

Tecnología Aqüimpe: fundamentos, aplicaciones y desarrollo actual

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la tecnología de la modelación matemática de acuíferos contribuye a mejorar el conocimiento de las disponibilidades de estos recursos y a desarrollar políticas racionales de administración que garanticen su desarrollo sustentable.

Específicamente en los sistemas acuíferos, dentro de las estrategias que persigue la modelación, los modelos de predicción revisten especial importancia pues permiten simular su comportamiento y sus respuestas ante diferentes acciones sobre el mismo, como son: las obras de drenaje o de recarga, el efecto que provoca sobre el agua subterránea las construcciones y las labores de minería, y las estrategias de explotación para diferentes condiciones naturales y artificiales [1].

Según [2], un acuífero puede ser analizado como un sistema de grandes complejidades pero que con ciertas hipótesis simplificadoras puede ser representado mediante un modelo. Este modelo está caracterizado por tener una gran distribución de parámetros, con condiciones de frontera y ecuaciones diferenciales demasiado complejas que no permiten su integración por métodos analíticos, por lo que el tratamiento por métodos numéricos constituye en la actualidad la única solución viable de este problema [3]. El modelo numérico del sistema acuífero constituye una herramienta de gran utilidad práctica ya que permite caracterizar su comportamiento hidrológico y ayuda a la toma de decisiones en la operación del mismo, sobre una base científica.

Como resultado, la factibilidad de la modelación se basa en la hipótesis de sustitución del medio cársico real por un medio poroso equivalente cuyas propiedades de comportamiento se determinan definitivamente durante la calibración del modelo. Adicionalmente, este medio equivalente puede ser heterogéneo, pero es isotrópico y a través de él ocurre un flujo impermanente, lineal y bidimensional.

Resumen / Abstract

La modelación matemática de acuíferos contribuye a evaluar las disponibilidades de estos recursos y a desarrollar una gestión que garantice su desarrollo sustentable. La definición de políticas de gestión óptima está basada en el modelo matemático del sistema en su conjunto, tanto desde el punto de vista regional, como local. Desde la década del '80 hasta el presente un grupo de especialistas, encabezados por el Dr. José Bienvenido Martínez ha venido desarrollando la tecnología AQÜIMPE para el estudio de sistemas acuíferos a escala regional, obteniéndose resultados muy positivos en su aplicación. En el presente trabajo se abordan las bases y experiencias obtenidas en la aplicación de esta tecnología, así como los trabajos de ampliación de la misma, desarrollados en la actualidad.

Palabras clave: modelación matemática de recursos hidráulicos, sistemas de información geográfica, método de elemento finito, calibración automática.

Mathematical modeling of aquifers can contribute to improve the evaluation of its water resources and to develop their sustainable management. The definition of optimal management policies is based on the mathematical model of the overall aquifer system from the regional and local points of view. Since the 80's years until the present day a group of experts have been developing the so-called AQÜIMPE technology to model and study aquifer systems on a regional basis, with very positive results so far. In this work the principles and experiences of this technology are presented as well as the recent extensions that have been included in it.

Keywords: water resources modeling, geographic information systems, finite element method, automatic calibration.

El carácter bidimensional no impide que se puedan variar espacialmente los espesores acuíferos, pero también esto puede obviarse si se trabaja con transmisividad en lugar de permeabilidad para caracterizar el medio. A partir de estas premisas en [2] se desarrolla el modelo AQÜIMPE para la simulación del flujo impermanente bidimensional de una cuenca acuífera subterránea a escala regional. Este modelo permite, además, simular problemas a escala local y la interacción entre un cuerpo de agua superficial, dígame un lago o un embalse y el acuífero que lo subyace siempre que exista un posible intercambio entre ellos.

En este trabajo se exponen las bases teóricas del modelo AQÜIMPE, se ilustran algunos de los problemas estudiados con este modelo que demuestran su validez y posibilidades reales de utilización para la planificación del uso del recurso y se plantean los nuevos tópicos desarrollados en el programa de computación y los principios de diseño tomados en cuenta para habilitar el empleo de este modelo a la gestión de los recursos hidráulicos subterráneos y la operación de los sistemas fuentes de distribución de agua.

FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA

La tecnología empleada en la elaboración de un modelo matemático depende en buena medida de la naturaleza del problema a resolver. En [2] se realiza un análisis de trabajos anteriores y señala la conveniencia del Método del Elemento Finito, utilizando el triángulo cuadrático como figura básica para la discretización, concluyendo que esta figura parece estar en un punto medio en el compromiso que es necesario establecer entre la flexibilidad que requiere el problema y las dificultades de programación.

Este criterio es apoyado por [4] y [5] cuando realiza la comparación entre El Método de las Diferencias Finitas (MDF) y el Método de los Elementos Finitos (MEF) con triángulo cuadrático y concluye que este último ofrece mejores posibilidades para la simulación del flujo del agua subterránea.

Entre las ventajas que brinda el MEF, se pueden citar las siguientes:

Tiene gran flexibilidad para representar las fronteras, siendo especialmente útil en el caso de la simulación de fronteras móviles, Ej. drenaje de minas, modelos de perfil de acuíferos libres o de descarga al mar, modelación de asentamientos, etc. [1].

Da la posibilidad de utilizar elementos de tamaño y forma variable, lo que permite representar zonas de mayor interés o de características distintivas. Esta posibilidad es de gran utilidad en la modelación de acuíferos cársicos [2].

