

Modelación del acuífero Cuentas Claras

Ing. Lemuel Carlos Ramos Arzola email: lemuel@cih.cujae.edu.cu
CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Ing. Karunanandarajah Maiyourathan email: maiyourathan@gmail.com
Lanka Hydraulic Institute, Moratuwa, Sri Lanka.

Dr. Eric Cabrera Estupiñán email: ecabrerae@gmail.com
Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, extensión Chone. Ecuador.

Dr. Armando Orestes Hernández Valdés email: ahernandez@cih.cujae.edu.cu
CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

Dr. David Ernesto Marón Domínguez email: dmaron@cemat.cujae.edu.cu
CEMAT, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

RESUMEN

La presente contribución se basa en crear y calibrar un modelo matemático bidimensional del flujo regional de las aguas subterráneas del importante acuífero Cuentas Claras. Primeramente se concibe un modelo que contempla toda el área del acuífero y se somete a un proceso de calibración; se utilizó el paquete de programas de simulación del agua subterránea AQÜIMPE. No se logra la calibración y se propone un segundo modelo, solamente del sector Cuentas Claras, donde se introduce de forma indirecta el aporte subterráneo de la zona de recarga. Esta entrada requirió también de un proceso de ajuste. Se logra la calibración del segundo modelo reproduciéndose adecuadamente los niveles observados. Este trabajo pretende contribuir a la planificación de estrategias de protección y administración de las aguas subterráneas de este acuífero.

Palabras clave: acuífero, AQÜIMPE, calibración, modelación matemática del agua subterránea.

Modeling of Cuentas Claras aquifer

ABSTRACT

The main objective of this paper is to create and calibrate a two-dimensional regional groundwater model for the "Cuentas Claras" aquifer. First, an overall model was conceived and it was subjected to a calibration process. For that purpose AQÜIMPE groundwater simulation software was applied. As the calibration was not achieved for the overall model, the idea of conceiving a partial model representing only the exploitation zone was carried through. The recharge coming from the mountains was introduced to this second model as a groundwater intake, and therefore it had to be calibrated as well. As a final result, a logical calibration of the model was achieved with high accuracy. The present work also attempts to contribute with the groundwater management strategies of this aquifer.

Keywords: aquifer, AQÜIMPE, calibration, groundwater modeling.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio, donde se encuentra incluida el área principal investigada, Cuentas Claras, ocupa un área aproximada de 1560 km², comprendiendo a los municipios Manzanillo, Campechuela y Yara, pertenecientes a la provincia Granma, Cuba. Esta zona limita al norte con el Golfo de Guacanayabo, al sur con las premontañas de la Sierra Maestra, al este con el municipio Yara y al oeste con el municipio Campechuela, figura 1.

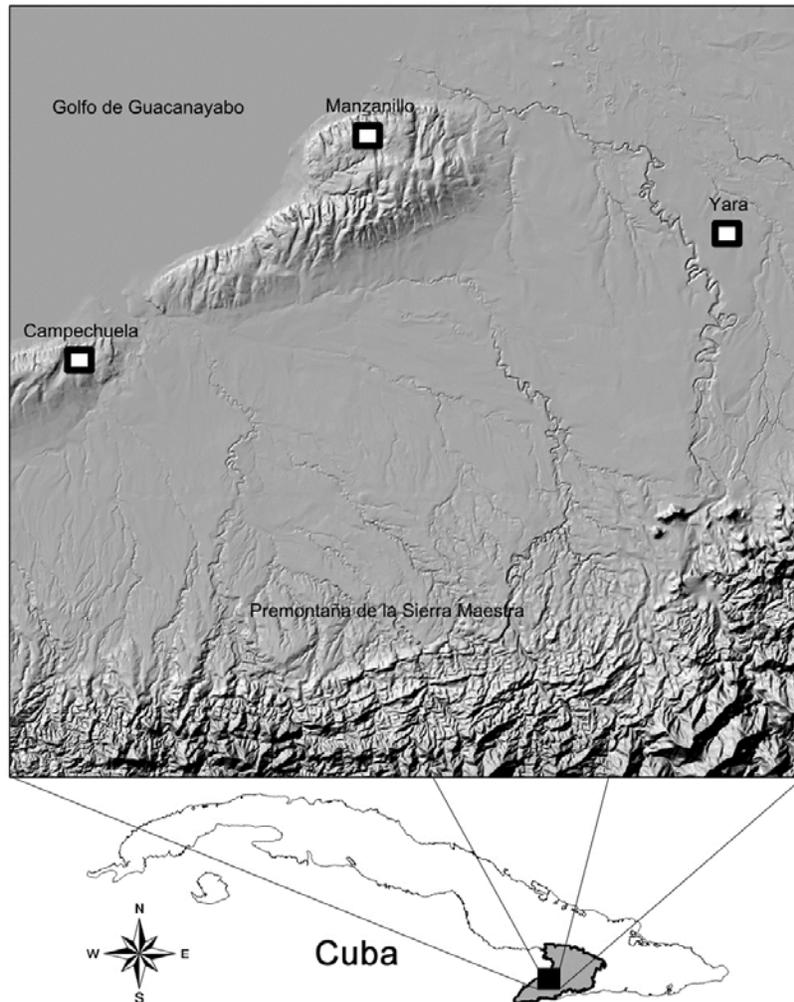


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio

La ciudad de Manzanillo presenta el conglomerado poblacional más importante de la zona de estudio, el cual asciende a 98 000 habitantes hasta el 2012. Esta ciudad es abastecida de agua potable por medio de los recursos subterráneos de los acuíferos Cayo Redondo y Cuentas Claras, los cuales no han sido evaluados con confiabilidad y menos aún administrados adecuadamente.

Las reiteradas quejas de la población debido a la escasez del agua y la poca estabilidad de este recurso, provocaron la acción del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) para darle solución a este problema, convirtiéndose en una de las principales prioridades del país en este sector.

La necesidad de conocer el comportamiento hidrodinámico del acuífero Cuentas Claras es un

aspecto vital para establecer futuras políticas de explotación que cumplan (en lo posible) con las demandas planteadas, al mismo tiempo que respeten principios de sustentabilidad de la fuente. En tal sentido, la presente contribución se basa en crear y calibrar (por primera vez) un modelo matemático del acuífero Cuentas Claras. Éste presenta la base conceptual para la posterior aplicación de un modelo de administración óptima de la explotación del acuífero (Cabrera y Dilla 2011).

