

Incidencia de la Anisotropía en la detracción de agua de un sistema léntico o lótico por acciones antrópicas, determinada mediante modelación numérica

Incidence of the anisotropy in the detraction of water of a lentic or lotic system by anthropic actions, determined through numeric modeling

Héctor Fabio Aristizábal Rodríguez¹; Carlos Alberto Escobar Chalarca²; Pedro Martínez Santos³

DOI: <http://dx.doi.org/10.23850/24220582.169>

Fecha de recibo: 23-01-2015 Fecha de aceptación 20-08-2015

RESUMEN

Para estimar la cantidad de agua detráida de los humedales y ríos (sistemas léntico y lótico) que produce el aprovechamiento de aguas subterráneas, existen metodologías analíticas que incluyen como hipótesis la isotropía del medio en el plano XY, limitadas a condiciones particulares. En la actualidad, los modelos numéricos permiten considerar escenarios de simulación amplios y complejos. Por lo tanto, en este trabajo se propone determinar la importancia de incluir la anisotropía del medio en este proceso antrópico. La implementación se hizo en predios de las Haciendas Ginebra y San Felipe en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca, Colombia, y se modeló con el paquete RIVER de la herramienta MODFLOW. Los resultados muestran la existencia de anisotropía, con valores para la conductividad hidráulica de $K_x=1,9$ m/día y $K_y=0,75$ m/día. Se concluye que la anisotropía influye directamente en esta estimación y se sugiere que sea incluida en análisis similares para garantizar la sostenibilidad ambiental del sistema.

Palabras clave: anisotropía; sistemas lénticos y lóticos; pozo; MODFLOW; conductividad hidráulica; coeficiente de almacenamiento.

ABSTRACT

To estimate the amount of water subtracted wetlands and rivers (lentic and lotic systems) produced by the use of groundwater, there are analytical methodologies that include the hypothesis of the isotropy of the medium in the XY plane, limited to particular conditions. Currently, numerical models allow considering scenarios of large and complex simulation. This research aims to determine the importance of including the anisotropy of the medium in this anthropic process. The implementation was done on grounds of Haciendas Ginebra and San Felipe in the municipality of Tuluá, Valle del Cauca, Colombia and modeled with the mudflow package RIVER tool. The results show the existence of anisotropy values for hydraulic conductivity $K_x = 1.9$ m / day and $K_y = 0.75$ m / day. We conclude that the anisotropy directly influences the estimate and suggests inclusion in similar analyzes to ensure environmental sustainability of the system.

Keywords: Anisotropy, lentic and lotic systems, modflow, hydraulic conductivity, storage coefficient.

¹ Colombiano. Ph.D en Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Santiago de Cali, Colombia. Correo electrónico: hector-fabio.aristizabal@cvc.gov.co, aristizabalr67@gmail.com

² Colombiano. Ph.D en Ciencias Agropecuarias, profesor asociado, dedicación exclusiva, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, Palmira, Colombia.

³ Español. Ph.D en Hidrogeología, profesor titular, Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

INTRODUCCIÓN

Siendo el Valle del Cauca un relleno de sedimentos aluviales cuaternarios y terciarios, es importante adelantar investigaciones que involucren la determinación de la variabilidad de la conductividad hidráulica, entendida como la facilidad con que el acuífero transmite agua.

Se debe tener presente que la mayor parte del agua extraída de los acuíferos procede de dos fuentes: la escorrentía subsuperficial que constituye el flujo base de los ríos y el agua almacenada en los embalses subterráneos, cuyo desequilibrio ocasiona impactos ambientales irreparables.

Los avances tecnológicos de la última década permiten contar con modelos numéricos para simular los principios fundamentales que rigen el sistema acuífero-río, en los cuales se puede incluir el análisis de la anisotropía del medio.

Por lo anterior, el objetivo del proyecto realizado se centró en evaluar la incidencia de la anisotropía en la detracción de agua de un sistema hídrico superficial, por efecto el aprovechamiento subterráneo.

LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Esta zona se localiza en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, en la cuenca del río Tuluá, la cual limita al norte con las cuencas de los ríos Morales y Bugalagrande; al sur con las cuencas de la Quebrada San Pedro y el río Guadalajara; por el oriente con el departamento del Tolima; y al occidente con el río Cauca y las cuencas de los ríos Piedras y Riofrío.

El estudio se desarrolló específicamente en las Haciendas San Felipe y Ginebra, localizadas cerca de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tuluá, aguas abajo de la cabecera municipal, parte central del departamento del Valle del Cauca, Colombia Figura 1.

METODOLOGÍA

Para desarrollar el trabajo propuesto se eligió una zona que cuenta con el pozo de producción codificado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC, como Vtu-132, con una profundidad de 85 metros, localizado en la Hacienda Ginebra a 580 metros del río Tuluá en sentido Norte. Las coordenadas del pozo son: Norte 946,750 - Este 1,096,110. (Aristizábal, 2015).

El diseño requerido para el levantamiento de información incluyó la construcción de tres pozos de monitoreo identificados como PM1, PM2 y PM3, ubicados en diferentes direcciones entre el pozo de producción (Vtu 132) y el río Tuluá Figura 2.

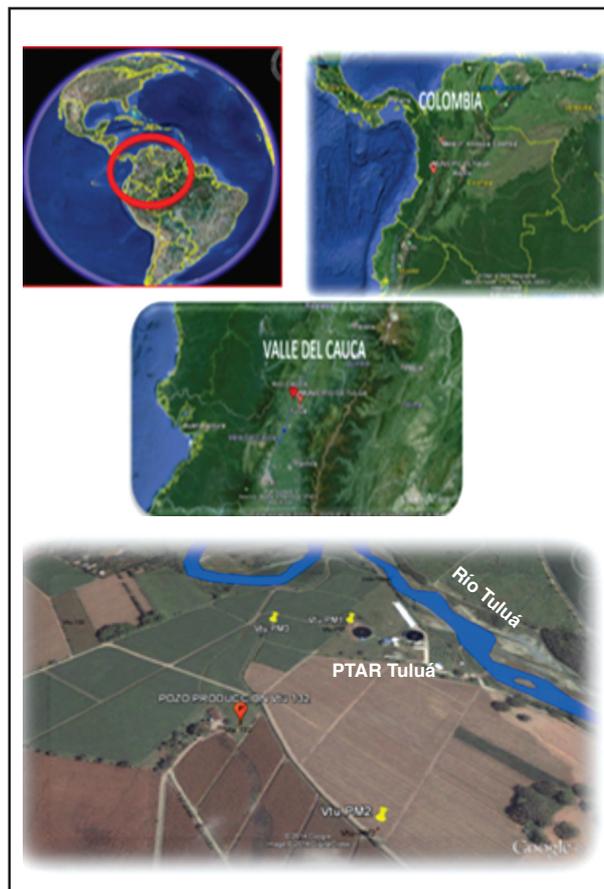


Figura 1. Localización de la zona de estudio

Fuente: Autores



Figura 2. Diseño experimental

Fuente: Autores

La información levantada en campo y la existente, permitieron realizar la calibración del modelo numérico MODFLOW (Harbaugh, 2005) para el medio Isótropo (conductividad hidráulica K , igual en el eje X y en el eje Y) y Anisótropo ($K_x \neq K_y$).

Se realizó la calibración en régimen permanente y su resultado se convirtió en las condiciones iniciales

de los modelos calibrados en régimen transitorio. La información de la prueba de bombeo se realizó entre el 25 de febrero y el 1 de marzo de 2013.

Por último, se estimaron los caudales detraídos del río Tuluá al aplicar los modelos obtenidos.

RESULTADOS

Construcción de los pozos de monitoreo - piezómetros

Con apoyo de los técnicos y contratistas del grupo de Recursos Hídricos de la Dirección Técnica Ambiental de la CVC, se construyeron manualmente los pozos de monitoreo en los puntos indicados. La profundidad total de cada perforación alcanzó los 7 metros Figura 3.



