

Recarga Potencial de los Acuíferos Colima y Barva, Valle Central, Costa Rica

ROBERTO RAMÍREZ CHAVARRÍA
roracha66@gmail.com

Recibido: 22 octubre 2013

Aceptado: 14 marzo 2014

RESUMEN

El proceso de recarga de los acuíferos Barva y Colima, se da principalmente por infiltración de la lluvia y percolación vertical de los acuíferos superiores hacia los inferiores. Este trabajo determinó la recarga potencial utilizando una metodología basada en balance de humedad del suelo, donde primero se calcula la precipitación que infiltra y posteriormente por medio de un balance de humedad de suelos se obtiene la recarga potencial del acuífero. La recarga potencial calculada para el sistema acuífero Barva-Colima es de 9.720 litros por segundo y la extracción calculada es de 9.866 litros por segundo; si la tasa de extracción actual de agua subterránea aumenta en el futuro, para suplir los distintos de agua, se enfrentaría una crisis de abastecimiento. Las zonas en donde se ubica la mayor recarga son las tres provincias Alajuela, Heredia y San José. Los cantones respectivos son: Alajuela, Barva, San Isidro, San Rafael, Santa Bárbara, Santo Domingo, Goicoechea, Montes de Oca, Moravia y Vásquez de Coronado.

Palabras clave: recarga acuífera, recarga potencial, valle central, acuífero Barva y Colima.

ABSTRACT

Potential recharge of the Colima and Barva aquifers, Valle Central, Costa Rica. The recharge process of the Colima and Barva aquifers is mainly due to water infiltration and vertical percolation from the upper aquifer to the lower one. This study determined the potential recharge using a methodology based on soil moisture balance, which first calculates the precipitation that infiltrates and then through soil moisture balance the potential aquifer recharge is obtained. Calculated potential recharge of the Barva-Colima aquifer system is 9.720 liters per second and the calculated extraction is 9.866 liters per second, if the current rate groundwater extraction increases due to the different water uses, a water supply crisis would be face up. The areas where most recharge occurs are located on the provinces of Alajuela, Heredia and San José. The respective counties are: Alajuela, Barva, San Isidro, San Rafael, Santa Barbara, Santo Domingo, Goicoechea, Montes de Oca, Moravia and Vasquez de Coronado.

Key words: groundwater recharge, potential recharge, valle central, Barva and Colima aquifers.

Introducción

En la actualidad, el Valle Central esta sometido a una gran demanda de recursos hídricos subterráneos. Según datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA 2007) las perforaciones de pozos superan la cantidad de 5198, lo que representa un 42% del total de pozos registrados en el país hasta el 2007. Está explotación de los recursos hídricos, esta acompañada por un cambio en el uso de la tierra; lo que anteriormente eran áreas potenciales para recarga, se han transformado en zonas dedicadas a cultivos permanentes, sistemas urbanos y usos comerciales e industriales. Todas estas actividades pueden poner en peligro la cantidad y calidad del recurso hídrico subterráneo.

El objetivo de este estudio es determinar a partir de las características de los suelos, parámetros físicos, y datos climáticos como, precipitación, temperatura y evapotranspiración, el balance de humedad de suelos, el cual será utilizado para el cálculo del balance hídrico subterráneo.

La zona de estudio se ubica en una parte del Valle Central, específicamente, entre las coordenadas aproximadas 212.000-235.000 Lambert Norte y 505.00-545.000 Este de las Hojas Topográficas Barva, Abra, Naranjo, Río Grande, Carrillo e Istarú, escala 1:50 000, editadas por el Instituto Geográfico Nacional. En la figura 1 se muestra el área de estudio la cual tiene una extensión de 482 km². Dicha área pertenece a la vertiente del Pacífico, aunque tiene influencia