BREVE DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO CUENTAS CLARAS

Según lo reportan (Blanco et al. 2010) y (Lloréns et al. 2011), el área de interés para la modelación se encuentra limitada por el sector Cuentas Claras, que cuenta con 137 km²; sin embargo, se considera un área de recarga al acuífero en el sur de 178 km² y un área intermedia, entre la anterior y el sector Cuentas Claras, de 355 km², figura 2. El área intermedia permite la circulación del agua subterránea, desde el sur al norte, como acuífero confinado con profundidades del techo estimadas entre 200 y 300 m.

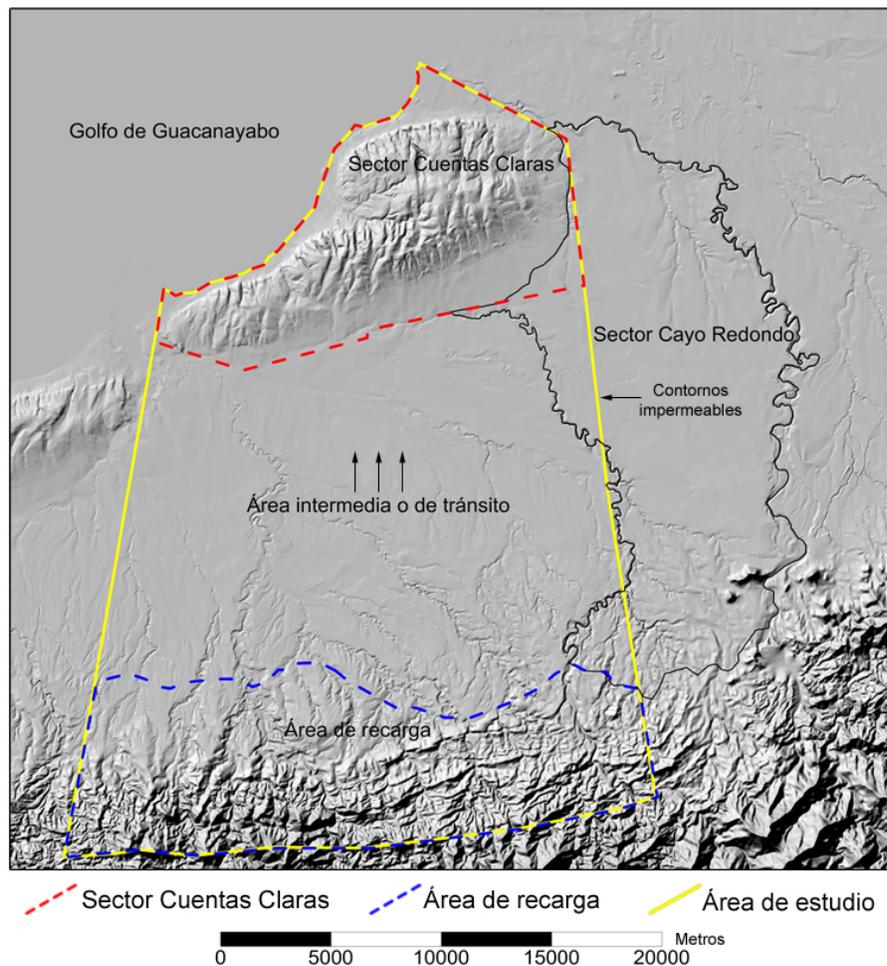


Figura 2. Ubicación del área de estudio (Cuentas Claras)

Desde el punto de vista geológico, esta zona se encuentra enclavada en el complejo acuífero de los sedimentos carbonatados del mioceno de la formación Manzanillo. En el mapa geológico y perfil esquemático confeccionados en los trabajos anteriormente citados, se pueden observar las principales estructuras geológicas del área de estudio, además, se muestran los límites que permiten caracterizar al acuífero, figura 3.

