

DETERMINACIÓN DE LA RECARGA ACUÍFERA POTENCIAL MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA CUENCA DEL RÍO FRÍO, COSTA RICA

POTENTIAL AQUIFER RECHARGE DETERMINATION FOR COSTA RICA'S COLD RIVER BASIN USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

*Pablo Ramírez Granados**

Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

RESUMEN

En hidrogeología y manejo de recursos hídricos, una de las áreas prioritarias de investigación involucra los estudios de recarga acuifera a partir de la infiltración de la lluvia. Dichos estudios generalmente involucran diversas metodologías siendo una de ellas la aplicación de un balance hídrico. En los últimos años, con el ascenso de los sistemas de información geográfica en los estudios hidrogeológicos, la facilidad de integración, manejo, consulta y modelado de geodatos ha permitido cuantificar y modelar de mejor forma las aguas subterráneas. En este artículo se demuestra cómo se determinó la recarga acuifera potencial en la cuenca del río Frío mediante la aplicación de un balance hídrico de suelos, a partir de una serie de variables geohidrológicas. La modelización de

* Investigador del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: pablo.ramirez@ucr.ac.cr

** Este artículo es el resultado parcial del proyecto de investigación 830-A9-518 denominado *Estudio Hidrogeológico Regional de la Cuenca del Río Frío* del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG), inscrito en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Se agradece al M.Sc. Mario Arias Salguero, director del CICG, quien facilitó los datos hidrológicos con que fue elaborado este artículo, así como los datos generales de la cuenca a los que se refiere este trabajo, contenidos en el informe final del proyecto.

Fecha de recepción: 07 de agosto de 2012
Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2012

geodatos en el sistema de información geográfica incluyó métodos de interpolación espacial y álgebra de mapas. La información modelada sirvió para la construcción del balance hídrico con el cual se determinaron las zonas de recarga acuífera potencial de la cuenca del río Frio.

Palabras claves: cuenca río Frio, modelado hidrogeológico, balance hídrico, sistemas de información geográfica, zonas de recarga.

ABSTRACT

In hydrogeology and water resources management, one of the priority areas of research involves studies of aquifer recharge from rainfall. These studies generally involve several methodologies, one being the implementation of water balance. In recent years, with the rise of geographic information systems in hydrogeological studies, ease of integration, management, consulting and modeling of geodata has allowed more accurate quantifying and modeling of groundwater. This article shows the potential aquifer recharge in the Río Frio (Cold River) Basin through the implementation of a soil-water balance from a series of geohydrological variables. Modeling of geodata in the geographic information system included spatial interpolation methods and map algebra. The information used for the construction modeled water balance to identify areas of potential aquifer recharge from rainfall.

Key words: Río Frio Basin, Costa Rica, hydrogeological modeling, water balance, geographic information system, aquifer recharge zones.

Introducción

Una de las etapas principales en el análisis de las aguas subterráneas es el modelado de los datos hidrológicos, tanto los obtenidos en campo como los recopilados en informes técnicos. Para dichos análisis siempre es necesario establecer el comportamiento de una determinada variable a partir de una serie de geodatos.

Los métodos comúnmente aplicados en el análisis de geodatos corresponden al modelado geoespacial mediante la construcción de superficies continuas, las cuales son elaboradas por métodos de interpolación espacial (Kresic, 2007), algunos de estos métodos son conocidos también como métodos geoestadísticos y se aplican con frecuencia en la hidrogeología (Bear & Cheng, 2010; Kresic, 2007; Kitanidis, 1997).

Para desarrollar este modelado de geodatos es necesario integrarlos en un sistema de información geográfica que facilite la comunicación entre los geodatos, de manera que se puedan gestionar consultas y aplicar una serie de operadores numéricos, con el fin de determinar un conjunto de propiedades hidrogeológicas a partir de datos primarios, así como caracterizar el comportamiento geohidrológico de una variable específica (Pinder, 2002).

Uno de los aspectos más llamativos de la hidrogeología es la cuantificación de la recarga con el potencial hacia los acuíferos a partir de la precipitación, especialmente aquella relacionada al proceso de infiltración. Dichas investigaciones se refieren al flujo de aguas subterráneas en suelos (Zaradny, 1993), los cuales a su vez son parte de la zona no saturada. Existen una serie de metodologías que son aplicables a la cuantificación del balance hídrico y que han sido aplicadas en Costa Rica; estas varían según la naturaleza del estudio y la manipulación de las variables. Algunas de ellas son la Thornthwaite, aplicada en el estudio de riego, o la de Holdridge, de orientación más ecológica. En Costa Rica, la metodología para la cuantificación del agua subterránea más usada es la propuesta por Schosinsky (Schosinsky, 2006; Schosinsky y Losilla, 2000), la cual es oficial en Costa Rica según el *Reglamento de Metodologías Hidrogeológicas para la Evaluación del Recurso Hídrico*, publicado en el *Alcance a La Gaceta* del 31 de julio del 2012.

El propósito de este trabajo es aplicar dicha metodología para aproximar la recarga potencial en la cuenca del río Frío, en la zona norte de Costa Rica, utilizando las técnicas del modelado de datos hidrogeológicos y los sistemas de información geográfica.

Metodología

La información climática correspondiente a las variables meteorológicas precipitación (P) y temperatura (T) se obtuvo de los registros históricos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de las estaciones Comando, Laguna y San Jorge (Arias, 2011). Para la determinación de la precipitación zonal se aplicó la técnica de los polígonos de Thiessen a las tres estaciones antes mencionadas, considerando que dicho método es uno de los más empleados en ciencias hidrológicas (Marsily, 1986; Fetter, 2001; Dingman, 2002, Ward & Trimble, 2003) y la carencia de más estaciones meteorológicas.

El cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) se realizó mediante el método indirecto de Thornthwaite (1948), utilizando los valores T disponibles de las estaciones mencionadas, ya que la cuantificación de dicha variable directamente requiere especificar la evaporación y la transpiración por cada cobertura. Es importante mencionar que la ETP aquí calculada puede sustituirse fácilmente por otros métodos comunes, como

Blanney-Criddle, Pennam o Hargreaves, incluso, a mayor cantidad de datos, se pueden incluir metodologías más detalladas; para este estudio se consideró el método de Thornthwaite (Arias, 2011).

