

## MODFLOW y AQÜIMPE: dos aproximaciones a la realidad

Daniel Molina Pérez

Centro de Investigaciones Hidráulicas(CIH), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Habana, Cuba.

e-mail:[danielmolinaperez90@gmail.com](mailto:danielmolinaperez90@gmail.com)

Eric Cabrera Estupiñán

Centro de Investigaciones Hidráulicas(CIH), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, (ISPJAE). Habana, Cuba.

Empresa de Ingeniería y Proyectos del Petróleo (EIPP), Habana, Cuba.

e-mail:[ecabrera@cipp.minbas.cu](mailto:ecabrera@cipp.minbas.cu)

Lemuel Carlos Ramos Arzola

Centro de Investigaciones Hidráulicas(CIH), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. Habana, Cuba.

e-mail:[lemuel@cih.cujae.edu.cu](mailto:lemuel@cih.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

En este artículo se realiza un análisis comparativo entre algunos de los resultados que ofrecen dos sistemas de modelación de aguas subterráneas: MODFLOW y AQÜIMPE. Con vista a que los modeladores puedan utilizar en un caso de estudio las herramientas y capacidades de simulación de ambos modelos, se presentan varias estrategias de modelación que contribuyen a la similitud de los resultados de ambos sistemas, constituyendo uno de los resultados más notables del trabajo. Para el análisis comparativo se realiza la modelación matemática de un caso de estudio didáctico mediante ambos sistemas y posteriormente se modela el acuífero de Cuentas Claras (provincia Granma, Cuba) con el objetivo de analizar el comportamiento de ambos modelos ante un caso real en donde existen varias zonas de propiedades y de infiltración.

Palabras claves: AQÜIMPE, modelación matemática de acuíferos, MODFLOW, PMWIN.

## MODFLOW and AQÜIMPE: two approximations to reality

### SUMMARY

This article makes a comparative analysis between the results offered by two groundwater modeling softwares, such as MODFLOW and AQÜIMPE. To facilitate modelers the use in a case study the simulation tools and capabilities of both models, several modeling strategies are presented that contribute to the similarity of results of both systems. These strategies are one of the most remarkable results of this work. For comparative analysis, mathematical modeling of a teaching case study is performed using both systems and then the real Cuentas Claras aquifer is modeled (Granma province, Cuba) in order to follow the behavior of both models in a real case where several areas of infiltration and properties are considered.

Keywords: AQÜIMPE, aquifer mathematical modeling, MODFLOW, PMWIN.

## INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de estudiar y comprender la compleja dinámica de las aguas subterráneas, una de las técnicas más difundidas a nivel mundial es la modelación matemática (Hernández 2001). Ella se basa en una versión simplificada del sistema acuífero real y reproduce o simula de una forma aproximada los estímulos relevantes que actúan sobre el sistema (Cabrera 2009).

A finales de la década de los 80 el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) desarrolló un modelo tridimensional de flujo subterráneo. Este modelo se conoce como MODFLOW y puede simular el flujo freático tridimensional. El programa MODFLOW ha sido el modelo más utilizado, difundido y documentado a nivel mundial, al punto de convertirse en un estándar para la modelación de aguas subterráneas. Su código fuente es de dominio público y han sido compiladas numerosas versiones para computadoras personales (PC) (JICA 2011). En este trabajo se emplea el ProcessingModflow (PMWIN).MODFLOW que resuelve la ecuación diferencial de flujo tridimensional impermanente a través del método de las diferencias finitas (MDF), utilizando como elementos de discretización celdas con nodos centrados. Sus premisas fundamentales son que las direcciones principales de la conductividad hidráulica están alineadas con los ejes de coordenadas y que el flujo tiene una superficie potencial linealmente aproximada. Presenta la capacidad de simular flujo hacia drenes, flujo a través del lecho de ríos, recargas, pozos de inyección y recarga, evapotranspiración, barreras de flujo horizontal, flujo con distribución de densidades, embalses, efectos de resaturación, entre otros.

Por otro lado desde mediados de la década de los 80 el Centro de Investigaciones Hidráulicas de Cuba ha desarrollado un modelo numérico bidimensional conocido como AQUIMPE. Numerosas han sido las aplicaciones y experiencias que se han tenido con este modelo a nivel nacional e internacional, muchas de las cuales se encuentran recogidas en Dilla y Hernández (2001). AQUIMPE resuelve la ecuación bidimensional impermanente de las aguas subterráneas a través del método de los elementos finitos (MEF), utilizando como elementos de discretización el triángulo cuadrático. En un análisis realizado por Hernández (1993) sobre la comparación entre el MDF y el MEF con triángulo cuadrático se concluye, que este último parece tener mejores posibilidades para la simulación del flujo del agua subterránea. Sus consideraciones más importantes son que el flujo solo se mueve en dirección horizontal y que el medio es isotrópico. Es capaz de simular fronteras con niveles constantes y variables, recargas, pozos de inyección y recarga, evapotranspiración, interacción del sistema con embalses, fenómenos de intrusión salina, fronteras de descarga lateral, entre otros.

Las herramientas o programas de modelación utilizados para la solución de un problema pueden ser tan simples o tan complejos como lo requiera el problema, pero el método, las suposiciones y las capacidades de simulación deben ser evaluados para asegurar que la herramienta sea adecuada y pueda ofrecer resultados científicamente defendibles.

Resultaría oportuna la posibilidad de utilizar en casos de estudio las capacidades y prestaciones de ambos modelos. Para esto debería garantizarse de antemano que el comportamiento de los resultados del caso en cuestión, tanto en términos de niveles y de volumen, sean similares entre ambos sistemas. Sin embargo, hasta el momento se desconoce cómo se comportan los resultados entre dichos modelos para un determinado problema, en el que ambos programas sean capaces de ofrecer soluciones válidas. Por tanto, constituye un objetivo del trabajo realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en la simulación de los modelos AQUIMPE y MODFLOW para un caso de estudio real y definir estrategias de modelación que contribuyan a la similitud de los resultados con ambas tecnologías.

## SIMULACIÓN DE UN CASO DE ESTUDIO MEDIANTE LOS SISTEMAS DE MODELACIÓN PMWIN Y AQÜIMPE

En esta sección se presenta un caso de estudio didáctico extraído de Martínez et al. (2000) y sometido a algunas modificaciones. Está basado en un sistema acuífero con dos zonas de propiedades y sujeto a estímulos externos muy comunes en la práctica. El comportamiento del acuífero será simulado mediante los sistemas de modelación AQÜIMPE y PMWIN.

Para un análisis comparativo entre los resultados de ambos modelos se utilizan los nodos principales y secundarios creados en la triangulación de AQÜIMPE. Dichos nodos con sus respectivos niveles calculados por AQÜIMPE, son ubicados en PMWIN como pozos de observación para una comparación de cargas entre ambos modelos. Los niveles en estos pozos de observación (nodos de AQUIMPE), los cuales no coinciden necesariamente con el centro de las cuadrículas de PMWIN, son determinados por este último programa mediante un proceso de interpolación bilineal, ver Molina (2013).

Se presenta un acuífero confinado de aproximadamente 1,5 km<sup>2</sup> de área, cuyas condiciones de contorno son (figura 1); un contorno AB de carga conocida fija en el tiempo; un contorno CDEF de carga variable en el tiempo y un contorno GHIJ que descarga al exterior. Los restantes límites se consideran impermeables. El sistema presenta dos zonas de propiedades hidrogeológicas que coinciden con dos zonas de infiltración y cuatro pozos de bombeo espacialmente distribuidos. También se cuenta con el estado inicial del acuífero. La simulación se realizará de forma impermanente durante 12 meses con períodos de tiempo de 30 días. Una información más detallada de este caso, útil para la reproducción del ejercicio así como la presentación de resultados más específicos puede encontrarse en Molina (2013).

