El modelo utilizado correspondió a una modificación del balance de Thornthwaite. Para efectuar el balance hidrológico se realizaron mediciones de caudales y precipitaciones, y la evapotranspiración se estimó con el método de Penman-Montheith. Se realizó un análisis de sensibilidad de la recarga resultante con respecto a la evapotranspiración y capacidad de retención de humedad del suelo para observar el efecto de posibles errores en los datos ingresados al modelo. Los resultados obtenidos indicaron que la recarga puede alcanzar hasta el 6% de la precipitación anual, con valores mínimos de 1%. Esto significa 22 mm/año, con un mínimo de 6.3 mm/año, lo que permitiría al menos triplicar la disponibilidad de agua obtenida de pozos someros y de esta forma mejorar sustancialmente la calidad de vida de los habitantes de la zona.

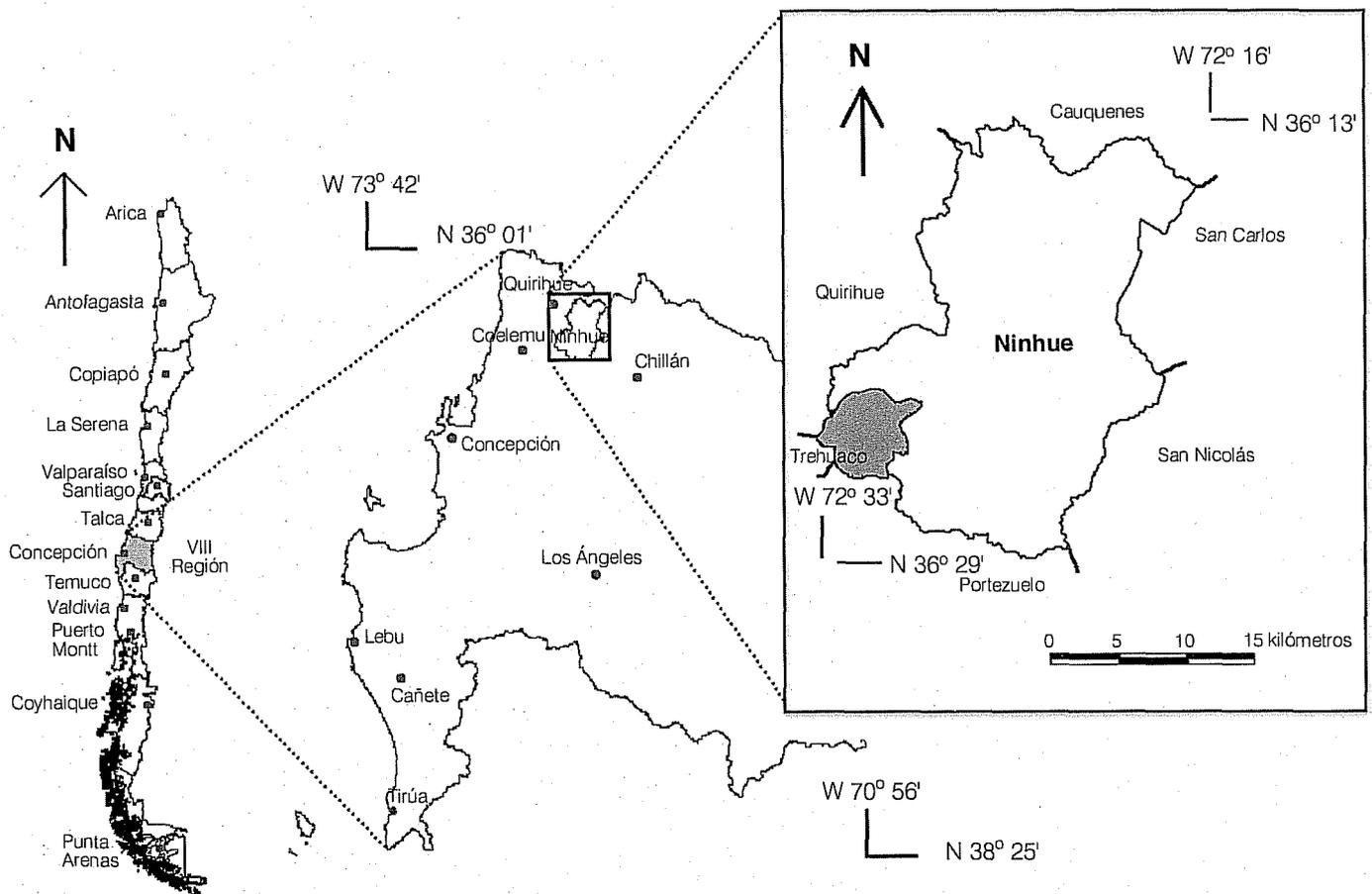
Palabras clave: recarga de acuíferos, balance hidrológico, secano interior, escorrentía superficial, suelos graníticos, percolación profunda, aguas subterráneas, Chile.

Introducción

La cuenca del estero San José, donde se realizó este estudio, está ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, provincia de Ñuble, VIII Región, centro sur de Chile (ilustración 1). Corresponde a la zona denominada Secano Interior, la cual se caracteriza por tener importantes problemas de abastecimiento de agua tanto para uso agrícola como potable, lo que constituye uno de los factores que explica el bajo nivel de desarrollo alcanzado en los rubros agrícola, industrial y en otras actividades.

La cordillera de la costa de la zona del sector en estudio está constituida principalmente por rocas plutónicas paleozoicas: granitoide rico en cuarzo y diorita cuarcífera (Bizama, 1998). Los intensos procesos de meteorización que han actuado sobre estas rocas graníticas han permitido la formación *in situ* de un suelo residual de espesor variable, compuesto por material arcillo-arenoso, con presencia de gravilla y limo, textura fina, baja fertilidad, propenso a la erosión, de baja permeabilidad y tasa de infiltración, lo que contribuye a una alta escorrentía superficial concentrada en los meses lluviosos, la cual decrece rápidamente después de los eventos de precipitación.

Ilustración 1. Plano de ubicación de la zona del estudio.



Los horizontes superiores del suelo tienen una capacidad de retención de humedad volumétrica cercana al 20%, mientras que en los estratos más profundos, la porosidad eficaz es del orden de 1 a 8% (Selker *et al.*, 2000).

Los procesos de alteración de las rocas graníticas tienen una influencia considerable en la capacidad de almacenamiento de agua. La desintegración mecánica, disolución química, y los efectos del clima y la vegetación, son causa de modificaciones locales en las rocas primarias y su sistema de fracturas. Estas acciones pueden suponer un aumento o una disminución de la porosidad primaria de las rocas originales y sus fracturas. La zona de transición entre las capas alteradas y las rocas subyacentes inalteradas puede funcionar como acuífero, dependiendo de la porosidad de la zona.

