

Modelo numérico para determinar la relación entre los acuíferos geotérmicos y las depresiones lacustres de Tarímbaro y Cuitzeo, Mich.

Ana Yunnuen Ávila Villegas¹, Víctor Hugo Garduño Monroy¹, Andrea Borgia² y Francisco Domínguez Mota³

¹Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT), Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo CEMIE-Geo. ²EDRA-Italia. ³Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. Correo:

didactica.fismat@gmail.com

RESUMEN

Hasta ahora el desarrollo de los campos geotérmicos en México se ha concentrado en establecer modelos de explotación en campos de alta entalpía, los cuales ya son pocos. Sin embargo, el escenario vulcano tectónico del país ofrece campos geotérmicos de mediana y baja entalpía, que ya son aprovechados en otros países del mundo y cuyo aprovechamiento en México, no obstante su abundancia, está rezagado. Para aprovechar este tipo de recursos se requieren estudios de factibilidad muy precisos que sustenten las condiciones para su explotación y manejo. Los yacimientos geotérmicos se estudian de forma indirecta y la aplicación de modelaciones numéricas es una herramienta extra que permite hacer predicciones sobre el comportamiento del sistema en el tiempo. Pero además, no se conoce mucho sobre la interferencia de la explotación de un acuífero geotérmico somero de baja o media entalpía con acuíferos de agua dulce. El modelo numérico que se propone se basa en datos geológico-geofísicos y con los parámetros físicos que se presentan actualmente en la zona de estudio, se desarrolla con los software GMS (*Groundwater Modeling System*) y Tough2. Se utiliza el método de diferencias finitas con un paquete interno de Modflow y subrutinas en lenguaje Fortran 90 que permiten trasladar los elementos de la malla establecida con todos los parámetros físicos y detalles que hayan sido asignados en la misma, entre ambos software. Con ello se logra comprender el flujo subterráneo de agua, por una parte, y el flujo de calor 3D, por la otra. En este trabajo se explican de manera detallada los software y la metodología empleados para la elaboración del modelo numérico, así como detalles de los resultados de modelación obtenidos. Se presentan además simulaciones del comportamiento del campo geotérmico en funcionamiento y su relación con sus zonas de recarga de acuíferos asociados.

Palabras Clave: Modelado numérico, Tough2, GMS, Modflow, baja y media entalpía, interferencia con acuíferos.

Numerical modeling to determinate relationships between geothermal aquifers and lacustrine troughs at Tarímbaro and Cuitzeo, Mich.

ABSTRACT

The development of Mexican geothermal fields has been focused on the high-enthalpy fields, which are no many in the country. However, the volcano tectonic scenario in Mexico provides low-medium enthalpy geothermal resources that are exploited in many countries around the world. In spite of its abundance in Mexico, these resources are under-utilized. To take advantage of these resources accurate feasibility studies are necessary, to support the field's management and exploitation. Geothermal reservoirs are indirectly studied, and numerical modeling is an important tool to predict the system behavior over time. Moreover, there are not many knowledge about the interference of the exploitation of a low-medium enthalpy shallow geothermal aquifer with freshwater aquifers. The numerical model proposed is based on geological-geophysical data and physical parameters currently presented in the study area. It is made with programs GMS (*Groundwater Modeling System*) and Tough2. The finite difference method is used as part of the internal package in GMS known as Modflow,

as well as Fortran 90 subroutines that let us move the net elements with all their physical parameters and details from one to other program. The main objective is understand the groundwater flow and the heat flow in the zone. This paper explains in detail the programs and methodology used to process the numerical model and parts of the results obtained. We present also simulations of the behavior of the geothermal field and its relationships with the associated recharge areas.

Keywords: Numerical modeling, Tough2, GMS, Modflow, low-medium enthalpy, aquifers interference.

1. Introducción

Hay actualmente en México diversos estudios e investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de zonas de baja-mediana entalpía para la generación de energía geotérmica. Algunas de estas zonas se encuentran localizadas al norte del estado de Michoacán, en regiones aledañas al Lago de Cuitzeo donde se han identificado manifestaciones termales desde los años ochenta (Cedillo et al., 1981; Vargas Ledezma, 1985) y donde faltan modelos numéricos y estudios cuantitativos. El propósito de este artículo es ofrecer información relevante sobre técnicas de modelación numérica y la dinámica en tiempo y espacio de los sistemas jerárquicos del flujo del agua subterránea a través de las unidades hidrogeológicas en la localidad de San Agustín del Maíz, municipio de Copánaro, Michoacán.