Figura 3. Construcción de los pozos de monitoreo -Piezómetros
Fuente: Autores

Obtención de información básica primaria -Toma de información espacio-temporal de niveles de agua.

Se midió de manera periódica el nivel de agua en los puntos seleccionados, una o dos veces por mes, durante 2.5 años (enero 2012 - agosto 2014). El comportamiento medio mensual de los niveles medidos, en términos de cota sobre el nivel del mar, se presenta en la Figura 4.

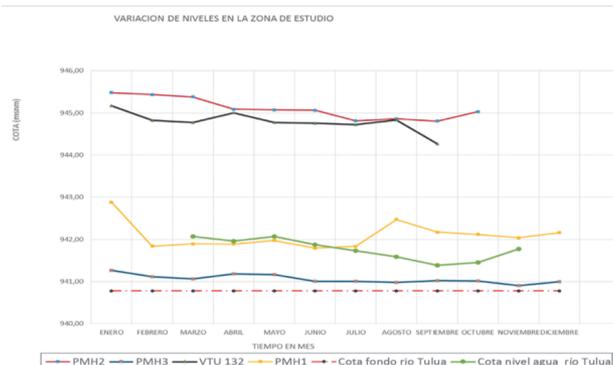


Figura 4. Comportamiento piezométrico del agua en los sitios medidos
Fuente: Autores

Estimación en condiciones de campo de la conductividad hidráulica saturada del lecho de río (Kzrío)

Para calcular el parámetro denominado conductancia requerido en el módulo RIVER del modelo numérico MODFLOW, se realizaron mediciones en el lecho del río que permitieron estimar el valor de la conductividad hidráulica saturada, tal y como se evidencia en la figura 5.



Figura 5 Estimación de la conductividad hidráulica saturada del lecho del río Tuluá.
Fuente: Autores

Los valores obtenidos presentan una variación entre 144 a 576 m/día.

Determinación del número de Capas Hidrogeológicas

Estudios realizados por (INGEOMINAS, 1976) definen que existe una capa hasta los 100 m de profundidad caracterizada por tener resistividades entre 30 a 60 Ω m, equivalente a **gravas + arenas, arenas o arcillas + rodados**.

Para validar lo indicado se adelantaron durante 5 días sondeos electromagnéticos con el equipo EM 34 Figura 6.

Los resultados obtenidos de resistividad en la Dirección Horizontal (DH) y Vertical (DV) variaron entre 30 a 80 Ω m, corroborando lo obtenido por INGEOMINAS.

Para el objeto de este trabajo y teniendo en cuenta lo anterior, se definió que hasta los 100 m de profundidad existen materiales considerados similares, por lo tanto se debe trabajar en la modelación con una única capa que define la unidad acuífera.



Figura 6. Medición electromagnética en la zona de estudio.

Fuente: Autores

Recarga de agua al acuífero

La modelación realizada incluyó los resultados del estudio realizado por (Jaramillo, 2006) en la cuenca del río Tuluá, en donde se estimó que el valor de recarga era igual a 251 mm/año (0,7 mm/día).

Calculo de la evaporación

Esta información fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC. Por lo tanto, en la modelación se incluyó un valor de 1400 mm/año (3,8 mm/día).

Prueba de bombeo

Las características de la prueba de bombeo se realizaron entre el 25 de febrero al 1 de marzo de 2013, se describen a continuación:

Se realizó a caudal constante (40 l/s) con una duración de 96 horas incluidas las 24 horas de la fase de recuperación. Inició a las 12:00 horas del mediodía del día 25 de febrero hasta las 12:00 horas del mediodía del día 28 de febrero de 2013; posteriormente se midió la recuperación del pozo en las siguientes 24 horas, finalizando el 1 de marzo de 2013 Figura 7.

