

DEFINICIÓN DE TASAS DE BOMBEO PARA LA APLICACIÓN DE LA
TÉCNICA RIVERBANK FILTRATION EN LOS ANDES COLOMBIANOS,
USANDO PARTICLE TRACKING.

Rogger Escobar C, Marcela Jaramillo Uribe y Jaime I Vélez Upegui
Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. rescobarc@unal.edu.co,
mjaramiu@unal.edu.co, jivelezu@unal.edu.co

RESUMEN:

En este artículo se plantean dos modelos de flujo de agua subterránea para dos acuíferos teóricos que simulan la técnica *Riverbank Filtration* o Filtración Ribereña (técnica de tratamiento de agua consistente en extraer agua del río a través de un pozo perforado en la llanura aluvial y utilizando el acuífero como filtro natural). Ambos modelos están apoyados en información previa de estudios hidrogeológicos regionales en las zonas del occidente y oriente Antioqueño, en los Andes Colombianos. El primero (modelo A) se encuentra en el valle del Río Cauca (uno de los más importantes del país) y el segundo (modelo B) en la quebrada La Mosca (caso típico de un río de montaña). Utilizando técnicas de *Particle tracking* acopladas al Visual ModFlow V.9.1, se simuló el flujo del agua del río al pozo, encontrándose que para un caso como el presentado en el modelo A, se requieren tasas de bombeo superiores a 3 l/s para que fluya agua del río al pozo y en el modelo B se requieren tasas superiores a los 8 l/s. Por último, se simulan también varios casos en los cuales se cambian los niveles de las condiciones de frontera de los modelos encontrando que para ambos modelos, un descenso en estos niveles representa una mayor facilidad para que el agua pase del río al acuífero, caso contrario a lo que sucede cuando los niveles de las condiciones de frontera ascienden.

ABSTRACT:

This article discusses two models of groundwater flow that simulate two theoretical aquifers and exemplify the Riverbank Filtration technique (water treatment technique for the extraction of river water using a well located in the alluvial plain and using the aquifer as a natural filter). Both models are supported by previous information from regional hydrogeological studies in the east and west zones of Antioquia, in the Colombian Andes. The first (model A) is located in the Cauca river valley (one of the most important rivers in the country) and the second (model B) is at La Mosca river valley (a typical mountain river). Using particle tracking techniques coupled in Visual Modflow V9.1, flow river water

the boundary conditions of the models were changed by changing the

PALABRAS CLAVES:

Riverbank filtration, Modelación de agua subterránea, Particle tracking.

INTRODUCCIÓN

La técnica *Riverbank Filtration* (RBF, por sus siglas en inglés) o Filtración Ribereña, ha demostrado ser muy eficiente en la remoción de contaminantes. El hecho de ser un pozo el que sirva como obra de captación hace generalmente más económico el sistema en comparación a las obras de captación convencionales, lo cual la convierte en una técnica clave en la gestión integrada del recurso hídrico para el país. Sin embargo en Colombia, poco o nada se tiene documentado de la técnica a pesar de que existen escenarios aparentemente propicios para su implementación. Por esta razón se hacen necesarios estudios que orienten en su funcionamiento, y en este caso, específicamente en el diseño.

Se habla de RBF cuando el agua de un río se infiltra a través de sus bancas o lecho, continuando su trayectoria a través del acuífero aluvial hacia un pozo de bombeo (Figura 1). Durante este trayecto se dan varios procesos físicos, químicos y biológicos, que contribuyen a mejorar notablemente la calidad del agua del río. Los procesos de mezcla entre al agua del acuífero y el agua del río, el paso del agua a través del medio poroso, y la presencia de microorganismos, constituyen elementos fundamentales en la dilución, difusión, sorpción y degradación de contaminantes. Resulta tan efectivo el proceso en la remoción de contaminantes que inclusive puede llegar a ser el equivalente al tratamiento primario convencional (coagulación/floculación, sedimentación y filtración) y, en algunos casos, el agua pasar directamente a cloración si se ha de usar para consumo humano (Tufenkji, 2002).