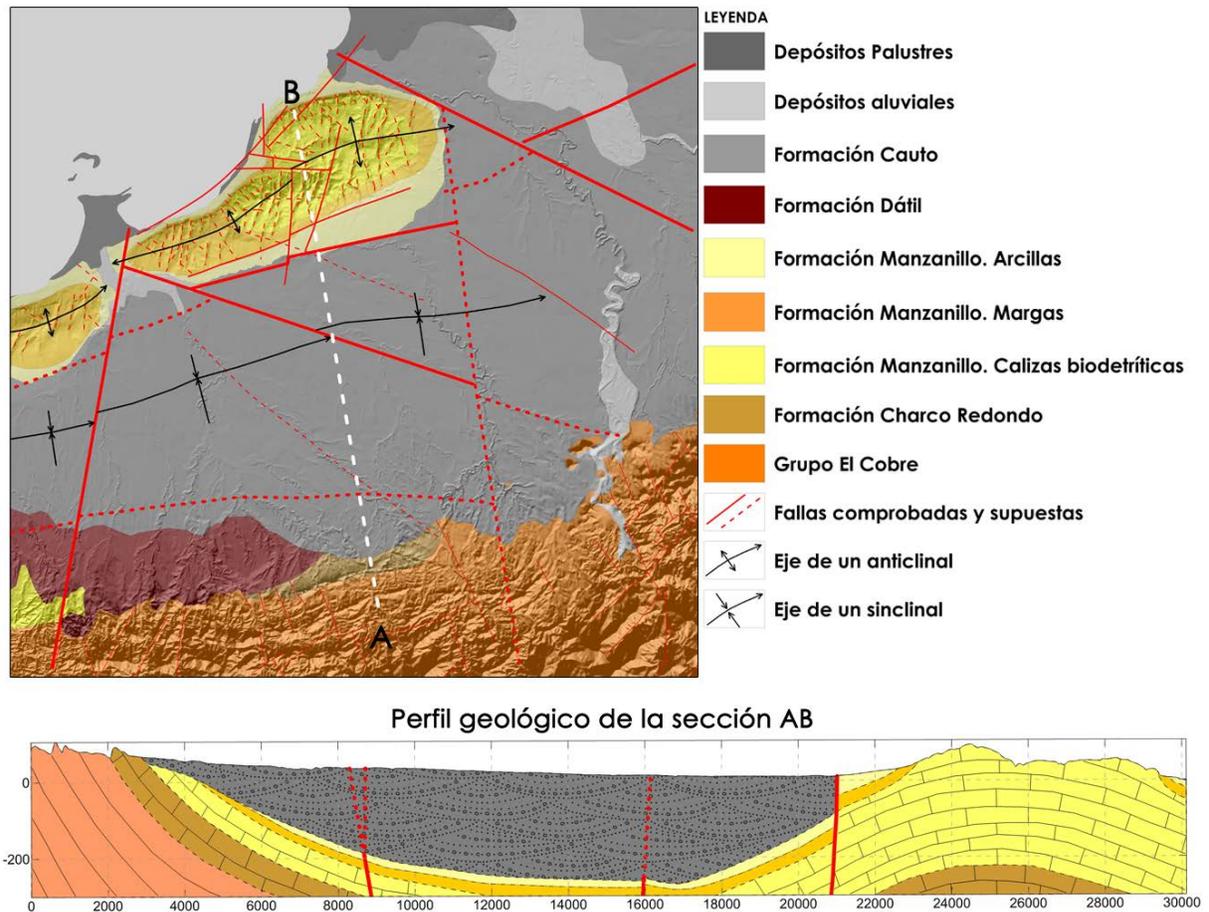


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio

De acuerdo a la distribución de las precipitaciones se determinan en el año dos períodos, uno seco y otro lluvioso, el primero se extiende de noviembre a abril y el segundo de mayo a octubre. La precipitación anual oscila entre los valores de 1127 a 2396 mm, con una media de 1646 mm. La temperatura media anual, muestra poca variación, 25.6°C a 26.5°C, con una humedad relativa anual entre 78 % y 81 %, correspondiendo a julio y agosto los meses más calurosos, y los más fríos de diciembre a enero.

Desde el punto de vista orográfico, se presenta al norte un relieve de colinas bajas que no llegan a los 90 m en su porción centro-este, suavizándose en forma de llanura ondulada hacia el norte, este, sur y suroeste, constituyendo una estructura en forma de cúpula. En la parte central el relieve es llano con ligeras ondulaciones, mientras que al sur el relieve es de colinas y montañas bajas en su extremo meridional, con cuevas suaves que tienden su inclinación en dirección norte.

La potencia acuífera tiene como promedio 25 m, y se ubica hasta 10 m por debajo del nivel medio del mar. La profundidad de las aguas subterráneas va desde 4 m a 50 m, respecto a la

superficie del terreno. La mayor profundidad se encuentra hacia las partes más elevadas del sector Cuentas Claras, donde calas de hasta 100 m, no alcanzan el nivel de las aguas subterráneas. Estas profundidades están asociadas a la topografía en forma de cúpula donde se encuentra ubicada la ciudad de Manzanillo.

La dirección del flujo de las aguas subterráneas, en el sector Cuentas Claras, ocurre predominantemente de forma radial, desde las partes elevadas del sector en su porción centro-sur hacia las partes bajas. Además se encuentran en algunos lugares niveles por debajo del nivel medio del mar.

TECNOLOGÍA A EMPLEAR

La tecnología seleccionada, AQÜIMPE, es un paquete modular integrado de programas, que permite la simulación matemática del flujo lineal en medio poroso libre o confinado, en dos dimensiones del espacio y con impermanencia gradual. Está concebido para simular acuíferos freáticos (de cualquier espesor saturado) o acuíferos artesianos a escala regional (Martínez 1989 y Martínez et al. 2000). En AQÜIMPE se resuelve la ecuación de flujo del agua subterránea mediante el Método de los Elementos Finitos, utilizando el triángulo cuadrático como elemento y aplicando la aproximación de Galérkin, soluciona el sistema de ecuaciones que se deriva de la aproximación numérica mediante el método de la raíz cuadrada o de Choleski y puede simular la interacción entre un lago o embalse y el acuífero que subyace, siempre que exista un posible intercambio entre ellos. Además, puede simular en los acuíferos costeros abiertos el fenómeno de la intrusión salina utilizando una interfaz abrupta que se mueve en dependencia de las cotas del agua subterránea para cada paso de tiempo (Cabrera 2009). Por último, está dotado con un módulo capaz de realizar la calibración automática de las propiedades hidrogeológicas regionales del acuífero a partir de los valores medidos de niveles (Gómez et al. 2009).

MODELO CONCEPTUAL 1 DE CUENTAS CLARAS (ÁREA TOTAL)

El modelo conceptual de un acuífero es el resultado de la aplicación de un conjunto de hipótesis y abstracciones definidas por el modelador que permiten representar a una realidad tan compleja y heterogénea como la que se presenta en estos reservorios (Hernández et al. 2001).

A partir de los estudios hidrogeológicos, geofísicos, geológicos e hidrológicos realizados en esta zona, se procede en una primera variante a definir el área del modelo y las formas de modelar sus fronteras tal y como se indica a continuación (ver figura 2):

- Se definen todos los contornos como impermeables, quiere decir, que la descarga del acuífero es producto solamente de la explotación.
- Existen dos zonas de importancia: el sector Cuentas Claras al norte, donde se encuentra casi toda la información disponible (pozos de observación, pozos de explotación, etc.), y el polígono que se encuentra al sur, donde se produce la principal recarga al acuífero.
- El área intermedia entre el sector Cuentas Claras y el polígono de recarga, permitirá la conexión hidrodinámica entre estas dos áreas.

Otras características del modelo conceptual es que el acuífero será simulado con un modelo bidimensional no estacionario en planta, esto quiere decir que sus propiedades hidrogeológicas no varían en dirección vertical y además el medio filtrante puede simularse como si fuera un medio continuo poroso isotrópico y heterogéneo.

Discretización espacial

La discretización o “triangulación” del área se realizó atendiendo a: los mapas de propiedades hidrogeológicas, ubicación de los pozos de bombeo y de observación, límites del área a modelar y zonas de infiltración por cada tipo de suelo. Con este fin se utilizó la herramienta SIG, AQTRIGEO (Cabrera 2009), que permite la construcción semiautomática de la malla de triángulos. La figura 4 presenta la discretización adoptada y pueden observarse zonas donde la malla es más fina producto de una mayor densidad de datos.