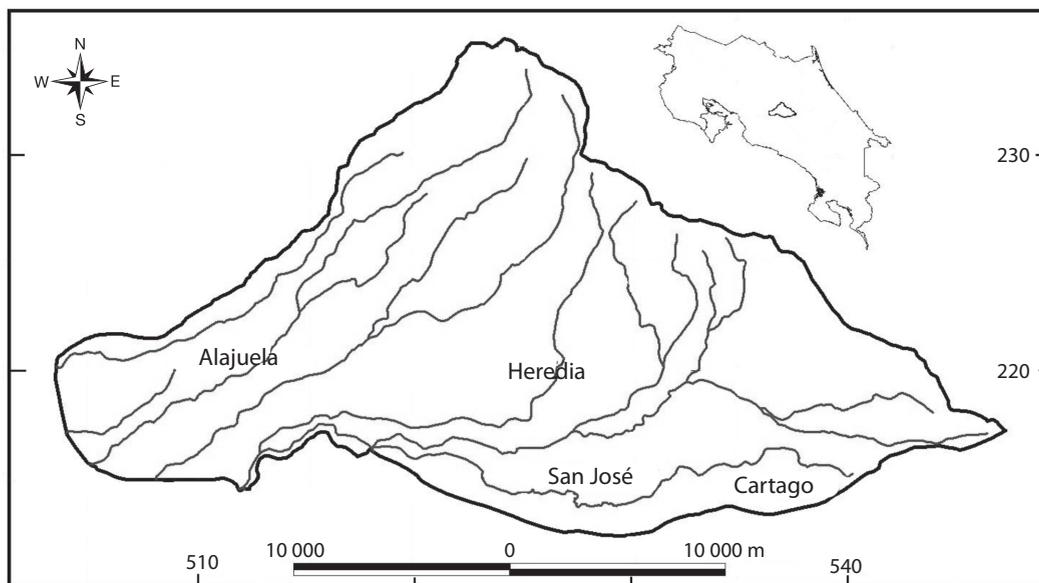


Figure 1. Ubicación zona de estudio.

del Caribe. Se identifican dos épocas climáticas, la seca que va de diciembre a abril y la lluviosa que comprende los meses desde mayo hasta noviembre, con la presencia de un veranillo de finales a junio o inicio de julio. La precipitación total promedio anual registrada varía entre 3500 a 2500 mm en la parte alta y entre 2000 y 1800 mm en la parte baja. La temperatura varía en la parte alta desde 15 a 17 grados, en la parte media de 20 grados y en la baja de 22,5 grados en promedio.

La topografía del área de estudio tiene rangos de elevación desde los 500 m hasta los 2700 m sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). La altura máxima se localiza en la cúspide del volcán Barva (2 906 m). La parte alta de área de estudio presenta una topografía con pendientes muy pronunciadas (mayor de 40%). En la parte media y baja las pendientes son plano onduladas, menores del 20%.

Antecedentes

Los primeros estudios sobre la recarga del Valle Central fueron desarrollados por Losilla et al. (1982). Estos autores realizaron una serie

de aforos en los ríos localizados en la zona este del Valle Central y los resultados evidenciaron la ocurrencia de una recarga importante de agua en esta área. Esta conclusión se dedujo a partir de la aplicación de un modelo matemático del acuífero para estudiar el Campo de Pozos de la Valencia y se sugirió la ocurrencia de infiltración importante a través de los lechos de los ríos al noreste de San José, debido a que al modelar matemáticamente el acuífero, se requirió de una recarga considerable al acuífero en esta área. Estos estudios demostraron también la presencia de varios acuíferos con características hidráulicas diferentes. Los de mayor importancia denominados Colima, tienen una descarga calculada en 5500 litros por segundo. Estratigráficamente, se ubican bajo los acuíferos Barva y La Libertad, ambos de menor potencial pero de mayor susceptibilidad a la contaminación (BGS & SENARA, 1985).

Darling, W.G. et al., (1985) por medio de isótopos como el tritio determinaron que la edad aproximada de las aguas subterráneas del Valle Central se encuentran entre los 10 a 15 años, implicando que el flujo subterráneo es muy rápido. También los investigadores trabajaron con isótopos estables de oxígeno 18 y deuterio

y los resultados evidenciaron que la recarga del Acuífero Barva ocurre a una elevada altitud por medio de la percolación de ríos. Sumado a esta condición, el acuífero de la Libertad recibe un aporte importante de los ríos del este del Valle Central (ibid). El acuífero subyacente, el Colima Superior, recibe en teoría su recarga vertical por percolación vertical desde Barba y la Libertad, mientras que el acuífero Colima Inferior, tiene diferentes fuentes de recarga, una parte de Colima Superior otra de la Libertad (ibid).