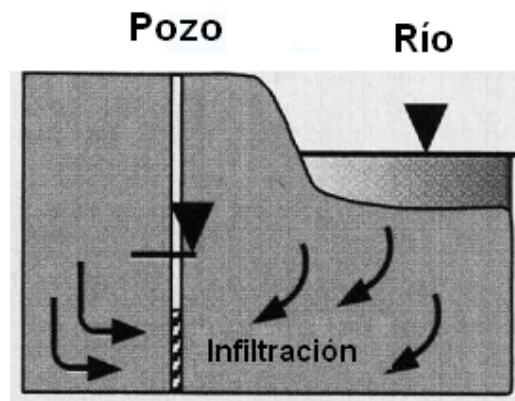


Figura 1. Esquema básico de Filtración Ribereña

El comportamiento de un sistema RBF puede ser simulado en modelos de flujo de aguas subterráneas. Chen (2001), soluciona analíticamente el tiempo de residencia del agua mientras llega al pozo con una tasa de bombeo de $1.3 \text{ m}^3/\text{min}$, una distancia al acuífero de 300m y una conductividad hidráulica de 100m/d. Los resultados demuestran que el tiempo de residencia del agua del río en acuífero puede ser de unos noventa días y de forma natural el agua puede quedarse varios años. Abdel-Fattah et al. (2007), por otro lado, solucionan numéricamente el problema utilizando la técnica de *particle tracking* (técnica que simula partículas que se mueven sólo de forma advectiva), para un pozo ubicado en El Paso, Texas, con una tasa de bombeo de $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$ y a 18 m del río. Estos autores encuentran que el tiempo en que el agua del río alcanza el pozo es de aproximadamente 1.46 días. En términos de cantidad, Chen (2001) estimó que la relación entre el caudal bombeado y el caudal infiltrado alcanza un máximo aproximadamente entre 10 y 20 días. La relación de mezcla entre el agua superficial infiltrada (ASI) y subterránea (ASb) extraída en el pozo puede ser de hasta 75/25 (Shankar et al, 2009).

El comportamiento del sistema es muy específico para cada zona de estudio ya que las condiciones hidrológicas, hidráulicas y la interacción acuífero-río son diferentes en cada caso, por lo cual no se puede generalizar el comportamiento de un sistema RBF.

En este trabajo se presentan los resultados de la implementación de dos modelos numéricos de flujo de agua subterránea, utilizando el Software Visual MODFLOW (Harbaugh y MacDonald, 1988) y técnicas de *Particle tracking* simulando dos acuíferos teóricos que representan acuíferos típicos ubicados en los Andes Colombianos del departamento de Antioquia: Modelo A. La llanura aluvial del Río Cauca (en el municipio de Santa Fé de Antioquia que representa un caso típico en uno de los ríos más importantes del país y Modelo B. La llanura aluvial de la quebrada La Mosca (en el municipio de Guarne), que representa un típico río de montaña. Estas dos zonas de condiciones climáticas y geológicas diferentes permiten hacerse a una idea de las condiciones de operación necesarias para la implementación de RBF en cada una de ellas.

Descripción de las Zonas

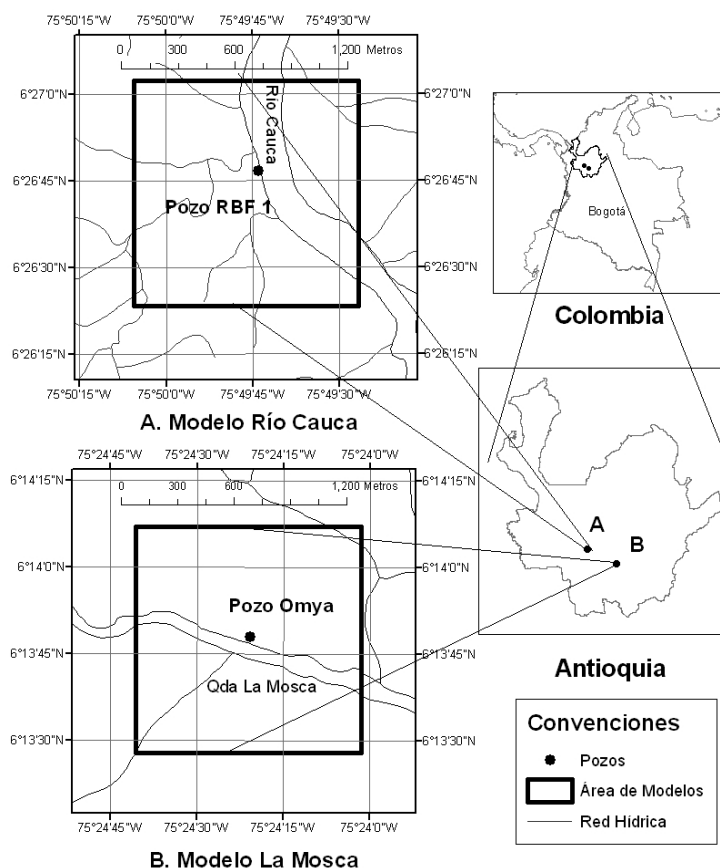


Figura 2. Esquema de localización de las zonas modeladas.

Clima general

Dada la multiplicidad de fenómenos climáticos que influyen los Andes colombianos, estos tienen un carácter especial desde el punto de vista hidrológico e hidrogeológico. El clima es gobernado por la presencia de los océanos atlántico y pacífico, fenómenos como el chorro del Chocó, la circulación atmosférica de la cuenca amazónica, Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), las ondas tropicales del este, la Oscilación Madden-Julian, el ENSO (Fenómeno del Niño-Oscilación del Sur), además de microclimas locales dada la variación altitudinal de los Andes. El ciclo anual está organizado de forma bimodal con temporadas lluviosas en los meses de abril-mayo y septiembre octubre, y con temporadas secas en los meses de enero-febrero y julio-agosto, comportamiento asociado a la migración de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y de gran influencia en las actividades humanas del país (Poveda y otros, 2006, Poveda y otros, 2004).