Para la clasificación del uso de la tierra (*kv*) se consideraron las categorías propuestas por Schosinsky & Losilla (2000), con base en los usos determinados por el Instituto Nacional de Biodiversidad (INBIO) y mediante fotografías aéreas (Arias, 2011). El coeficiente de retención por follaje (*Cfo*) para dichos usos es el propuesto en la metodología (Shosinsky, 2006), salvo que se indique otro.

Para la determinación de las propiedades geomorfológicas del terreno, que se relacionan con el proceso de infiltración por lluvia, específicamente las pendientes en porcentaje (*kp*), se utilizaron como insumo las curvas de nivel topográficas vectorizadas de las hojas Zapote, Tilarán, Tierras Morenas, San Jorge, Monterrey, Miravalles, Medio Queso, Los Chiles, Guatuso y Arenal del Instituto Geográfico Nacional (IGN), escala 1: 50 000 (Arias, 2011). Con base en la información altitudinal derivada de dichas curvas, se construyó un Modelo Numérico del Terreno (MNT) por medio de una Red de Triángulos Irregulares (RTI), conocida como triangulación (Hengl & Evans, 2009), y con base en este se derivó una grilla de elevaciones a la cual se le derivó la pendiente en porcentaje según la ecuación de Zevenberger y Thorne (Hengl & Evans, 2009).

Para la determinación de las propiedades hidrogeológicas de los suelos se realizó una etapa de muestreo que consistió en la obtención de una muestra inalterada del horizonte superficial y una muestra suelta. Dichas muestras se llevaron al Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para la determinación de los estados de retención de agua y la densidad aparente (Arias, 2011).

Los estados de retención de humedad de un suelo, a partir de una muestra inalterada, de interés para la aplicación del balance hídrico, corresponden con la capacidad de campo (*cc*) y el punto de marchitez (*pm*).

Adicionalmente, se realizaron ensayos de infiltración por infiltrómetro de doble anillo para la caracterización de la velocidad de infiltración del suelo (*fc*). Para el cálculo de la lámina de agua se utilizó la profundidad promedio de las raíces (*pr*) de las unidades vegetales de la cuenca, esto se determinó con base en el trabajo de campo. Para el cálculo del factor de

infiltración, debido a la textura del suelo (*k_fc*), se utilizó la ecuación propuesta por Schosinsky (Schosinsky y Losilla, 2000).

Para el modelado de geodatos se utilizó la aplicación de métodos de interpolación espacial, con el fin de caracterizar la distribución espacial de las variables hidrogeológicas en la cuenca hidrográfica. El método utilizado para la cantidad de datos fue la función de base radial, debido a que permite un modelado visualmente más apropiado de la variable interpolada que otros métodos. La escogencia del método de función de base radial se efectuó después de utilizar otras técnicas de interpolación, ya que generó mejores resultados para la cantidad de datos disponibles y la extensión espacial de la cuenca. Cuando se cuenta con una mayor cantidad de muestras la escogencia del método puede variar (Kresik, 2007).

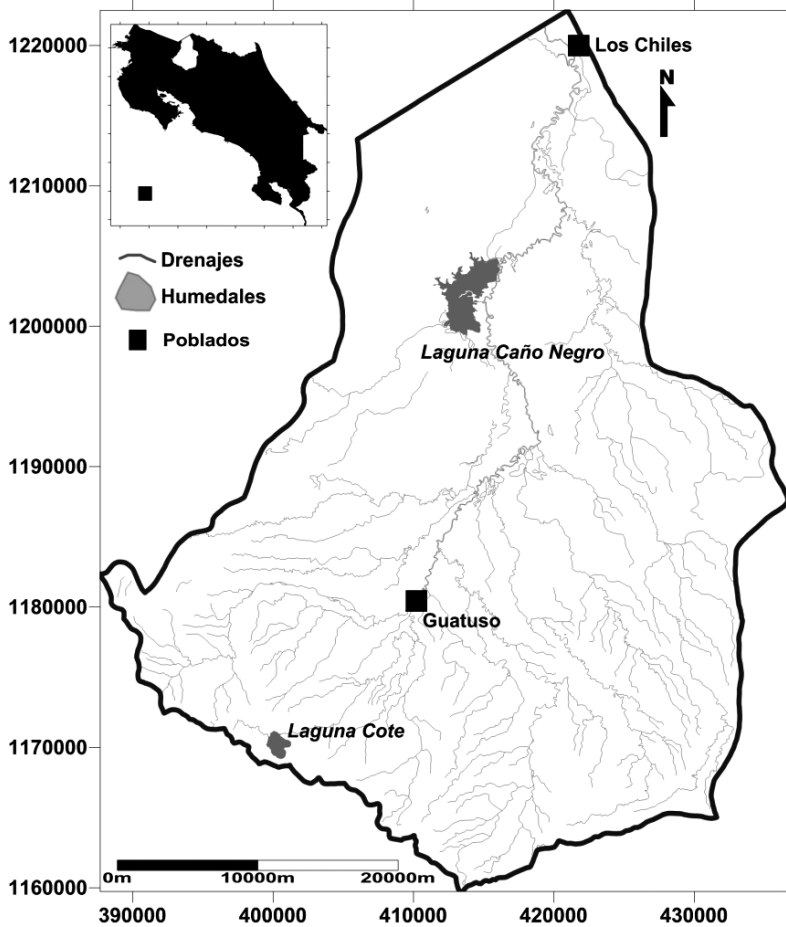
La incorporación de los geodatos en el sistema de información geográfica implicó dos pasos. El primero de ellos fue la importación de los diferentes geodatos en la forma de vectores, los cuales tenían asociada una base de datos.

En el caso de las muestras y su modelización a partir de interpolaciones se construyó una grilla o cuadrícula en la que cada punto tiene un espaciamiento aproximado de 25 metros, considerando que cada uno de los datos para el modelado de la cuenca se basó en la cartografía 1: 50 000, siendo este un tamaño de cuadrícula recomendado para esta escala (Hengl & Evans, 2009).