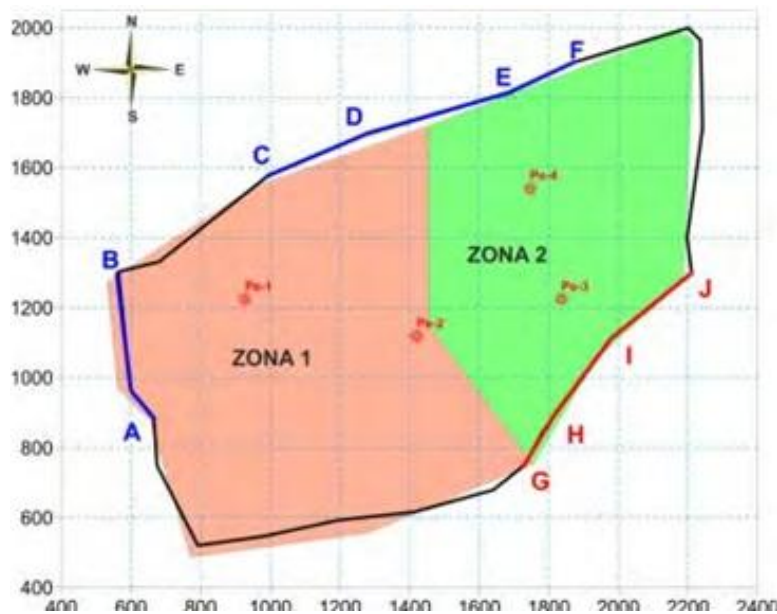


Figura 1. Límites del acuífero, pozos de extracción y zonas de propiedades e infiltración

### Creación del modelo

Se discretiza la zona de estudio en PMWIN con celdas de 100 m x 100 m (figura 2a). La discretización presenta 169 celdas activas. En sentido vertical, o sea en profundidad sólo se crea una capa, de modo que el modelo sólo podrá tener componentes horizontales de flujo (modelo bidimensional).

A las celdas pertenecientes a los contornos de carga conocida fija AB y carga conocida variable en el tiempo CDEF se le asignan tales características. Se declaran los pozos de extracción en las celdas que tengan implícita la posición real de los pozos. También se utiliza el paquete de pozos para representar la descarga lateral, puesto que PMWIN no cuenta con un paquete específico para dicho fenómeno. Se ubican pozos en todo el contorno GHIJ. El gasto que se introduce en cada pozo es el producto del gasto lateral y la longitud de la arista de la celda (100 m). Se asigna la recarga y las propiedades hidrogeológicas a cada una de las celdas atendiendo a su posición con respecto a las zonas de propiedades e infiltración. Por último se le asigna el estado inicial a las celdas del modelo.

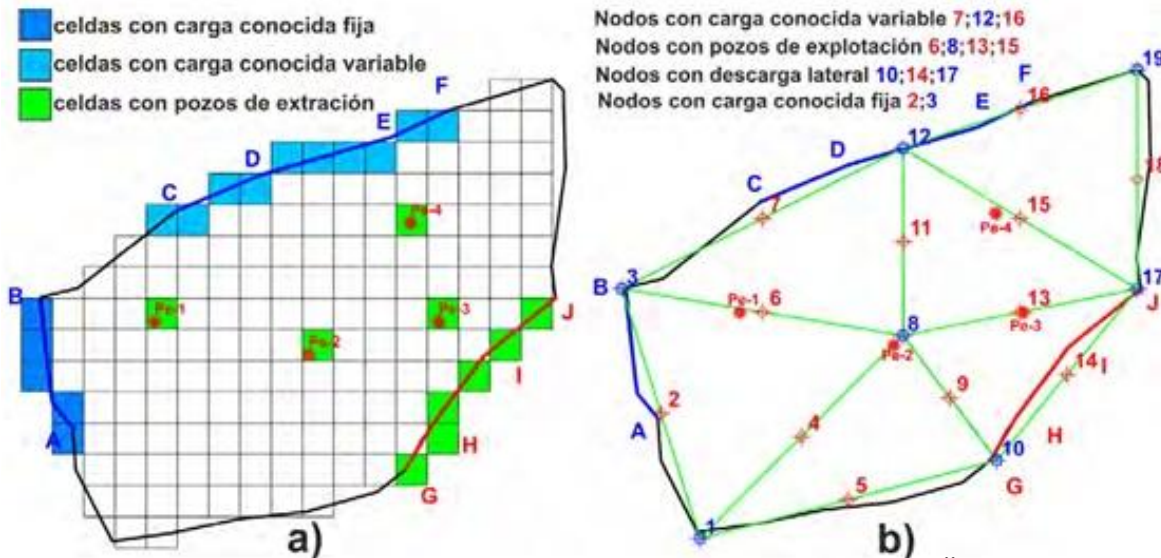


Figura 2. a) Modelo creado en PMWIN

b) Modelo creado en AQÜIMPE

La triangulación en AQÜIMPE se realiza atendiendo a: las propiedades hidrogeológicas, ubicación de los pozos de bombeo, límites del área a modelar y las zonas de infiltración. Dadas ciertas ventajas mencionadas en Hernández (1993), es posible triangular el sistema con menos elementos que el mallado en PMWIN, sin perder precisión en los resultados de la simulación. Se realizó una discretización del sistema con 6 elementos y 19 nodos (figura 2b).

De manera similar al procedimiento anterior, en AQÜIMPE se declaran nodos con carga conocida fija o carga conocida variable en el tiempo a aquellos nodos que se encuentren ubicados en las fronteras AB o CDEF respectivamente. Se asignan los pozos de extracción en aquellos nodos más cercanos a la posición real de los pozos. AQÜIMPE tiene la capacidad de simular flujo lateral de entrada o salida al sistema. En este caso se declara el gasto lateral mediante los nodos ubicados en la frontera GHIJ. Se asigna la recarga y las propiedades hidrogeológicas a cada uno de los elementos (triángulos) atendiendo a su posición con respecto a las zonas de propiedades e infiltración y se declara el estado inicial para todos los nodos del sistema.

### Resultados de la primera simulación

Una comparación entre los niveles de los 19 nodos en todos los tiempos de la simulación ofrece los siguientes resultados, ver (tabla 1):

Tabla 1. Error del sistema general (19 nodos)

Error medio absoluto (m)	1,93
Raíz del error medio cuadrático (m)	2,79
Diferencia entre los errores (m)	0,86

La raíz del error medio cuadrático (RMC) pondera aquellos puntos donde la diferencia entre los niveles (o residuos) es alta. Si la diferencia entre todos los niveles es similar, la RMC tendrá un valor muy cercano al error medio absoluto (EMA).

Teniendo en cuenta que la cantidad de nodos en AQÛIMPE es mucho menor que los existentes en PMWIN, el error mostrado en la tabla 1 demuestra las capacidades que presenta el modelo AQÛIMPE para brindar buenos resultados con pocos elementos. No obstante el valor de la RMC evidencia que existen elevadas diferencias de niveles en algunos nodos. Con el objetivo de incrementar la similitud de los niveles se realizan una serie de reajustes tanto en PMWIN como en AQÛIMPE que se comentarán a continuación.

### Reajustes en el modelo

Se decide realizar una discretización más fina que permita al modelo AQÛIMPE representar el comportamiento del sistema con un mayor grado de precisión. La nueva discretización cuenta con 24 triángulos y 61 nodos, ver figura 3 (b). Los reajustes en PMWIN consisten en representar los estímulos del sistema, excepto la lluvia, sólo en aquellas celdas de PMWIN que contengan los nodos de AQÛIMPE donde se declaran tales características. En otras palabras, se representarán los pozos de extracción, la frontera de descarga y fronteras de cargas conocidas de la forma que lo hace AQÛIMPE. Esto es, AB es un contorno de carga conocida fija, su declaración en AQÛIMPE es a través de los nodos 3, 4 y 6, entonces su representación en PMWIN no será en todas las celdas que atraviesan el contorno, sino sólo en las celdas que contengan los nodos anteriores (figura 3). De igual modo se procede con el contorno de carga conocida variable en el tiempo CDEF.