Modelo A

La zona representada en el modelo A, es la correspondiente a un acuífero localizado en un aluvión del valle del río Cauca en el occidente antioqueño con elevaciones promedio de 550msnm (Figura 2,A). Una zona con demanda turística creciente pero con un abastecimiento de agua limitado, ya

que sus acueductos se surten de fuentes superficiales que no logran satisfacer la demanda. Además, como en casi todas las fuentes hídricas del país, se tienen problemas de contaminación agrícola, pecuaria y otros lixiviados derivados de actividades humanas. El valle del río Cauca se encuentra encausado entre las cordilleras occidental y central (UNAL y Corantioquia, 2004).

Clima

El clima es semiarido, con una alta influencia de las cordilleras central y occidental, y la presencia de lluvias orográficas por causa de frentes húmedos del Chocó cuya intensidad se atenúa por la barrera que representa la cordillera occidental. El promedio de la precipitación anual es del orden de los 967 mm/año, la evapotranspiración real se encuentra entre los 590 y los 1033 mm/años y temperaturas promedio de 27°C (UNAL y Corantioquia, 2004).

Geología

La zona esta litológicamente conformada por cuerpos rocosos estructuralmente asociados con el sistema de fallas Cauca-Romeral, rocas ígneas y metamórficas que afloran en las montañas que encausan el río Cauca. También se presentan depósitos sedimentarios, aluviales y aluvio-torrenciales en las partes más bajas de la zona y asociados a cuerpos de agua (Rhenals, 2007).

Modelo B

La segunda zona se localiza en el Oriente antioqueño, en el valle de San Nicolás, sobre la cordillera central de los Andes, presenta una topografía general de altiplano, con alturas entre los 1800 y 2800 msnm (Figura 2,B). Esta zona se caracteriza por tener una de las poblaciones más grandes y crecientes del departamento de Antioquia. También las actividades agropecuarias desarrolladas en zona rural principalmente, aportan desechos agrícolas y pecuarios, a lo que se suma el creciente establecimiento de todo tipo de industrias, una fuente de contaminación importante a las fuentes de agua y en general a los recursos naturales. La quebrada La Mosca nace en el Alto de La virgen, en el municipio de Guarne y desemboca en el río Negro, atravesando los municipios de Guarne y Rionegro. Las zonas de alto potencial acuífero se encuentran asociadas a las vegas aluviales de las fuentes hídricas superficiales más importantes de la zona al igual que en la zona anterior (UNAL y Cornare, 2000).

Clima

Las precipitaciones promedias oscilan entre los 1800mm/año y 2600mm/año, localizándose el área modelada en la zona con menores precipitaciones dentro del valle de San Nicolás. La evapotranspiración real promedio es de 825 mm/año y las temperaturas promedio se encuentran entre los 16 y 17 °C (UNAL y Cornare, 2000).

Geología

El basamento de la zona está conformado por rocas cristalinas con origen en el Batolito Antioqueño. La meteorización del mismo ha generado perfiles compuestos de saprolito y gruss, limos de bajas permeabilidades. Sobre estos, se asientan depósitos de vertiente y depósitos aluviales. En casi toda la zona también se presenta un manto de ceniza volcánica con altas permeabilidades pero de bajo espesor (en promedio de 1.3m), de alta importancia hidrogeológica, ya que facilita la infiltración del agua a niveles inferiores (UNAL y Cornare, 2000).

MATERIALES Y MÉTODOS

Aprovechando la información de los estudios hidrogeológicos previamente realizados por la Universidad Nacional de Colombia e información satelital (UNAL y Corantioquia, 2004; Rhenals, 2007; UNAL y Cornare, 2002) se generaron dos modelos en el software Visual MODFLOW 2009.1 (Harbaugh y MacDonald, 1988), que representan los acuíferos típicos de las zonas de estudio. Cada uno de los pozos es modelado con parámetros de bombeo teóricos para luego encontrar las condiciones de bombeo que le permitan realizar RBF.

Modelos

El dominio de ambos modelos fue de 1200m*1200m, y sus elevaciones fueron asignadas usando modelos de elevación digital. El modelo A fue dividido en celdas de 10m*10m y el modelo B en celdas de 30m*30m, con un refinamiento en las zonas circundantes a los pozos. El pozo del acuífero de La Mosca fue refinado utilizando información facilitada por la empresa OMYA S.A. Utilizando el modulo MODPATH se agregaron 80 partículas en cada zona, cubriendo 40m de tramos de río en el modelo B y 70m en el modelo A.