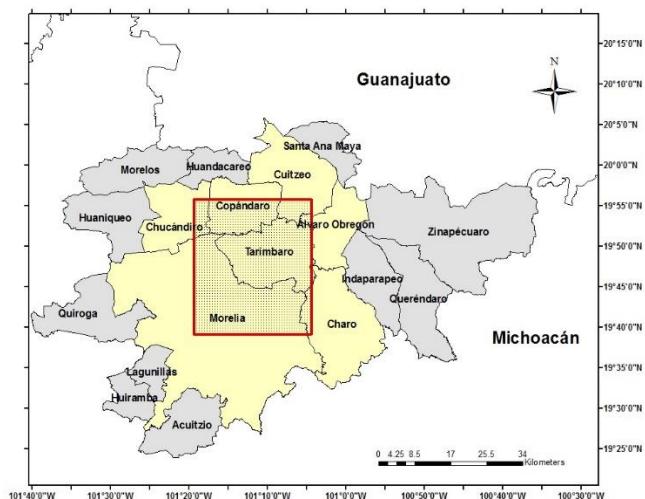


Fig. 1. Frontera de modelación regional en el acuífero Morelia-Queréndaro.

La zona de estudio forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y contiene acuíferos de origen volcánico (Medina Vega, 2008) y sistemas de fallas (Ferrari, 2000,

Garduño Monroy et al., 2014). Por ello, los acuíferos se caracterizan por tener una gran permeabilidad secundaria y una elevada transmisividad, debido al fracturamiento de la roca (Medina Ortega, 2010). Estos acuíferos termales son de interés por su potencial geotérmico de baja o mediana entalpía.

La modelación numérica resulta muy útil para la predicción del comportamiento de los sistemas en el tiempo. Existen herramientas computacionales que han demostrado un amplio potencial para la caracterización de flujos en medios porosos y fracturados en otras partes del mundo (Borgia, et al., 2011) y que se aplican en esta investigación. En una primera parte del artículo se detallan las generalidades del proyecto, enfatizando la descripción de los programas de software y la metodología utilizada para la elaboración del modelo conceptual y numérico. Posteriormente se exponen algunos de los resultados y avances obtenidos a la fecha.

2. Antecedentes

Para que un yacimiento geotérmico pueda ser explotado debe estar formado por rocas de alta permeabilidad, además de estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación. El estudio de las manifestaciones térmicas superficiales debe considerar el marco hidrogeológico general, lo cual implica el conocimiento de la hidrología de la región y de las condiciones estructurales que controlan los sistemas hidrotermales.

Cedillo et al. (1981) realizaron un estudio hidrológico de la región de Cuitzeo y definieron tres acuíferos: uno superficial en medios granulares, uno intermedio en rocas andesíticas y uno profundo también constituido por rocas andesíticas. Este trabajo fue retomado en 1985

por Vargas Ledezma quien enfatizó las áreas de San Juan Tararameo, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque, Araró y Estación Queréndaro como zonas con potencial para la explotación de recursos geotérmicos. Todas esas zonas se consideraban como parte de un mismo sistema geotérmico debido a la similitud química de su composición, estimando que las principales fuentes de alimentación al sistema provenían del acuífero inferior regional y en menor escala del acuífero superior que actúa como diluyente. Se ha sugerido también que la uniformidad del acuífero superior de la zona es interrumpida únicamente en algunas localidades por efectos de sobre-explotación o abatimiento en la zona del municipio de Tarímbaro (Garduño Monroy et al., 2001; Medina Vega, 2008). Por otro lado, Segovia (2005) elaboró un análisis geoquímico de aguas de las zonas reportadas por Vargas Ledezma, encontrando alteraciones termales y una composición química similar a los fluidos geotérmicos del campo de Los Azufres en muestras colectadas en manantiales de Araró, sugiriendo correlación entre ambos fluidos. Reporta que las zonas de interés presentan temperaturas entre 129°C y 216°C, a partir de las cuales concluye que las zonas son óptimas para la generación de energía eléctrica por ciclos convencionales o binarios.