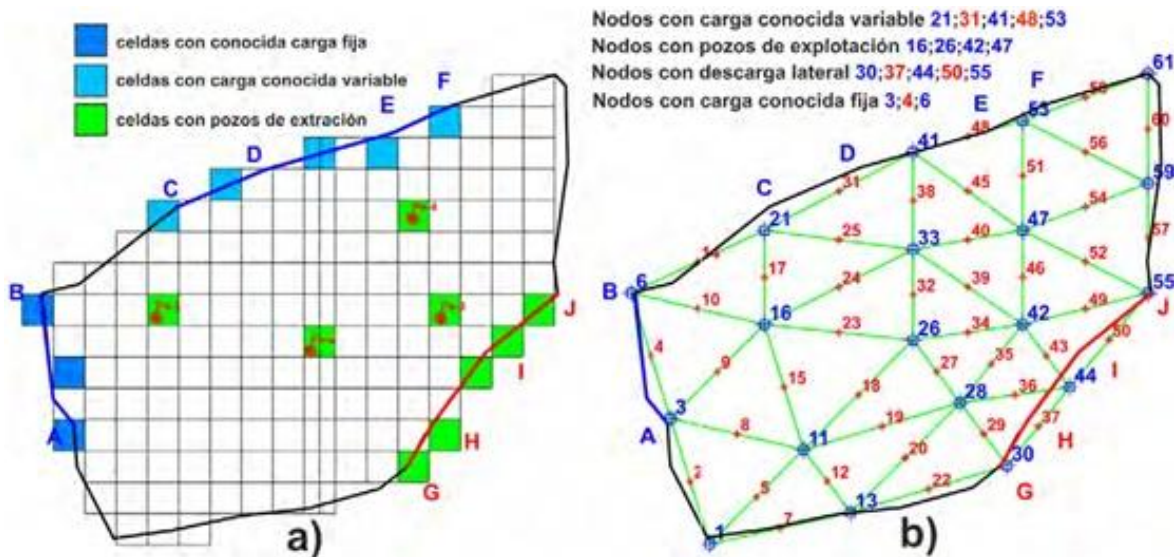


Figura 3. a) Modelo creado en PMWIN

b) Modelo creado en AQÛIMPE

Por otro lado, cuando en AQÜIMPE se declara un lado con gasto lateral, el modelo multiplica dicho gasto por la longitud del lado y extrae o incorpora al modelo la sexta parte del gasto total por cada nodo principal del lado y los restantes 2/3 por el nodo secundario correspondiente. De manera similar se declara la frontera GHJ en PMWIN, las celdas que contienen los nodos principales de cada lado con gasto lateral, pasan la sexta parte del gasto del lado y las celdas donde se encuentran los nodos secundarios pasan el resto.

Resultados de la segunda simulación

En contra de lo esperado, en esta simulación se incrementan las diferencias entre los niveles de AQÜIMPE y PMWIN. Tal efecto se refleja en el error medio del sistema (tabla 2).

Tabla 2. Error del sistema general (61 nodos)

Error medio absoluto (m)	2,38
Raíz del error medio cuadrático (m)	2,86
Diferencia entre los errores (m)	0,48

Sin embargo, la diferencia entre el EMA y la RMC disminuye aproximadamente a la mitad con respecto a la primera simulación, lo que significa que a pesar del incremento de las diferencias entre los niveles, ocurre un aumento en la uniformidad de tales residuos. Ante esta eventualidad se procede a crear los mapas de hidroisohipsas para los 12 tiempos de la simulación de ambos modelos, con el objetivo de observar el comportamiento de los niveles en el espacio. La figura 4 (b) muestra una superposición de los mapas de hidroisohipsas del tiempo 3, nótese cierto desfase entre las isolíneas de ambos modelos.

En la figura 4 (a) puede observarse que existen diferencias espaciales entre los nodos con carga conocida de AQÜIMPE y PMWIN, así como entre los nodos con pozos de extracción asignados, este hecho parece ser la razón de tal desfase, por lo que se decide realizar un nuevo reajuste donde coincidan los nodos con tales asignaciones.

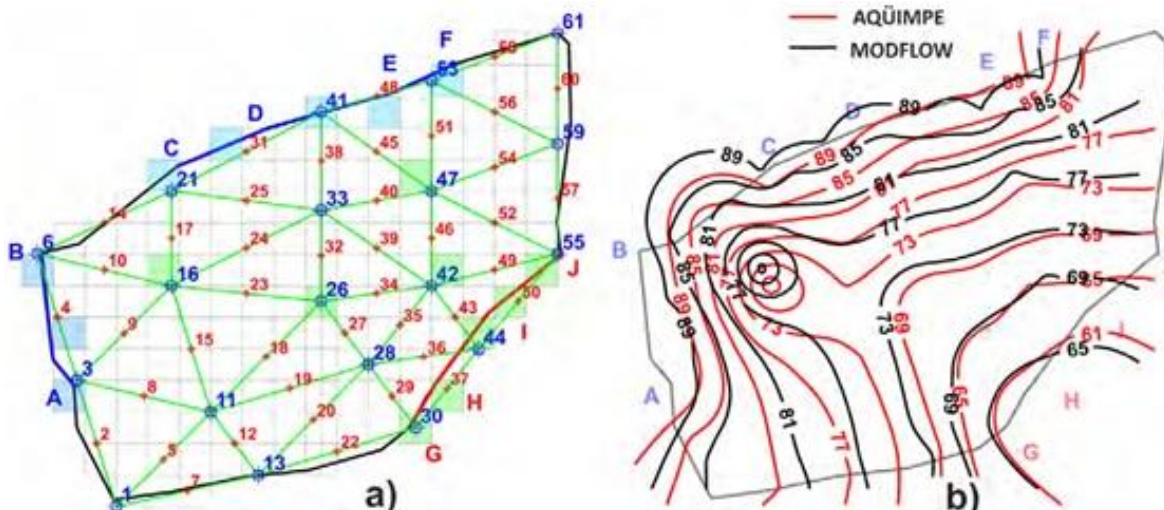


Figura 4. a) Superposición de la discretización de ambos modelos  
 b) Mapa de hidroisohipsas de AQÜIMPE y PMWIN (tiempo 3)

### Reajustes en el modelo de AQÜIMPE

En la figura 5 (a) se muestra la discretización reajustada. Véase que se modifica la ubicación espacial de los nodos principales con cargas conocidas y con pozos de explotación asignados en AQÜIMPE, hasta llevarlos a los centros de las celdas de PMWIN con dichas características. Lógicamente no se asegura que todos los nodos secundarios con tales asignaciones coincidan.

En la figura 5 (b) se muestra la superposición de los mapas de isolíneas resultantes de la simulación del sistema con los reajustes mencionados, la coincidencia de estos mapas corrobora que el desfase respondía a la no coincidencia espacial de los nodos que producen estímulos al sistema.

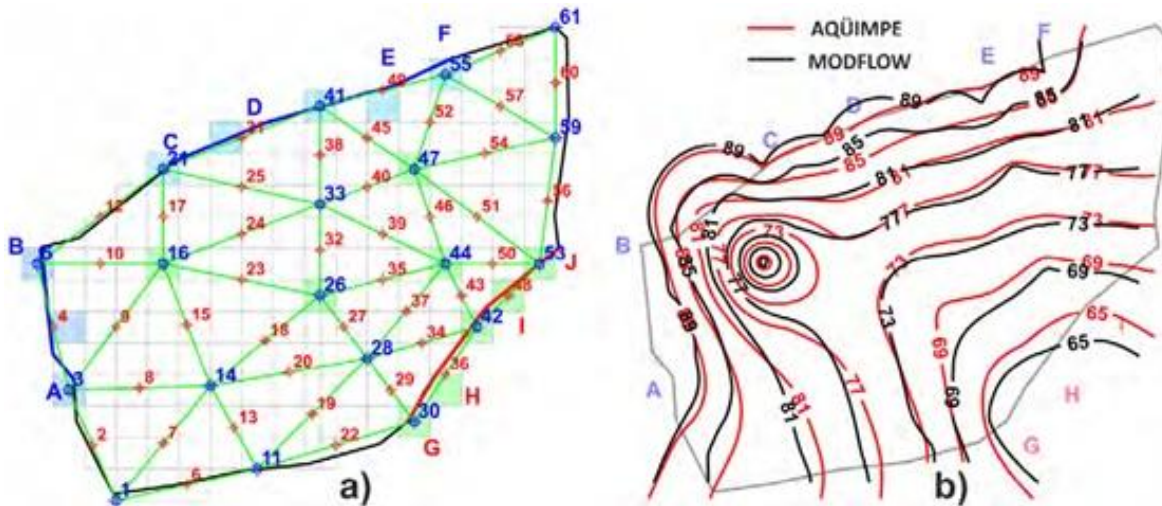


Figura 5. a) Superposición de la discretización de ambos modelos  
b) Mapa de isolíneas de AQÜIMPE y PMWIN (tiempo 3)