BGS, SENARA y A y A (1988), concluyeron que los acuíferos Colima producen un caudal mínimo de 5500 litros por segundo. Las extracciones en ese momento contabilizaban aproximadamente 2200 litros por segundo, donde se incluían los 1000 litros por segundo extraídos del campo de pozos de La Valencia, 650 litros por segundo de los manantiales de Puente de Mulas, 250 litros por segundo de los Manantiales de Potrerillos y 300 litros por segundo de pozos y fuentes privadas. En este mismo estudio, a partir del análisis de pruebas de infiltración realizadas en el campo y determinaciones de permeabilidades realizadas en el laboratorio de muestras de rocas, demostraron la alta capacidad de infiltración del terreno en el Valle Central. Las lavas brechosas y meteorizadas tienen las capacidades más altas de infiltración, mientras que las tobas tienen valores inferiores (ibid). Sin embargo, las tobas son suficientemente permeables como para permitir la infiltración de al menos 50 mm/día, de manera que solo la lluvia muy intensa no se incorporará a la recarga y aparecerá como escorrentía superficial (ibid).

Rodríguez (1990) estudia el impacto del desarrollo urbano sobre la recarga de los acuíferos y concluye que este desarrollo reducirá la recarga a los acuíferos Colima, afectando la producción de los pozos, los niveles de agua subterránea y al caudal de los manantiales. Este autor recomienda que se restrinja dentro de la GAM, la densidad de construcción a un máximo de un 20% y también menciona que no se expanda el área de la GAM más allá de los límites establecidos.

Como un antecedente final podemos mencionar que Maldonado & Ramírez (2006) desarrollaron el modelo digital de recarga potencial

a partir de un balance de humedad del suelo, el cual consiste en forma general en el cálculo de un balance mensual por celdas y no por áreas geológicas o tipos de suelos.

Hidrogeología

Los materiales geológicos que se encuentran en la zona de estudio son en su mayoría lavas y flujos piroclastos, asociados por algunos autores con las formaciones Lavas Intracañón y los Depósitos de Avalancha Ardiente (Denyer, Aguilar y Arias, 1994). Estas formaciones geológicas debido a su porosidad primaria y secundaria (debida la presencia de fracturas) originan una serie de sistemas de acuíferos denominados informalmente como Colima Superior e Inferior y Barba. La Formación Colima consiste en coladas de lavas, brechas, ignimbritas y pómez y la misma fue dividida en tres miembros: Belén, Puente de Mulas y Linda Vista (Lavas la Libertad) por Echandi (1981). Posteriormente aparece la Formación Tiribí y fue subdividida por el mismo autor en los miembros: Nuestro Amo, Electriona y La Caja. Krushensky (1972) describe Tiribí como una serie geológica ampliamente distribuida en la que predominan depósitos de nube ardiente (flujos de ceniza, flujos de pómez, flujos de bloques, lapilli, ceniza e ignimbritas). Posteriormente aparece la Formación Barva, que incluye varias coladas y depósitos piroclásticos que se originaron en la Cordillera Volcánica Central y forman parte del Grupo Volcánico Central y han sido incluidas dentro de la Formación Lavas post-Avalancha y otros nombres usados para las coladas hacia el suroeste, como la Colada de Cebadilla, la cual se presenta en forma de promontorios de bloques que sobresalen de la planicie ignimbrítica. La Formación Barva está constituida por coladas de lavas andesíticas y andesito-basálticas con espesores que van desde 10 metros hasta 80 metros con intercalaciones de aproximadamente 10 metros de ceniza y ocasionalmente lapilli (Denyer y Arias, 1991). Se divide en cuatro miembros desde el punto de vista hidrogeológico: Miembro Bermúdez, Porrosatí y Carbonal, Los Ángeles

y los Bambinos y Miembro Cráter (Echandi, 1981., Arredondo, 1994).