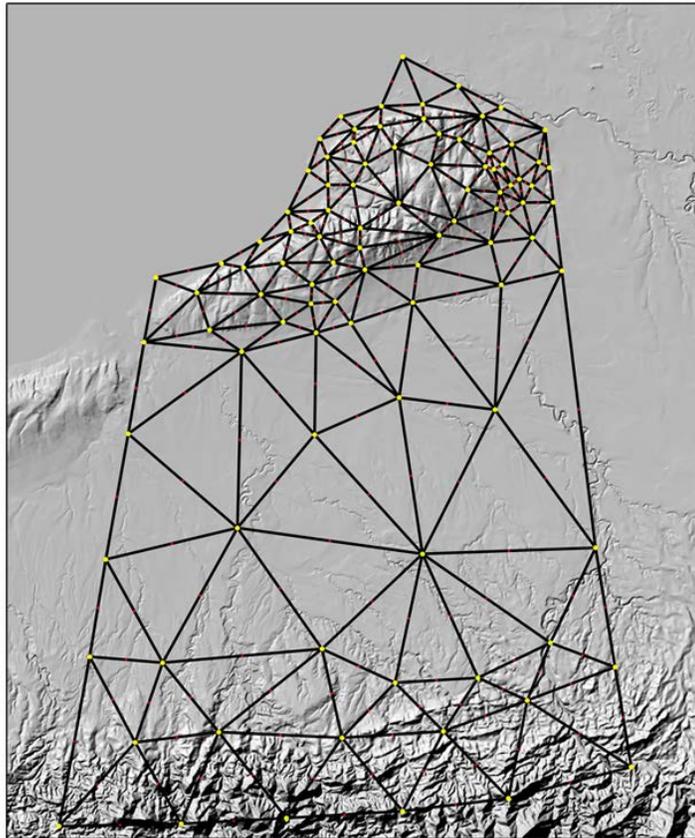


Figura 4. Discretización del área de Cuentas Claras (área total)

Zonificación

La herramienta AQTRIGEO permite al modelador agrupar triángulos donde se considere que las propiedades hidrogeológicas y características de infiltración de los mismos sean similares. El área de estudio se particiona en 8 grupos de propiedades y 9 grupos de infiltración, ver figura 5.

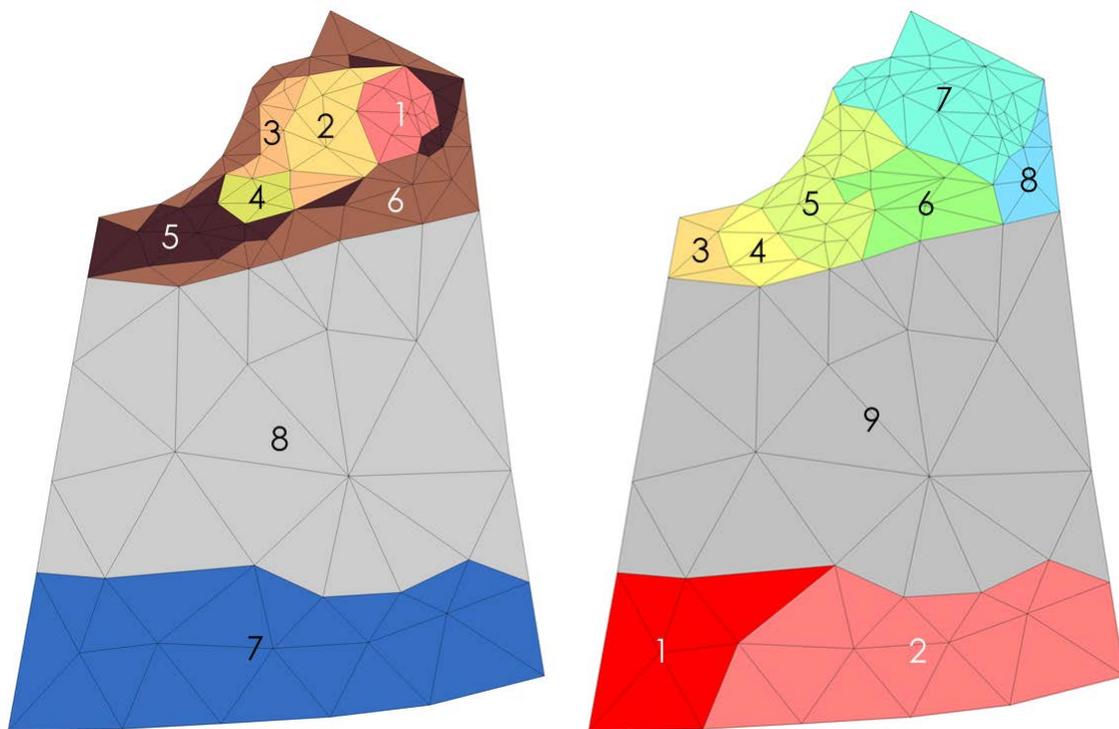


Figura 5. Grupos de Propiedades (izquierda) y Grupos de Infiltración (derecha).

Debido al déficit de información de carácter hidrológico que existe en el área de estudio, no fue posible la determinación de la recarga mediante modelos de simulación hidrológica. Se estima entonces la recarga potencial al acuífero en cada grupo de infiltración usando el método de balance hídrico propuesto por (Schosinsky 2006).

Para evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en una zona, se determinan: la precipitación mensual, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente. Cuando esto se realiza, se puede evaluar la infiltración mediante una ecuación presentada por Schosinsky y Losilla en (Schosinsky 2006). Para el cálculo de la evapotranspiración potencial existen una serie de ecuaciones, aunque algunas de ellas requieren un grupo de datos que pocas estaciones meteorológicas los tienen. En la presente investigación se emplearon diferentes métodos para determinar la ETP y luego de varios análisis en conjunto con los especialistas de la zona, se aceptó el método de Hargreaves ya que reflejaba la realidad más adecuadamente. Posteriormente, luego de conocida la capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo y la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, se realiza el balance en un prisma rectangular, que tiene en la cara superior un cuadrado de 1 metro de lado y de profundidad la de las raíces. La máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, es igual a la capacidad de campo. Finalmente, la recarga al acuífero se produce, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas.

Calibración del modelo 1

Como se dijo anteriormente, la tecnología AQÜIMPE está equipada con un módulo capaz de realizar el proceso de calibración de los parámetros de manera automática. Para esto utiliza un Algoritmo Genético (AG) denominado Shuffled Complex Evolution (SCE). Este proceso de calibración se basa en minimizar la siguiente función objetivo (FO):

$$FO = \sum_{i=1}^{TF} \sum_{j=1}^{NPO} (h_{i,j}^o - h_{i,j}^s)^2 \quad (1)$$

donde: i : contador de tiempos de simulación, TF : tiempo final de simulación, j : contador de nodos con pozos de observación, NPO : número total de nodos con pozos de observación, $h_{i,j}^o$: carga hidráulica observada para el tiempo i en el nodo j , $h_{i,j}^s$: carga hidráulica simulada para el tiempo i en el nodo j .