Caracterización geohidrológica de la cuenca

La cuenca del río Frío se ubica en la zona norte de Costa Rica y abarca un área media de 1600 km² que incluye casi en su totalidad al cantón de Guatuso (Arias, 2011). Al Norte limita con Nicaragua y al Sur con el eje montañoso de la Cordillera de Tilarán y el volcán Arenal. Entre los drenajes principales se pueden destacar el río Medio Queso, Caño Negro y el río Frío, que actúan como colectores hidrográficos principales; otros drenajes importantes como Muerte, Samen, Venado, Cote y Boca Tapada constituyen importantes tributarios hidrográficos que aportan sus aguas desde la parte alta al sur de la cuenca (Arias, 2011). Entre las poblaciones más importantes en la cuenca se pueden citar San Rafael de Guatuso y Los Chiles, que son las cabeceras de cantón de Guatuso y Los Chiles respectivamente (figura 1).

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Frío



Fuente: Arias, 2011.

Los usos de la tierra de la cuenca del río Frío se pueden agrupar en las siguientes categorías (Arias, 2011): bosque, cuerpos de agua, cultivos, herbazal, infraestructura, matorral, nubes, plantación forestal, sombra, terreno descubierto y vegetación anegada. Las áreas y los porcentajes de área obtenidos a partir del sistema de información geográfica para cada uno de los usos se pueden visualizar en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Uso de la tierra en la cuenca del río Frío

Tipo	Área (km²)	Área (%)
Bosque	281.18	17.38
Cuerpos de agua	31.29	1.93
Cultivos	135.30	8.36
Herbazal	659.69	40.76
Infraestructura	1.61	0.10
Matorral	37.33	2.31
Nubes	126.26	7.80
Plantación forestal	6.05	0.37
Sombra	7.54	0.47
Terreno descubierto	63.92	3.95
Vegetación anegada	268.11	16.57
TOTAL	1618.28	100.00

Fuente: INBIO, 2010.

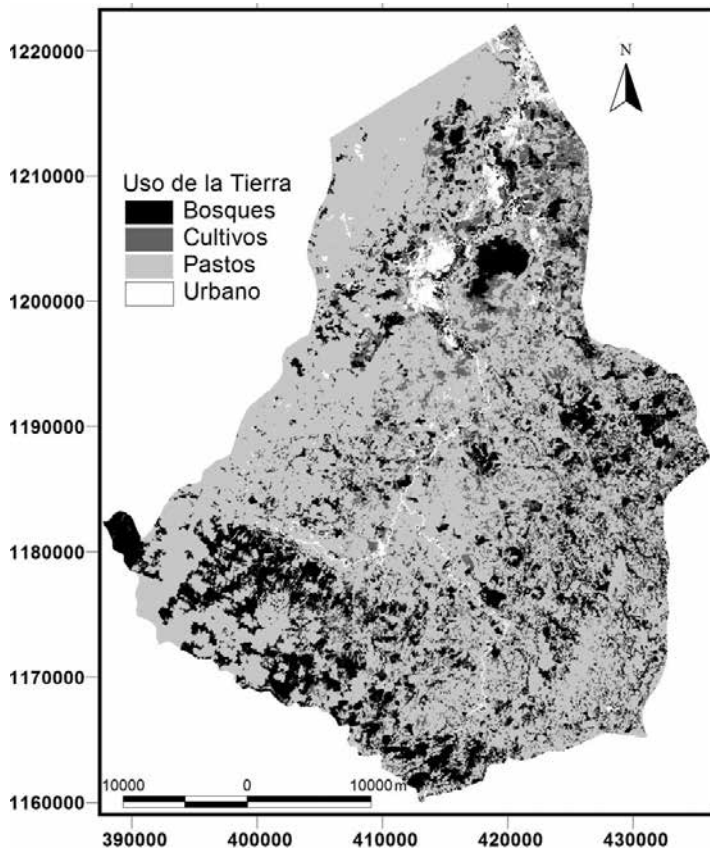
Como se aprecia en el cuadro 1, en la cuenca del río Frío, predominan los herbazales, los cuales contabilizan más del 40% del área total de la cuenca. Los otros usos dominantes son bosques (17.38%) y vegetación anegada (16.57%).

En la cuenca del río Frío los usos de herbazales se distribuyen por casi toda la cuenca, especialmente en el sector central oeste donde son más extensos y en los sectores suroeste y central este en los que comparten con los usos de bosques. Los bosques solo son dominantes en la cuenca alta, especialmente en el sector suroeste, donde presentan más continuidad; y hacia el sureste y el sector central este se visualizan manchas dispersas.

Desde el punto de vista hidrológico, los usos de la tierra tienen una importancia significativa, ya que definen y condicionan el tránsito del agua proveniente de la precipitación, que llega a infiltrarse hasta percollar y recargar el acuífero (Arias, 2011). De esta forma, se consideran como prioritarios en el modelado de la recarga, pues influyen en los procesos de retención e intercepción y en el movimiento del agua en la superficie

del suelo (Arias, 2011). Considerando dicha característica, se agruparon los usos de bosques, matorrales y plantaciones como bosques, herbazales y vegetación anegada como pastos, cultivos y terreno descubierto como cultivos y cuerpos de agua como impermeable según la metodología de Shosinsky & Losilla (2000). De esta manera el uso de la tierra de la cuenca se categorizó usando los valores recomendados de k_v (figura 2).