Según [6], el problema se formula con la ecuación diferencial parcial de segundo orden, de tipo parabólica, que surge al analizar el flujo bidimensional, impermanente, lineal y libre o confinado en medio poroso con término fuente sumidero y condiciones de contorno filtrante o im-

permeable.

Este problema tiene una solución que se expresa a través de la carga hidráulica (o piezométrica) H , como variable dependiente, en función de las coordenadas del espacio bidimensional (x,y) y del tiempo (t) :

$$H = f(x, y, t)$$

donde H se mide sobre un plano de referencia dado. En acuíferos freáticos H es la cota de la superficie libre del agua.

La solución se desarrolla a partir del MEF, utilizando un triángulo cuadrático y aplicando la aproximación de Galérkin.

El sistema de ecuaciones algébricas lineales que resulta se resuelve, debido a la simetría de su matriz de coeficientes, mediante el método conocido como método de la raíz cuadrada o de Choleski.

El desarrollo del planteamiento matemático aparece en [2]. A continuación se describen los enunciados básicos del modelo:

La ecuación de continuidad en un flujo impermanente, freático y bidimensional del agua subterránea es la siguiente (en términos de caudal por unidad de área):

$$n \frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial (u h)}{\partial x} - \frac{\partial (v h)}{\partial y} \quad (1)$$

donde:

n : Porosidad efectiva.

h : Altura del agua (carga piezométrica).

u,v : Componentes del vector velocidad.

t : Tiempo.

x,y : Coordenadas espaciales.

Si el flujo es lineal, las ecuaciones de la velocidad en un medio poroso isotrópico son:

$$u = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial x} ; \quad v = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial y}$$

donde:

K : Permeabilidad del medio.

Sustituyendo en (1) se obtiene:

$$n \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial (Kh \cdot h_x)}{\partial x} + \frac{\partial (Kh \cdot h_y)}{\partial y}$$

donde:

h_x, h_y : Notación para derivadas parciales.

Si se añade un flujo f exterior (en unidades de LT^{-1}) y se toma positivo el flujo que sale:

$$f + n \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial (Kh \cdot h_x)}{\partial x} + \frac{\partial (Kh \cdot h_y)}{\partial y} \quad (2)$$

En esta ecuación el término $(K \cdot h)$ representa la transmisividad de un acuífero freático, la cual depende del espesor saturado h . Si se sustituye este término por un símbolo T que no depende de h , la ecuación (2) es válida

para acuíferos confinados, en cuyo caso el símbolo n sería el coeficiente de almacenamiento.

De esta manera, la ecuación (2) puede emplearse en ambos tipos de acuíferos con sólo dar el debido tratamiento al término que representa a la trasmisividad. Particularmente frecuente en Cuba es el caso en que las variaciones de h son pequeñas en comparación con sus valores absolutos, lo cual hace que el término $(K \cdot h)$ pueda aceptarse como independiente de esas variaciones y permite simplificar el proceso de modelación.

La modelación del acuífero se basa en una subdivisión del área que abarca en distintas zonas, atendiendo a sus propiedades hidrogeológicas. Estas zonas, a su vez, se subdividen en triángulos con la condición de que, dentro de cada triángulo, las propiedades sean constantes.

Discretización y definición de las condiciones de contorno en AQÜIMPE

La discretización (Figura 1) constituye una de las decisiones más importantes en la construcción del modelo numérico de un acuífero y es uno de los factores que se derivan del modelo conceptual. En la literatura no existe información sobre cómo abordar la discretización cuando se utiliza el MEF y el triángulo cuadrático, tema que por primera vez se recoge en [7].

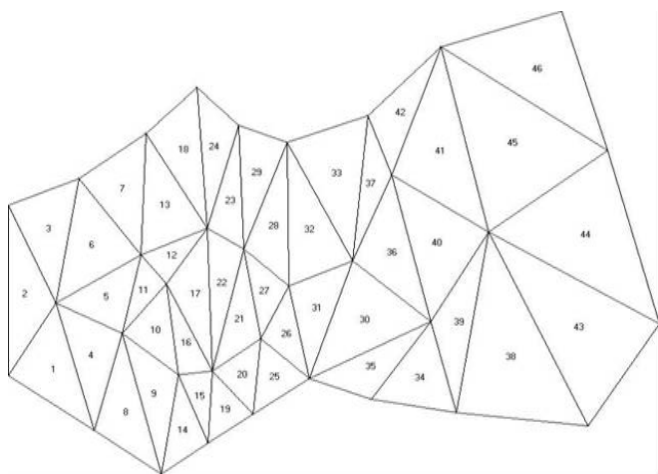


Figura 1. Ejemplo de discretización de una zona de estudio mediante el empleo del triángulo cuadrático como figura geométrica.

Es necesario destacar entre otros factores que intervienen en la discretización, el tamaño de los elementos, la posición de éstos y la asignación de las propiedades hidrogeológicas.

El tamaño del elemento: Este factor incide en la precisión del método numérico que se utiliza y el grado de detalle con que se puede representar el sistema real.

La utilización del MEF con el triángulo cuadrático, permite reducir el número de elementos sin perder precisión, ya que dentro de cada elemento, se integra la ecuación diferencial, pudiéndose determinar la carga en cada uno de sus puntos. Los elementos pequeños se emplean con

este método en las zonas de mayor complejidad geológica, donde las propiedades hidráulicas y geométricas del acuífero tienen gran variación, lo cual se refleja en el comportamiento de las hidroisohipsas. También se utilizan elementos pequeños en zonas de intensa explotación o recarga y donde se quiere aumentar la información sobre las respuestas del acuífero. En ambos casos, el tamaño del elemento no debe ser inferior a la base informativa disponible.