Metodología del balance

El método para estimar la recarga potencial hacia los acuíferos, consiste en la determinación de la precipitación que infiltra, donde se toma en cuenta la textura del suelo, la precipitación total, el uso de la tierra, intercepción de la vegetación y la pendiente. En la segunda etapa, se calcula la recarga potencial del acuífero considerando las siguientes variables: evapotranspiración potencial, y características del suelo, como densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitez y profundidad de raíces.

Analíticamente se plantea el modelo de precipitación que infiltra propuesto por (Schosinsky, 2006), el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$I_p = (1 - \alpha) (k_p + k_s + k_c)P$$

donde,

I_p	Precipitación que infiltra en el suelo mm/mes
α	Coefficiente de intercepción de copas %
k_p	Coefficiente de infiltración por condiciones de pendiente %
k_s	Coefficiente de infiltración por textura del suelo %
k_c	Coefficiente de Infiltración por condiciones de cobertura vegetal %
P	Precipitación total mm/mes

Se debe aclarar que k_s esta relacionado con la textura del suelo, sin embargo en caso de tener valores de pruebas de infiltración del suelo, se establece la siguiente relación que puede ser usada como valor de k_s :

$$kf_c = 0,267\ln f_c - 0,000154f_c - 0,723$$

kf_c	capacidad de infiltración del suelo mm/día
f_c	permeabilidad básica del suelo mm/día

La segunda parte del modelo según Schosinsky y Losilla (2000), consiste en la

determinación de la recarga potencial hacia el acuífero, donde se obtiene la humedad del suelo, en función de la capacidad de campo y punto de marchitez, para calcular la evapotranspiración real y utilizar la relación:

$$R_p = I_p - ETR - H_i - H_f$$

R_p	Recarga potencial mm/mes
I_p	Precipitación que infiltra en el suelo mm/mes
ETR	Evapotranspiración real mm/mes
H_i	Humedad inicial mm/mes
H_f	Humedad final mm/mes

La primera tarea fue editar el perímetro del área de estudio, a partir de un archivo digital (polígono Arcview). Este mapa digital del acuífero Colima Superior fue transformado en un archivo raster con celdas de tamaño 200 m por 200 m, y cada celda con un área equivalente de 40 000 m² (4,0 hectáreas); este archivo raster quedó formado por 12 671 celdas. A este archivo raster se le extrajo el centroide (punto central de la cuadrícula) y se le asignaron las coordenadas X,Y para cada punto en coordenadas planas Lambert Norte. Este archivo X,Y constituye el marco de referencia para obtener los datos para ese punto de las diferentes coberturas (Z1, Z2,... Zn) que se utilizaron en este estudio. A cada punto se le asignó un código (p1, p2, p3,... pn) para tener un identificador único. Se generaron los mapas de precipitación, evapotranspiración, pendiente, cobertura y uso de la tierra, profundidad de raíces, punto de marchitez, capacidad de campo, densidad aparente, para completar la secuencia de coberturas necesarias para la aplicación del modelo se elaboró el mapa de permeabilidad (mm/día).

Resultados y discusión

En este estudio se asignaron los coeficientes propuestos por Schosinsky y Losilla (2000), como también los valores propuestos por Schosinsky (2006) en su modelo digital de "Balance hídrico de suelos" (Cuadro 1). El establecer este modelo para miles de celdas es una

CUADRO 1

Variables y coeficientes utilizados en modelo de precipitación que infiltra

Pendiente		Cobertura-uso de la tierra		Profundidad de raíces	
(%)	kp	Categoría	kv	Categoría	Metros
0-0,06	0,30	Urbano	0	Urbano	0
0,06-0,40	0,20	Pastos	0,09	Cultivos anuales	0,4
0,40-2,00	0,15	Cultivos anuales	0,10	Uso mixto	0,45
2,00-7,00	0,10	Cultivos permanentes	0,12	Pastos	0,5
Más de 7,00	0,06	Uso mixto	0,12	Cultivos permanentes	1,0
		Tacotal-charral	0,12	Tacotal-charral	2,0
		Bosque secundario	0,13	Bosque secundario	2,0
		Bosque primario	0,20	Bosque primario	3,0

Fuente: Modificado de Schosinsky (2006).

gran ventaja pues se tiene la opción de generar escenarios y comparar los resultados.