La empresa Lesser y Asociados (2000) hizo el primer modelo matemático del Valle de Cuitzeo para el análisis de los acuíferos de la zona, principalmente hacia la parte norte, en la región colindante con el estado de Guanajuato. En dicho estudio se utilizaron los programas Visual Modflow y Surfer para la modelación de la superficie del terreno, concluyendo que en la parte norte del acuífero hay una buena permeabilidad que permite infiltraciones y la recarga del acuífero con flujo hacia el sur (en el municipio de Cuitzeo) y brotando en forma de manantiales o por medio de pozos. Señala que el basamento geohidrológico del acuífero, que en su mayoría es de tipo libre, está constituido a profundidad por materiales aluviales y partes de una secuencia ignimbritica superior del Oligoceno. Además, se indica que la profundidad promedio del nivel estático está entre los 20 y 40 m, presentando un abatimiento

aproximado de 1 m por año. El estudio resaltaba la importancia de controlar la extracción.

Medina Vega (2008) realizó una investigación relacionada con la geohidrología en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Reporta la existencia de tres acuíferos dentro de esa cuenca: uno en secuencias lacustres, otro en rocas volcánicas y un acuífero geotérmico profundo. Concluye con un modelo conceptual a partir de datos geológicos, de estratigrafía, geología estructural, hidrogeoquímica, piezometría y geofísica, aportando datos de precipitación y evaporación media anual, así como de infiltraciones. Sugiere que las principales zonas de recarga ocurren en la parte sur de la cuenca del Lago de Cuitzeo. Señala que los datos recabados resultaron insuficientes para la modelación numérica en Modflow haciendo énfasis en la necesidad de recabar información de las condiciones hidrodinámicas de los acuíferos mediante la realización de pruebas de bombeo para determinar coeficientes de almacenamiento, volúmenes de escurrimiento, mediciones de infiltraciones y de conductividad hidráulica en zonas aledañas al acuífero.

En datos reportados por CONAGUA (2009) se estimó que para toda la planicie de Tarímbaro-Álvaro Obregón-Queréndaro se presentan dos acuíferos principales, uno de ellos ubicado entre 1848 y 1700 msnm y alojado en secuencias lacustres y fluviolacustres. El otro es más profundo y está formado por andesitas e ignimbritas fracturadas entre 1750 y 1600 msnm.

Garduño Monroy et al. (2014) reportan que el nivel estático del acuífero de la cuenca del Lago de Cuitzeo se mantiene, durante los meses anteriores a la temporada de lluvias, a menor profundidad en la ribera SW del lago Lago de Cuitzeo y resalta que el flujo del agua subterránea se concentra mayormente en esta misma zona del lago. En cambio, para los meses posteriores a la temporada de lluvias el nivel estático está a menor profundidad en la porción NE de la ribera del lago, cambiando también la dirección del flujo subterráneo que se desplaza hacia esta misma zona. También se menciona la existencia de dos direcciones principales de flujo. La primera ocurre en

Morelia y Tarímbaro, que es una zona de recarga del acuífero en el S y SW. La segunda tiene una dirección de flujo que va hacia el NW y recibe aportación principalmente de la parte sur, la Sierra de Mil Cumbres (SMC). Aquí también la dirección del flujo es hacia el lago. Con base en los niveles estáticos y las direcciones de flujo para la cuenca de Cuitzeo, determinaron que la zona de recarga del acuífero profundo se localiza principalmente en la SMC, mientras que su descarga ocurre tanto en la ribera sur del lago como en una porción de la zona norte, en la localidad de Santa Ana Maya.

3. Objetivo

El objetivo principal de investigación de este trabajo es aportar información avanzada sobre la caracterización del flujo en los acuíferos de Tarímbaro por medio de un modelo numérico, que posteriormente aporte información sobre el comportamiento del acuífero geotérmico si éste fuera explotado en el futuro. También se pretende ofrecer información sobre el gradiente geotérmico en la región, además de analizar la influencia de las fallas E-W, NE-SW y NS en el acuífero regional y en el acuífero geotérmico, y con ello aportar elementos para el desarrollo de recursos geotérmicos de mediana entalpía.

4. Metodología

La metodología para la elaboración del modelo numérico se define a partir del trabajo de Borgia *et al.* (2011) quienes elaboraron un estudio de mareas en la costa de la Laguna de Venecia empleando modelos calibrados de Modflow, desarrollados con las interfaces gráficas de GMS para caracterizar los flujos de agua y el depósito de arenas en la laguna. Ellos utilizaron una malla de 252 mil celdas para posteriormente elaborar subrutinas en lenguaje Fortran a las que llamaron TMT2 (Translating Modflow to Tough2), para poder trasladar esta malla con todas las condiciones de frontera hidrogeológicas a un archivo de Though2, y se añadió información adicional para conseguir las diferentes simulaciones.