### Resultados de la tercera simulación

Las diferencias entre los niveles de ambos modelos en esta simulación presenta una disminución notable (tabla 3). En la figura 6 se realiza una comparación entre los niveles en los nodos 16 (Pe-1), 26 (Pe-2), 44 (Pe-3) y 47 (Pe-4) obtenidos por AQÜIMPE y por PMWIN. Estos constituyen los nodos a los que le fueron asignados los pozos de explotación, en los cuales existen altos gradientes y por tanto los niveles determinados en estos son altamente dependientes de la discretización realizada en la zona donde se encuentran, lo que los hace propensos a presentar diferencias de niveles entre ambos modelos.

Por otro lado en dicha figura se puede contrastar que las mayores diferencias entre los niveles se encuentran en los primeros dos intervalos de tiempo de la simulación. Según Llanusa et al. (1990), los niveles en los primeros intervalos de tiempo de una simulación no serán muy precisos y convendrá tener un período de calentamiento del modelo. Lo anterior se debe a la necesidad de compensar los errores por falta de equilibrio en el estado inicial de los niveles del agua subterránea. No habría razón para la existencia de tal período de calentamiento si el estado inicial se hubiese obtenido mediante una simulación del modelo. Por esta razón se decide despreciar los primeros dos tiempos del modelo en el análisis comparativo, resultando una disminución del error medio entre los niveles, como se muestra en la tabla 4. Obviamente la disminución del EMA significa que los modelos ofrecen una solución muy próxima cuando desaparecen los efectos de calentamiento del modelo. Por otro lado la similitud de la RMC con el EMA cuando

desaparecen tales efectos hace evidente que las diferencias entre los niveles de los nodos tienden a la uniformidad.

Tabla 3. Error del sistema general

Error medio absoluto (m)	0,89
Raíz del error medio cuadrático (m)	1,35
Diferencia entre los errores (m)	0,45

Tabla 4. Error del sistema general excluyendo tiempos 1 y 2

Error medio absoluto (m)	0,67
Raíz del error medio cuadrático (m)	0,90
Diferencia entre los errores (m)	0,23

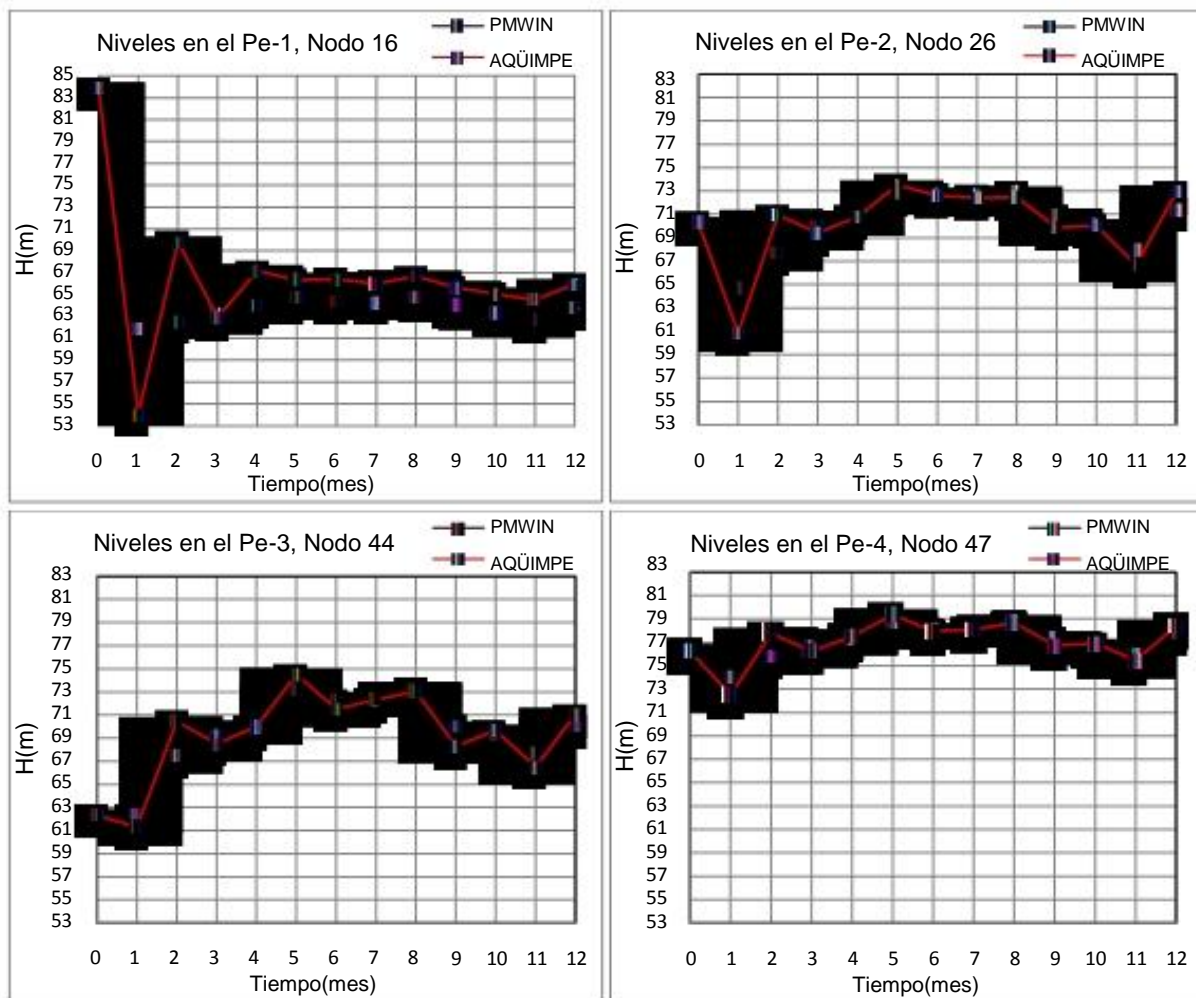


Figura 6. Comparación gráfica entre los niveles obtenidos por AQÜIMPE y PMWIN

### Balance hídrico

En las figuras 7 y 8 se muestran los gastos que entran al sistema a través de las fronteras AB y CDEF en ambos modelos. En la figura 9 se muestran los volúmenes del acuífero determinados



por ambos modelos. Nótese la similitud que alcanzan los gastos en las fronteras de carga conocida así como los volúmenes en el acuífero en la tercera simulación.