Figura 2. Usos de la tierra categorizados para el balance hídrico de suelos

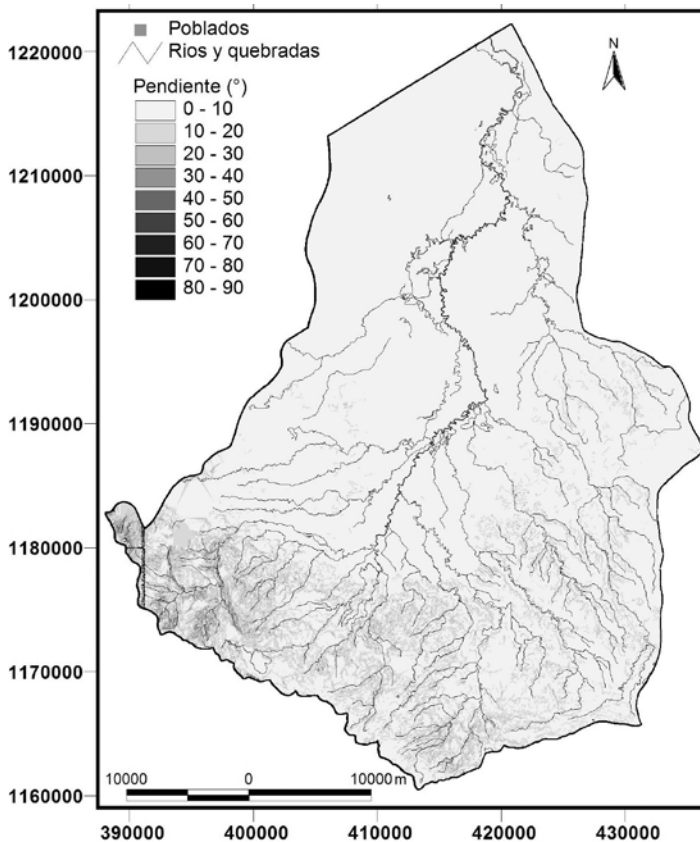


Fuente: Arias, 2011.

Respecto al factor k_p , obtenido a partir del MNT, las pendientes más fuertes se concentran en la parte sur de la cuenca, en todo el eje montañoso; estas pendientes suelen ser más pronunciadas en los sitios donde hay

una mayor profundización del cauce de los drenajes superficiales (Arias, 2011). Hacia la parte norte de la cuenca, en la cuenca media y la cuenca baja, las pendientes son predominantemente planas (figura 3).

Figura 3. Pendientes (°) en la cuenca del río Frío, 2011.
Nótese que la mayoría de la cuenca del río Frío se encuentra en pendientes entre los 0 y 10°



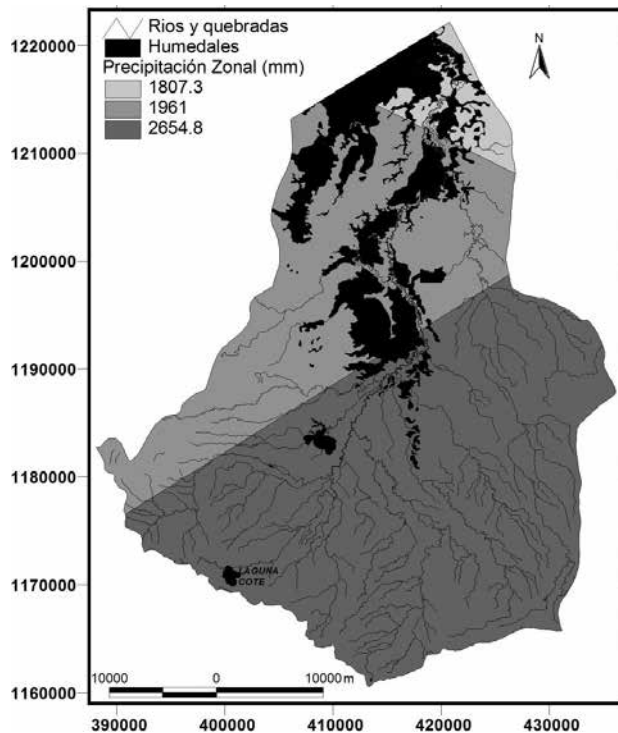
Fuente: Arias, 2011.

La precipitación zonal de la cuenca del río Frío indicó tres zonas determinadas por las estaciones, Comando, Laguna y San Jorge (Arias, 2011). En la cuenca del río Frío las precipitaciones son mayores a los 1800 mm de lluvia por año, siendo en la cuenca alta donde se dan los mayores valores de lluvia (figura 4) hasta alcanzar más de los 2600 mm. El patrón

de lluvias indicó que en los meses de enero, febrero, marzo y abril se desarrolla la estación seca en la cuenca (Arias, 2011).

Los valores de precipitación en las tres estaciones durante la estación seca muestran un comportamiento muy parecido, en el que las desviaciones respecto a los promedios de la lluvia varían desde los 7 a los 15 mm (Arias, 2011). La estación San Jorge es la que presenta los mayores valores de precipitación, probablemente por ser la que más se aproxima a la zona montañosa, hacia la cual se dirigen las masas de aire húmedo que descargan en su recorrido. En el caso de la *ETP*, para el caso de la cuenca del río Frío solo se contabilizaron los datos de temperatura de las estaciones Comando y Laguna, por lo que para el cálculo de la evapotranspiración se utilizó el promedio mensual y a partir de allí la *ETP* (Arias, 2011).

Figura 4. Precipitación zonal construida a partir del método de Thiessen, en la cuenca del río Frío con base en la información de precipitación de las estaciones meteorológicas Comando, Laguna y San Jorge



Fuente: Arias, 2011.

En lo que respecta a las propiedades hidrológicas de los suelos, estas fueron determinadas a partir de una serie de ensayos y recolección de muestras, las cuales fueron procesadas en el Laboratorio de Suelos del INTA.

Utilizando la ubicación de las muestras y el valor $z = f(x, y)$ de cada una de las propiedades determinadas en el laboratorio, se realizó un modelado a partir de interpolación espacial para establecer la distribución de la variable en la cuenca. Para ello se aplicó el método de la función de base radial (Kresik, 2007) el cual consiste de una combinación de n funciones base (una para cada dato muestral de suelos), donde n sería el número de datos que se tienen. La predicción es la combinación lineal de las funciones base que adopta la forma siguiente:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n (\omega_i \cdot \varphi(\|s_i - s_0\|)) + \omega_{n+1}$$

Donde $\varphi(r)$ es una función de base radial, $r = \|s_i - s_0\|$ es la distancia euclidiana entre el lugar que se predice s_0 y cada lugar muestral s_i , $\{\omega_i : i = 1, 2, \dots, n+1\}$ son los pesos que van a ser estimados.