De acuerdo con los resultados de las prospecciones geofísicas (perfiles eléctricos verticales) realizados en la cuenca San José (Uribe, 2002) y por observaciones en

los pozos existentes en el área, se ha estimado que el espesor de la zona alterada fluctúa entre cinco y treinta metros, dependiendo de la topografía de la zona. Los niveles freáticos observados en los pozos ubicados en las zonas topográficamente bajas se encuentran generalmente a una profundidad que varía entre dos y cinco metros; mientras que en los sectores altos, éstos se encuentran a profundidades mayores, que varían entre 10 y 17 metros. Las fluctuaciones estacionales del nivel freático son similares en ambos sectores, con una variación promedio de 1.6 metros.

La conductividad hidráulica saturada (K_s), obtenida mediante pruebas de recuperación en pozos someros en la cuenca San José es, en promedio, de 1.01 m/día (Uribe, 2002).

En el área de estudio, el acuífero se recarga por la infiltración del agua de lluvia, de modo que su régimen se relaciona estrechamente con las láminas de lluvia anua-

les. Utilizando el método de balance de cloro se han obtenido 27.4 mm/año de infiltración neta en otra área del Secano de la VIII Región (González, 1999). Sin embargo, en la cuenca San José se ha estimado que los setenta pozos someros, distribuidos en 725 ha, captan menos de 1.5 mm/año (Pérez et al., 2001).

El objetivo de este estudio fue realizar una estimación de la recarga por lluvia en dos subcuencas seleccionadas de la cuenca San José para cuantificar la disponibilidad potencial de aguas subterráneas posible de ser extraída mediante pozos someros.

El balance hidrológico mensual se realizó desde febrero de 2001 hasta enero de 2002, utilizando una modificación de la metodología de Scozzafava y Tallini (2001), quienes propusieron incorporar el método del número de la curva (NC) al balance de Thornthwaite para discriminar entre escurrimiento superficial e infiltración neta. Los autores describen el método combinado (Thornthwaite + NC) como simple, flexible y aplicable a sistemas hidrogeológicos complejos, por lo que se consideró apto para ser utilizado en esta investigación. En este trabajo, sin embargo, la escorrentía superficial se midió en cada subcuenca.

Aspectos climatológicos generales

Según la clasificación de Papadakis, el clima del área de estudio es de tipo mediterráneo marino (Del Pozo y Del Canto, 1999). De acuerdo con la información meteorológica de la estación San Agustín de Puñal, perteneciente a la Dirección General de Aguas, ubicada a unos siete kilómetros del área de estudio, la precipitación media anual es de 775 mm/año, concentrada en los meses de invierno, donde la lluvia duplica los niveles de evaporación potencial. Por otra parte, en los meses de verano las temperaturas son elevadas y la evaporación potencial alcanza niveles de 250% de la precipitación

(Selker et al., 2000). El clima es apto para diversos cultivos, tales como vides, cerezos, olivos y otros, los cuales ven limitado su crecimiento por la escasez de agua.

Marco geomorfológico y ubicación del área de estudio

La cuenca del estero San José se emplaza en la parte oriental de la cordillera de la costa. Esta unidad orográfica, con altitudes que varían entre los 120 y 300 metros sobre el nivel del mar está constituida principalmente por rocas plutónicas paleozoicas: granodiorita, granitoide rico en cuarzo, tonalita, diorita cuarcífera y pegmatitas.

Las estructuras principales, fallas y lineamientos (Ferraris, 1981, Bizama, 1998), muestran direcciones preferenciales NNE-SSW, NNW-SSE y N-S, las que afectan al batolito de la cordillera de la costa y ejercen un importante control de la red de drenaje.

La cuenca San José se extiende entre los 36° 24' S y 72° 30' W, y abarca una superficie de 10,56 km², dentro de la cual se seleccionaron dos subcuencas para realizar los balances hidrológicos mensuales (ilustración 2). En los cuadros 1 y 2, y en las ilustraciones 2 y 3 se presentan las características físicas y distribución del uso de los suelos de las áreas analizadas.

Aspectos generales del problema

La escasez de agua en el Secano Interior, debida a las condiciones climáticas, geológicas y al alto grado de degradación del suelo por actividades antrópicas, ha sido un problema para sus habitantes. Actualmente, las fuentes de captación de agua son pozos someros de baja capacidad que permiten extraer, en promedio, 460 l/día (Uribe, 2002). La hipótesis de este trabajo es que la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos es mayor y se puede aumentar la cantidad de agua útil para con-

Cuadro 1. Caracterización física de las subcuencas 1 y 2.

Característica	Unidad	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Cuenca San José
Área	km ²	7,252	0.142	10,569
Perímetro	m	12,850	1.595	14,220
Elevación mínima	m	55.0	95.0	42.0
Elevación máxima	m	230.0	144.0	230.0
Longitud del cauce principal	km	3,830	0.530	5,440
Pendiente del cauce principal	m/m	0.0193	0.056	0.015
Precipitación	mm/año	627.8	631.8	-
Escorrentía superficial	mm/año	337.5	349.5	-

Cuadro 2. Distribución de uso de suelo en las subcuencas 1 y 2.

Uso del suelo	Subcuenca 1		Subcuenca 2	
	Área (m ²)	%	Área (m ²)	%
Forestal	1,935,855	27	108,875	66
Barbecho	353,043	5	13,100	8
Trigo	744,484	10	13,100	8
Pradera natural	4,146,220	57	26,200	16
Infraestructura	72,521	1	2,500	2
Total	7,252,123	100	163,750	100

Ilustración 2. Cuenca San José y subcuencas 1 y 2, en donde se indica la ubicación de pozos someros, red de drenaje, puntos de medición de escorrentía y precipitación. Coordenadas UTM, Datum SAD 1969, huso 18.