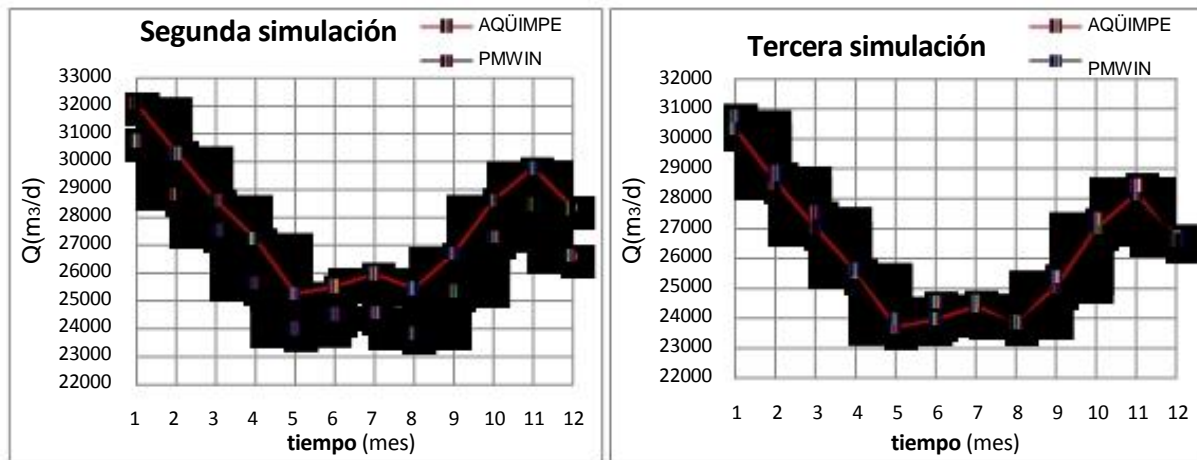


Figura 7. Gastos en la frontera de carga conocida fija AB

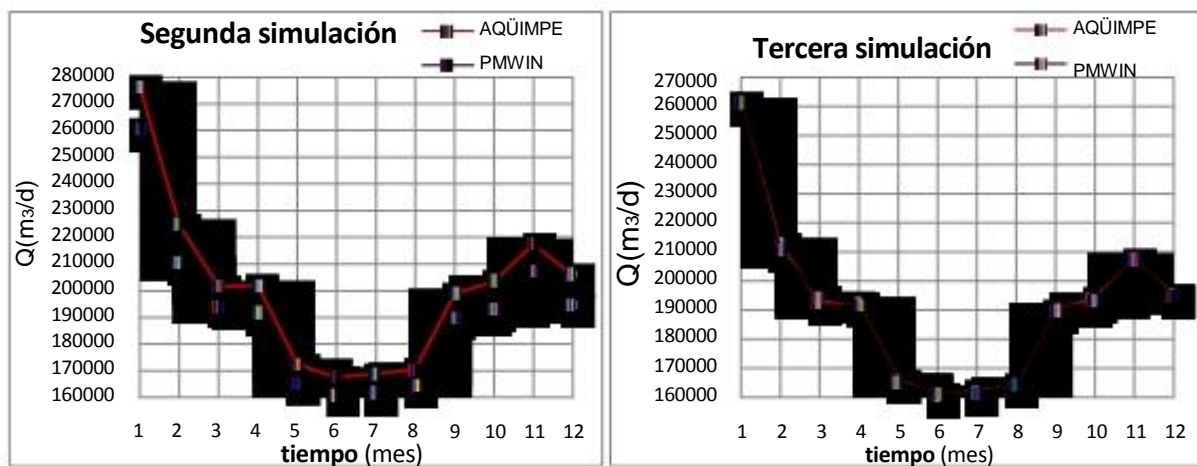


Figura 8. Gastos en la frontera de carga conocida variable en el tiempo CDEF

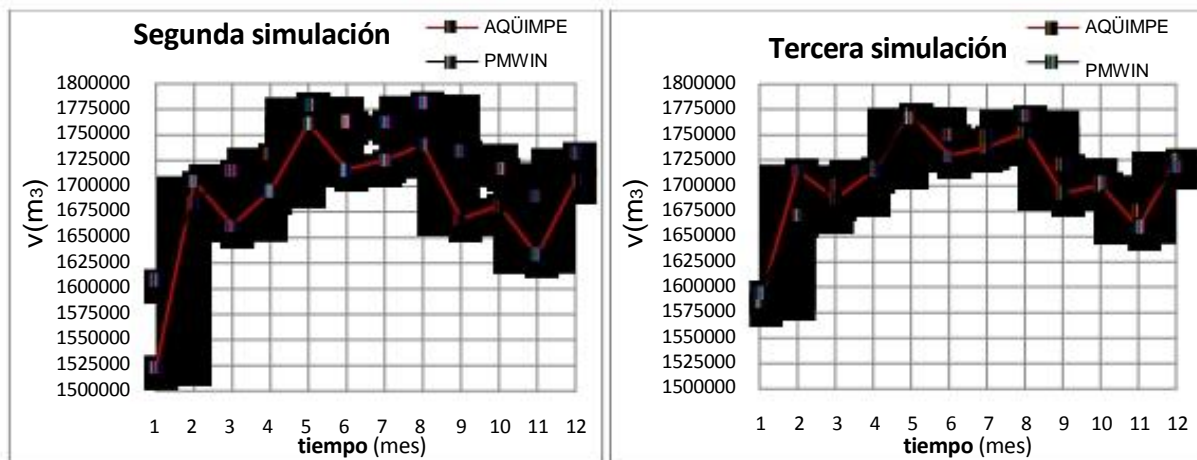


Figura 9. Balance hídrico general

## MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL ACUÍFERO “CUENTAS CLARAS”

La ciudad de Manzanillo en la provincia de Granma es una de las ciudades cubanas donde el abasto de agua proviene de fuentes subterráneas. En los últimos años el abasto de agua a esta ciudad ha presentado serios problemas atribuibles a una inadecuada evaluación y administración del acuífero “Cuentas Claras”, principal fuente de abasto a la ciudad. Por tales razones en el año 2012 se hace prioritario para el Instituto Nacional de Recursos Hidráulico (INRH) poder evaluar con mayor confiabilidad tanto el funcionamiento hidrodinámico de dicho acuífero como los recursos explotables para diferentes escenarios de pronóstico.

Ramos (2012) desarrolla el modelo conceptual de dicho acuífero utilizando el sistema de modelación AQUIPE. Este es sometido a un proceso de calibración automática para obtener las propiedades hidrogeológicas del acuífero. La recarga al acuífero se produce fundamentalmente en la zona sur ubicada cerca de la Sierra Maestra. Debido a la poca, o casi ninguna información existente para obtener esta importante variable, se decidió introducirla en el proceso de calibración, siendo necesario establecer varios escenarios.

En este capítulo se procede a crear un modelo del acuífero “Cuentas Claras” mediante PMWIN con el objetivo de simular el comportamiento regional del sistema y establecer una comparación entre sus resultados y los obtenidos mediante el sistema de modelación AQUIPE publicados en Ramos (2012). Para la creación del modelo conceptual en PMWIN es utilizada la información recopilada en dicho trabajo. El modelo creado en AQUIPE que se presenta más adelante corresponde al trabajo realizado en Ramos (2012).

### Modelo conceptual

Se trata de un acuífero libre cuya zona de estudio es de aproximadamente 140 km<sup>2</sup> de área. Las condiciones de contorno se definen como impermeables, de modo que la descarga del acuífero es producto solamente de la explotación. En el área de estudio existen un total de 51 pozos de explotación controlados por tres organismos diferentes: la Industria con 11 pozos, el Ministerio de la Agricultura con 12 pozos y el Acueducto, con 28 pozos. Además cuenta con una red de 7 pozos de observación con mediciones mensuales (figura 10).

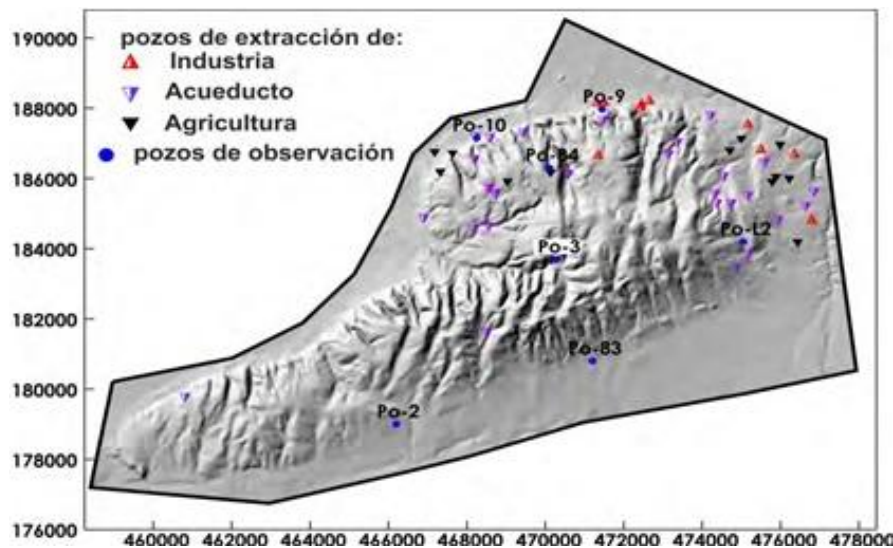


Figura 10. Sector “Cuentas Claras”

La recarga se produce fundamentalmente en la pre-montaña de la Sierra Maestra ubicada al sur del sector Cuentas Claras. Sin embargo los resultados de los estudios geológicos y geofísicos sugieren que el aporte de la recarga de la zona montañosa al sector Cuentas Claras proviene de fallas geológicas bajo este, por lo que el flujo debe ser de abajo hacia arriba con componentes verticales de velocidad significativas. Dado que AQÜIMPE no está capacitado para simular flujos verticales, Ramos (2012) excluye dicha zona del modelo conceptual e introduce el aporte de la montaña indirectamente en el sector como una lámina adicional a la lámina de la precipitación que ocurre sobre Cuentas Claras.