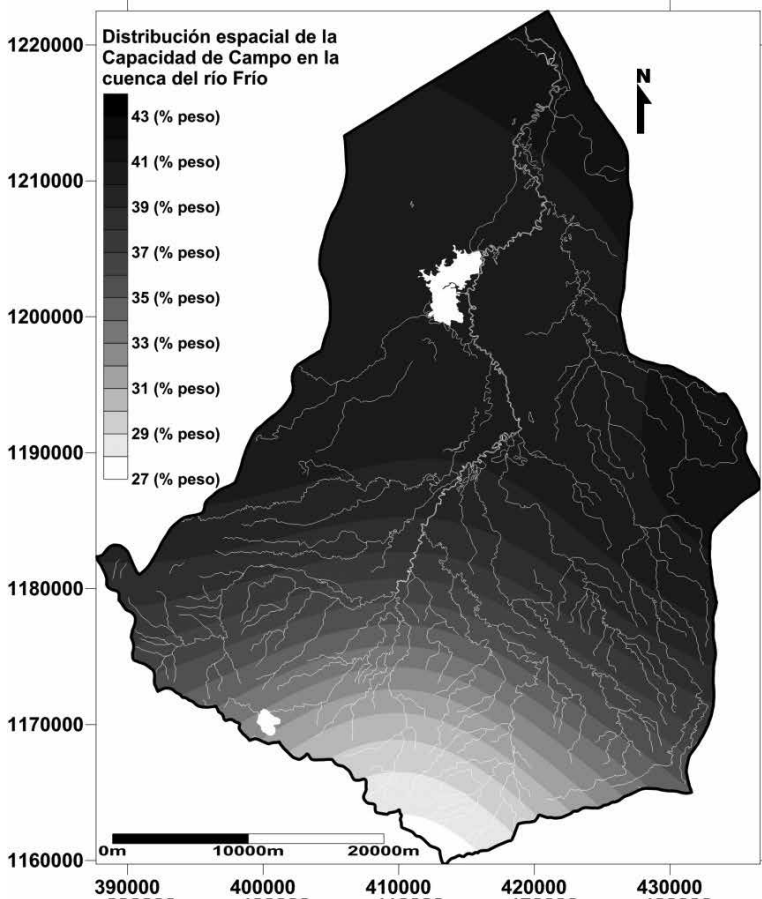
Los pesos $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ van a ser estimados resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \phi & 1 \\ 1' & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ 0 \end{pmatrix}$$

Donde ϕ es una matriz que tiene como elementos ϕ_{ij} a $\varphi(\|s_i - s_j\|)$, 1 es un vector columna de unos, $1'$ es un vector fila de unos (traspuesto del vector 1 columna) y z es un vector columna que contiene los datos $Z(s_i)$. Si ϕ es el vector que contiene $\varphi(\|s_i - s_0\|)$, entonces la predicción es, $\hat{Z}(s_0) = \omega' \cdot \phi + \omega_{n+1}$ donde ω_{n+1} es un parámetro de sesgo. Una vez descrito el método se procede al análisis de los datos.

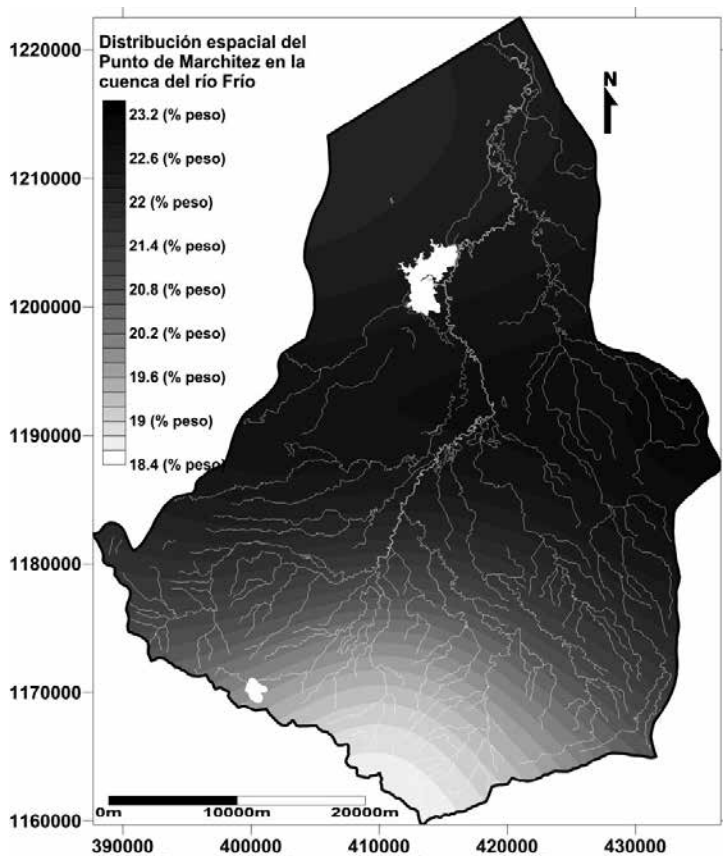
Las retenciones de agua en la cuenca del río Frío mostraron altos valores de *cc* y *pm*, lo cual es un fuerte indicador de la presencia de fracciones texturales arcillosas (Arias, 2011) desde la cuenca media hacia la baja (figuras 5 y 6). Dichas fracción textural se caracteriza por la absorción de grandes cantidades de agua y altas porosidades, generando así estados de humedad del suelo más constantes. La situación es similar en el caso del punto de marchitez.

Figura 5. Capacidad de campo y su distribución en la cuenca del río Frío



Fuente: Arias, 2011.