La información de profundidad de raíces fue estimada con base en la experiencia y datos recolectados en el campo, por ejemplo en cultivos anuales se usó un promedio de profundidad de diferentes cultivos incluyendo hortalizas, legumbres, sandías, melones y tubérculos. En el caso de cultivos permanentes se usaron los datos reportados para café, que es el cultivo que más predomina en el área. Para uso mixto se usó un valor intermedio entre cultivos anuales y pastos, que es lo que más se observa en el campo cuando se clasifica con esta categoría. Las celdas con uso urbano representan el 21% del total, las que presentan mayor peso son cultivos permanentes con 29.4% y pastos con el 20.7%,

los tacotales-charrales y bosque secundario el 14.3%, los cultivos anuales 5.2%, el uso mixto 4.5% y bosque primario el 4.9%.

Mapa de Recarga

Para tener un parámetro de comparación se calculó inicialmente un balance de humedad de suelos, método que se utiliza en la mayoría de estudios hidrogeológicos en el país. Este método consiste en asignar a cada área que tenga la misma litología geológica o igual tipo de suelos los parámetros de precipitación, evapotranspiración, capacidad de infiltración y otros. Posteriormente se realiza los cálculos de precipitación que infiltra y finalmente la determinación de la recarga potencial, la desventaja de este método es que se

CUADRO 2

Balance hídrico de la zona de estudios, donde se utiliza parámetros promedios por formación geológica

Tipo de roca	Formación	Área (m ²)	Recarga (mm)	Recarga litros por segundo
Iglimbritas	Tiribi	100.341.660,85	404	1.284,60
Lahares	Lavina	74.771.645,53	296	701,35
Epicalastos, lavas, vulcanitas y lahares	Zurquí	33.068.127,15	440	461,07
Piroclastos, lavas, avalanchas	Barva	269.112.534,82	1086	9.261,24
Lavas e Iglimbritas	Colima	3.640.074,08	886	102,20
Aluvión, lahares y coluvios	Aluvión, lahares y coluvios	863.164,84	608	16,63
Lavas y cenizas	Estratovolcán Pico de Piedra	13.932.012,51	886	391,16
Lavas y depósitos piroclastos	Estratovolcán Cabeza Vaca	3.220.498,95	886	90,42
TOTAL		498.949.718,74		12.308,67

Fuente: propia.

obtiene valores puntuales y promedios por área de igual litología y no se pueden diferenciar zonas con mayor o menor recarga.

Con este método se calculó el balance hídrico puntual por unidad geológica (cuadro 2) se puede observar que la recarga potencial total para el área de estudio es de 12.308,67 litros por segundo, que posteriormente se compara con el método basado en celdas, que realizaremos a continuación.

En la figura 2 se muestra el resultado final de la recarga potencial anual del modelo de celdas usando los coeficientes propuestos. Como se puede observar la zona con mayores valores de recarga potencial (cuadro 3) se ubica principalmente en la zona norte y oeste del área que coincide con los cantones de Santa Bárbara y Barva.

En el cuadro 4 se muestran los resultados totales promedios de las celdas por mes, se puede observar una recarga importante en los meses de setiembre octubre debido a que coincide con los meses de mayor precipitación de la zona.

CUADRO 3

Valores de la Recarga Potencial en mm/año

Recarga Potencial	Intervalo en mm/año
Muy Alta	1.600-1.200
Alta	1.200-800
Media	800-400
Baja	400-0

Fuente: propia.

Del total de celdas se calculó la recarga potencial del sistema acuífero Colima- Barba en 9720 litros por segundo. Si se comparan este caudal de recarga, con el calculado por TAHAL (1990) de 8200 litros por segundo se concluye que los datos de producción de los acuíferos son consistentes para el sistema acuífero Barva-Colima y deja en evidencia que el dato de SENARA-BGS (1988) de 5500 l/s para el Acuífero Colima de 5500 l/s, solo considera el sistema Colima.