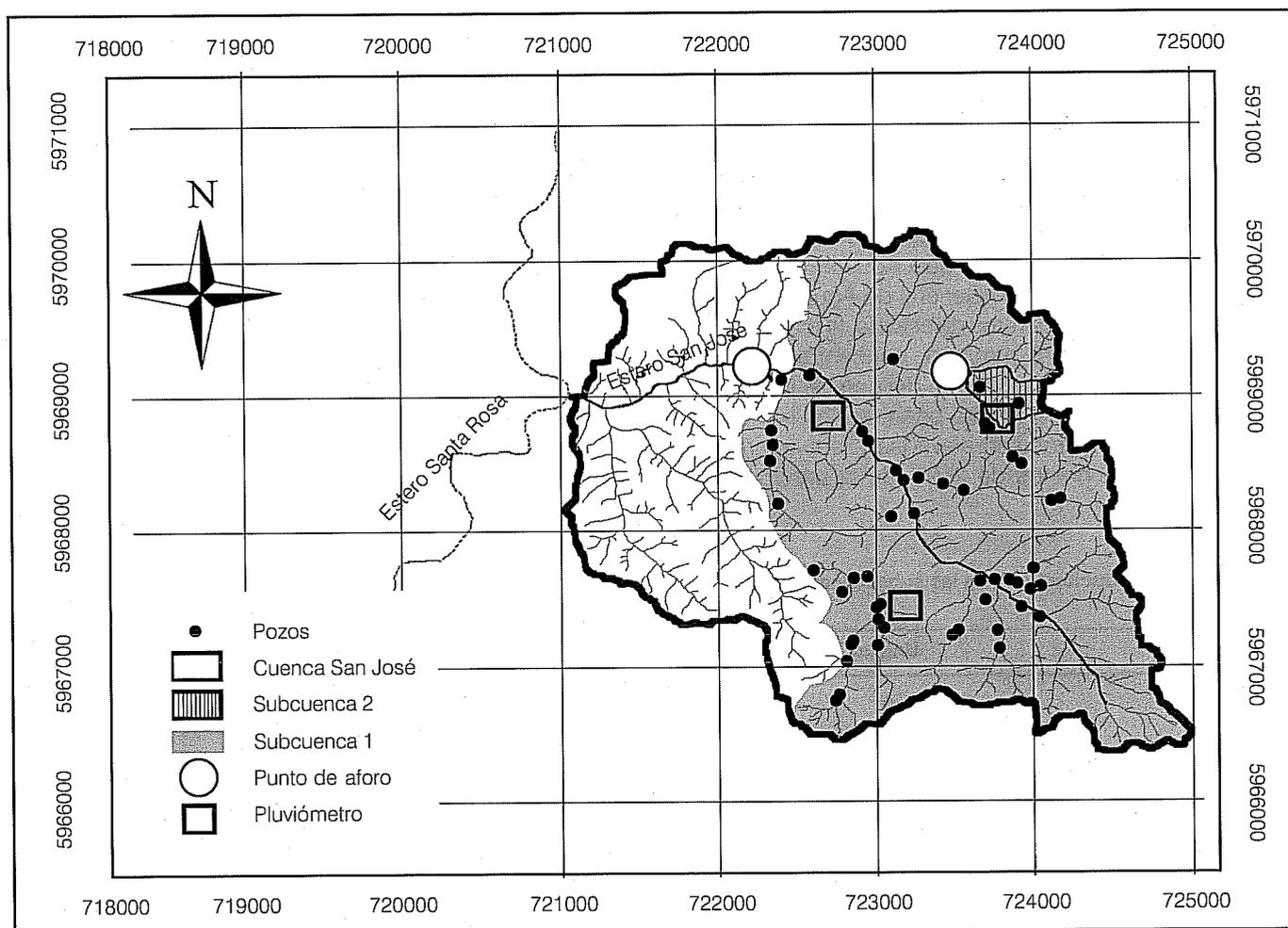
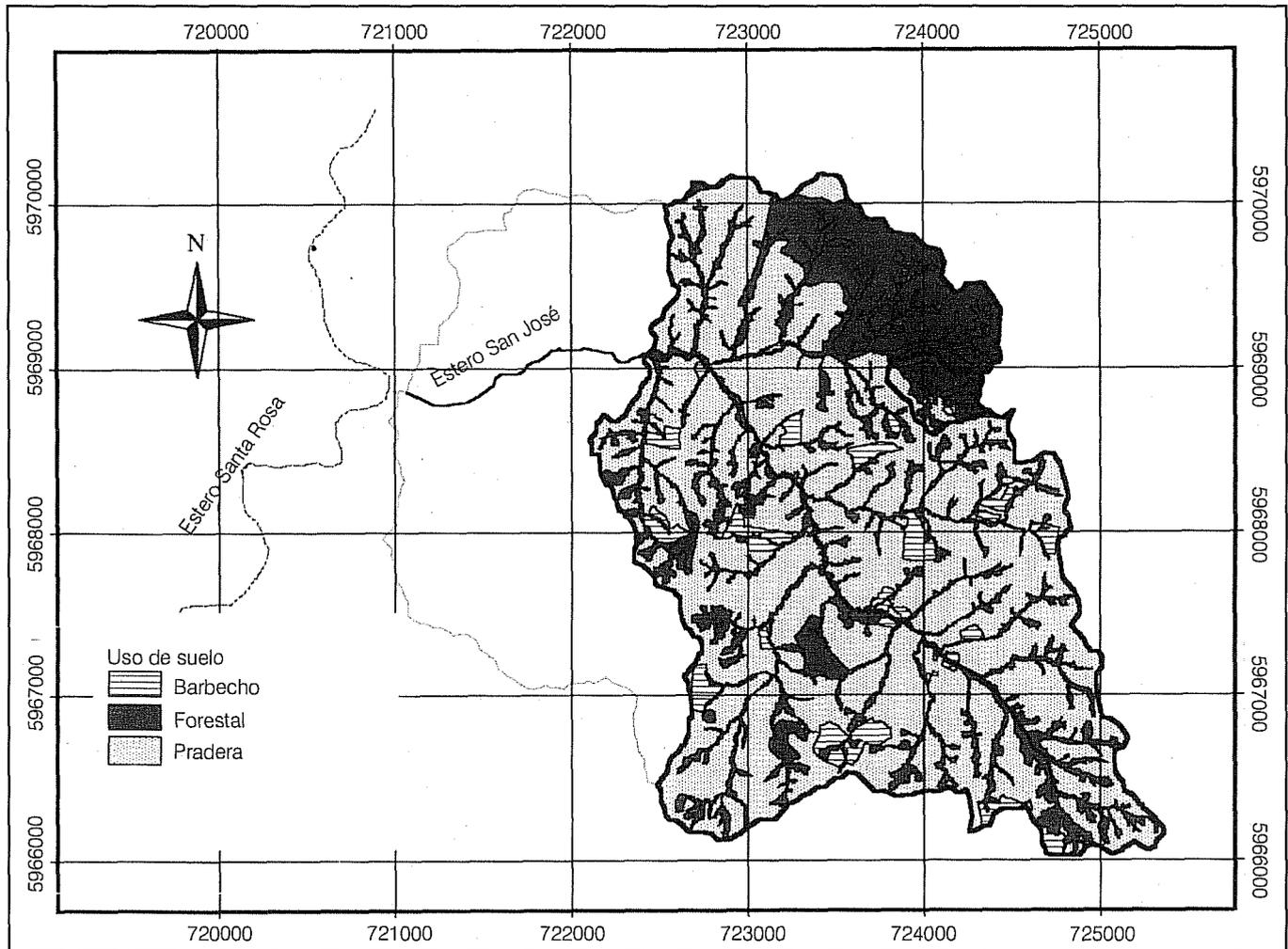


Ilustración 3. Uso del suelo en las subcuencas del estudio. Coordenadas UTM, Datum SAD 1969, huso 18.



sumo doméstico y riego, lo que permitiría mejorar la calidad de vida de los agricultores del sector.