Posición de los elementos: En el caso de medios no homogéneos y aunque la recarga sea uniforme es necesario ser cuidadoso en la forma de hacer la triangulación, ya que para igual número y tamaño de los elementos, se pueden obtener diferentes resultados en dependencia de la forma en que se distribuyan éstos en una misma zona.

De lo anterior se concluye que en la modelación regional de los acuíferos caracterizados por su no homogeneidad, debe tratarse en la discretización de situar los elementos en una posición tal que puedan reproducir el comportamiento real de las hidroisohipsas.

Los límites del área a modelar o fronteras, tienen que estar bien definidos desde el punto de vista geológico e hidrodinámico. En el caso del MEF, las fronteras consideradas como impermeables son condiciones naturales del método que no requieren ser especificadas.

El otro tipo de frontera que se puede presentar es la que permite las entradas o salidas de agua subterránea y puede modelarse con este método numérico de dos formas: asignándole una carga conocida fija o variable, en cada paso de tiempo o definiéndole un gasto de salida por ese contorno.

En el primer caso el modelo dará por respuesta el caudal que entra o sale por la frontera con carga conocida y su magnitud en cada paso de tiempo se obtiene de la corrida de AQÜIMPE, [7]. Este caudal de descarga dependerá de las propiedades hidrogeológicas de los elementos del contorno y de los gradientes que se producirán según el estado de cargas en el acuífero.

La otra posibilidad que existe para representar fronteras permeables es la de asignarle un gasto a los nodos correspondientes de la frontera. Esta alternativa se utiliza cuando el caudal de salida o entrada es aproximadamente conocido o se quiere garantizar los aportes a otras fuentes. En este caso se obtendría como respuestas del modelo las cargas en el contorno que garantizan dicho caudal [8].

Asignación de las propiedades hidrogeológicas por elemento: En el mapa donde aparece la discretización del área del acuífero que se modela, se representan los resultados de los ensayos de bombeo que se han realizado en dicha zona, según los datos de archivo y estudios hidrogeológicos precedentes. Las situaciones que se pueden presentar son: elementos con varios datos de pruebas de bombeo, las cuales arrojan valores similares; ele-

mentos con varios datos pero con gran dispersión en las propiedades; y elementos sin dato alguno. En [1], se describe las acciones a desarrollar para cada caso e ilustra y demuestra la efectividad del empleo del MEF con el triángulo cuadrático.

■ APLICACIÓN DEL ALGORITMO SCE PARA LA RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA INVERSO

En el modelo AQÜIMPE las respuestas del sistema acuífero son simuladas mediante una ecuación diferencial en derivadas parciales de tipo parabólico, que rige el movimiento del agua en un medio poroso saturado, sobre un dominio espacial y temporal, sometido a condiciones iniciales y de frontera. Los parámetros utilizados en la obtención de la ecuación diferencial son espacialmente dependientes y no son directamente medidos desde el punto de vista físico, se determinan a partir de observaciones históricas del acuífero.

La calibración de un modelo de flujo se refiere a la demostración de que el modelo es capaz de reproducir los datos de campo como las cargas medidas y los flujos [3]. Se relaciona con la búsqueda del conjunto de parámetros que producen cargas simuladas y flujos que se relacionan con los datos de campo medidos. Encontrar ese conjunto de valores es lo que se conoce como problema inverso. En un problema inverso el objetivo es determinar los valores de los parámetros hidrogeológicos del acuífero a partir de la información de la carga.

Formulación del problema de optimización

Utilizando el criterio del error de salida, se debe resolver el siguiente problema de optimización con restricciones de cotas en los parámetros:

$$\begin{aligned} \min_P \quad & F(P), \quad F(P) = \sum_{i=1}^{no} (h_{oi} - h_{ci})^2 \\ \text{sujeto a} \quad & P \in \Omega = \{P \in \mathbb{R}^N, \\ & P_l \leq P_i \leq P_s, i = 1..N\} \end{aligned} \quad (3)$$

donde:

P es el vector de los parámetros (tiene 2ne componentes, es decir, dos parámetros por cada triángulo (elemento) de la discretización),

P_l es el vector de las cotas inferiores de los parámetros (tiene 2ne componentes),

P_s es el vector de las cotas superiores de los parámetros (tiene 2ne componentes),

no es el número de nodos que coinciden con los pozos de observación,

h_{oi} son los valores observados de la carga h ,

h_{ci} son los valores calculados de la carga hidráulica.

Como puede observarse, la solución del problema inverso a través de esta función lleva la utilización del problema directo para el cálculo de la carga h_{ci} .

Implementación del proceso de calibración automática

La calibración automática es aquella que realiza el proceso de calibración; pero desprovista de la subjetividad del modelador cuando éste realiza la calibración por el método manual o por ensayo y error. De manera que para que tenga lugar la calibración automática debe existir un procedimiento de optimización que permita alcanzar el óptimo de la función objetivo planteada [9].

La existencia de múltiples óptimos en el espacio de soluciones factibles, Ω , sugiere la adopción de un método de búsqueda global de los parámetros óptimos. En la literatura aparecen reportes sobre la aplicación de métodos y estrategias de calibración automática de parámetros. Algunos de estos trabajos, vinculados con el campo de la hidráulica subterránea, aparecen citados en [10] y [3].