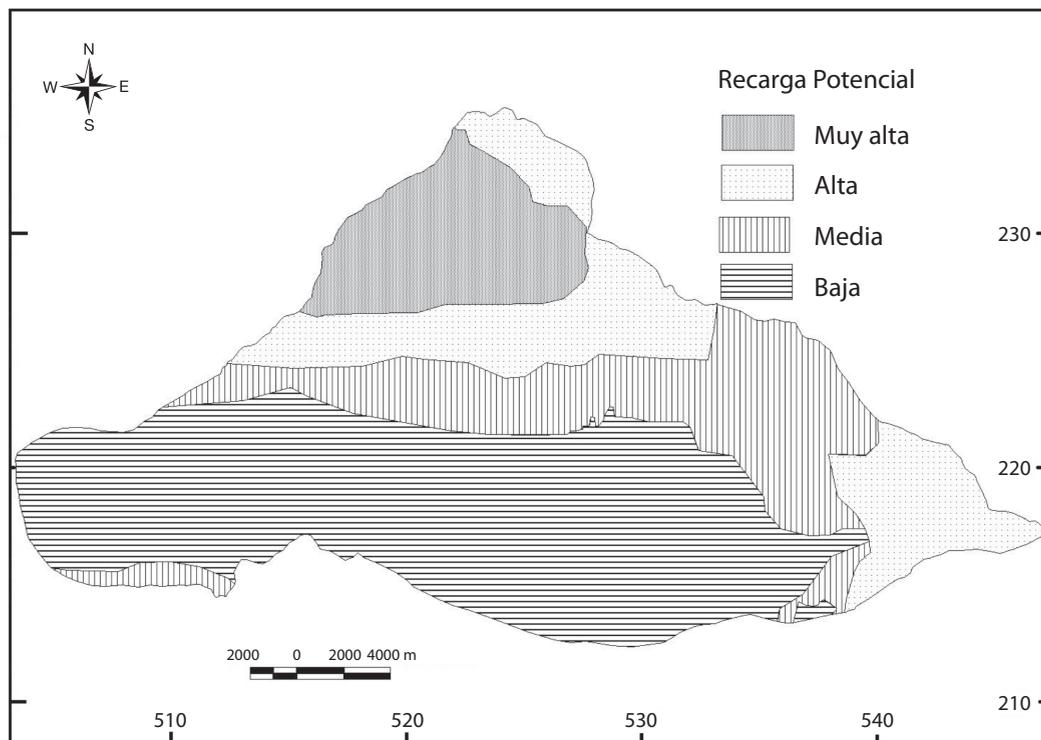


Figure 2. Mapa de recarga potencial anual de los Acuíferos Barva y Colima.

CUADRO 4

Valores promedio por mes de recarga potencial en milímetros de recarga potencial por mes

Meses	Recarga Potencial en milímetros
Enero	2,300
Febrero	1,800
Marzo	0,050
Abril	1,900
Mayo	47,80
Junio	80,10
Julio	44,80
Agosto	78,40
Setiembre	136,00
Octubre	147,00
Noviembre	52,00
Diciembre	12,00
TOTAL	604,15

Fuente: propia.

Extracción, demanda y balance de aguas

Según las bases del Registro Nacional de Pozos del SENARA (2007), se identificaron las perforaciones y manantiales que tienen concesión otorgada por el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), hasta el mes de enero del 2007. Los valores aproximados de extracción se definen en el cuadro 5.

Algunos autores han definido posibles escenarios de extracción de agua subterránea, por ejemplo, Losilla et. al (2001) calcula un caudal de 2916 litros por segundo para el acuífero Colima y Barva, el BGS y SENARA (1988), considera que las extracciones actuales representan aproximadamente 2200 litros por segundo, TAHAL (1990), define que se extrae

de los pozos, manantiales y galerías un caudal mínimo de 4330 litros por segundo y por último Reynolds (2002) menciona que el caudal de agua superficial que se usa en la GAM es de 4638 litros por segundo y la extracción de aguas subterráneas es de 5663 litros por segundo. Se puede observar que los datos de extracción están muy por debajo de los calculados por este trabajo esto debido a que los otros autores se basan en información más desactualizada y no se tenía todas las concesiones otorgadas.