### Creación del modelo en AQÜIMPE

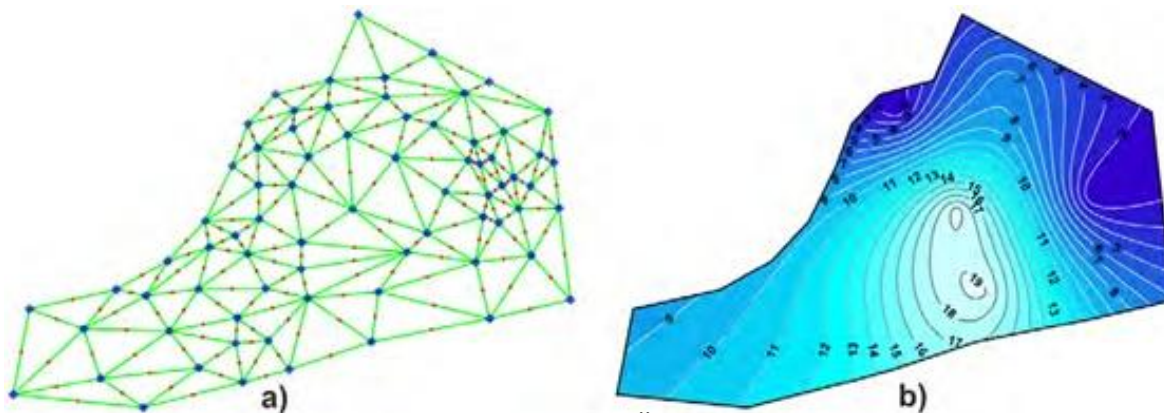


Figura 11. a) Discretización del sector para AQÜIMPE b) Estado inicial del sector

Se realiza la discretización del área, como en la figura 11 (a) atendiendo a: las propiedades hidrogeológicas, ubicación de los pozos de bombeo y de observación, límites del área a modelar, características hidrofísicas de los suelos existentes en el área y a los polígonos de Thiessen. La discretización cuenta con 121 triángulos y 264 nodos. Se le asignan los gastos de los pozos de explotación a los nodos más cercanos a estos pozos. El nivel o carga inicial en cada nodo (estado inicial) se obtiene mediante un proceso de interpolación y asignación empleando la información de niveles en los pozos de observación, ver figura 11 (b).

Atendiendo a las características hidrofísicas de los distintos tipos de suelos del área en cuestión, a la asignación de la recarga por zonas y a la discretización del área a modelar, se definieron 8 grupos de infiltración, ver figura 12 (a). Por otro lado se agruparon los triángulos en 10 grupos de propiedades de acuerdo a la información aportada por la geología y la geofísica con el objetivo de evaluar la influencia de la heterogeneidad del acuífero ver figura 12 (b).

### Creación del modelo en PMWIN

Dadas las dimensiones del sector y el hecho de que solo se producen estímulos producto de la recarga y los pozos de extracción, se crean celdas de 500 metros de lados. En dirección vertical solo se crea una capa puesto que se pretende lograr una analogía con el modelo creado en AQÜIMPE. La malla presenta 563 celdas activas (figura 13).

La ubicación de los pozos en el modelo de PMWIN está basada en los nodos de AQÜIMPE con pozos asignados como muestra la figura 13. Los pozos de extracción de AQÜIMPE representados en la figura tienen un tamaño proporcional al valor de sus gastos. En este caso no es conveniente reajustar los nodos con pozos asignados en AQÜIMPE puesto que con esta

discretización se calibró el sector “Cuentas Claras” y de ahí los valores de propiedades en las respectivas zonas así como los valores de recarga.

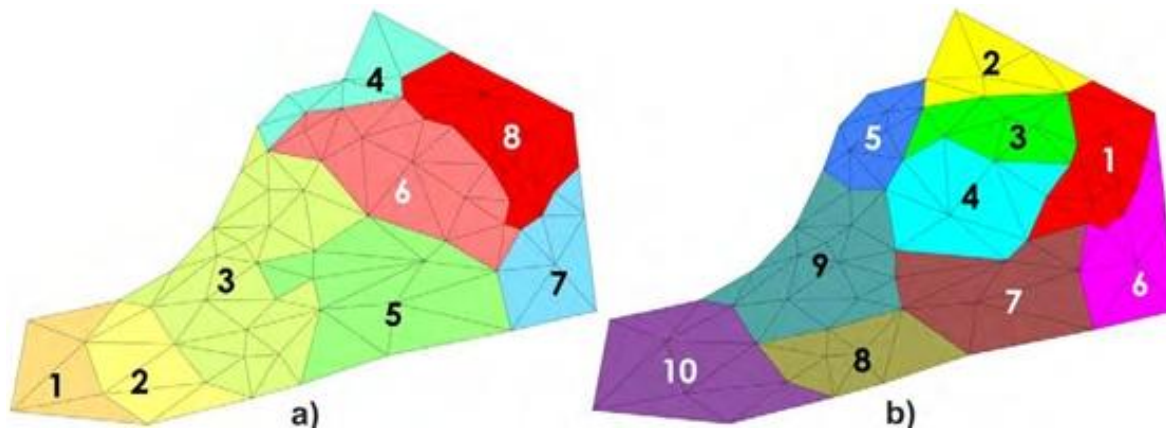


Figura 12. a) Grupos de infiltración b) Grupos de propiedades

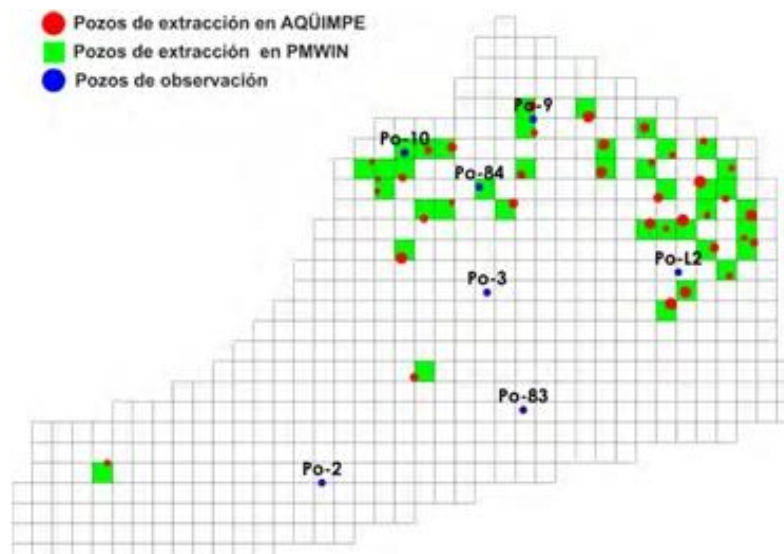


Figura 13. Discretización del área en PMWIN y asignación de los pozos de explotación

En la figura 14a y 14b se muestran los grupos de infiltración y propiedades creados en PMWIN respectivamente. En dicha figura se muestra (línea azul) el contorno original de las zonas creadas por Ramos (2012).