Con el objetivo de realizar ejecuciones donde se puedan modificar un conjunto de variables del modelo y los parámetros del algoritmo de optimización, AQÜIMPE permite la posibilidad de definir escenarios. En éstos se puede para un mismo problema, establecer diferentes variantes de configuración, y por tanto, de solución.

En la búsqueda de la solución óptima, se desea encontrar la distribución de propiedades hidrogeológicas capaces de simular los niveles estáticos en los pozos de observación para el período seleccionado.

La calibración del modelo 1 de Cuentas Claras que se realiza, tiene como objetivo lograr que en los elementos ubicados en el sector Cuentas Claras, se obtengan valores del coeficiente de almacenamiento menores que 0,1; ya que la geología en la que se encuentran estos elementos está caracterizada por rocas con bajas capacidades de almacenamiento. También se espera que en el tramo de tránsito se alcancen altas transmisividades, para así demostrar la funcionalidad del mismo como responsable de conectar y transmitir el flujo desde la montaña hasta el sector Cuentas Claras.

Además se crea un segundo escenario donde se restringe al mínimo la capacidad de comunicación entre la premontaña de la Sierra Maestra y el sector Cuentas Claras. Para ello, el intervalo de búsqueda de la transmisividad en el área de tránsito se limita al intervalo $1 \text{ m}^2/\text{d} - 10 \text{ m}^2/\text{d}$. Todo lo anterior se realiza con el objetivo de evaluar la respuesta del modelo cuando no se considera el importante aporte de recarga proveniente de la zona de montaña.

En la tabla 1 se observa la similitud que existe entre los resultados provenientes de estas dos calibraciones. A pesar de obtenerse un grupo de propiedades que permiten lograr un error aceptable entre los valores observados y simulados de los pozos de observación, en el tramo de tránsito para el escenario inicial, no se logra la calibración con altas transmisividades, a esto se suma que el coeficiente de almacenamiento de los grupos ubicados en el sector Cuentas Claras, muestra una fuerte tendencia a tomar el valor máximo 0,1.

Lo anterior demuestra una inconsistencia en el modelo conceptual aceptado, ya que éste no es capaz de reflejar adecuadamente el comportamiento hidrodinámico del acuífero.

Tabla 1. Propiedades calibradas

Grupos de Propiedades	Escenario-1		Escenario-2	
	Transmisividad (m ² /d)	Coefficiente de almacenamiento	Transmisividad (m ² /d)	Coefficiente de almacenamiento
1	1087	0,1000	1190	0,0999
2	59	0,0999	58	0,0999
3	512	0,0994	509	0,0998
4	3982	0,0089	1574	0,0188
5	10	0,0998	10	0,0999
6	26	0,1000	22	0,0999
7	1016	0,0556	1945	0,0846
8	14	0,0002	9	0,0001

Por ejemplo, (Ramos 2012), demuestra que no es suficiente la recarga proveniente de la lluvia que cae sobre el sector Cuentas Claras para satisfacer la explotación a la que está sometida este acuífero, luego se necesita del flujo procedente de la zona de montaña. Además, como se dijo anteriormente, las formaciones acuíferas que se encuentran presentes en el sector Cuentas Claras, no poseen grandes capacidades de almacenamiento.

MODELO CONCEPTUAL 2 DE CUENTAS CLARAS (SECTOR CUENTAS CLARAS)

Los resultados obtenidos, junto a las razones que se comentarán a continuación, obligan a replantearse la conveniencia de sustituir el modelo conceptual del área total, por uno que solo contemple el área correspondiente al sector Cuentas Claras.

AQÜIMPE, al ser un modelo en 2D, cuando se aplica al caso donde la componente horizontal es la predominante, está incapacitado para contemplar la componente vertical de la velocidad del flujo. Lo anterior, unido a que los niveles en el comienzo del sector Cuentas Claras son bajos y aumentan hacia el centro, imposibilita que el flujo proveniente de la Sierra Maestra pueda comunicarse a través del tramo de tránsito; ya que estos bajos niveles y la concepción del AQÜIMPE representan una barrera para este flujo. Los resultados de los estudios geológicos y geofísicos sugieren que el aporte de la recarga de la zona de montaña al sector Cuentas Claras proviene de fallas geológicas bajo éste, por lo que el flujo debe ser de abajo hacia arriba con componentes verticales de velocidad significativas.

Con AQÜIMPE esto pudiera ser simulado como una recarga en superficie, adicional a la que se produce directamente por la lluvia, en los elementos que corresponden a los afloramientos de las calizas, siendo este aporte (en cantidad) un determinado por ciento del volumen que infiltra en la zona de recarga. En la figura 6 se muestran de manera esquemática las ideas anteriores.