La metodología de trabajo consta de varias etapas de ejecución. En un inicio se realizó un trabajo de gabinete donde se investigaron y

obtuvieron propiedades físicas de las rocas y datos geohidrológicos y de modelación, así como los datos de topografía y el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) correspondiente. La geología de la región y la delimitación de la frontera de modelación se obtuvieron de datos de trabajo de campo y de gabinete. Una vez establecida la estratigrafía, la litología y las propiedades físicas de los materiales se empezó el proceso de modelación en GMS.

GMS es un programa que permite construir y hacer simulaciones sobre modelos de agua subterránea con una interfaz gráfica amigable con el usuario y que contiene herramientas avanzadas para visualizar procesos complejos en dos y tres dimensiones. Los paquetes de estratigrafía y geoestadística incluidos en el software, así como la posibilidad de importar y manipular modelos elaborados en Sistemas de Información Geográfica, facilitan el manejo de los modelos conceptuales que una vez desarrollados permiten agregar características de simulación por medio de Modflow (Borgia *et al.*, 2011). Modflow es un modelo de flujo saturado en diferencias finitas. Se trata de un programa multicapa donde los módulos se agrupan en paquetes y cada paquete trata características específicas del sistema hidrogeológico a simular.

La elaboración del modelo conceptual se divide en varios pasos. Una vez importado el MDE a GMS se construye un mapa de puntos de dispersión 2D y la estratigrafía de la zona, con apoyo de puntos de control para establecer los materiales y espesores correspondientes de cada columna, los cuales se interpolan para establecer los sólidos del modelo. Se elaboran capas con datos de recarga, drenaje, pozos de extracción, frontera de modelación y datos estructurales, además de extraer la topografía del acuífero que representa las condiciones iniciales del modelo en Modflow. Posteriormente se establece la malla 3D con los refinamientos correspondientes en las regiones donde se requiere un control más específico y se le asignan los sólidos y las capas construidas con datos necesarios para la modelación de flujo subterráneo. Pese a que las mallas que se construyen en GMS no pueden ser irregulares,

la capacidad gráfica y de mallado es muy superior a la de otros software comerciales, pues permite modelar grandes extensiones geográficas y hacer refinamientos en las mallas de acuerdo a los sitios en los que se requiere mayor detalle en el proceso de solución de la ecuación general de flujo subterráneo. Esta ecuación, en un régimen transitorio para un medio homogéneo e isotrópico, se expresa por la ecuación (1), que representa la suma de entradas y salidas de agua en un cubo poroso elemental, por razones de la diferencia de nivel piezómetro entre dicho cubo y las zonas inmediatas del acuífero.

$$S^* \frac{\partial h}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \cdot K \quad (1)$$

S representa el coeficiente de almacenamiento, h el potencial hidráulico, t el tiempo y K la conductividad hidráulica. Modflow cuenta con varias opciones numéricas para la solución de los sistemas de ecuaciones, de las que la técnica del gradiente bi-conjugado ha mostrado mejores resultados de convergencia. La calibración del modelo y el análisis del error se lleva a cabo de manera automática presentando la solución correspondiente, con la limitación de que la densidad y temperatura del agua no pueden modificarse en ningún punto de la modelación.

Con el modelo de flujo de agua subterránea obtenido de Modflow, se importan en GMS los datos de la topografía y se ajustan a las primeras capas de la malla. Para garantizar la condición de Voronoi en la modelación para el flujo de calor 3D que se realiza en Tough2, se considera que la altura del centroide de las celdas de la primera capa es equivalente al punto medio de la altura de la celda más pequeña y el software hace un cálculo de estabilidad de la presión hidrostática para los puntos más altos. De esta forma se simula una malla regular, sin ignorar las características topográficas reales de la región. La malla y la solución de Modflow se pueden exportar fácilmente para hacer un procesamiento de datos adecuado para la modelación en Tough2. Los archivos obtenidos contienen las características físicas y geométricas de la malla,

los materiales correspondientes y la reinterpretación de las condiciones hidrostáticas que se utilizan como datos de condiciones iniciales en Tough2.