Figura 6. Punto de marchitez y su distribución en la cuenca del río Frío

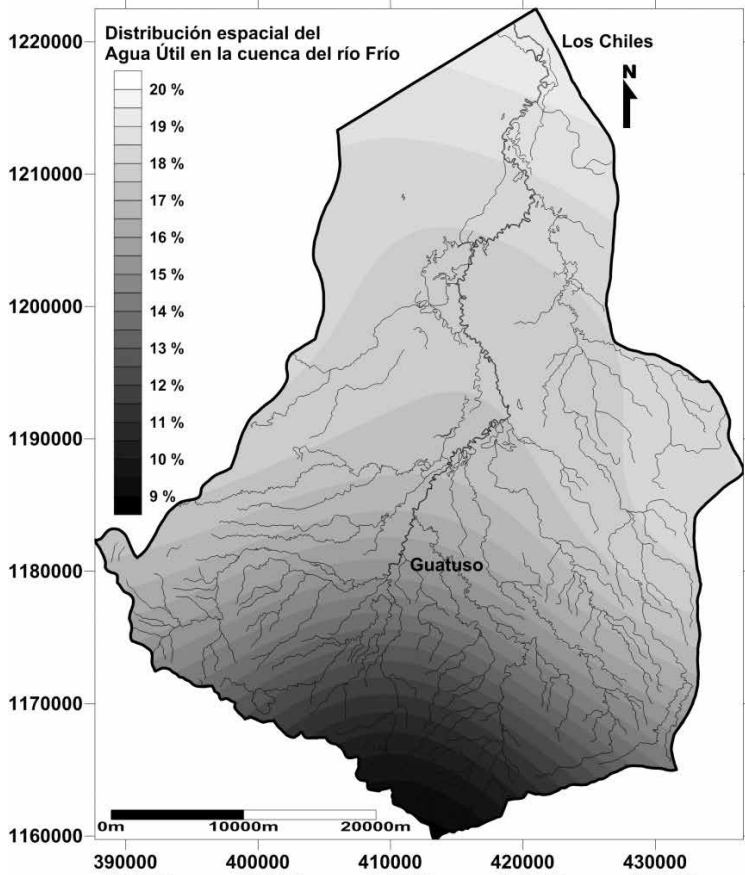


Fuente: Arias, 2011.

Considerando los estados de retención de agua en la cuenca del río Frío, es notable como los porcentajes de agua útil, relacionados con los tipos de textura (Arias, 2011), indican que en la parte alta de la cuenca los valores de retención de agua son menores a los del resto de la cuenca. Esta situación característica del suelo se relaciona con el hecho de que en la parte alta se encuentran materiales litológicos correspondientes a la Cordillera Volcánica de Guanacaste, entre ellos lavas y brechas (Arias, 2011).

A partir de los estados de humedad del suelo, se pueden contabilizar los porcentajes de agua útil, es decir, aquella agua almacenada en forma de humedad que sirve para el abastecimiento de las poblaciones vegetales (figura 7).

Figura 7. Porcentaje de agua útil en la cuenca del río Frío

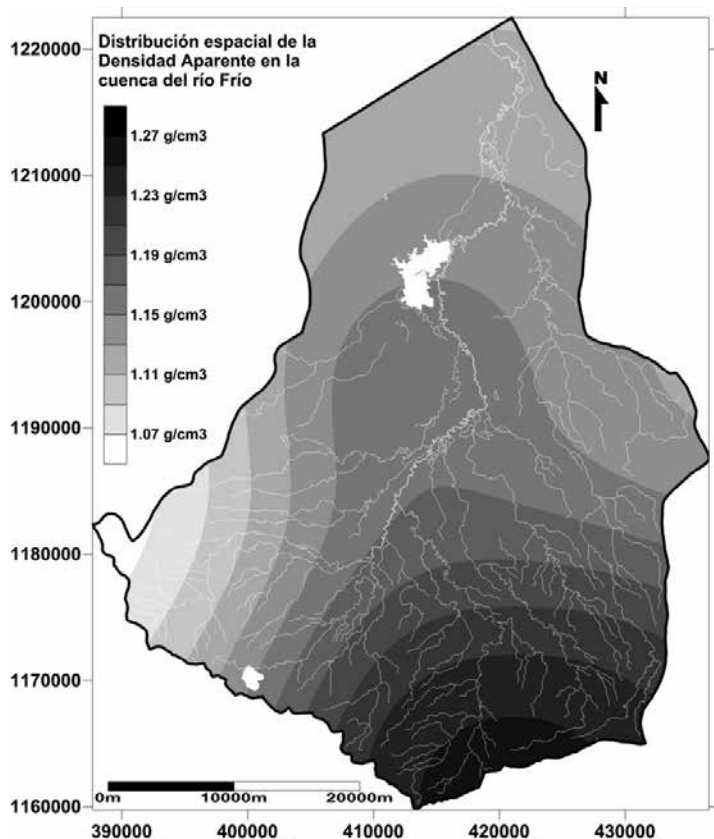


Fuente: Arias, 2011.

Respecto a la densidad aparente, esta muestra una relación importante en su distribución espacial; los valores más altos se encontraron hacia el sureste, disminuyendo estos tanto hacia el oeste como hacia el sur (figura 8). La densidad aparente es una variable de suma importancia en la construcción del balance hídrico de suelos, pues permite el cálculo de la humedad volumétrica a partir de los datos gravimétricos obtenidos de laboratorio y de este la lámina de agua (Arias, 2011).

Los suelos volcánicos en general presentan una menor densidad aparente, esta característica es observable en la parte alta, especialmente la vinculada con el eje montañoso de la cordillera de Tilarán y el volcán Arenal.

Figura 8. Densidad aparente en la cuenca del río Frío



Fuente: Arias, 2011.

Mientras que el factor f_c utilizado para el cálculo del Kf_c mostró la distribución de la tasa de infiltración en la cuenca del río Frío, aquí es factible observar que los valores más altos se encuentran en la parte suroeste, esto es coincidente con los valores cc , pm y da . Sin embargo, llama la atención el valor alto en la cuenca baja, esto se debe, posiblemente, a alguna situación local definida por los materiales y la condición existente.