### Resultados de la simulación

De manera similar al ejemplo anterior, se introducen todos los nodos de la triangulación de AQÜIMPE como pozos de observación en PMWIN, y se realiza un análisis comparativo entre sus niveles. Aunque el EMA es admisible (tabla 5), existe una gran diferencia entre este y la RMC, esto es producto de que en algunos pocos nodos existen grandes diferencias de niveles. Los nodos que presentan estos problemas son precisamente los pozos de extracción.

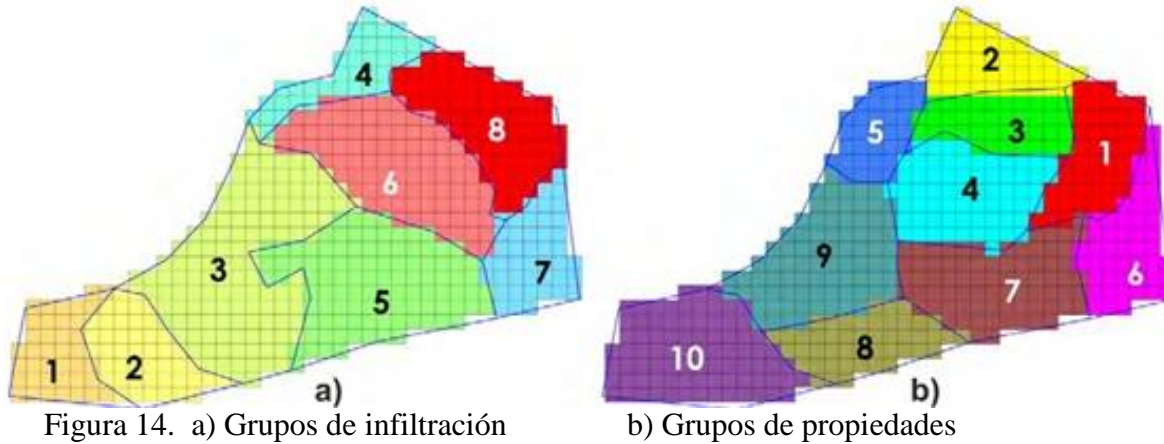


Tabla 5. Error del sistema general (264 nodos)

Error medio absoluto(m)	1.63
Raíz del error medio cuadrático(m)	4.20
Diferencia entre los errores(m)	2.57

#### Refinamiento de la malla

Se refinaron dos zonas en las cuales los pozos de extracción presentan grandes diferencias entre los niveles. Pueden observarse ambos refinamientos en el extremo derecho de la figura 15. Resulta lógico que en esas zonas existan tales problemas si se consideran las altas extracciones que en ellas ocurren y su cercanía con las fronteras impermeables como se observa en la figura 13. Nótese además, que se realiza un refinamiento en la frontera impermeable cercana a los pozos refinados, para una mejor representación de la misma. Aunque solo se muestra el resultado con estos tres refinamientos, los mismos no se realizaron a la vez, sino que su declaración fue de forma consecutiva y con la adición de cada uno se obtuvieron mejores resultados. Es importante destacar que el refinamiento debe realizarse de forma gradual, es decir, luego de la zona refinada se va discretizando en menor medida hasta llegar al tamaño original de la celda. La nueva discretización presenta 1287 celdas activas.

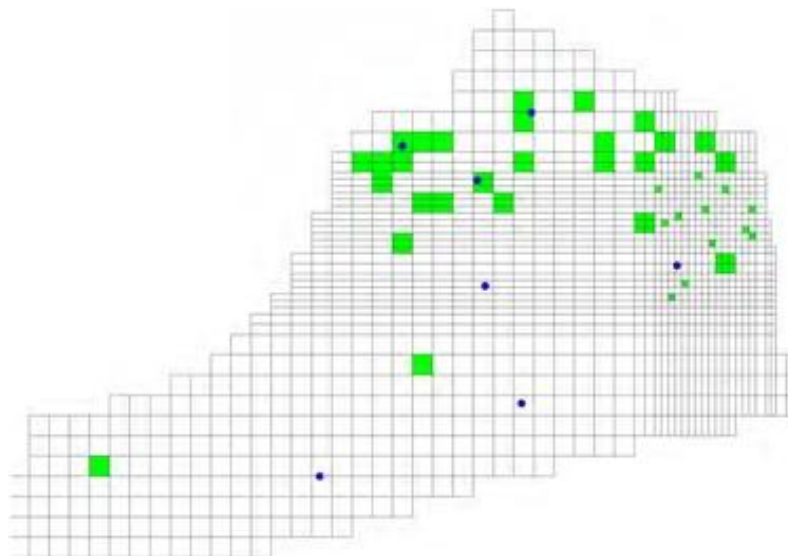


Figura 15. Refinamiento de la discretización del acuífero

Resultados de la segunda simulación

La figura 16 muestra la semejanza existente entre los niveles obtenidos por ambos modelos, así como la similitud de estos con los niveles reales medidos en algunos pozos de observación. En la tabla 6 puede observarse la disminución del error medio entre los niveles y su proximidad a la RMC para el mallado refinado, lo que indica una alta similitud en el comportamiento de ambos sistemas.

Por otro lado en la figura 17 se observa el incremento de la proximidad de los volúmenes en la última simulación. La figura 18 muestra una representación gráfica de las curvas de nivel para el tercer tiempo de simulación, donde se aprecia la semejanza existente entre las isolíneas determinadas por PMWIN y AQÜIMPE.

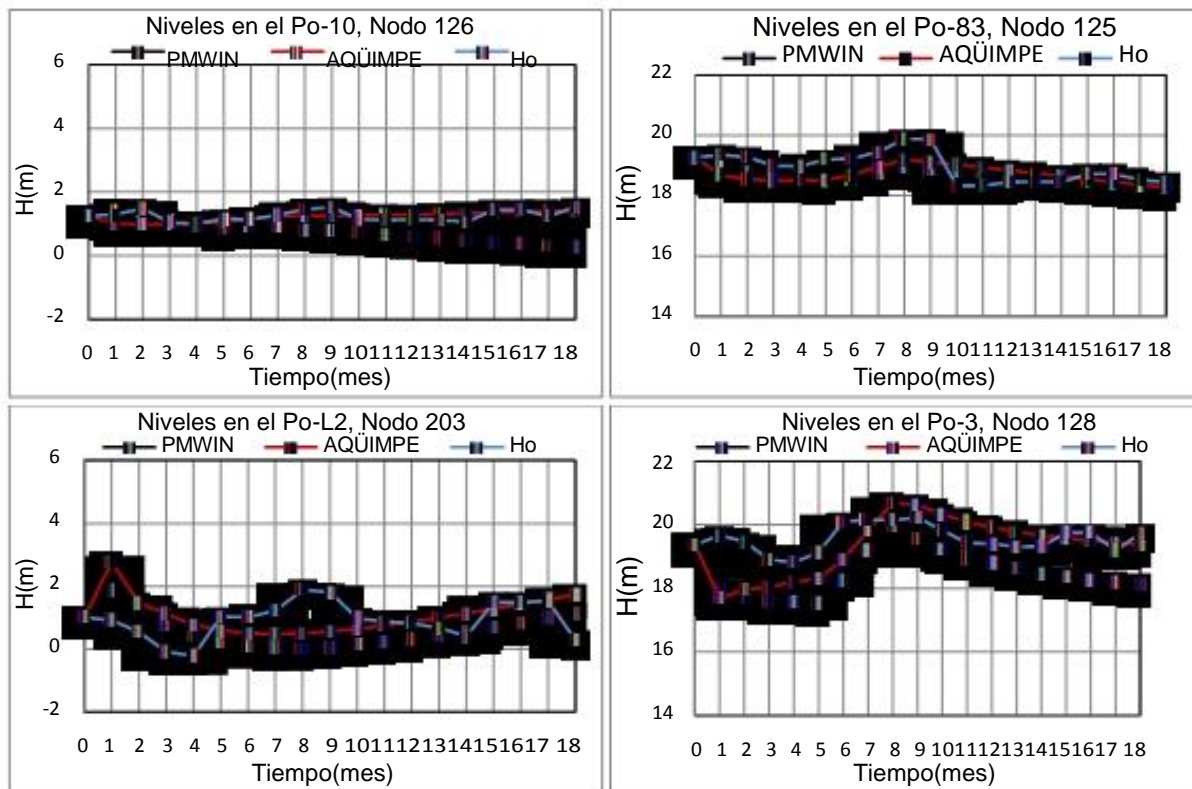


Figura 16. Niveles en algunos de los pozos de observación existentes

Tabla 6. Error del sistema general (264 nodos)