Los archivos nativos de Modflow se procesan en una primera subrutina Fortran conocida como TMT2 (*Traslatting Modflow to Tough2*) que por medio de un paquete de ecuaciones de estado entrega los insumos para la modelación en Tough2. En nuestro caso se empleó el correspondiente a un modelo bifásico líquido-gas. El código TMT2 lee la información de la malla en Modflow y calcula las coordenadas de los nodos de las celdas activas y además computa conexiones para celdas adyacentes, interfaces para áreas de superficie, distancias entre puntos nodales y la interfaz y el ángulo entre las líneas conectando los dos puntos nodales y el vector de aceleración de la gravedad. El tensor de conductividad hidráulica de Modflow, K_i , se pasa al tensor intrínseco de permeabilidad usado en Tough2 por medio de la relación:

$$K_i = \rho_0 g \frac{k_i}{\mu_0} \quad (2)$$

Donde ρ_0 y μ_0 son la densidad del fluido y la viscosidad del agua pura, respectivamente, y g es la aceleración de la gravedad. En Tough2 la densidad del fluido actual ρ se calcula asumiendo un fluido de volumen constante y considerando que el fluido es una mezcla de agua pura ρ_w y salmuera ρ_b , por medio de la ecuación (3):

$$\frac{1}{P} = \left(1 - \frac{X_b}{\rho_w} \right) + \frac{1}{\rho_b} \quad (3)$$

En esta ecuación 3 X_b es la fracción de masa de salmuera en la mezcla del fluido. No fue necesario trasladar la porosidad, y otras variables termofísicas como la densidad de granos en la roca, la conductividad térmica y el calor específico, que son necesarias para Tough2, se añaden en archivos de entrada. Los archivos de salida son INCON, con las condiciones iniciales, MESH con las condiciones físicas de la malla, y GENER con los parámetros de salida requeridos por el

usuario. Posteriormente se hace la simulación de flujo de calor 3D en Tough2.

Tough2 resuelve ecuaciones de balance de masa y energía que describen el flujo de calor y fluidos en sistemas multifásicos. La advección de fluidos se describe con una extensión multifase de la ley de Darcy. Adicionalmente, hay transporte de masa (difusividad) en todas las fases. El flujo de calor ocurre por conducción y convección. Cuando es por convección se incluyen efectos sensibles como de calor latente: la descripción de condiciones termodinámicas se basa en la asunción del equilibrio local de todas las fases. Los parámetros de los fluidos y formaciones pueden ser arbitrariamente funciones no lineales de variables termodinámicas primarias.

El tiempo se discretiza completamente con un método implícito de primer orden de Diferencias Finitas hacia atrás. La discretización resulta en un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales fuertemente acopladas, con todas las variables termodinámicas primarias tiempo-dependientes de cada celda en la malla como las incógnitas. Estas ecuaciones se arrojan en forma residual y se resuelven en forma simultánea usando la iteración de Newton-Raphson. Los pasos de tiempo pueden ajustarse de manera automática durante una simulación dependiendo de la tasa de convergencia para el proceso de iteración. Un ajuste automático del paso de tiempo es esencial para una solución eficiente de problemas de flujo multifase. La solución de un problema de flujo consiste esencialmente de un conjunto completo de variables termodinámicas como función del tiempo. Las propiedades termofísicas de las mezclas de fluidos necesarias para ensamblar las ecuaciones que gobiernan el balance de masa y energía son provistas por los módulos EOS, las ecuaciones de estado. Las condiciones de fase de fluidos se reconocen de los valores numéricos de las variables primarias, y además proveen valores para todos los parámetros termofísicos secundarios. Los sistemas de flujo se inicializan asignando un conjunto completo de variables termodinámicas a todos los elementos de la malla en el que ha sido discretizado el dominio.

La solución que genera Tough2 provee la solución de la ecuación de flujo de calor en la malla establecida después de 9999 iteraciones Newton-Raphson. Dicha solución no cuenta con la precisión geográfica que se necesita para la visualización del archivo en GMS, por lo que se requiere hacer un post procesamiento de la solución. Este se lleva a cabo por medio de una segunda subrutina computacional conocida como T2TM (*Traslating Tough2 to Modflow*), ya mencionada. Una vez realizado este paso se puede importar la solución de Tough2 a GMS como un archivo de texto que contiene puntos de dispersión 3D que se pueden interpolar a la malla de Modflow y visualizarse fácilmente haciendo uso de las herramientas del software.