Para tal efecto, en este estudio se estimó la disponibilidad potencial de agua subterránea, cuantificando la recarga neta, paso previo a la toma de decisiones sobre construcción o mejoramiento de pozos someros.

Métodos

Para realizar el balance hidrológico mensual se adaptó el método Thornthwaite modificado (Scozzafava y Tallini, 2001), que se expresa de la siguiente manera como un balance de humedad del suelo durante el mes i :

$$\theta_i = \theta_{i-1} + P_i - E_i - ET_{r_i} - PER_i \quad (1)$$

donde:

- θ_i y θ_{i-1} = humedad final e inicial del suelo del periodo i (mm).
- P_i = precipitación (mm/mes).
- E_i = escorrentía superficial (mm/mes).
- ET_{r_i} = evapotranspiración real (mm/mes).
- PER_i = percolación profunda (mm/mes).

Bajo el supuesto de que no existan aportes externos de otras subcuencas ni cursos de agua que puedan recargar indirectamente los acuíferos, la percolación profunda puede considerarse como la recarga total de las aguas subterráneas.

Evapotranspiración

Los principales usos de suelo en el área de estudio son trigo, barbecho, pradera natural y plantaciones forestales (cuadro 2 e ilustración 3). En el balance hidrológico se estimó la evapotranspiración de cultivo (ET_c) como una ponderación de las ET_c de acuerdo con los usos de suelo, según la ecuación 2 (Jara y Valenzuela, 1998; Vela et al., 2001).

$$ET_c = K_c * E_{T_o} \quad (2)$$

donde:

- ET_c = evapotranspiración de cultivo (mm/mes).
- K_c = coeficiente de cultivo (adimensional).
- E_{T_o} = evapotranspiración de cultivo de referencia (mm/mes).

La evapotranspiración de cultivo de referencia (E_{T_o}) se determinó mediante el método de Penman-Montheith, considerando que es uno de los más adecuados para este tipo de estudios (González de Aguilar, 1997).

Además, se hizo una estimación mensual de la ET_c bajo condiciones de restricción de humedad del suelo según la ecuación 3 (Shuttleworth, 1993). Este tipo de estimación también es mencionado por Millar (1993).

$$ET_c = f(\theta) * K_c * E_{T_o} \quad (3)$$

donde:

- K_c = coeficiente de cultivo (adimensional).
- E_{T_o} = evapotranspiración de cultivo de referencia (mm/mes).

y $f(\theta)$ se define como:

$$f(\theta) = \frac{\theta - \theta_w}{\theta_f - \theta_w}$$

donde:

- θ = contenido de humedad del suelo (mm).
- θ_w = contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP) (mm).
- θ_f = contenido de humedad a capacidad de campo (CC) (mm).

La evapotranspiración en las áreas forestales (ET_f) se estimó a partir de la ecuación 4 (Shuttleworth, 1993):

$$ET_f = 0.8 E_{T_o} + \alpha_i * P \quad (4)$$

donde:

$$\alpha_i * P = \frac{0.95 N_s (S + 0.2\tau_s)}{N_d}$$

- N_s = número de tormentas en el periodo de N_d días.
- S = capacidad de intercepción de las tormentas (1.2 mm para coníferas).
- τ_s = duración promedio de las tormentas (h).
- N_d = número de días.

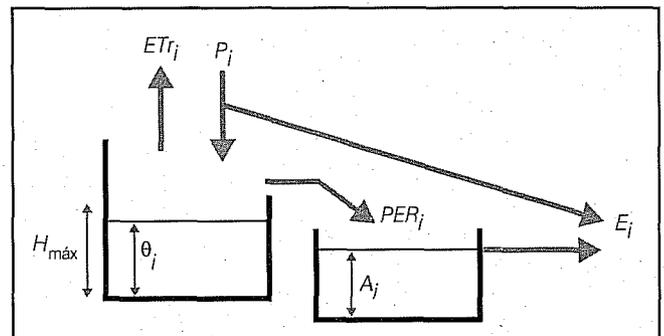
La evapotranspiración real (ET_r) es el total o una fracción de la evapotranspiración de cultivo (ET_c) o forestal (ET_f), según corresponda, dependiendo de la disponibilidad de agua en el suelo.

Modelo hidrológico

El modelo del balance hidrológico se efectuó suponiendo que existen dos elementos de almacenamiento de humedad en la cuenca: el suelo (hasta 0.9 m) y un almacenamiento subterráneo. Cada uno de estos elementos se modeló como un estanque (ilustración 4).

El modelo mensual se aplicó desde febrero de 2001 hasta enero de 2002. Se consideró adecuado iniciar y terminar el balance hidrológico en una época en la que el contenido de humedad del suelo es bajo y aproximadamente el mismo (Custodio y Llamas, 1983).

Ilustración 4. Modelo conceptual del balance hidrológico según Thornthwaite. ET_r (evapotranspiración real para el mes i); P_i (precipitación durante el mes i); θ_i (agua en el suelo al final del mes i); PER_i (percolación en el mes i); A_i (agua almacenada en el estanque subterráneo al final del mes i); E_i (escorrentía ocurrida durante el mes i); $H_{m\acute{a}x}$ (máxima capacidad de almacenar agua del suelo).



Los parámetros incluidos en el balance hidrológico mensual fueron evapotranspiración real (ET_{ri}); precipitación (P_i); contenido de humedad en el suelo al final de cada mes (θ_i); escorrentía superficial (E_i); infiltración ($P_i - E_i$); percolación profunda (PER_i), y agua almacenada en el estanque subterráneo (A_i). Además, se utilizó la capacidad máxima del suelo para almacenar agua ($H_{m\acute{a}x}$), que de acuerdo con los análisis fisicohídricos es de 150 mm para un perfil de 0.9 m (Uribe, 2002).