Condiciones de frontera

Se definieron condiciones de frontera RIVER para simular los ríos. En el modelo A se ubicaron condiciones de General Head Boundary (GHB) en las zonas este y oeste del dominio, y en el modelo B se definieron condiciones de GHB en el costado norte y en el costado sur. El pozo RBF1 del acuífero A, se encuentra a 15m del río Cauca, y el pozo Omya se encuentra a 30m de la quebrada La Mosca. El nivel del río Cauca en la condición RIVER es simulado a una altura de 456 msnm y la quebrada la Mosca es simulada a una altura de 2080msnm.

En la siguiente tabla se resumen las características de cada acuífero (Tabla 1):

Tabla 1.- Parámetros principales de los acuíferos modelados.*: Parámetros por defecto en el software.

Parámetro	A	B
Kx (m/d)	15	8.6
Ky (m/d)	10	2.2
Kz (m/d)	1	0.863
Ss (1/m)	1×10^{-5} *	1×10^{-3} *
Por Efectiva	0.3 *	0.3 *
Recarga(mm/año)	70	90
Ancho de Río (m)	133	15
Nivel del Río (msnm)	456	2080
Nivel GHB 1 (msnm)	459.2	2100
Nivel GHB 2 (msnm)	458	2110

Condiciones Iniciales

Cada modelo fue corrido en estado permanente por 365 días para obtener las condiciones iniciales (Figura 3). Luego se simularon los acuíferos variando las tasas de bombeo en estado transitorio durante 120 días.

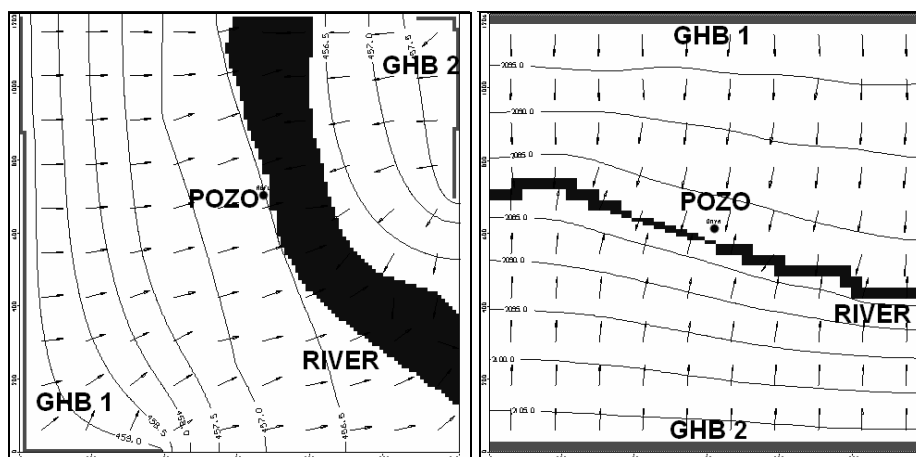


Figura 3.- Esquema de las direcciones de flujo de los modelos definidos y sus condiciones de frontera. A la izquierda el modelo A y a la derecha el modelo B.

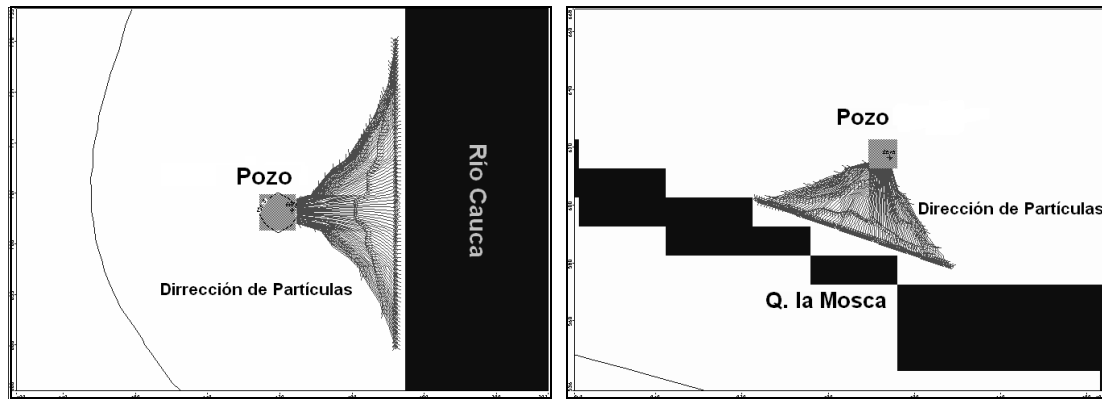


Figura 4.- Esquema de las trayectorias de las partículas a una tasa de 20 l/s. A la izquierda el modelo A y a la derecha el modelo B.