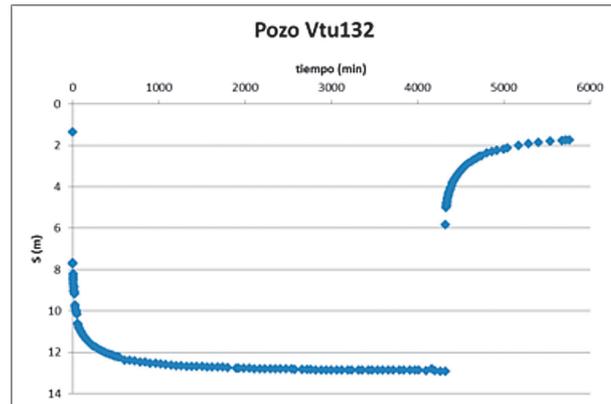


Figura 7. Prueba de bombeo, pozo Vtu-132

Fuente: Autores

Condiciones de contorno del modelo

Las condiciones de contorno se determinaron, analizando el área de influencia considerada. Para el caso particular de este trabajo, el área de influencia de la calibración en régimen permanente cubrió desde las inmediaciones de la cabecera del municipio de Tuluá hasta el río Cauca en sentido Este - Oeste, y en sentido Norte - Sur desde el río Tuluá hasta los límites de la cuenca del río San Pedro.

Las condiciones de contorno del modelo se presentan en la Figura 8.

Norte: River - Río Tuluá
 Sur: No flujo
 Este: Cabeza constante, correspondiente a la equipotencial 960 msnm
 Oeste: River - Río Cauca

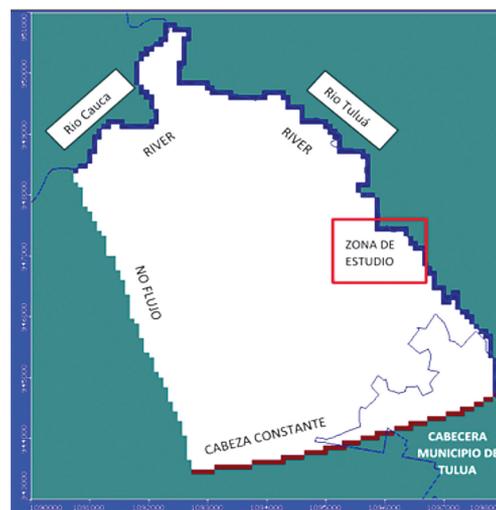


Figura 8. Condiciones de contorno del modelo

Fuente: Autores

Discretización del modelo

Se estableció una discretización de 100 filas * 100 columnas para el modelo general, quedando celdas de 80 m *80 m. Para el área de estudio se refinó la malla quedando de 20 m de ancho * 10 m de alto Figura 9.

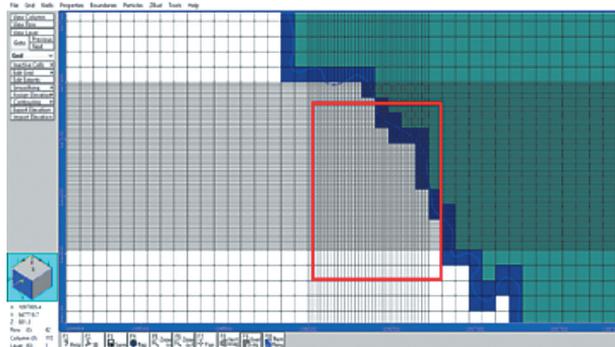


Figura 9. Discretización del modelo

Fuente: Autores

Definición de las zonas de balance de agua (Zone Budget)

En la Figura 10 se presentan las zonas identificadas dentro del modelo en el cual se realizaron los balances de agua; específicamente se evaluó la zona 4 o zona de la investigación.