Los algoritmos genéticos [11], [12], son capaces de resolver problemas altamente no lineales y complejos sin la necesidad de tener información acerca de la curvatura de la función, simplemente mediante un muestreo directo del espacio de búsqueda. Una de sus principales características es que trabajan modificando una población de soluciones en lugar de una sola solución, como en el caso de los algoritmos tradicionales. De esta manera es capaz de explorar diferentes áreas del espacio de búsqueda al mismo tiempo, por consiguiente las probabilidades de quedar atrapado en óptimos locales es mucho menor que la de los algoritmos tradicionales, pudiendo ser considerado entonces un procedimiento de optimización global [9].

A partir de los resultados presentados por [3], se implementó en la herramienta WinAQE el método de Evolución y Mezcla de Complejos SCE-UA [13], para la calibración automática de los parámetros de los sistemas de acuíferos.

El método de Evolución y Mezcla de Complejos SCE

El método SCE [13]-[16], está basado en una síntesis de cuatro conceptos que han tenido probado éxito en la optimización global:

- ◆ Combinación de aproximaciones aleatorias y determinísticas.
- ◆ El concepto de clustering.
- ◆ El concepto de una evolución sistemática de un com-

plejo de puntos extendiendo el espacio en la dirección de perfeccionamiento global.

♦ El concepto de evolución competitiva.

El uso de estrategias determinísticas le permite al algoritmo SCE hacer un uso efectivo de la información de la superficie respuesta para guiar la búsqueda, mientras la inclusión de elementos aleatorios ayuda a hacer al algoritmo flexible y robusto. La búsqueda comienza con un complejo de puntos seleccionado aleatoriamente que extiende el espacio factible completo Ω . Un número suficientemente grande de puntos podría ayudar a asegurar que el complejo contenga información respecto del número, localización y tamaño de la mejor región de atracción.

La implementación de una estrategia de clustering implícita ayuda a concentrar la búsqueda en la más promisoría de las regiones identificadas por el complejo inicial.

El uso de una estrategia evolutiva sistemática de complejos ayuda a asegurar que la búsqueda sea robusta y guiada por la estructura de la función objetivo. La robustez es resultado del hecho de que la estructura del complejo se puede enfrentar con éxito a superficies de la función objetivo rugosas, insensitivas y altamente no convexas y no está relativamente afectada por los mínimos locales de la función objetivo que son encontrados en la trayectoria hacia la solución global. Además, no necesita información sobre la derivada de la función objetivo.

La implementación de una estrategia de evolución competitiva se utiliza para perfeccionar la eficiencia de la convergencia global.

La descripción de los pasos del SCE es la siguiente:

0. *Iniciación.* Seleccionar $p \geq 1$ y $m \geq n+1$, donde p es el número de complejos y m es el número de puntos en cada complejo. Calcular el tamaño de la muestra $s = pxm$.

1. *Generación de la muestra.* Generar s puntos en el espacio factible $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Calcular el valor de la función f_j en cada punto x_i . En ausencia de información previa, use una distribución de muestreo uniforme.

2. *Ordenar los puntos.* Organizar los s puntos en orden creciente del valor de la función objetivo y almacenarlos en un arreglo $D = \{x_i, f_i, i = 1, \dots, s\}$, por lo que $i = 1$ representa el punto con el menor valor de la función.

3. *Partición en Complejos.* Particionando D en p complejos A^1, \dots, A^p , cada uno conteniendo m puntos, tal que:

$$A^k = \left\{ \begin{array}{l} x_j^k, f_j^k / x_j^k = x_{k+p(j-1)}, f_j^k = f_{k+p(j-1)} \\ j = 1, \dots, m \end{array} \right\}$$

4. *Evolución de cada complejo.* Evolución de cada complejo A^k , $k=1, \dots, p$ separadamente de acuerdo con el esquema del algoritmo de evolución competitiva del complejo (ECC).

5. *Mezcla de complejos.* Restituir A^1, \dots, A^p en D , tal que $D = \{A^k, k=1, \dots, p\}$. Organizar D en orden creciente de

los valores de la función.

6. *Chequeo de la convergencia.* Si los criterios de convergencia son satisfechos; parar, de lo contrario, retornar al paso 3.

La Figura 2, muestra la representación esquemática del algoritmo SCE:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de los ejemplos de aplicación en Cuba citados en [1], se encuentran:

- *Modelo del Acuífero Costero Sur de La Habana:* Se planteó la necesidad de confeccionar este modelo para evaluar el incremento de recursos hídricos en el acuífero debido a la retención de drenaje superficial hacia el mar sobre la base de la construcción de un dique.

- *Modelo del Acuífero Ariguanabo:* En la década de 1980 se realizan diversos proyectos preliminares para la protección de la cuenca Ariguanabo y la subcuenca Aeropuerto de la cuenca Almendares, en la provincia La Habana. El objetivo del modelo matemático es realizar el análisis preliminar de las medidas de protección contra las inundaciones en los objetivos económicos de interés de la zona de estudio.

- *Modelos del Acuífero de la Parte Norte de Ciego de Ávila:* El objetivo del modelo fue conocer el funcionamiento hidrodinámico del acuífero principal. Los resultados obtenidos en el proceso de calibración mostraron que los cambios en las propiedades y las acciones sobre el sistema en la mitad oeste no producían cambios significativos en el resto y viceversa, por lo que se propuso dividir el acuífero para su estudio en dos modelos.

- *Modelación de la interacción entre la Presa Ejército Rebelde y la Cuenca Vento:* En este modelo se realiza una aplicación de una nueva versión del programa AQÜIMPE a la cuenca Vento interactuando con la Presa Ejército Rebelde, para modelar la interacción entre esta cuenca y la mencionada presa.