Simulaciones

Cada modelo fue simulado variando las tasas de bombeo para encontrar los valores necesarios que permitan el flujo del agua del río hacia el pozo. También se comparó como la variación del caudal repercute en el tiempo de viaje de las partículas que representan el agua del río, hacia el pozo. Esta variación del caudal respecto al tiempo mínimo de viaje de las partículas se evaluó en seis diferentes casos que se pueden dar dadas las condiciones climáticas variables de ambas zonas en los cuales se varían en un metro los niveles de las condiciones de frontera RIVER y GHB. El caso 0 es considerado el caso con condiciones normales o promedio en cada zona (Tabla 2). Los tres siguientes casos estiman lo que pasa con la relación caudal bombeado y tiempo mínimo de viaje de las partículas del río al pozo cuando los niveles promedio de las condiciones de frontera descenden. Los tres últimos casos representan lo que sucede cuando estos niveles ascienden.

El caso 1 representa un descenso de un metro en los niveles del río y simultáneamente de los GHB. El caso 2 es la representación de un descenso de un metro en los niveles en el río, más no del GHB. El caso 3 representa una disminución de los niveles en las GHB de un metro más no en el Río. En el caso 4, los niveles del río y de las condiciones de frontera GHB son aumentados simultáneamente en un metro. El caso 5 solo simula un aumento en el nivel de río de un metro, mientras que la GHB permanece con el nivel promedio. Por ultimo, el caso 6 representa un aumento en un metro en el nivel del GHB mientras que el río permanece con un nivel promedio. En la Tabla 2 se presenta un resumen de las variaciones realizadas en cada caso.

Tabla 2.- Resumen de los casos simulados.

Condiciones Promedio (Caso 0)		
	Nivel Río (msnm)	Nivel GHBs (msnm)
Modelo A	456	459.2 y 458
Modelo B	2080	2100 y 2110
Descienden 1 metro		
Caso 1	Si	Si
Caso 2	Si	No
Caso 3	No	Si
Ascienden 1 metro		
Caso 4	Si	Si
Caso 5	Si	No
Caso 6	No	Si

EVALUACIÓN DE RESULTADOS

En condiciones promedio (caso 0) el pozo RBF 1 comienza a bombear agua del río Cauca a partir de los 3 l/s (Figura 5) mientras que el pozo Omya comienza a bombear agua de La Mosca a partir de los 8 l/s (Figura 6). El cono de abatimiento del pozo RBF 1 alcanza a bombear todas las partículas situadas en el tramo de 40 m a partir de los 9 l/s y el cono de abatimiento del pozo Omya alcanza todas las partículas situadas en el tramo de 70m cubiertos por partículas a partir de los 12 l/s. Para un caudal de bombeo de 20 l/s, el tiempo mínimo de viaje de una partícula en el pozo RBF 1 es de 2.51 días y para el mismo caudal en el pozo Omya, el tiempo mínimo de una partícula es de 11.17 días. Para el mismo caudal en ambos pozos se extrae aproximadamente un 25% de agua superficial asumiendo que el porcentaje de agua superficial es equivalente al porcentaje del ángulo formado entre las líneas de flujo de las partículas más lejanas en relación a la circunferencia del cono de abatimiento (Chen, 2001).

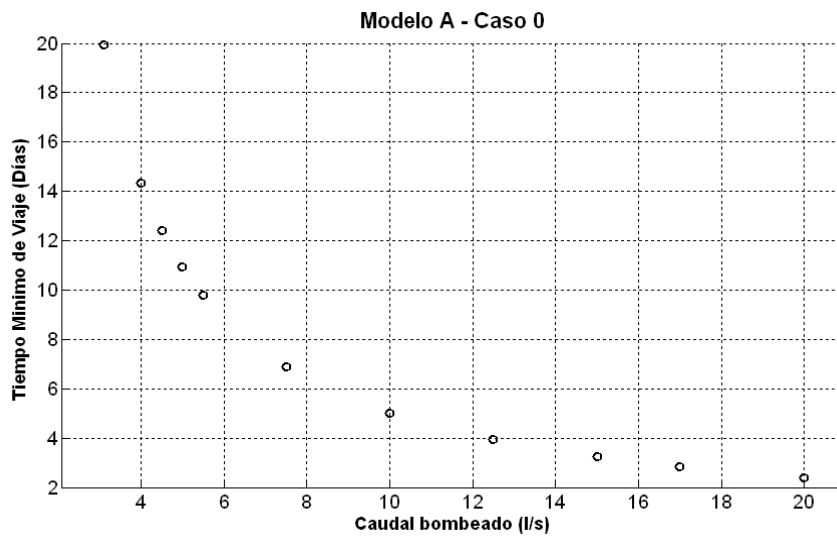


Figura 5.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo A.