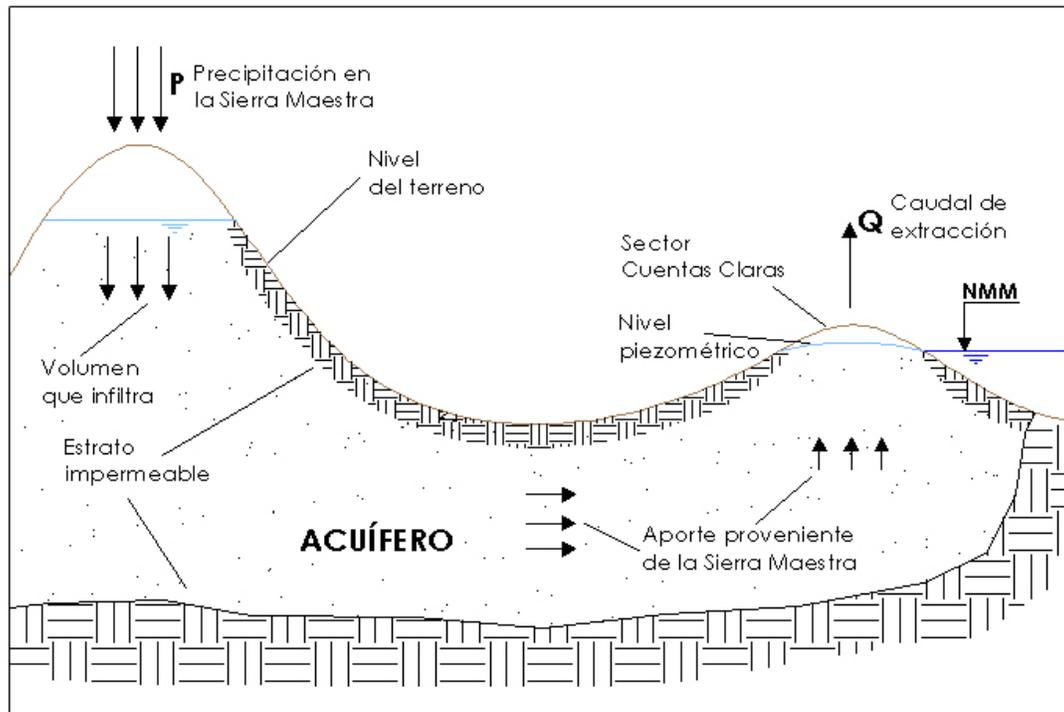


Figura 6. Perfil esquemático del acuífero con el movimiento del agua subterránea

Manteniendo el mallado realizado anteriormente sobre este sector, se definen nuevos grupos de propiedades y de infiltración. Estos cambios se observan en las figuras 7 y 8.

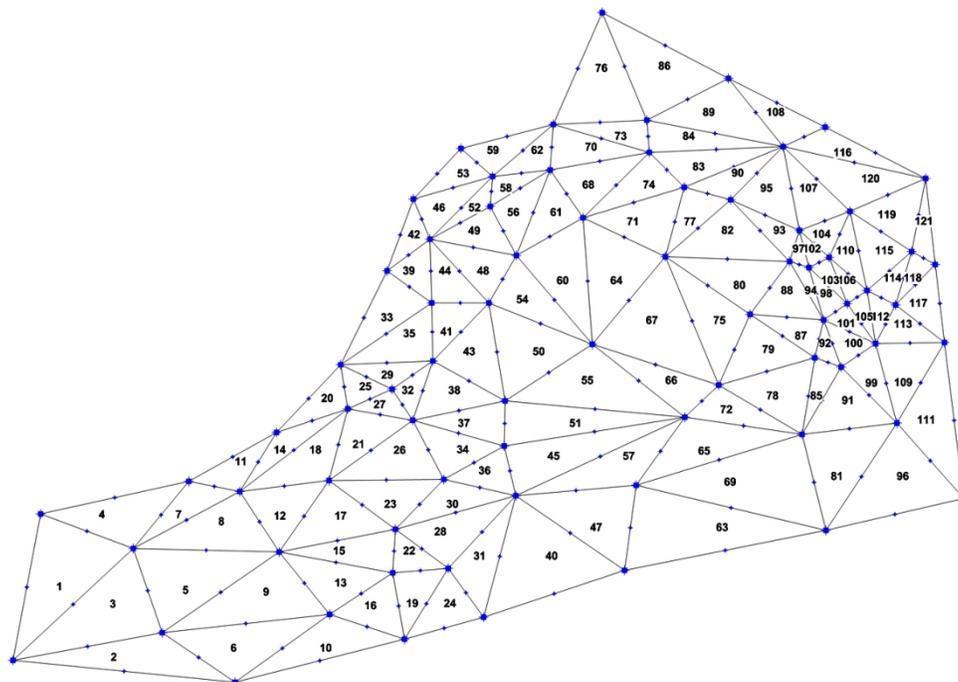


Figura 7. Discretización en el sector Cuentas Claras

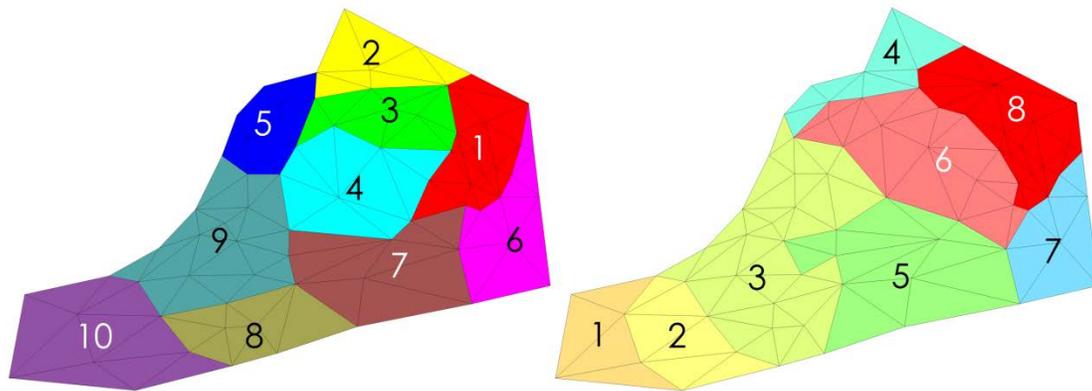


Figura 8. Nuevos Grupos de Propiedades (izquierda) y Grupos de Infiltración (derecha)

Se agruparon los triángulos en 10 grupos de propiedades atendiendo a la información aportada por la geología y la geofísica con el objetivo de evaluar la influencia de la heterogeneidad del acuífero. Los grupos de infiltración 6 y 8 serán los encargados de transmitir al modelo el aporte de la Sierra Maestra como gasto superficial.

Tratamiento de la recarga

Se mantuvo la recarga calculada en el modelo del área total, con la diferencia que en el caso de los grupos de infiltración 6 y 8, se calcula cuanto debería ser la lámina total, a asignar a estos grupos, capaz de representar un volumen equivalente al derivado de la zona de montaña. Para definir la distribución en el tiempo de esta lámina se establecieron varios escenarios que se comentan a continuación.

Estrategias de la calibración

Es bueno señalar que esta nueva concepción obliga a calibrar, además de las propiedades hidrogeológicas, la recarga adicional sobre el sector Cuentas Claras, pero de manera manual. El primer escenario consiste en dividir la lámina total entre la cantidad de tiempos de calibración. Esto genera una lámina uniforme en todo el período. A partir de este valor se definen otros escenarios modificando la magnitud de esta lámina uniforme. En los dos últimos, se distribuye la lámina total siguiendo el comportamiento de infiltración de la lluvia en la zona de montaña para el período de calibración, tomando como consideración para el último escenario, que el aporte demora un mes en llegar al sector Cuentas Claras.

Calibración del modelo 2

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en la calibración, cuyo ajuste puede ser considerado como aceptable y responde satisfactoriamente a las hipótesis y objetivos propuestos.

Se muestra en la figura 9 una gráfica con la variación de la FO (1) en cada escenario, apreciándose que en el escenario 12 se obtiene el valor mínimo global (FO = 42). Se evidencia además la sensibilidad del modelo a la recarga, ya sea en cuanto a cantidad como a distribución temporal de la misma sobre el acuífero.