- *Modelo de la Cuenca Jaruco-Aguacate:* Se realizó un análisis hidrodinámico de la cuenca para la simulación del comportamiento del agua subterránea en régimen impermanente, antes y después de la puesta en marcha del Acueducto El Gato.

- *Modelo del Acuífero M1-Matanzas:* El trabajo tuvo como objetivo demostrar la utilidad de emplear de forma simultánea el modelo acuífero y los modelos hidrológicos determinísticos para evaluar la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas.

Esta tecnología se ha empleado además en:

- *Modelo de interacción entre el Lago Tequesquitengo (México) y su acuífero subyacente:* En [17]-[19], mediante simulaciones hipotéticas de un periodo de 60 años, se investiga el origen del llenado del lago en el siglo XIX, se conforma una explicación probable como causa del descenso del lago y se proponen recomendaciones para detener este descenso.

- *Modelo de la Interacción entre el lago y el acuífero de*

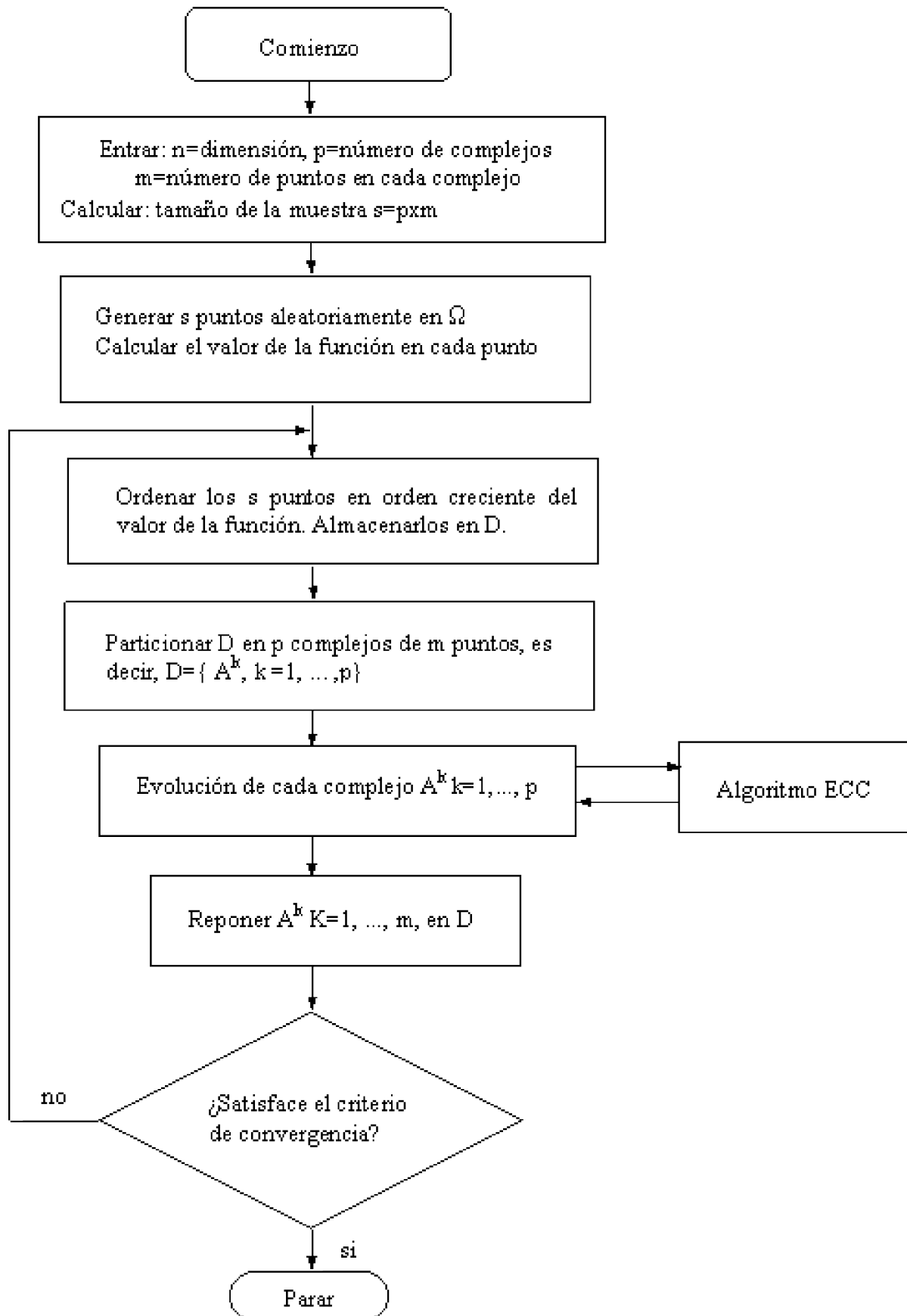


Figura 2. Esquema del procedimiento de trabajo del método SCE.

la cuenca Pátzcuaro (México): En [20] se caracteriza la cuenca de Pátzcuaro y se logra una calibración del sistema acuífero-lago de modo que se reproducen los niveles observados en el lago y las observaciones piezométricas del nivel del agua subterránea con un nivel de precisión aceptable para este tipo de estudios.

A partir de los principales desarrollos en el campo de la modelación matemática y su integración con los sistemas de información geográficos, bajo los esquemas actuales de comunicación e intercambio de información que proporcionan los sistemas operativos y las herramientas de programación que hoy existen en el mercado, se hace necesario actualizar o extender la tecnología AQÜIMPE, con vistas a continuar ofreciéndola como una importante solución para el estudio del comportamiento de los acuíferos.