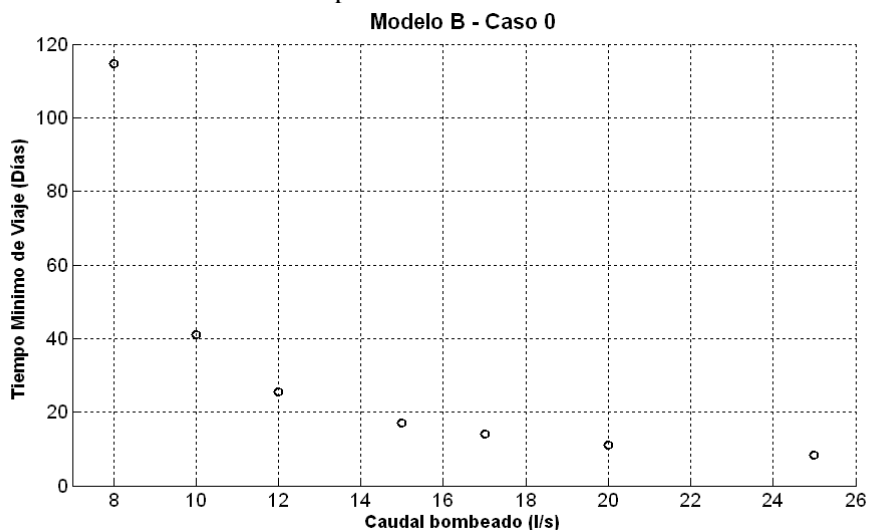


Figura 6.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo B.

En las Figuras 8 y 9 se presentan los resultados de la variación de los tiempos mínimos de viaje respecto al caudal de bombeo en cada uno de los tres primeros casos. En el modelo A se puede apreciar de manera general una variación pequeña de los tiempos de viaje de las partículas en relación a las condiciones promedio, comportándose de manera inversa a la tasa de bombeo en el pozo. Esta pequeña variación se puede explicar dada la cercanía del pozo al río, además de las altas conductividades hidráulicas del acuífero, que facilitan el flujo del agua. Si observamos como varía el tiempo de viaje para el caudal mínimo requerido para RBF (3 l/s), podemos ver que en el caso 3, en el cual descenden solo los niveles de las condiciones de frontera GHB, se reducen los tiempos mínimos de viaje, contrario al caso 2, donde el nivel del río es el que disminuye y en el cual aumenta el tiempo mínimo de viaje. El tiempo mínimo de viaje disminuye también en un menor grado, para el caso 1 respecto a las condiciones promedio.

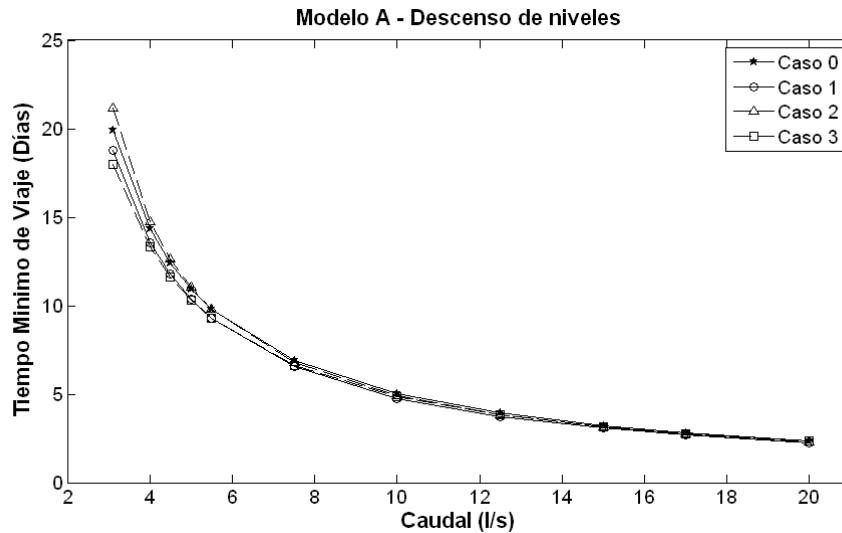


Figura 8.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo A para cada uno de los casos de simulados de descenso de niveles: casos 1,2 y 3.

En el modelo B, se logra apreciar una mayor variación de los tiempos mínimos de viaje para cada uno de los casos respecto al caso promedio (caso 0) que en el modelo A, posiblemente asociada a las menores conductividades del acuífero y a la mayor distancia entre el pozo y la quebrada. El caso 1, que representa un descenso simultáneo en el río y los niveles de las fronteras GHB del acuífero, indica que se facilita el viaje de las partículas, en general para tasas de bombeo pequeñas, permitiendo además que el pozo tome agua del río a tasas de bombeo menores que en las condiciones promedio (desde los 7.5 l/s). Una variación solo en el nivel del río, como en el caso 2 no muestra cambios significativos en cuanto a las condiciones promedio, pero un descenso en las fronteras GHB del acuífero, como lo es el caso 3, repercute en una disminución de los tiempos mínimos de viaje al igual que el caso 1, pero en menor grado (Figura 9).