5. Datos

Para la obtención de las direcciones de flujo subterráneo en los acuíferos de la zona de estudio se han hecho modelaciones en Modflow. Se utilizaron las cartas topográficas del INEGI a escala 1:50,000 E14A13 y E14A23 de Cuitzeo y Morelia, respectivamente. Se elaboraron 14 perfiles estratigráficos de 30 km de longitud en dirección S-N con datos geológico-geofísicos de gran precisión. Cada perfil se dividió posteriormente en 7 puntos de control a cada 5 km de distancia para la construcción de la estratigrafía dentro de GMS.

Con base en el trabajo de Medina Vega (2008) se establecieron datos físicos importantes obtenidos de 15 pruebas de bombeo de corta duración. Las transmisividades en el acuífero varían entre los 0.13×10^{-3} y $7.08 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. El coeficiente de almacenamiento se ajustó al de un acuífero libre con zonas de semi-confinamiento con valores entre 0.005 y 0.03. Se emplearon datos de precipitación para establecer la recarga promedio en la zona (Fig. 2) y de evaporación (Tabla 1). Los datos de infiltración generales para el acuífero Morelia-Queréndaro son de $75 \text{ mm}^3/\text{año}$ de manera natural desde los flancos montañosos y de $45 \text{ mm}^3/\text{año}$ como producto de la infiltración excedente de riego y la contribución del Río Grande de Morelia. Así mismo, del análisis de los niveles estáticos se reportó que en 1990 los niveles de agua estaban a 1825 msnm con un pequeño cono de abatimiento al noreste de la

falla de Tarímbaro. En 2002 reporta un cono de abatimiento cercano al poblado de Copándaro con un desnivel de 5m con respecto al nivel general de 1830 msnm.

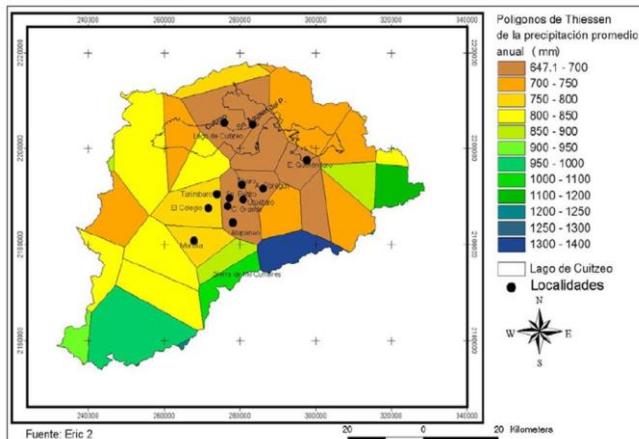


Fig. 2. Polígonos de Thiessen de la precipitación promedio anual en mm en la cuenca del Lago de Cuitzeo (Medina Vega, 2008).

Por medio del trabajo de gabinete y recomendaciones de los modelos conceptuales de Medina Vega (2008) y analíticos de Lesser y Asociados (2000), la zona sur del modelo se considera de carga constante porque las precipitaciones máximas de la zona se concentran en dicha región. La frontera oeste se considera como una frontera impermeable, ya que se demostró que en esta zona hay un bloque de baja densidad según resultados de estudios geofísicos.

Tabla 1.- Datos de precipitación media anual en los municipios que comprenden la zona de modelación (tomados de Medina Vega, 2008).

Municipio	Periodo	Precipitación media anual (mm)
A. Obregón	1965-1985	647.1
Tarímbaro	1986-2005	788.1
Copándaro	1969-2001	849.8
Cuitzeo	1923-2005	674.5
Morelia	1947-2005	789.3

La frontera norte se considera de tipo permeable por la dirección de flujo que

teóricamente desemboca en el Lago de Cuitzeo, mientras que la frontera este se considera de carga constante.

Tabla 2.- Datos de evaporación promedio anual en los municipios que comprenden la zona de modelación (tomados de Medina Vega, 2008).

Municipio	Periodo	Evaporación promedio anual (mm)
Tarímbaro	1988-2005	128.2
Copándaro	1969-2001	157.9
Cuitzeo	1923-2005	151.5
Morelia	1952-2005	155.3

Los datos de conductividad hidráulica y porosidad de los materiales (Tabla 3) se establecieron a partir de datos reportados en la bibliografía (Sanders, 1998), mientras que la anisotropía (horizontal 1.0 y vertical 3.0), conductividad (0.01 m/s) y almacenamiento específico se mantuvieron constantes para todos los materiales.