En [21] se demuestra la importancia que tienen ciertos procesos auxiliares pero indispensables para ejecutar el modelo AQÜIMPE, como es el importante tema de todo el trabajo previo con mapas de la zona de estudio: mapas geológicos, mapas de uso del suelo, la red hidrográfica, la ubicación de pozos de bombeo y de observación, la red pluviométrica y mucha más información.

Con todos estos datos el especialista tiene que conformar la triangulación o mallado de la zona de estudio y creará entonces un nuevo plano, del cual posteriormente tendrá que extraer una cantidad importante de información, en su gran mayoría geométrica, que será necesaria para las corridas del modelo.

En [22] se abordan los resultados alcanzados en la concepción e implementación de la herramienta AQTriGeo para producir y gestionar toda la base informativa de carácter geográfico y geométrico que requiere AQÜIMPE.

Hasta el momento de su implementación, todo el proceso de triangulación se realizaba de forma manual, lo que constituía un trabajo agotador y requería de bastante tiempo y dedicación. Se requería, además, de la experiencia necesaria para lograr un buen mallado, con el riesgo, no obstante, de cometer errores que implicaban comenzar el proceso de triangulación, nuevamente desde el principio.

AQTriGeo, es una herramienta SIG que permite a los usuarios de AQÜIMPE definir y eventualmente modificar las triangulaciones necesarias para sus proyectos, con la característica de que este proceso está completamente soportado por métodos automatizados, con los consiguientes beneficios en cuanto a tiempo de respuesta y eficiencia en las etapas de mantenimiento del modelo.

CONCEPCIÓN DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA WINAQE

Hasta el presente todas las actualizaciones realizadas al modelo basaron su implementación en la versión original del programa, con entorno de ejecución MS-DOS. De ahí que las posibilidades para interactuar con AQTriGeo, permitiendo flujo de información en ambos sentidos, estu-

vieran muy limitadas. Adicionalmente, el entorno de ejecución en MSDOS impone restricciones en cuanto al volumen de información a mantener en memoria, por lo que se hacía inoperable el tratamiento de las salidas de AQTriGeo, consistentes en mallas de gran cantidad de elementos, necesarias para el estudio del comportamiento local de los niveles del acuífero en las cercanías de los pozos de bombeo. Se requería entonces, la búsqueda de soluciones que habilitaran el empleo del modelo como una herramienta más para los propósitos de operación.

Las tareas que se acometieron para cumplir con las nuevas exigencias fueron:

- ◆ Conversión del código del programa original de su versión para MS-DOS a la plataforma Windows, adoptando para ello los preceptos de la programación orientada a objetos y la programación guiada por eventos.

- ◆ Diseño de la ejecución aplicando los conceptos de programación multihilo, de forma tal de garantizar la ejecución simultánea y la optimización del tiempo de respuesta, en todas las etapas donde fuera necesario.

- ◆ Rediseño de la interfaz de configuración del modelo, permitiendo mayor grado de interactividad con los especialistas y usuarios en general.

- ◆ Diseño e implementación de los tipos de datos del programa mediante la concepción de una jerarquía de clases que facilitara la reusabilidad del código e hiciera la aplicación más robusta, permitiendo el tratamiento dinámico de mayores volúmenes de información.

- ◆ Implementación de módulos de importación y exportación de datos, con vistas a lograr su fácil articulación con las herramientas SIG.

- ◆ Incorporar proceso automático de calibración de los parámetros del modelo, a partir de la implementación de algoritmo de optimización, de búsqueda global.

A continuación se fundamentan, las características principales, presentes en esta nueva versión.

Organización del proyecto: De acuerdo con los patrones actuales de diseño de aplicaciones, en WinAQE se estructura el proyecto en forma de árbol. WinAQE denomina al proyecto como Problema, al cual se le puede asignar un título que indique el caso concreto de estudio que trate.

La estructura arbórea del problema se compone de un grupo de archivos y un grupo de escenarios. El primer elemento, o elemento raíz, es aquel que representa justamente el problema en cuestión. A continuación aparecen el resto de los escenarios y archivos de datos que contiene el problema. La secuencia de estos archivos sigue un orden lógico, de modo tal que induzca al modelador a realizar una entrada de datos ordenada. Aunque esto no es requisito para todos los casos, es conveniente señalar que en el modelo AQÜIMPE existe un conjunto de datos que depende de la información previa introducida. Por ejemplo, el número de nodos para los cuales se indican sus

coordenadas, debe coincidir con el número de nodos que aparece contenido como resultado del análisis de la información relativa a los elementos (triángulos). Para casos como éste, se realiza, de modo automático, el chequeo de consistencia correspondiente y se genera el número apropiado de elementos, de ser necesario, con vistas a reducir los errores en la definición del problema. El problema tiene asociado un título que identifica el caso de estudio.

Los escenarios: Los escenarios permiten contener, para un mismo problema, diferentes variantes de configuración de éste, y por tanto, de solución. Este es un aspecto importante cuando se estudian diferentes combinaciones de datos y parámetros para el modelo, y se requiere arribar a conclusiones sobre los resultados obtenidos. De modo general, el modelador, para cada caso de estudio, construye un grupo de escenarios y los somete a prueba.