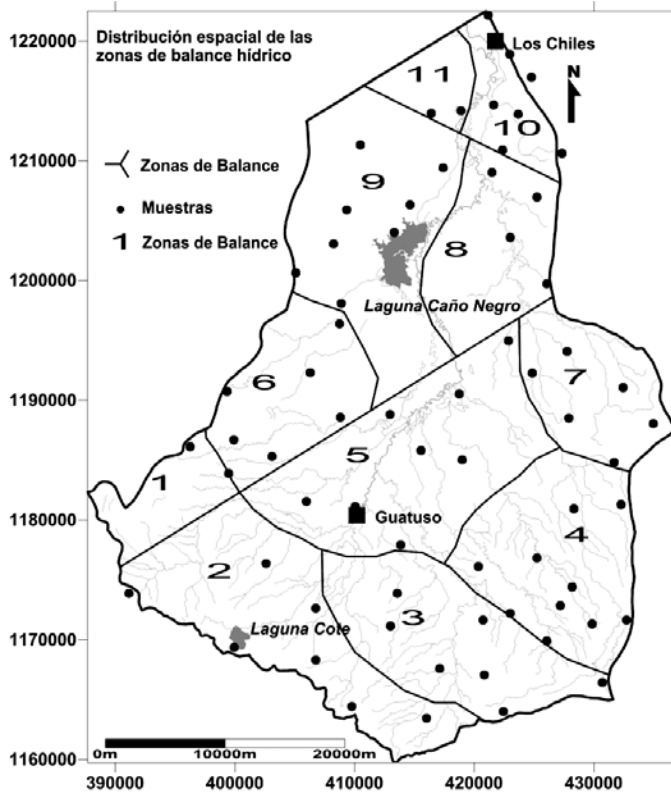
Aplicación del balance hídrico de suelos y resultados

La cuantificación de las zonas de recarga de la cuenca del río Frío implicó dos pasos: la definición de las zonas de balance, que involucró una segmentación geoespacial de la cuenca en zonas de características

hidrológicas específicas y la aplicación de la metodología de cálculo del balance hídrico de suelos de Schosinsky (2006), por medio de una hoja electrónica en Microsoft Excel en cada una de las zonas.

Para la definición de las zonas de balance se integraron los datos de precipitación zonal, uso de la tierra y pendientes en porcentaje en un sistema de información geográfica. Cada una de las capas vectoriales fue sobrepuesta una con otra y con ello se realizó una segmentación de la cuenca. Respecto a las grillas o cuadrículas en formato grid de las variables f_c , cc , pm y da , se tomó el valor promedio de la serie de datos de cada una de las variables para cada zona de balance hídrico, a partir de la consulta de dichos valores en el sistema de información geográfica. De esta manera, la cuenca del río Frío fue segmentada de la siguiente manera (figura 9).

Figura 9. Zonas para el cómputo del balance hídrico de suelos



Fuente: Arias, 2011.

Una vez construidas las zonas de balance hídrico de suelos, se realizó la aplicación de la hoja electrónica de Schosinsky, la cual dio el valor de la recarga potencial para cada una de las zonas. Las propiedades hidrológicas de cada una de las zonas construidas con el sistema de información geográfica se muestran en el cuadro 2:

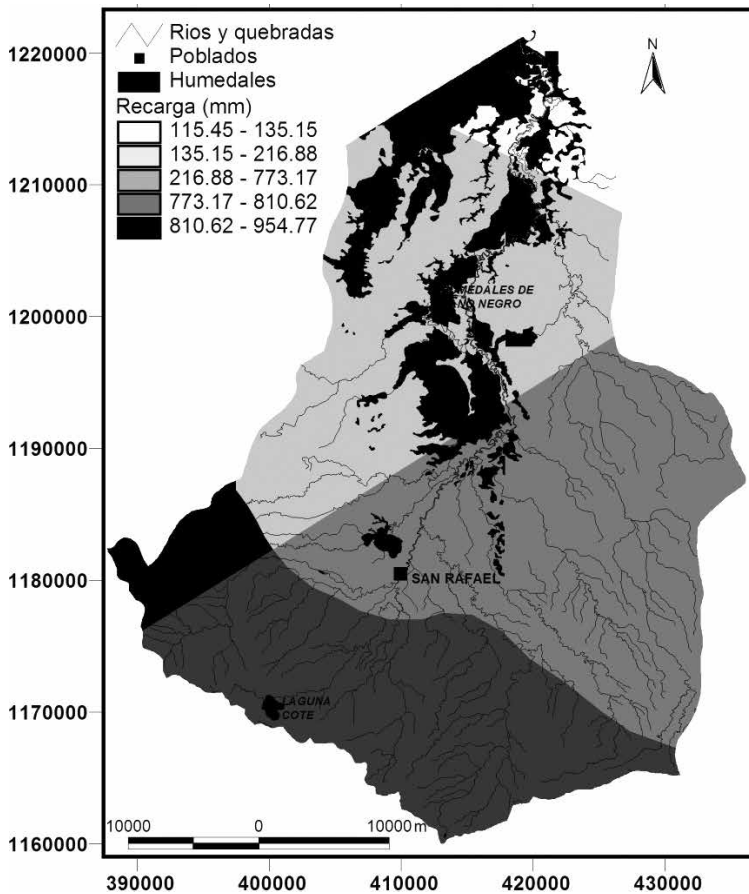
Cuadro 2: Propiedades de las zonas de balance para la cuenca del río Frío

ZONA	cc (%)	pm (%)	da (g/cm3)	fc (mm/día)	p (mm)	etp (mm)	Kv	Kp
1	39.51	22.22	1.06	904.51	1961.00	1770.80	0.20	0.06
2	31.52	19.84	1.19	1016.48	2654.80	1770.80	0.19	0.06
3	30.78	19.03	1.25	1041.84	2654.80	1770.80	0.18	0.06
4	39.79	22.15	1.23	2823.33	2654.80	1770.80	0.18	0.15
5	40.74	23.02	1.13	650.00	2654.80	1770.80	0.20	0.22
6	40.09	23.07	1.19	1405.00	1961.00	1770.80	0.19	0.18
7	40.74	22.97	1.12	930.00	2654.80	1770.80	0.19	0.15
8	40.61	22.42	1.14	1504.37	1961.00	1770.80	0.17	0.30
9	39.80	22.07	1.12	136.13	1961.00	1770.80	0.20	0.30
10	43.92	21.98	1.13	3668.75	1807.30	1770.80	0.21	0.30
11	41.09	22.37	1.11	641.39	1807.30	1770.80	0.15	0.30

Fuente: Arias, 2011.