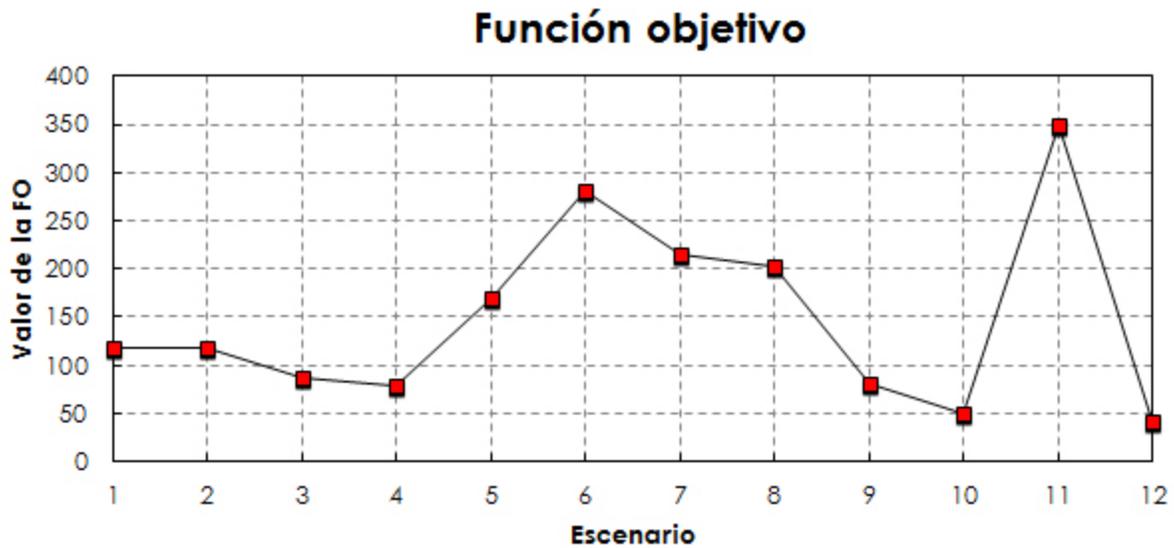


Figura 9. Comportamiento de la función objetivo en la calibración

A continuación para el escenario 12 se muestran las propiedades calibradas (tabla 2) y los niveles observados y simulados en los pozos de observación utilizados (figura 10), así como el mapa de hidroisohipsas correspondiente al último tiempo de calibración (figura 11), el cual reproduce cualitativamente las formas de los mapas históricos de niveles subterráneos de la región.

Tabla 2. Propiedades calibradas en el escenario 12

Grupos de Propiedades	Transmisividad (m ² /d)	Coefficiente de almacenamiento
1	284	0,0161
2	215	0,0998
3	78	0,0997
4	60	0,0084
5	156	0,0840
6	10	0,0014
7	37	0,0510
8	3552	0,0419
9	4437	0,0199
10	4704	0,0846