Fundamentalmente, los escenarios, dentro del modelo de simulación AQÜIMPE, son empleados para dos fines bien definidos:

1- El proceso de calibración de los parámetros del acuífero: En este caso, se generan tantos escenarios como variantes de combinaciones de valores de los parámetros se deseen probar. En las versiones anteriores del programa de computación AQÜIMPE, esta estrategia se empleaba para la calibración de los parámetros del modelo por el método de ensayo y error.

2- Evaluar diferentes políticas de explotación del recurso: Para los propósitos de administración del recurso, y una vez el modelo se encuentre debidamente calibrado, conviene evaluar las implicaciones de la política de explotación ante diferentes condiciones de recarga del acuífero. La capacidad de la herramienta para actualizar su base de datos y generar y evaluar de manera flexible y eficiente estas variantes, hacen posible extender su empleo, de forma discreta, a los problemas de operación.

En la implementación de WinAQE, se consideró de importancia el diseño y manejo de los escenarios, desde el propio entorno de trabajo (Figura 3), atendiendo a las razones, arriba expuestas. Las operaciones de generación de un nuevo escenario y activación de éstos, resultan entonces simples de realizar en esta nueva versión, desde la barra de herramienta del navegador del problema, mediante la implementación de las funciones de copia de archivos, borrado, etc.

Diseño de la estructura de datos y su tratamiento: Como se mencionó anteriormente, el diseño de la estructura de datos del programa se realizó siguiendo los principios del paradigma de la orientación a objetos, construyendo las nuevas especificaciones, mediante la concepción de una jerarquía de clases que respondiera a los requerimientos para el manejo de la información del modelo.

Con vistas a garantizar la reusabilidad del código para asimilar futuras ampliaciones del modelo, se desarrollaron para WinAQE nuevos modelos y abstracciones de

datos, dirigidos en lo fundamental al tratamiento de los tipos de variables, los tipos de archivos de trabajo, y los elementos del sistema de ecuaciones.

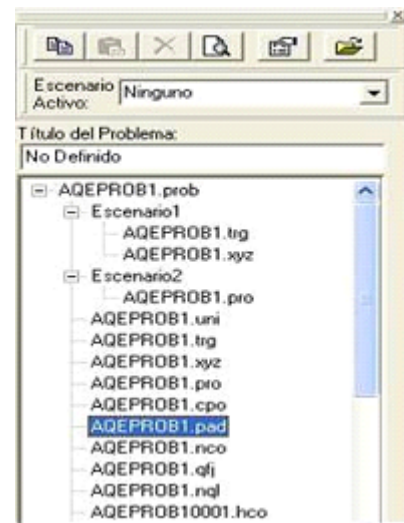


Figura 3. Vista para el manejo de los escenarios desde WinAQE.

Para eliminar cualquier limitante desde el punto de vista del volumen de información de entrada, procesamiento y salida capaz de manejar el programa, se aprovecharon las potencialidades implícitas del ambiente de trabajo para tratamiento de la memoria dinámica, haciendo un uso amplio de las definiciones de arreglos y listas dinámicas, dentro de los tipos de datos abstractos definidos, para aquellos datos y variables cuyo tamaño no es posible definir de manera predeterminada. Las pruebas de desempeño se realizaron para una amplia gama de especificaciones de malla). En todos los casos, los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Ejecución del modelo: La fase de ejecución del modelo comienza con la selección de los tiempos para la simulación. Tomando como base los archivos de tiempo, dado que el número de archivos disponibles desde la etapa de captación de datos puede ser diferente para cada grupo de archivos (gastos puntuales en el tiempo, gastos laterales en el tiempo, etc.), en WinAQE se realiza un análisis previo de las combinaciones posibles de tiempo inicial y final, de tal modo que se protege al usuario de cometer errores en esta selección.

Desde la etapa de captación de datos y durante toda la corrida, aparece visible en la parte inferior de la ventana principal del programa, la vista de errores de la corrida, la cual va mostrando el estado del proceso de simulación e informa de cualquier inconsistencia que dificulte la obtención de los resultados, de forma tal que se facilite la información necesaria para realizar las acciones de corrección pertinentes.

Los resultados obtenidos se muestran agrupados según su contexto, como se muestra en la Figura 4. La integración de WinAQE con las herramientas SIG viene dada

por la posibilidad que el primero brinda para importar/exportar en formato texto y archivos de base de datos, la información previa y procesada, respectivamente, para cada uno de los tiempos.

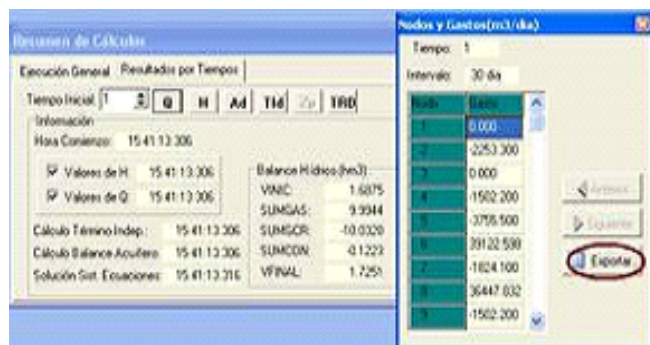


Figura 4. Presentación de los resultados y opción para exportarlos.

CONCLUSIONES

Los recientes desarrollos de la nueva versión del programa AQUIMPE, WinAQE, y el sistema de información geográfica AQTriGeo, han significado un salto cualitativo importante en la integración de estas tecnologías, que repercute positivamente, tanto en el proceso de modelado y generación de la malla, como en la interacción modelador-programa.