En este momento, si se compara los datos de extracción 9.866 litros por segundo contra los 9.720 litros estaríamos alcanzando la recarga potencial en su totalidad, sin embargo, para tener una mejor aproximación de la oferta de agua se debe realizar un balance de aguas subterráneas, con un monitoreo continuo de niveles del acuífero. Con respecto a la extracción, se debe mejorar la medición y el control por medio de ente que concesiona el agua en el país.

Modificación de parámetros del modelo de recarga

Los dos parámetros del balance de humedad del suelo que fueron cambiados para analizar el comportamiento del modelo de celdas son: profundidad de raíces y cobertura de uso de la tierra.

En el primer escenario se le asignan los coeficientes utilizados de referencia propuestos por Schosinsky y Losilla (2000) y valores propuestos por Schosinsky (2006) en su modelo digital de "Balance hídrico de suelos". A nivel de celda el valor máximo de recarga potencial es de 1772,4 mm y el valor mínimo 0, para un promedio anual de 605,3 mm. El total anual en este escenario es 7.669.941 mm incluyendo todas las celdas y meses (Maldonado & Ramírez, 2006).

CUADRO 5

Volumen anual y caudal de extracción de agua subterránea

CAUDAL/USO	Doméstico	Industrial	Turismo	Agrícola
Litros por segundo	6.129	3.028	158	551
Porcentaje	62,1%	30,7%	1,6%	5,6%
TOTALES l/s	9.866			

Fuente: SENARA (2007).

Para ver la respuesta del modelo a un cambio en uno de los coeficientes, se hizo un Escenario 2. En este escenario, se cambió el dato de profundidad de raíces y se mantuvieron los valores en las otras variables. En el Escenario 2 se supone que la profundidad es de 0,5 metros. En esta nueva condición, el valor máximo de recarga potencial para cada celda es de 1768,3 mm y el valor mínimo 0, para un promedio anual de 629,3 mm. El total anual en este escenario es 7.974.881 mm incluyendo todas las celdas y meses. Al dejar de lado las celdas clasificadas como urbanas, el promedio anual es de 795,7 mm.

La diferencia en el total anual de recarga entre el Escenario 1 y el Escenario 2 es de 304,9 mm, es decir la recarga potencial aumentó en 4,0% con respecto del Escenario 1, por lo que se puede interpretar que la variación de la profundidad de raíces es un factor preponderante en el cálculo del balance hídrico de suelos.

Conclusiones y recomendaciones

Se comparó dos métodos, por el método tradicional se obtuvo un valor de recarga potencial de 12.308,67 litros por segundo y con método de celdas un caudal de 8.200 litros por segundo, esta diferencia se debe a que el método de celdas por su tamaño (200x200 metros) logra disminuir los errores de extrapolación de parámetros como la infiltración, tipos de suelos, precipitación, uso de la tierra y otros.

Una de las ventajas de tener un modelo digital del balance hídrico es la facilidad de variar parámetros, como por ejemplo el uso de la tierra, mismo que cambia constantemente por la propia dinámica territorial y social. También el mapa tiene otra ventaja que se puede zonificar la recarga y definir áreas de mayor o menor recarga. En las áreas de mayor recarga se puede definir políticas de manejo de las aguas subterráneas.

El parámetro que más tiene influencia en el cálculo del balance de humedad de suelos es la profundidad de raíces, por lo que se recomienda realizar estudios de campo para obtener primeramente el uso de la tierra y posteriormente la profundidad de raíces asociada a ese cultivo.

Uno de los parámetros más complejos de calcular en los balances hídricos es la extracción de aguas subterráneas. En este trabajo se utilizó el cálculo de caudal por medio de concesiones, sin embargo se recomienda obtener datos directos de extracción (macromedición y micromedición), como también realizar un monitoreo de las aguas subterráneas (medición de niveles, conductividad eléctrica y nitratos principalmente) y así obtener modelos de flujo numéricos que incorporen posibles cambios en la recarga, el bombeo y generar escenarios de explotación futura y por último observar tendencias en los parámetros de calidad.