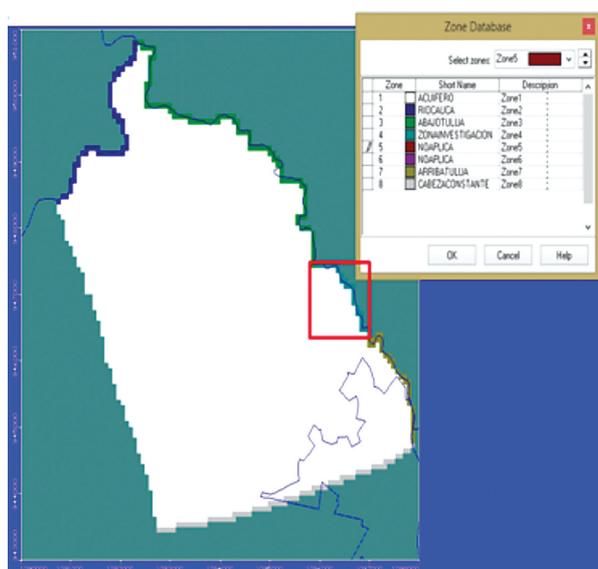


Figura 10. Zonas de balance de agua del modelo

Fuente: Autores

Definición de zonas hidrogeológicas

Teniendo en cuenta que el comportamiento piezométrico cercano al río Cauca difiere del comportamiento general,

se incluyeron dos zonas hidrogeológicas diferentes Figura 11.

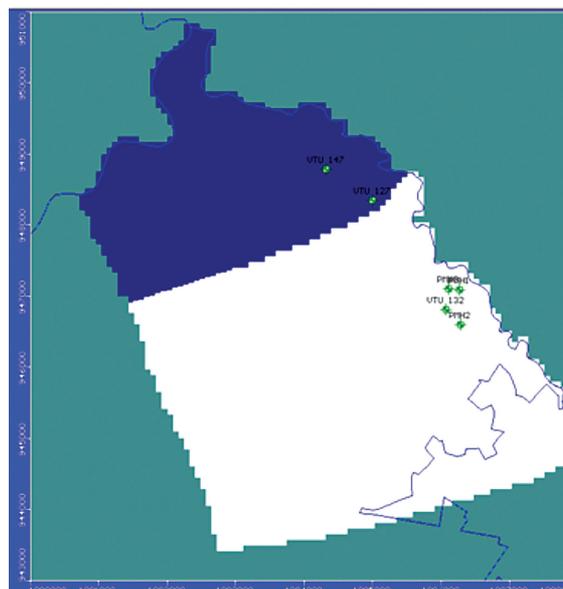


Figura 11. Zonas hidrogeológica

Fuente: Autores

Pozos de observación

Para realizar la calibración de los modelos en régimen permanente se tuvieron en cuenta las mediciones realizadas en seis pozos de observación, en donde se incluyeron los tres piezómetros del área de estudio. La Tabla 1 presenta los valores de cota de cada pozo que se emplearon en la calibración.

Tabla 1:

Pozos de observación y su medición

Pozo	Norte	Este	Valor de la medición
Vtu-127	948340,00	1095000,00	934,22
Vtu-147	948780,00	1094330,00	931,29
Vtu-132	946807,00	1096067,00	944,25
Vtu-PmH1	947090,64	1096270,08	942,20
Vtu-PmH2	946598,75	1096286,58	945,00
Vtu-PmH3	947093,08	1096107,23	942,00

Fuente: Autores.

Proceso de calibración del modelo en régimen permanente, medio Isótropo

Se hizo la calibración del área general del estudio realizando “paso a paso” las iteraciones en régimen permanente, considerando las conductividades del plano XY iguales, hasta encontrar q el comportamiento

modelado fuera similar al observado.

El balance de agua obtenido certificó la condición de “río ganador” en el tramo de estudio definido como zona 4. El caudal entregado por acuífero al río Tuluá es del orden de 13 l/s.