Tabla 3.- Materiales y parámetros físicos empleados en la modelación.

Material	Horizontal K (m/s)	Porosidad
Lavas del Volcán Punhuato	1×10^{-7}	0.1
Lavas del Volcán Quinceo y Tetillas	1×10^{-7}	0.1
Depósito Lacustre	1×10^{-5}	0.2
Ignimbrita Chucándiro	1×10^{-5}	0.1
Andesita	1×10^{-6}	0.1
Ignimbrita Mil Cumbres	1×10^{-5}	0.1
Ignimbrita Cuitzeo	1×10^{-5}	0.1
Andesita antigua	1×10^{-6}	0.1
Capas rojas	1×10^{-7}	0.1
Metasedimentaria	1×10^{-8}	0.05
Granito	1×10^{-9}	0.03

Los datos estructurales de la región se obtuvieron a partir del mapa de las principales zonas de fallas en la zona aledaña al lago de Cuitzeo (Pasquaré *et al.*, 1991).

6. Procesamiento

Con los datos de insumo se construyó un modelo conceptual en el software GMS. El modelo digital de elevaciones (MDE) se elaboró en ArcGis 10.2 por medio del procesamiento de las cartas topográficas de Cuitzeo y Morelia a escala 1:50,000. Con los MDE se construyó un mapa de puntos de dispersión 2D y posteriormente el TIN correspondiente. A partir de los 13 perfiles obtenidos del trabajo de campo y gabinete se establecieron un total de 182 puntos de control para la construcción de la estratigrafía de la zona y posteriormente una interpolación IDW para la construcción de los sólidos del modelo conceptual.

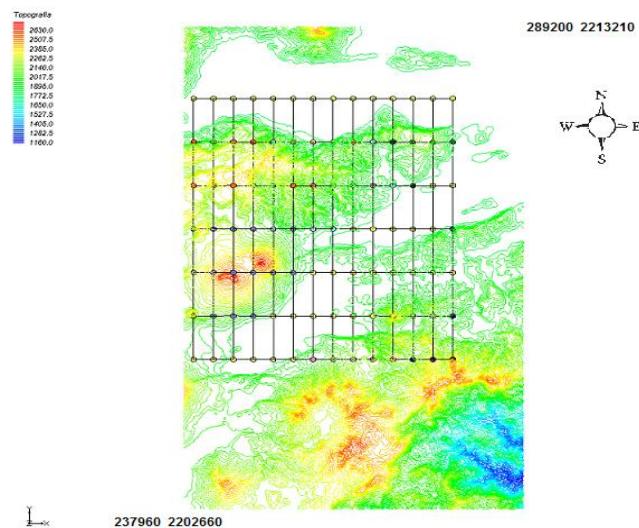


Fig. 3. Localización de las columnas estratigráficas en la malla de modelación.

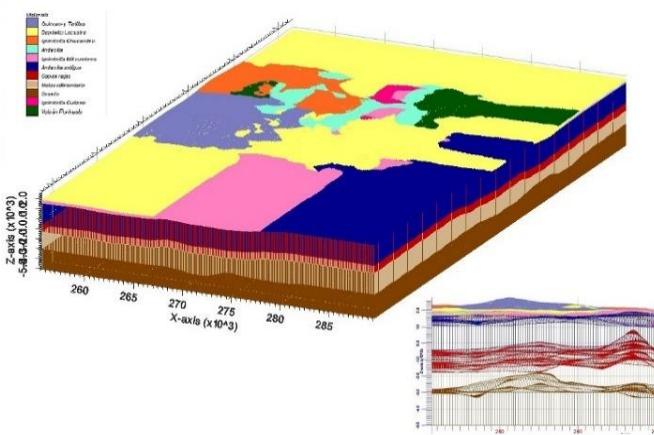


Fig. 4. Sólidos para la conceptualización geológica del modelo.

En GMS existen dos formas distintas para la modelación en Modflow. Una es por medio de la construcción de la malla a la que posteriormente se le asignan condiciones físicas por medio de TIN y valores de conductividad hidráulica vertical por cada capa que represente un material diferente. La otra es la que se aplicó en la simulación propuesta, donde se construyó un modelo conceptual con todos los parámetros geológicos y geofísicos conocidos, y posteriormente se construyó una malla 3D a la que se le asignaron parámetros hidrogeológicos por medio de capas previamente construidas en el modelo.