Agradecimientos

Se agradece la ayuda para la realización de este trabajo al SENARA, a Tirso Maldonado, Ingrid Vargas y en especial al Ingeniero Gunther Schosinsky Neverman (que de Dios goce) quien siempre apoyo con sus conocimientos los temas de balance hídricos.

Referencias

- Arredondo, S. 1994. Aguas subterráneas y fuentes termales. In Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica. Compiladores Denyer, P. & Kussmaul, S. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 187-210 p.
- BGS, SENARA y A y A, (British Geological Survey; Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento SENARA e Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados) 1988. Continuación de las investigaciones hidrogeológicas al norte y oeste del Valle Central de Costa Rica. SENARA Informe no. 165. San José, CR. 150 p.
- BGS (British Geological Survey; Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento SENARA). 1985. Mapa Hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica. E.S.R. Limited, Inglaterra. Esc. 1: 50.000. Color.
- Darling, W.G., Parker, J.M., Rodríguez, V.H. & Lanlner, A.J. 1985. Investigation of a volcanic aquifer system in Costa Rica using environmental isotopes. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas (SENAS), San José CR. 10 p.

- Denyer, P. & Arias, O., 1991. Estratigrafía de la región central de Costa Rica. *Rev. Geól. América Central* 12: 1-59.
- Denyer, P., Aguilar, T. y Arias, O., 1994. Historia Geológica. **In** Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica. Compiladores. Denyer, P. & Kussmaul, S. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 98-108 p.
- Denyer, P.; Kussmaul, S. y Arias, O. 1994. Estratigrafía de las rocas ígneas. **In** Atlas Geológico de la Gran Área Metropolitana, Costa Rica. Compiladores Denyer, P; Kussmaul, S. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 61-70 p.
- Echandi, E. 1981. Unidades volcánicas de la Vertiente Norte del Río Virilla. Tesis de Licenciatura. Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. 123 p.
- Krushensky, R.D., 1972. Geology of the Istarú Quadrangle, Costa Rica. – U.S. Geol. Bulletin Geological Survey, 1358: 1 - 46.
- Losilla, M.; Rodríguez, H.V.; Shosinsky, G.; Stimson, J.; Bethune, D. 2001. Los acuíferos volcánicos y el desarrollo sostenible en América Central. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 205 p.
- Losilla, M.; Rodríguez HV.; Foster, S.; Kitching, R. 1982. Estudio hidrogeológico para el desarrollo de los acuíferos Colima, aplicación de un modelo matemático IGS/SENAS, Valle Central Costa Rica. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas SENAS (Informe Interno). San José, CR. 54 p.
- Maldonado, T.; Ramírez, R. 2006. Balance Hídrico Digital del Valle Central. Acuífero Colima Superior-Barva. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento SENARA (Informe Interno). San José, CR. 33 p.
- Rodríguez, H., 1990. Impacto del desarrollo urbano sobre la recarga de los acuíferos Colima. **In** IV Congreso Nacional de Recursos Hidráulicos, San José Costa Rica. 12 p.
- Reynolds J. y Fraile, J. 2002. Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central. **In** Manejo Integrado de Aguas Subterráneas. Edit. Reynolds, J. Editorial EUNED. 19-32 p.
- SENARA (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento). 2007. Archivo Nacional de Pozos del Área de Aguas Subterráneas del SENARA. San José, CR. Disponible en <http://base-digh.senara.or.cr/logout.php>.
- Schosinsky, G. 2006. Calculo de la recarga potencial de los acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Rev. Geol. América Central* 34-35: 13-30.
- Schosinsky, G. y Losilla, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Rev. Geol. América Central* 23: 43-55.
- TAHAL (Tahal Consulting Engineers). 1990. Plan Maestro de Abastecimiento del Agua Potable de la GAM. Informe Final Tomo III: Aspectos Hidrológico e Hidrogeológicos. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados A y A. San José, CR. 300 p.