Algoritmo del balance hidrológico

Para el cálculo de las variables incluidas en el modelo se utilizó el algoritmo presentado en el diagrama 1. En el balance, la infiltración se calcula descontando de las lluvias la escorrentía superficial medida, en términos de lámina de agua. El agua infiltrada puede ser extraída desde el suelo (estanque 1) por las plantas mediante evapotranspiración. La lámina de agua contenida en el suelo al final del periodo corresponde al agua que había al inicio del periodo, más la infiltración y menos la evapotranspiración. Si esta lámina de agua es mayor que la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, entonces se produce percolación profunda (recarga al agua subterránea).

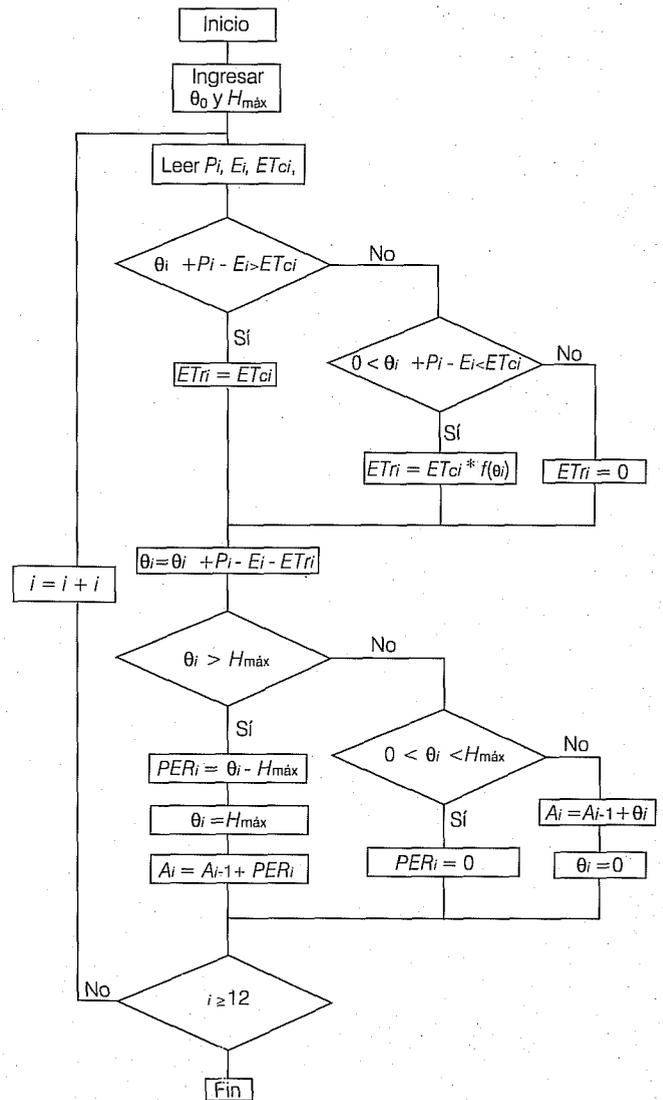
Materiales y mediciones

Durante más de un año se realizaron mediciones de precipitación, escorrentía superficial y presión atmosférica. Además, se contó con registros diarios de radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiental y humedad relativa procedente de una estación meteorológica ubicada cerca de la zona de estudio (latitud de 36° 31' S y longitud de 72° 22' O), que permitió estimar la evapotranspiración de cultivo de referencia (E_{To}) utilizando el método de Penman-Montheith.

Las mediciones de precipitación se hicieron con tres pluviómetros marca Davis, tipo II, con un *datalogger Hobo* y manejadas con el *software BoxCar Pro v. 3.51*, obteniendo información con resolución de 0.2 mm.

La escorrentía superficial en la subcuenca 1 se midió con una canoa Santa Rita (Smith et al., 1982), implementada con dos medidores de presión Diver; uno sumergido para medir presión por carga de agua más presión atmosférica y otro al aire para medir presión atmosférica, y así obtener el nivel de agua por diferencia. El *software* para el manejo de datos del Diver fue *EnviroMon v 1.4*. La escorrentía superficial en la subcuenca 2 se midió utilizando una canoa de fondo plano de 0.4 x 1.8 m (Valenzuela et al., 1997) y un sensor de nivel de agua modelo MiniTroll marca In situ y *software Win-situ*.

Diagrama 1. Diagrama de flujo del modelo utilizado.



En ambos casos, los registros se realizaron cada cinco minutos. La ubicación de los puntos de aforo y de los pluviómetros en las subcuencas se presentan en la ilustración 2.

Las mediciones de áreas de las subcuencas y de los diferentes tipos de uso de suelo se realizaron digitalizando fotos aéreas a escala 1:20,000 en *Cartalinx v 2.0*, previa corrección geométrica con *ERDAS v 8.4* y procesando la información en *ArcView v 3.1*.

La caracterización de las propiedades fisicohídricas de los suelos se realizó a partir de muestras obtenidas en seis calcatas. La humedad aprovechable fue de 150 mm, para una profundidad de 0.9 m.

Resultados y discusión

Los resultados de los balances hidrológicos de las subcuencas 1 y 2 se presentan en los cuadros 3 y 4, e ilustraciones 5 y 6. La información acumulada se observa en las ilustraciones 7 y 8; se resume en el cuadro 5.

Según los resultados obtenidos, el comportamiento hidrológico de ambas subcuencas resultó semejante. La *ET_o* fue alta durante el periodo de primavera-verano; sin embargo, la *ET_r* resultó baja debido a la poca disponibilidad de agua en el suelo. La distribución mensual de la

escorrentía superficial presentó diferencias entre ambas subcuencas, como se muestra en la ilustración 9. Las precipitaciones ocurridas durante los meses de marzo y abril, posteriores al periodo seco, no produjeron escorrentía superficial, pues se almacenó en el suelo. A partir de mayo se registraron flujos de agua en los esteros.

Durante mayo y junio, la escorrentía superficial resultó mayor en la subcuenca 2 que en la subcuenca 1 (ilustración 9), debido a que la subcuenca 2 presenta mayores pendientes que la subcuenca 1. En la subcuenca 1, el 50% del área tiene pendientes mayores a 17%;

Cuadro 3. Resultado del balance hidrológico en la subcuenca 1 (mm/mes). *ET_o* (evapotranspiración de cultivo de referencia); *P* (precipitación); *E* (escorrentía superficial); θ (agua en el suelo al final del mes); *ET_r* (evapotranspiración real); *PER* (percolación profunda).