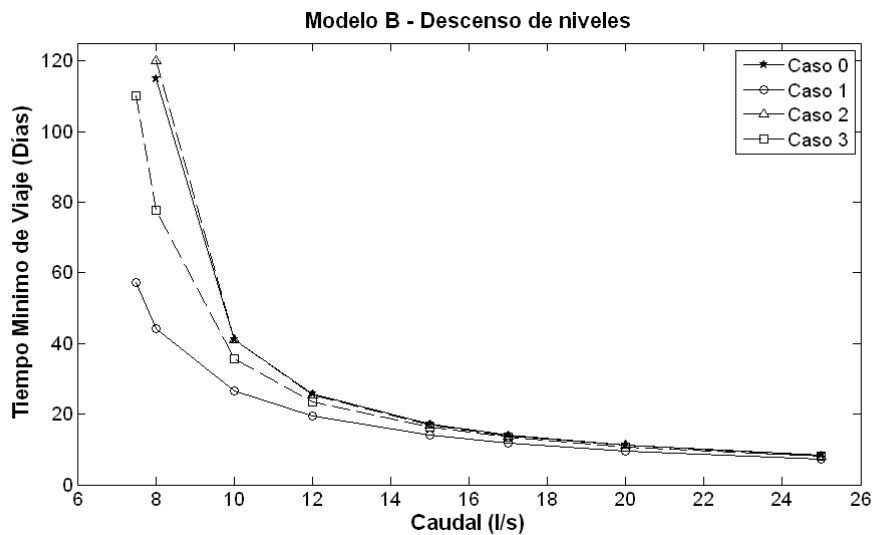


Figura 9.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo B para cada uno de los casos de simulados de descenso de niveles: casos 1,2 y 3.

La simulación de un ascenso de niveles en las condiciones de frontera, en los casos 4,5 y 6 sigue sin afectar mucho los tiempos mínimos de viaje en el modelo A, pero de forma general se puede apreciar que para las menores tasas de bombeo se logra retrasar el viaje de las partículas en unos 2 o tres días (Figura 10). Este retraso se incrementa cuando solo es el nivel de las fronteras GHB el que aumenta como en el caso 6.

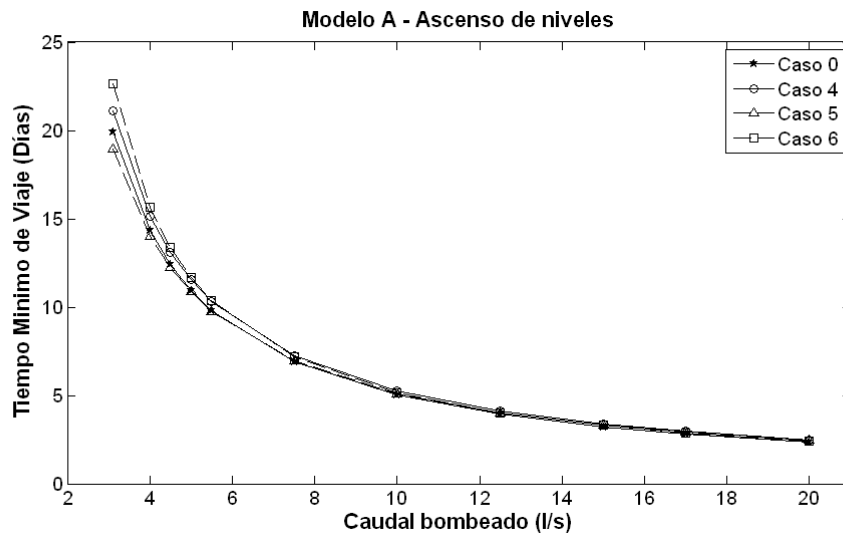


Figura 9.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo A para cada uno de los casos de simulados de ascenso de niveles: caso 4, 5 y 6.

El ascenso de los niveles en las condiciones de frontera en el modelo B, retrasa más los tiempos mínimos de viaje de las partículas que en el modelo A. La mayor variación se presenta en el caso 5, donde solo ascienden los niveles del río en inclusive se requiere de una mayor tasa de bombeo para extraer agua del río.

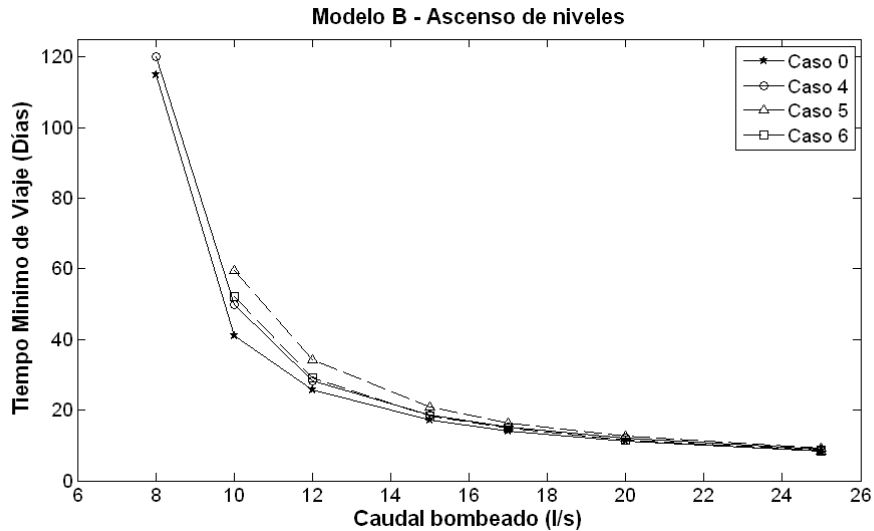


Figura 10.- Caudal bombeado en relación al tiempo mínimo de viaje de las partículas simuladas del río hacia el pozo en el modelo B para cada uno de los casos de simulados de ascenso de niveles: caso 4, 5 y 6.