Las zonas de recarga potencial de la cuenca del río Frío se agruparon en rangos, utilizando el métodos de cortes naturales para presentar los rangos de valores de una serie continua de datos geoespaciales, a partir de esto se creó el mapa de recargas potenciales (figura 10).

Figura 10. Zonas de recarga acuífera distribuidas en la cuenca del río Frío.



Fuente: Arias, 2011.

La cuenca presentó rangos de recarga altos en el sector de la cuenca alta, como resultado de una mayor retención de la precipitación debido al bosque y una mayor saturación de los suelos bajo cubiertas vegetales densas; en el caso de los usos bajo matorrales, estos presentan un comportamiento similar al de los bosques. Los coeficientes de infiltración en la cuenca alta se pueden considerar altos si se comparan con el promedio general, sin embargo, cabe destacar que existen importantes desviaciones que podrían influir en esta interpretación, aunque las altas recargas están en función también de los bajos valores de capacidades de campo (22 a 28%).

En la parte media de la cuenca fue notable la disminución de las recargas potenciales, lo cual se relaciona con los aumentos en los valores de capacidades de campo (30 a 38%), sin embargo, los valores del coeficiente de infiltración se mantuvieron semejantes a los de la cuenca alta. En la parte media y baja, los valores de recarga potencial disminuyeron considerablemente, lo cual se relaciona con la alta saturación de los suelos.

Conclusiones

Para la determinación de la recarga potencial hacia los acuíferos en la cuenca del río Frío se utilizaron la información meteorológica, las propiedades del terreno y las características hidrológicas de los suelos, con el propósito de construir once zonas las que fueron la base para aplicar el cómputo del balance hídrico de suelo, de acuerdo a la metodología de Schosinsky y Losilla (2000) y la información hidrológica correspondiente de la cuenca del río Frío (Arias, 2011).

Toda la información se integró en un sistema de información geográfica con el cual se modelizó la distribución de los datos muestreados, la elaboración de las zonas de balance hídrico y la segmentación de la cuenca en dichas zonas. El sistema de información geográfica tiene la ventaja de potenciar el manejo de grandes cantidades de datos, las cuales por otro medio sería imposible de clasificar y modelar, asimismo, con la ayuda de cálculos numéricos, es posible modelar los datos incorporados al sistema de información geográfica usando métodos computacionales que en el pasado requerían muchísimos pasos para el desarrollo del cómputo. Como bien lo menciona Pinder (2002) el uso y modelado de la información hidrogeológica para fines de modelamiento numérico solo son posibles con la incorporación de dichas variables en un sistema de información geográfica.

Los resultados de la aplicación del modelo de recarga potencial de acuíferos a partir del cálculo de la infiltración basado en la lluvia mensual, muestran rangos de recarga que varían de acuerdo a la zona de la cuenca; estas variaciones están especialmente asociadas a los cambios en el uso de la tierra que son inmediatos y a las propiedades hidrológicas de los suelos (Arias, 2011).

Los mayores valores de recarga de la cuenca se encontraron en la zona alta, coincidente con la zona de bosque, según el uso de la tierra. Este efecto es importante de anotar porque indicó como las coberturas boscosas

favorecen la intersección de la lluvia en los follajes. Esta intersección disminuye las tasas de escorrentía y aumenta el tránsito lento del agua desde las copas de los árboles y la estructura vegetativa hacia el suelo. Asimismo, al generar un efecto de sombra y de obstaculización del movimiento del agua en superficie, favorece el tiempo de saturación del suelo. El efecto del uso de la tierra es similar en los casos en los que existe matorral.

La disminución de los valores de recarga en el suelo en las cuencas media y baja puede deberse a varios elementos hidrológicos, como la cercanía al nivel freático del terreno, la saturación constante y los valores altos de las fracciones finas (Arias, 2011).

Referencias

- Arias, M. (2011). *Estudio hidrogeológico regional de la cuenca del río Frío*. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. [Informe interno]
- Bear, J. & Cheng, A. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. New York: Springer.
- Dingman, S. (2002). *Physical Hydrology* (2ª ed). Prentice Hall, New Jersey.
- Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology* (4ª ed). Prentice Hall, New Jersey.
- Hengl, T. & Evans, I. (2009). *Mathematical and Digital Models of the Land Surface*. En T., Hengl & H., Reuter (eds), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. 31-63. Amsterdam: Elsevier.
- INBIO (2010). *Cartografía digital de la cuenca del río Frío*, INBIO.
- Kitanidis, P. K., (1997). *Introduction to Geostatistics: Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kresic, N. (2007). *Hydrogeology and Groundwater Modeling* (2ª ed.). CRC Press, Boca Raton.
- Marsily, G. (1986). *Quantitative Hydrogeology*. Academic Press, Orlando.
- MINAET (2012). *Metodologías Hidrogeológicas para la Evaluación del Recurso Hídrico*. Alcance a la Gaceta, Diario Oficial La Gaceta, San José, Costa Rica, acuerdo 60-2012 del 31 de julio de 2012, resolución R-D-046-2012-MINAET del 01 de febrero del 2012, páginas 39-54.
- Pinder, G. (2002). *Groundwater Modeling using Geographical Information Systems*. New York; Wiley.

- Rubin, Y. (2003). *Applied Stochastic Hydrogeology*. Oxford University Press, Oxford.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35, 13-30.
- Schosinsky, G. y Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central* 23, 43-55.
- Ward, A. & Trimble, S. (2003). *Environmental Hydrology* (2ª ed). Lewis Publishers, Boca Raton.
- Zaradny, H. (1993). *Groundwater Flow in Saturated and Unsaturated Soils*. Rotterdam: Balkema.