Mes	<i>ET_o</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	θ	<i>ET_r</i>	<i>PER</i>
Febrero-01	154.6	2.8	0.1	17.5	2.2	0.0
Marzo-01	126.2	14.4	0.1	28.1	3.7	0.0
Abril-01	69.8	28.6	0.1	46.0	10.6	0.0
Mayo-01	38.3	185.6	28.7	150.0	38.3	14.6
Junio-01	32.6	59.2	21.7	150.0	32.6	5.0
Julio-01	29.7	186.6	197.2	109.8	29.7	0.0
Agosto-01	59.3	98.2	67.5	81.2	59.3	0.0
Septiembre-01	82.7	22.8	9.1	12.1	82.7	0.0
Octubre-01	125.8	15.0	6.1	19.3	1.7	0.0
Noviembre-01	140.5	14.6	6.5	23.9	3.5	0.0
Diciembre-01	194.1	0.0	0.4	19.7	3.7	0.0
Enero-02	184.8	0.0	0.1	17.0	2.6	0.0
Total	1,238.3	627.8	337.5		270.7	19.6

Cuadro 4. Resultado del balance hidrológico en la subcuenca 2 (mm/mes). *ET_o* (evapotranspiración de cultivo de referencia), *P* (precipitación), *E* (escorrentía superficial), θ (agua en el suelo al final del mes), *ET_r* (evapotranspiración real), *PER* (percolación profunda).

Mes	<i>ET_o</i>	<i>P</i>	<i>E</i>	θ	<i>ET_r</i>	<i>PER</i>
Febrero-01	151.4	2.8	0.0	13.6	1.2	
Marzo-01	123.6	14.4	0.0	25.4	2.5	0.0
Abril-01	68.4	28.6	0.0	44.9	9.2	0.0
Mayo-01	37.5	185.6	57.4	135.6	37.5	0.0
Junio-01	31.7	59.2	40.8	122.3	31.7	0.0
Julio-01	28.6	215.2	135.2	150.0	28.6	23.7
Agosto-01	56.7	92.2	59.2	126.3	56.7	0.0
Septiembre-01	79.8	19.0	29.7	35.9	79.8	0.0
Octubre-01	121.6	13.6	21.8	21.1	6.6	0.0
Noviembre-01	136.8	1.2	5.4	14.5	2.4	0.0
Diciembre-01	189.3	0.0	0.0	13.1	1.4	0.0
Enero-02	181.0	0.0	0.0	12.0	1.1	0.0
Total	1,206.3	631.8	349.5		258.7	23.7

Cuadro 5. Resumen de los balances anuales. Evapotranspiración real (ETr), precipitación (P), escorrentía superficial (E) y percolación profunda (PER).

		ETr	P	E	PER
Cuenca 1	mm/año	270.7	627.8	337.5	19.6
	% de P anual	43.1	100.0	53.8	3.1
Cuenca 2	mm/año	258.7	631.8	349.5	23.7
	% de P anual	40.9	100.0	55.3	3.7

Ilustración 5. Resultado del balance hidrológico en la subcuenca 1 durante el periodo de estudio. Evapotranspiración real (ETr), escorrentía superficial (E), precipitación (P) y evapotranspiración de cultivo de referencia (ETo).

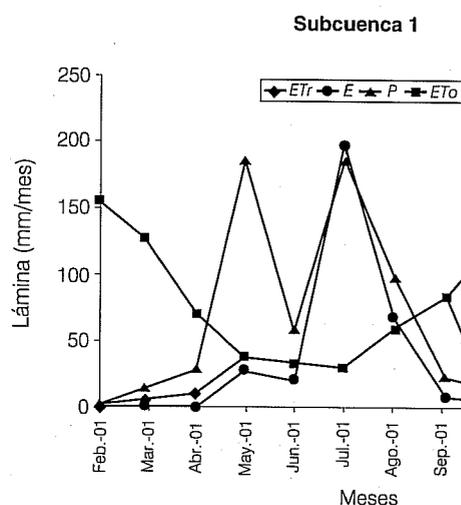


Ilustración 6. Resultado del balance hidrológico en la subcuenca 2 durante el periodo de estudio. Evapotranspiración real (ETr), escorrentía superficial (E), precipitación (P) y evapotranspiración de cultivo de referencia (ETo).

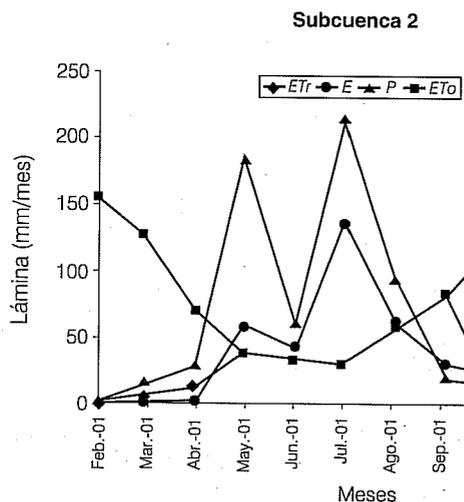


Ilustración 7. Componentes del balance presentados en forma acumulada para la subcuenca 1. Evapotranspiración real (ETr), escorrentía superficial (E), percolación profunda (PER) y precipitación (P).

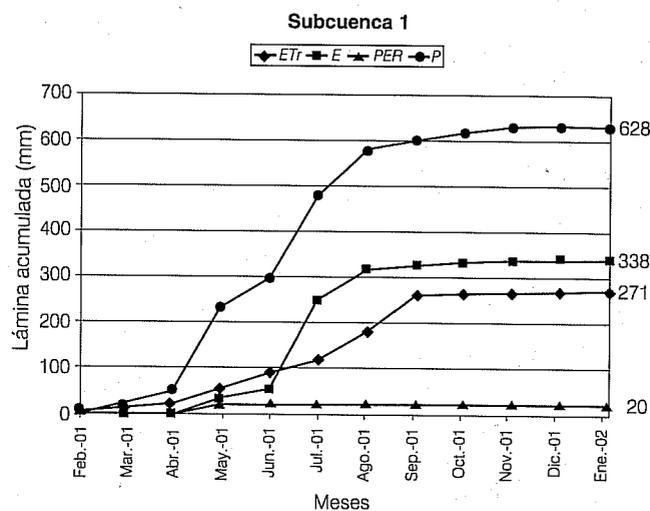


Ilustración 8. Componentes del balance presentados en forma acumulada para la subcuenca 2. Evapotranspiración real (ETr), escorrentía superficial (E), percolación profunda (PER) y precipitación (P).