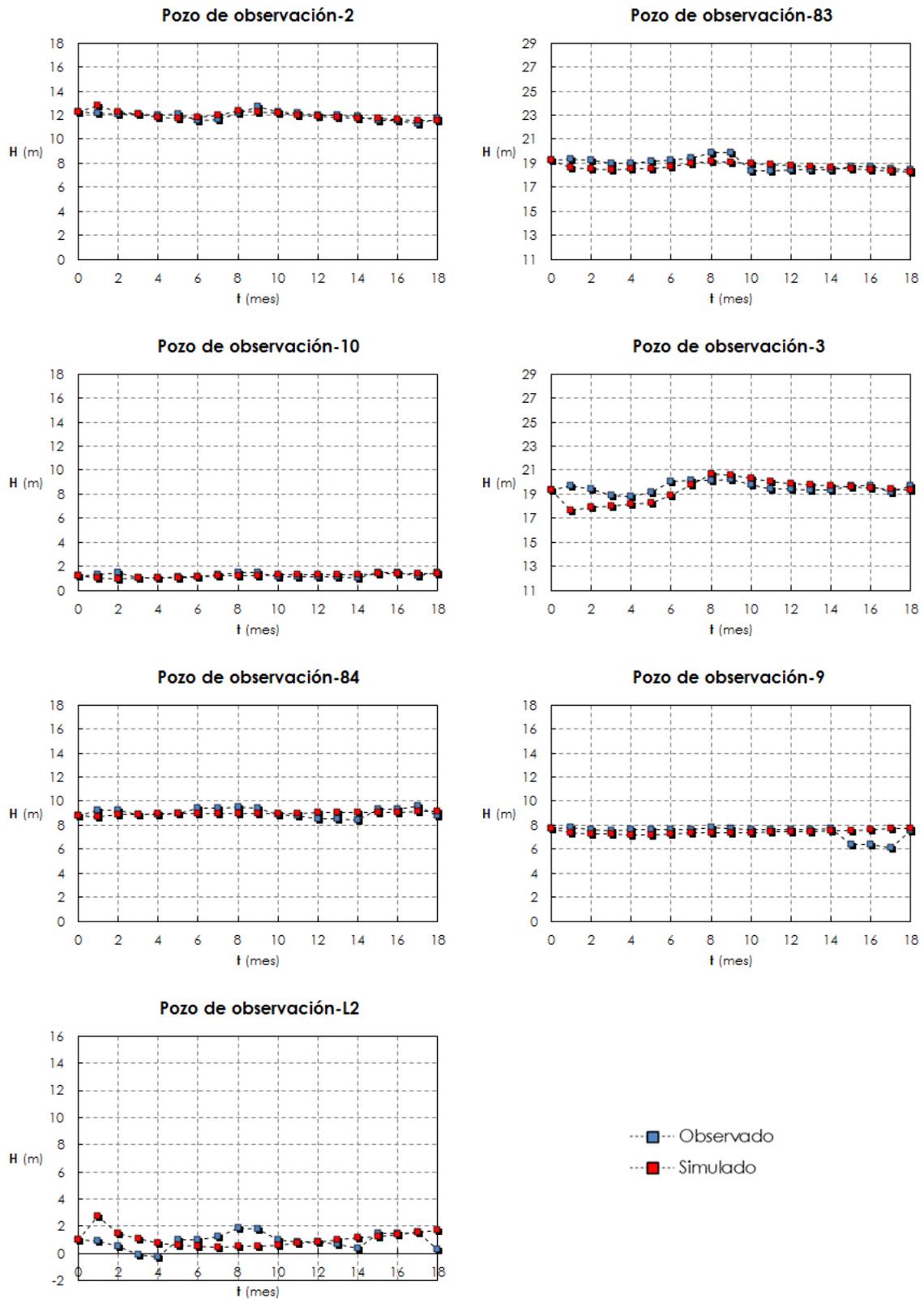


Figura 10. Niveles observados y simulados en el período de calibración

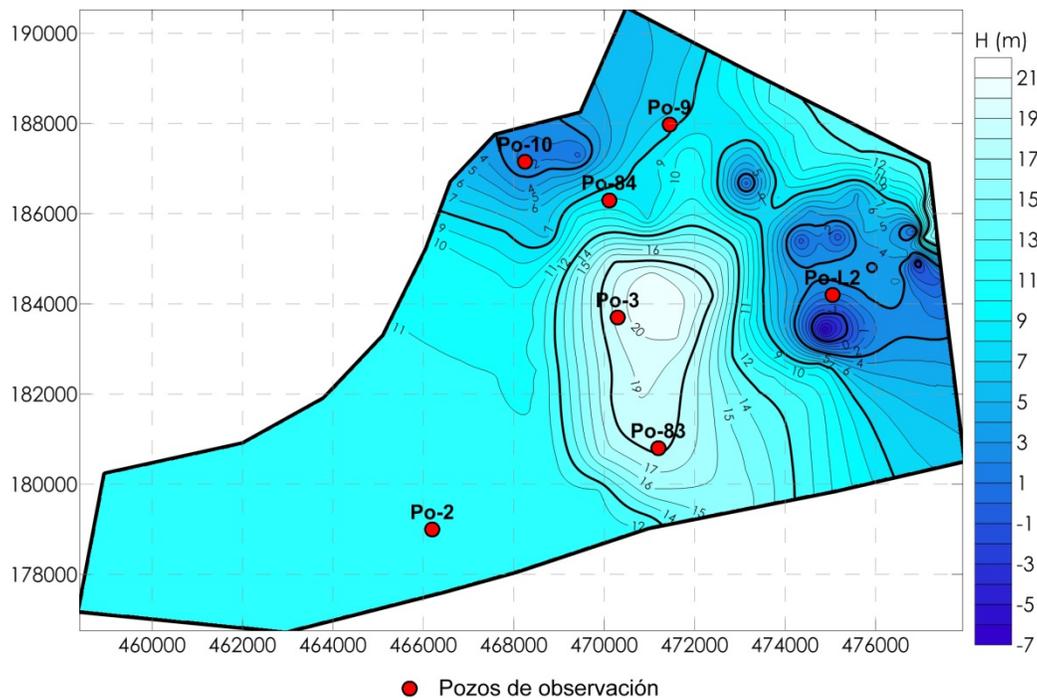


Figura 11. Mapa de hidroisohipsas correspondiente al tiempo final de la calibración

CONCLUSIONES

Por primera vez se realiza y calibra un modelo matemático hidrodinámico del importante acuífero Cuentas Claras. Este será la base para posteriores estudios encaminados a la administración óptima de la explotación del acuífero, evaluación del efecto de nuevos pozos de extracción, evaluación del efecto de contaminantes en el acuífero, etc.

Se demuestra que el modelo conceptual del área total es incapaz de simular adecuadamente el comportamiento hidrodinámico del acuífero, ya que no simula la recarga proveniente de la zona de montaña a través del tramo de tránsito y considera un almacenamiento ficticio en el sector Cuentas Claras. Esto demuestra la gran importancia que tienen las hipótesis de partida englobadas en el modelo conceptual sobre todo en la etapa de calibración.

Ante la imposibilidad de emplear un modelo general del acuífero desde la zona de recarga, se propone la idea de concebir un modelo que abarca solo la zona de Cuentas Claras. A este se le introduce (de forma indirecta) el aporte subterráneo proveniente de la zona de recarga. Los resultados demuestran la pertinencia de esta estrategia de modelación.

La sensibilidad del modelo del sector Cuentas Claras a la recarga proveniente de la zona de montaña es bastante notable, ya que con solo cambiar su valor o cambiar la forma de distribución por grupos de infiltración, se obtienen diferentes propiedades hidrogeológicas y diferentes valores de la función objetivo.

Existe una gran incertidumbre en cuanto a la cuantificación real de la recarga hacia el acuífero. Es por eso que el problema se complejiza y requiere no sólo de una calibración de los parámetros hidrogeológicos del medio sino que de alguna forma también se debe ajustar la recarga.

RECONOCIMIENTO

A los especialistas de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, MSc. Jorge Luis Blanco e Ing. Jorge Luis Almirall por el conocimiento aportado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Blanco, J. L.; Lloréns, C., Licea, J., Almirall, J., Cordovés, J. y Lorenzo, A.** (2010). “Investigación Hidrogeológica de los Sectores Cuentas Claras y Cayo Redondo. Manzanillo (Primera Etapa)”, Informe inédito, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Cuba.
- Cabrera, E.** (2009). “Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea”, Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Civil, Especialidad Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Cabrera, E. y Dilla, F.** (2011). “Modelo de administración de acuíferos: MADA”, Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. 2, No.4, pp. 5-24, México.
- Gómez, M.; Cabrera, E. y Garrido, M.** (2009). “Tecnología AQUIMPE: fundamentos, aplicaciones y desarrollo actual”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. 30, No.2, pp. 21-30, La Habana, Cuba.
- Hernández, A. O.; Martínez, J. B., Dilla, F. y Llanusa, H.** (2001). “Modelación de Acuíferos”, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Lloréns, J. C.; Ivonnet, H. y Pérez, C.** (2011). “Investigación Hidrogeológica de los Sectores Cuentas Claras y Cayo Redondo. Manzanillo (Segunda Etapa)”, Informe inédito, Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, Cuba.
- Martínez, J. B.** (1989). “Simulación matemática de cuencas subterráneas: flujo impermanente bidimensional”, Monografía, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Martínez, J. B.; Llanusa, H., Hernández, A. O. y Dilla, F.** (2000). “Manual del Usuario del Sistema AQUIMPE”, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
- Ramos, L. C.** (2012). “Modelación matemática del acuífero “Cuentas Claras””, Tesis de diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Especialidad Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Schosinsky, G.** (2006). “Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos”, Revista Geológica de América Central, Vol. 34-35, pp. 13-30, Costa Rica.