La versión WinAQE no impone restricciones en cuanto al volumen de información de entrada a mantener en memoria, por lo que se ha hecho operable la información suministrada por AQTriGeo, en particular, aquella consistente en mallas de gran cantidad de elementos.

Los tiempos de respuesta obtenidos con la versión WinAQE son cortos, por lo que se ajusta a los intereses que se persiguen durante el proceso de simulación.

La implementación de la estrategia de trabajo con escenarios, facilita la tarea de pronóstico a realizar con la herramienta WinAQE.

La implementación del proceso de calibración automática como función incorporada en WinAQE, utilizando el método SCE, representó un resultado importante para la identificación de los parámetros óptimos del modelo y dimensionó el uso de esta herramienta, desde el punto de vista práctico.

RECONOCIMIENTO

Los autores desean agradecer la valiosa ayuda brindada por el Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez para la realización de las tareas que dieron como resultado la implementación de la herramienta WinAQE.

REFERENCIAS

- [1] Hernandez, A. et al. *Modelación de acuíferos*. Monografía, La Habana, Cuba. 2001.
- [2] Martínez, J.B. Simulación matemática de cuencas subterráneas: Flujo impermanente bidimensional.

Monografía, Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba. 1989, 33p.

- [3] Mesa, H. *Solución del Problema inverso en Modelo de Flujo de Agua Subterránea mediante algoritmo de convergencia Global*. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Departamento de Matemática, Fac. Ing. Civil, ISPJAE. 2000.
- [4] Hernández, A. *La explotación de acuíferos a escala regional y la modelación matemática como su base tecnológica*. Tesis en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas. 1991.
- [5] Hernández, A. Estado actual de las técnicas numéricas en la modelación del flujo de agua subterránea. Ingeniería Hidráulica. Vol. XIV. Nº.1 pp. (7-19). 1993.
- [6] Martínez, J.B., et al. Manual de usuario del sistema AQUIMPE. Monografía, Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba. 1995.
- [7] Llanusa, H. et al. Metodología para la calibración de modelos matemáticos de acuíferos subterráneos. Facultad de Ingeniería Civil, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Grupo de Modelación Matemática de Acuíferos. ISPJAE, Marzo, 1990.
- [8] Dilla, F., Batista, J.C. y Valdés, L. Modelación matemática del acuífero Ariguanabo. Etapa Final. Informe Técnico. INRH. 1998.
- [9] G. R. Faulhaber, "Design of service systems with priority reservation," in *Conf. Rec. 1995 IEEE Int. Conf. Communications*, pp. 3-8.
- [10] W. D. Doyle, "Magnetization reversal in films with biaxial anisotropy," in *1987 Proc. INTERMAG Conf.*, pp. 2.2-1-2.2-6.
- [11] Davis, L. "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold. 1991.
- [12] J. G. Kreifeldt, "An analysis of surface-detected EMG as an amplitude-modulated noise," presented at the 1989 Int. Conf. Medicine and Biological Engineering, Chicago, IL.
- [13] Duan, Q., S. Sorooshian y V. K. Gupta. "Optimal use of The SCE-UA Global Optimization Method For The Calibrating Watershed Models", *J. Hydrol.*, vol. 158, num. 4. 1992. pp. 265-284.
- [14] Duan, Q., V. K. Gupta y S. Sorooshian. "A Shuffled Complex Evolution Approach For Effective and Efficient Global Minimization", *J. Optimization. Theory Appl.*, vol. 76, num. 3. 1993. pp. 501-521.
- [15] Duan, Q., V. K. Gupta y S. Sorooshian. "Optimal use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models", *J. Hydrol.*, vol. 158. 1994. pp. 265-284.
- [16] Sorooshian, S., V. K. Gupta y J. L. Fulton. "Evaluation of Maximum Likelihood Parameter Estimation Techniques for Conceptual Rainfall-Runoff Models:

- Influence of Calibration Data Variability and length on Model Credibility", Water Resource. Res. Vol.19, No 1. 1993. pp. 251-259.
- [17] Martínez, J.B. Estudio del Intercambio de Aguas entre el Lago Tequesquitengo y el Acuífero Subyacente. Informe de Investigación, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA), Coordinación de Tecnología Hidrológica. 2002.
- [18] Martínez, J.B. y Gutiérrez-Ojeda, C. ¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago Tequesquitengo? 1. Calibración de un modelo del sistema hidrológico. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, núm. 4. 2004, pp. 33-46.
- [19] Martínez, J.B. y Gutiérrez-Ojeda, C. ¿Por qué ocurren variaciones de nivel en el lago Tequesquitengo? 2. Simulación de eventos del siglo XIX. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, núm. 4. 2004, pp. 47-56.
- [20] Martínez, J.B. y González, L. Investigación y modelación numérica de la interacción hidráulica entre el lago y el acuífero de la Cuenca de Pátzcuaro. Informe de Investigación, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, (IMTA), Coordinación de Tecnología Hidrológica. 2007.
- [21] Cabrera, E. y Escartín, E. Propuesta para automatizar el proceso de triangulación digital del Modelo de flujo bidimensional Aqúimpe. 2^{do} Simposio Científico-Técnico EXPOAGUA, Ciudad de la Habana, Cuba. 2006.
- [22] Cabrera, E. *Elementos para la simulación de acuíferos con el empleo de un sistema de información geográfico*. Tesis presentada en opción al grado científico Maestro en Ciencias. La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Centro de Investigaciones Hidráulicas, 2007.

Recibido: Mayo del 2009
Aprobado: Junio del 2009