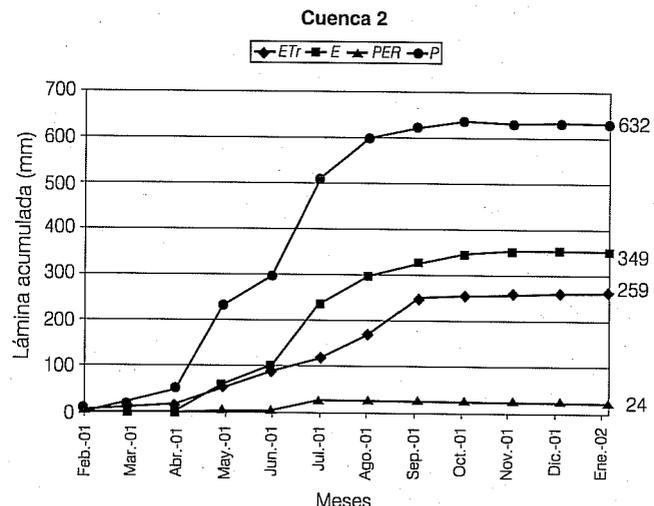


Ilustración 9. Comparación de escorrentía superficial entre las subcuencas 1 y 2.

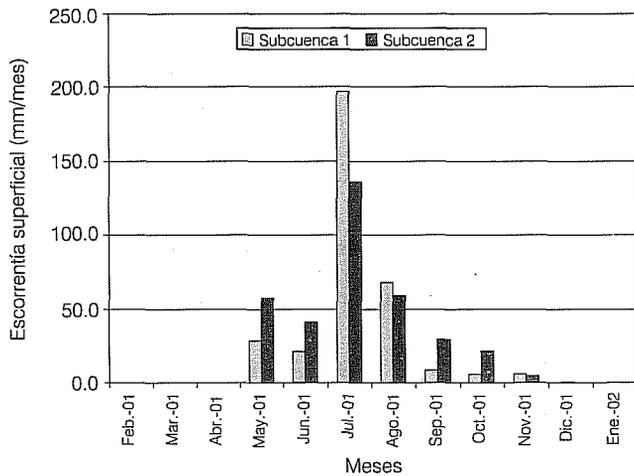
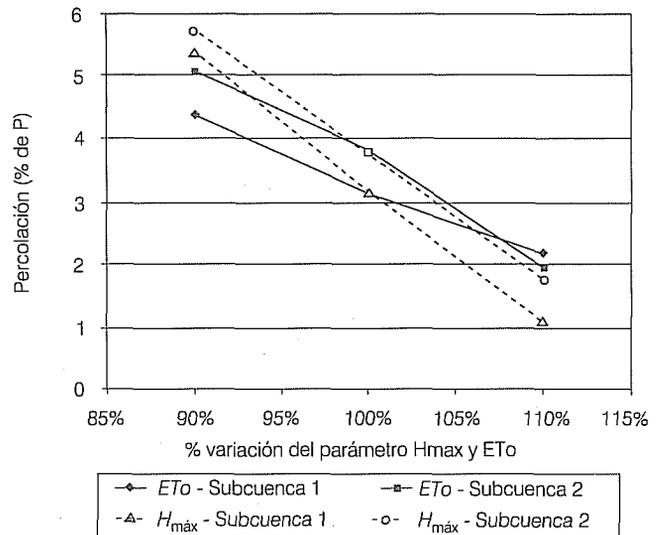


Ilustración 10. Análisis de sensibilidad de la percolación profunda (PER) con respecto a valores de $H_{m\acute{a}x}$ y ET_o .



en cambio, en la subcuenca 2 esto ocurre en el 75% de la superficie.

Con el método del balance de masa se pueden producir errores de estimación de la ET_o , que frecuentemente alteran el cálculo de la recarga (Samper, 1997). El cálculo exacto de la percolación es difícil de realizar, dado que los valores son muy bajos y pueden estar influenciados fuertemente por pequeños errores en el cálculo de los otros parámetros, cuyas magnitudes son mayores. Sin embargo, los valores de percolación profunda obtenidos en este estudio fueron del mismo orden que los conseguidos por el método del balance de cloro para una cuenca similar (González *et al.*, 1999).

La percolación profunda estimada fue del orden de 6%, o inferior, de la precipitación acumulada anual (cuadro 5, ilustración 10).

La estimación de ET_o se realizó a partir de datos meteorológicos y patrones de cultivo. Por no disponer de datos reales de consumo de agua de las plantas en la zona, se realizó un análisis de sensibilidad del balance hidrológico con respecto a ET_o , considerando una variación de $\pm 10\%$ de los valores mensuales, obtenidos a partir de la sumatoria de información diaria estimada por el método de Penman-Montheith. Los valores de percolación obtenidos variaron entre 2 y 5% de la precipitación anual (ilustración 10).

Otro factor de error del balance hidrológico es la capacidad de almacenamiento de agua del suelo ($H_{m\acute{a}x}$). En este trabajo se utilizó un $H_{m\acute{a}x}$ de 150 mm, correspondiente a un promedio de determinaciones realizadas en los suelos de las subcuencas. La

sensibilización de la percolación con respecto a $H_{m\acute{a}x}$, considerando una variación de este parámetro de $\pm 10\%$, mostró cambios en los resultados de la percolación de 1 a 5.7% de la precipitación anual (ilustración 10).

Las estimaciones realizadas indican que gran parte del agua que no escurre es evapotranspirada, superando el 40% de la precipitación anual (cuadro 5).

El coeficiente de escorrentía resultó mayor al 50%, lo que está asociado con el alto nivel de degradación de los suelos del secano de la provincia de Ñuble, los cuales han perdido capacidad de retención de humedad e infiltración.

Conclusiones

Este trabajo aportó valiosa información en el ámbito de subcuencas pequeñas, representativas del Secano Interior en el área centro-sur de Chile. Se pudo llegar a una cuantificación de las variables incluidas en el balance hidrológico que, si bien son estimaciones, permiten realizar análisis sobre bases más sólidas. En la actualidad se extraen menos de 1.5 mm/año de agua subterránea mediante pozos someros, principalmente con fines domésticos. De acuerdo con la estimación realizada, la percolación profunda varía entre 3 y 4% de la precipitación anual, con un mínimo de 1%. Esto corresponde aproximadamente a 22 mm/año, con un mínimo de 6.3 mm/año. Es decir, existe un potencial de aguas subterráneas para pozos someros que podría triplicar al menos el agua extraída actualmente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Proyecto CADEPA del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional Quilamapu, y a los gobiernos de Japón y Chile, gracias a los cuales es posible llevar a cabo este tipo de estudios en el Secano de Chile, en beneficio de los agricultores de la zona.