Error medio absoluto(m)	0.64
Raíz del error medio cuadrático(m)	1.15
Diferencia entre los errores(m)	0.51

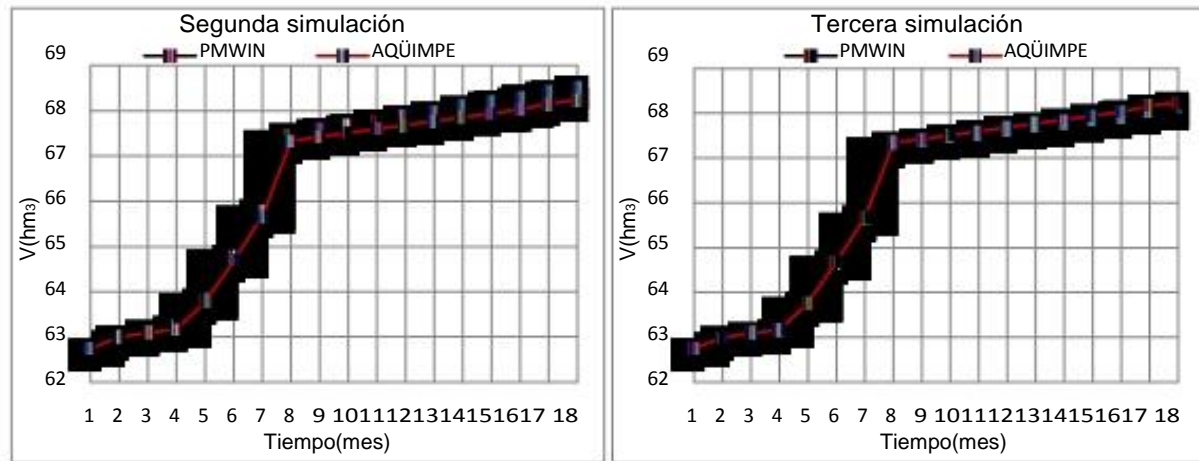


Figura 17. Balance hídrico general

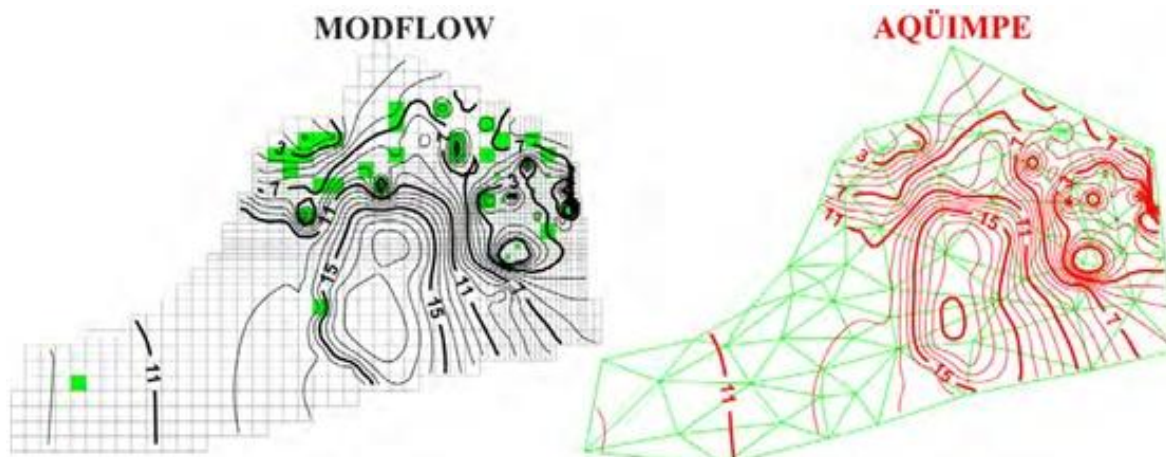


Figura 18. Mapa de isolíneas de AQÜIMPE y PMWIN (tiempo 3)

## CONCLUSIONES

Por primera vez se emplean los modelos AQÜIMPE y PMWIN (que tiene como motor de cálculo a MODFLOW) en un caso de estudio real, acuífero “Cuentas Claras” en la provincia de Granma con el objetivo de comparar las soluciones obtenidas y definir estrategias de modelación que permitan obtener resultados similares con ambas tecnologías.

Se demuestra que una concepción del sistema acuífero de manera independiente en cada modelo, incluso dentro del rango de lo correcto, no es suficiente si lo que se pretende es lograr una alta similitud entre los niveles de ambos sistemas de modelación.

Se definen un grupo de estrategias que permiten obtener soluciones similares en ambos modelos, las cuales se enumeran a continuación:

- Declaración similar de las fronteras de carga conocida entre AQÜIMPE y PMWIN, así como la coincidencia espacial entre los nodos con tales asignaciones de dichos sistemas de modelación. La estrategia consiste en asegurar la coincidencia entre los nodos principales

de AQÜIMPE y los nodos de PMWIN con cargas conocidas, obviamente no siempre se puede garantizar la coincidencia de todos los nodos secundarios.

- Coincidencia espacial de los nodos con pozos de explotación asignados, la envergadura de esta estrategia aumenta cuando en la vecindad del pozo existen altos gradientes, los cuales provocan una alta sensibilidad de los niveles del sistema con respecto a la discretización.
- Las fronteras de descarga lateral deben ser representadas de forma similar en ambos modelos y debe procurarse una coincidencia espacial entre los nodos con tales asignaciones. Además en esta estrategia debe asegurarse que pasen por los nodos coincidentes los mismos gastos.
- Aumentar de forma gradual el nivel de refinamiento del modelo en PMWIN en zonas donde existan altos gradientes, es decir, luego de la zona refinada se va discretizando en menor medida hasta llegar al tamaño original de la celda.
- Refinar en PMWIN aquellos contornos impermeables situados en zonas donde existan grandes volúmenes de flujo o elevados gradientes producto de extracciones o inyecciones cercanas, con el objetivo de lograr una representación más exacta de dichas fronteras.

## REFERENCIAS

- Cabrera E. (2009). “Sistema para la administración de la explotación del agua subterránea”, Tesis de doctorado, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana.
- Dilla F. y Hernández A. O. (2001) “Utilización de los modelos de acuíferos en la evaluación de proyectos de ingeniería o en la gestión y administración del agua subterránea”, Modelación de acuíferos, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría La Habana.
- Hernández A. O. (1993) “Estado actual de las técnicas numéricas en la modelación del flujo de agua subterránea”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XIV, No.1, pp. 7-19, La Habana.
- Hernández A. (2001). “Modelación de acuíferos. Monografía”, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
- JICA (2011). “Proyecto de mejoramiento de la capacidad de desarrollo y manejo del agua subterránea para la adaptación al cambio climático”, Curso de modelación de aguas subterráneas, INRH-CIH, Habana.
- Llanusa H., Dilla F., Hernández A. y Martínez J. B. (1990) “Metodología para la calibración de los modelos matemáticos de acuíferos subterráneos”, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana.
- Llanusa H., Hernández A. y Dilla F. (2000). “Manual del Usuario del Sistema AQUIMPE”, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana.
- Molina D. (2013). “Modelación matemática de acuíferos. Análisis comparativo MODFLOW-AQÜIMPE”, Tesis de diploma, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana.
- Ramos L. (2012). “Modelación matemática del acuífero Cuentas Claras”, Tesis de diploma, CIH, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría, La Habana.