Los valores de los parámetros hidrogeológicos calibrados son: Conductividad Hidráulica, Zona 1: $K_x=K_y= 1,4$ m/día y Zona 2: $K_x=K_y= 5$ m/día

Proceso de calibración del modelo en régimen permanente, medio Anisótropo

La calibración del modelo en régimen permanente para el medio Anisótropo se realizó por dos vías; la primera consistió en correr el modelo empleando el módulo ANISOTROPY que viene incluido en la herramienta MODFLOW, para determinar la existencia de anisotropía K_y/K_x en la zona de estudio.

La segunda vía fue similar a la calibración realizada para el medio Isótropo, en donde se realizaron “paso a paso” las iteraciones en régimen permanente, pero considerando las conductividades del plano XY diferentes, hasta encontrar q el comportamiento modelado fuera similar al observado.

Al calibrar el modelo empleando el módulo ANISOTROPY, este entrega como resultado la relación de anisotropía de manera porcentual, pero no los valores específicos de las conductividades hidráulicas en las direcciones X y Y, que la originan.

La estimación de la anisotropía del plano XY por esta vía entregó un valor de la relación entre las conductividades hidráulicas K_y/K_x del 35%.

Al realizar la calibración del modelo por la segunda vía, se obtuvo el balance de agua para el medio Anisótropo, en donde de igual forma se certifica la condición de “río ganador” en el tramo de la zona de estudio (Zona 4).

El caudal entregado por acuífero al río Tuluá es del orden de 17,9 l/s.

Los valores de los parámetros hidrogeológicos obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2:

Valores de los parámetros hidrogeológicos calibrados y relación de anisotropía

Conductividad Hidráulica (m/día) - Zona 1			
K_x	K_y	K_x/K_y	$(K_y/K_x)*100$
1,9	0,75	2,53	39,5 %

Fuente: Autores

Proceso de calibración del modelo en régimen transitorio, medio Isótropo y Anisótropo

La calibración de los modelos en régimen transitorio (Isótropo y Anisótropo) se realizó sobre la prueba de bombeo existente.

• Periodo de calibración y simulación del modelo

La calibración en régimen transitorio se hizo para el tiempo de duración de la prueba de bombeo que fue de cuatro (4) días; tres (3) días de aprovechamiento del pozo y un (1) día de recuperación.

• Medio Isótropo, régimen transitorio

Se realiza el proceso de ajuste de la calibración de la prueba de bombeo, realizando las iteraciones “paso a paso” con el apoyo del modelo MODFLOW, considerando las conductividades hidráulicas iguales en el plano XY (medio Isótropo).

Los valores obtenidos para los parámetros hidrogeológicos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3:

Valores de los parámetros hidrogeológicos calibrados

Conductividad Hidráulica (m/día) $K_x=K_y$	Coefficiente de Almacenamiento S_y
1,4	0,0012

Fuente: Autores

• Medio Anisótropo, régimen transitorio

Se realizó la calibración “paso a paso” de los niveles medidos en la prueba de bombeo, considerando el medio Anisótropo con apoyo de la herramienta MODFLOW. Los valores obtenidos para los parámetros hidrogeológicos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4:
Valores de los parámetros hidrogeológicos calibrados y relación de Anisotropía

Parámetro Hidrogeológico		
Conductividad Hidráulica m/día		Coficiente de Almacenamiento S_y
Kx	Ky	
1,9	0,75	0,0012

RELACION DE ANISOTROPIA	Kx/Ky	2,53
	(Ky/Kx)*	39,5 %
		100

Fuente: Autores

Aunque los dos modelos presentan calibraciones semejantes (Isótropo y Anisótropo), se verificó que el modelo Anisótropo interpretó con mayor certeza la evolución de la prueba de bombeo (Figuras 12, 13 ,14 y 15)



Figura 12. Calibración de la prueba de bombeo, Los puntos negros corresponden al medio Isótropo y los puntos verdes al medio Anisótropo.