CONCLUSIONES

Para poder aplicar RBF en acuíferos con características similares a las simuladas es necesario bombear con tasas mayores a 8 l/s, para aquellos pozos cercanos a La Mosca y de unos 5 l/s en aquellos ubicados cerca del río Cauca. Es recomendable de acuerdo a Schubert (2006), que el tiempo de residencia sea mayor a dos semanas para lograr una eficiencia de remoción de contaminantes, por lo cual es apropiado que se bombee con caudales menores a 15 l/s en acuíferos como el de La Mosca y menores a 4 l/s en acuíferos como el simulado para el Río Cauca.

Si se quiere mantener unas condiciones de bombeo más estables a lo largo del año, e independientes de los niveles del río o del acuífero, es necesario bombear en el acuífero de La Mosca con caudales superiores a los 15 l/s recomendados para mantener un tiempo de residencia de unas dos semanas. Es decir, en general, para un acuífero con las características del modelo B, es apropiado un caudal de bombeo de 15 l/s para la implementación de RBF. En un caso con las características del modelo A, el tiempo mínimo de viaje, tiende a ser invariante a los cambios de nivel freático o del río a partir de los 7.5 l/s aproximadamente. Sin embargo, las variaciones de alrededor de un día para el tiempo mínimo de viaje en el caudal de bombeo de 4 l/s garantizan que este caudal siga propiciando el tiempo mínimo de residencia de dos semanas recomendado por Schubert (2006).

De forma general, el ascenso de los niveles en cualquiera de las dos fronteras repercute en un aumento del tiempo mínimo de viaje de las partículas, y un descenso en los niveles de las mismas da como resultado una disminución en el tiempo mínimo de viaje de las partículas del río al pozo. El hecho de que estas variaciones sean mayores en el modelo B que en el modelo A nos pueden indicar que en un pozo que se encuentre a una mayor distancia del río y en un acuífero de bajas permeabilidades es más susceptible a variaciones en los niveles del río o del acuífero si se quiere implementar la tecnología *Riverbank filtration*. Sin embargo se requiere de más investigación para esclarecer a ciencia cierta el porqué de estas variaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-FATTAH A, LANGFORD R y SCHULZE-MAKUCH D. (2007) “Application of particle-tracking techniques to bank filtration: A case study from El Paso, Texas, USA”. *Environ Geol.*

CHEN XH. (2001) “Migration of Induced-Infiltrated Stream Water Into Nearby Aquifers to Seasonal Groundwater Withdrawal.” *University of Nebraska-Lincoln, Lincoln.*

HARBAUGH AW y MCDONALD MG. (1988). “A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.” *Techniques of Water Resources Investigations 06-A1, United States Geological Survey, Reston.*

POVEDA G, MESA O J, SALAZAR. L. F., ARIAS. P. A., MORENO. H. A., VIEIRA. S. C., AGUDELO. P. A., TORO. V. G., ALVAREZ J. F. (2004). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review. Vol 133.*

POVEDA G, WAYLEN P., PULWARTY R.. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Vol 234.*

RHENALS REMBERTO. (2007). Validación del modelo hidrogeológico del occidente antioqueño mediante técnicas isotópicas e hidroquímicas.

SCHUBERT, J. (2006). “Changes in riverbed hydraulic conductivity and specific capacity at Louisville. In: Hubbs, S.A. (eds) Riverbank Filtration Hydrology – Impacts on System Capacity and Water Quality.” *Springer, Dordrecht*, pp. 199 – 220.

SHANKAR V, ECKERT P, OJHA C y KÖNIG CM. (2009) “Transient three-dimensional modeling of riverbank filtration at Grind well field, Germany”. *Hidrogeology Journal.*

TUFENKJI N, RYAN. J y ELIMELECH M. (2002) “The Promise of Bank Filtration”. *Environmental Science and Technology.*

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) y CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE ANTIOQUIA (CORANTIOQUIA) (2004). Evaluación del potencial acuífero en los municipios de Santa Fe de Antioquia, San Jeronimo, Sopetran, Olaya y Liborina.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (UNAL) y CORPORACIÓN DE LOS RÍOS NEGRO Y NARE (CORNARE). (1997). Evaluación Hidrogeológica preliminar de los municipios de: El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen, Guarne y Marinilla.