Recibido: 20/03/2002

Aprobado: 30/10/2002

Referencias

- BIZAMA, G. *Geología del cuadrángulo Yumbel (37° 00' -37° 5' S, 72° 30' -72° 45' W) VIII Región del Bío-Bío, Chile*. Memoria de título. Concepción: Universidad de Concepción, Chile, 1998, 103 pp.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. *Hidrología subterránea*. Segunda edición. Barcelona: Editorial Omega, 1983, 2350 pp.
- GONZÁLEZ, L., MARDONES, M., SILVA, A. y CAMPOS, E. Hidrogeoquímica y comportamiento del agua subterránea en la cuenca del río Claro, Región del Biobío, Chile. *Revista geológica de Chile*. Vol. 26, núm. 2, diciembre de 1999, pp. 145-157.
- GONZÁLEZ DE AGUILAR, A. *La evaluación de los recursos hídricos en la planificación actual: credibilidad y medios*. Las Palmas de Gran Canaria, España: Seminario La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español. Enero de 1997, pp. 305-313.
- FERRARIS, F. *Mapas geológicos preliminares de Chile*. Santiago: Hoja Chillán. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1981, 32 pp.
- JARA, J. y VALENZUELA, A. *Necesidades de agua de los cultivos*. Cartilla divulgativa. Concepción: Comisión Nacional de Riego (CNR) y Universidad de Concepción, Chillán. 1998, 26 pp.
- MILLAR, A. *Manejo de agua y producción agrícola*. Concepción: IICA y Universidad de Concepción. 1993, 556 pp.
- PÉREZ, C. et al. *Estudio línea básica comuna de Ninhue*. Informe técnico. Chillán, Chile: Proyecto CADEPA. 2001, 189 pp.
- DEL POZO, A. y DEL CANTO, P. *Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones*. Serie Quilamapu, núm.113. Chillán, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu, 1999, 116 pp.
- SAMPER, J. *Métodos de evaluación de la recarga por lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores*. Las Palmas de Gran Canaria, España: Seminario La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español. Enero de 1997, pp. 41-81.
- SCOZZAFAVA, M. y TALLINI, M. Net infiltration in the gran sasso massif of central italy using the thornhwaite water budget and curve-number method. *Hydrogeology journal*. Vol. 9, 2001, pp. 461-475.
- SELKER, J., RUPP, D., LEÑAM, M. y URIBE, H. *Estudio hidrológico en el Secano Interior. Resultados preliminares del proyecto piloto en Portezuelo*. Informe técnico. Chillán, Chile: INIA, 2000, 41 pp.
- SHUTTLEWORTH, W.J. Evaporation. *Handbooks of hydrology*. Maidment, D.R. (editor). McGraw-Hill, 1993, pp. 4.1-4.53.
- SMITH, R.E., CHERY Jr., D.L., RENARD, K.G. y GWINN, W.R. Supercritical flumes for measuring sediment-laden flow. *Tech. bul.* Núm. 1655, USDA, julio de 1982, 72 pp.
- URIBE, H. *Metodología para determinar la disponibilidad de aguas subterráneas en el Secano Interior de Ninhue*. Tesis de Magister en Ingeniería Agrícola. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2002, 81 pp.
- VALENZUELA, A., CRISÓSTOMO, C., ALFARO, A. y QUEZADA, J. Canoa aforadora de fondo plano. *Boletín de extensión*. Núm. 53. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción, Chillán, Chile, 1997, 23 pp.
- VELA, A., MEJUTO, M.F. y CASTAÑO, S. Integración de un modelo de balance de agua en el suelo en un sistema de información geográfica. Aplicación al cálculo de la recarga directa. *Congreso las caras del agua subterránea*. Serie hidrogeología y aguas subterráneas 1. España: Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2001, pp. 507-513.

Abstract

URIBE C., H., ARUMÍ, J.L., GONZÁLEZ, L. & SALGADO, L. *Groundwater recharges using hydrological balances in the central drylands of Chile*. *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. July-September, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 17-28.

The drylands of the 8th region in south-central Chile are characterized by granitic soils and Mediterranean climate, where water scarcity is the main constrain for local development. Farmers obtain small amounts of water from shallow wells, barely enough for domestic consumption. In this study, monthly hydrological balances were carried out in two subwatersheds of the San Jose watershed, located in the commune of Ninhue, to estimate aquifer recharge and potential groundwater sources. The model used is a modification of Thornthwaite's balance. The balance was carried out using in-situ measurements of water flow and precipitation, and evapotranspiration was estimated by the Penman-Monteith method. The resulting recharge was sensitized regarding evapotranspiration and soil humidity retention capacity to detect data errors in the model. The results indicated that recharge can reach up to 6% of the annual precipitation, with minimum values of 1%. That means 22 mm/year with a minimum of 6.3 mm/year, which would triplicate water availability in shallow wells. By doing this, the peasant's quality of life will be improved as water availability increases.

Keywords: aquifer recharge, hydrological balance, dryland, runoff, granitic soil, deep percolation, groundwater, Chile.

Dirección institucional de los autores:

Hamil Uribe Cifuentes

Ingeniero Civil Agrícola, Mg. S.
Investigador.
INIA Quilamapu,
Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente,
Vicente Méndez 515, Chillán, Chile,
teléfono: 5642 209750,
fax: 5642 209799,
huribe@quilamapu.inia.cl.

José Luis Arumi Ribera

Ingeniero Civil, PhD.
Profesor Asociado.
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción,
Vicente Méndez 595, Chillán, Chile,
teléfono: 5642 208804,
fax: 5642 275303,
jarumi@udec.cl.

Liubow González M.

Hidrogeólogo, Magister en Geología.
Profesor Asociado.
Departamento de Ciencias de la Tierra,
Campus Universitario,
Universidad de Concepción,
Casilla 3-C, Concepción, Chile,
teléfono: 5641 203588,
fax: 5642 246075,
liubow@udec.cl.

Luis Salgado Seguel

Ingeniero Agrónomo, PhD.
Profesor Titular.
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción,
Vicente Méndez 595, Chillán, Chile,
teléfono: 5642 208804,
fax: 5642 275303,
lsalgado@udec.cl.