Fuente: Autores

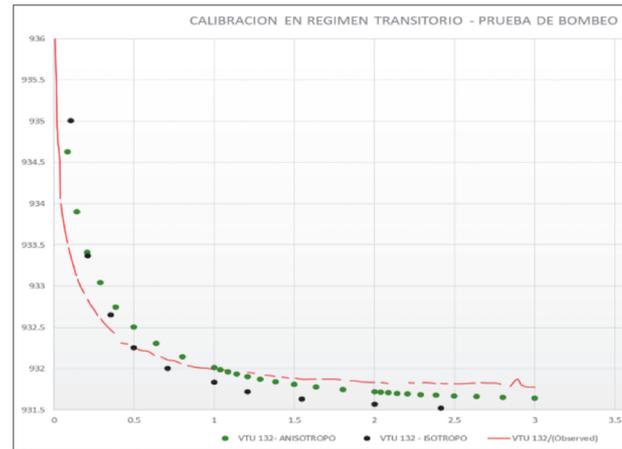


Figura 13. Detalle de la fase de aprovechamiento de la prueba de bombeo desde la cota 936 m/nm, los puntos negros corresponden al medio Isótropo y los puntos verdes al medio Anisótropo.

Fuente: Autores

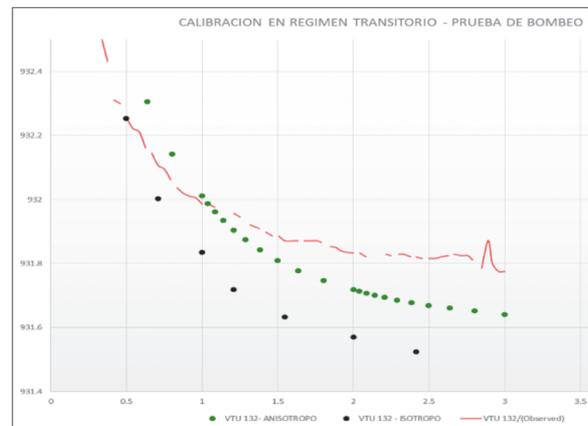


Figura 14. Detalle de la fase de aprovechamiento de la prueba de bombeo desde la cota 932,5 m/nm. Los puntos negros corresponden al medio Isótropo y los puntos verdes al medio Anisótropo.

Fuente: Autores



Figura 15. Detalle de la fase de recuperación de la prueba de bombeo. Los puntos negros corresponden al medio Isótropo y los puntos verdes al medio Anisótropo.

Fuente: Autores

CONCLUSIONES

Con base en los monitoreos de los niveles de agua subterránea y superficial realizados durante dos y medio años, se logró determinar que el río Tuluá en el tramo de estudio, se comporta como un río ganador.

Con apoyo de la herramienta MODFLOW se obtuvieron las condiciones iniciales del acuífero, mediante la calibración en régimen permanente de dos (2) modelos, uno para el medio Isótropo y otro para el medio Anisótropo.

Teniendo como insumo la información de la prueba de bombeo realizada, se obtuvieron dos (2) modelos calibrados en régimen transitorio, concluyendo que los mejores resultados se lograron con el modelo Anisótropo, en donde la conductividad hidráulica K_x es 2,5 veces mayor a K_y . Estos modelos permiten realizar los escenarios de simulación planteados.

Los resultados obtenidos deben tomarse como base para profundizar en la estimación de la Anisotropía en acuíferos aluviales.

REFERENCIAS

- Aristizábal, H.F. (2015). *Incidencia de la anisotropía en la detracción de agua de un sistema léntico o lótico por acciones antrópicas*. (Tesis doctoral). 180 p. Valle del Cauca, Colombia. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA, CVC. (1977). Hidrogeología del Valle del río Cauca entre Buga y Cartago. Cali.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey. Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process. Chapter 16 of Book 6. Modeling techniques, Section A. Ground Water U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A16*. Virginia, Estados Unidos.
- INGEOMINAS. (1976). *Geoeléctrica entre Buga y Cartago*. Cali.
- Jaramillo, M. F., Aristizábal, H. F. (2006). Aplicación metodológica para la estimación de la recarga potencial por precipitación en la zona centro del Valle del Cauca. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 5, 39-43.