Es importante señalar que el área de la malla es mayor a la empleada para la construcción de los sólidos. La malla 3D cubre una extensión de 1088 km² y una profundidad de 4360 m con un total de 136,000 celdas activas y 397,900 conexiones. La máxima profundidad de la malla se localiza a 2500 m y no se aplicaron criterios de refinamiento para la malla correspondiente; cada calda tiene dimensiones de 400 x 400 x 218 m.

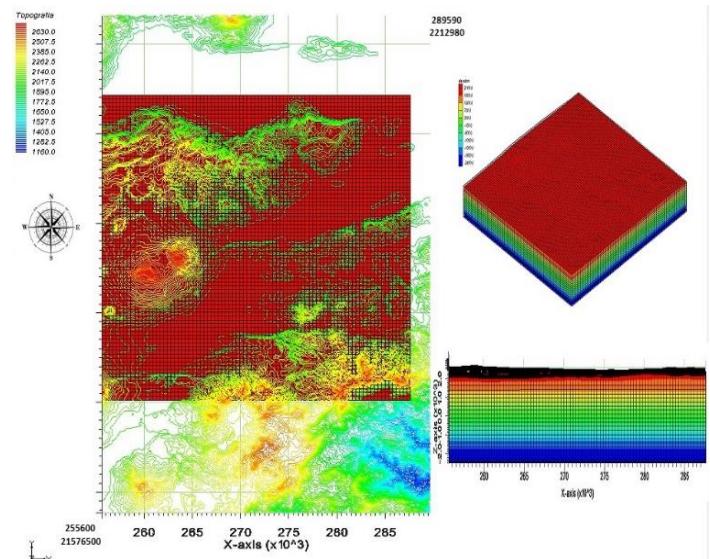


Fig. 5. Malla 3D de modelación con 136,000 celdas activas.

Se construyeron y asignaron a la malla los sólidos con la geología y datos geofísicos correspondientes, además de capas con datos estructurales (fallas e intrusiones), de drenaje,

recarga y de valor constante. Esta última se elaboró a partir de un truncamiento en la topografía con los valores más bajos, para asegurar un saturamiento de agua y utilizar los datos de valor constante en forma de condiciones iniciales en los insumos para Modflow. Se aplicó un método iterativo para obtener la solución del sistema de ecuaciones correspondiente. Para la primera iteración el criterio de convergencia en las condiciones iniciales fue de 10 m, posteriormente de 1 m y finalmente cada 10 cm. El criterio de error para la convergencia fue inicialmente de 0.1 m³/s y finalmente de 0.01 m³/s. El método de solución numérica fue el de Gradiente Pre-conjugado (PCG2) con el método modificado incompleto de Cholesky como precondicionante para la matriz correspondiente y con ello garantizar una óptima convergencia bajo el criterio de que cada instrucción sobre el procesador opera sobre un dato y no sobre un conjunto de datos a la vez. La calibración se realiza de manera automática por el software y el error correspondiente para la simulación es del orden de 10⁻¹⁶.

7. Interpretación

La modelación realizada en el acuífero regional permitió obtener el potencial hidráulico en cada punto del mismo y consecuentemente el modelo estacionario de flujo de agua subterránea. La organización modular de Modflow permitió establecer datos de recarga, drenaje y de potencial constante distribuidos geográficamente a lo largo de toda la malla.

Con dichos insumos podemos resaltar las observaciones siguientes:

- El sistema de drenaje de la sierra de Mil Cumbres aporta una recarga superficial considerable al acuífero ubicado en Morelia, Charo, Atapaneo, Uruétaro y en el municipio de Álvaro Obregón.
- El volcán Quinceo y Tetillas aporta una recarga superficial y un flujo subterráneo preferencial hacia los márgenes norte y SE del acuífero de Morelia y SW del acuífero de Cuitzeo.
- El flujo subterráneo desde el municipio de Charo corre principalmente en

dirección a la planicie del municipio de Álvaro Obregón, donde se distribuye en tres direcciones principales: una hacia el Municipio de Tarímbaro, otra en dirección al Lago de Cuitzeo y otra a una mayor profundidad a la que se asignó a la malla de modelación.

- A una profundidad aproximada de 1 km la dirección general de flujo subterráneo del acuífero regional es principalmente hacia los márgenes del Lago de Cuitzeo.

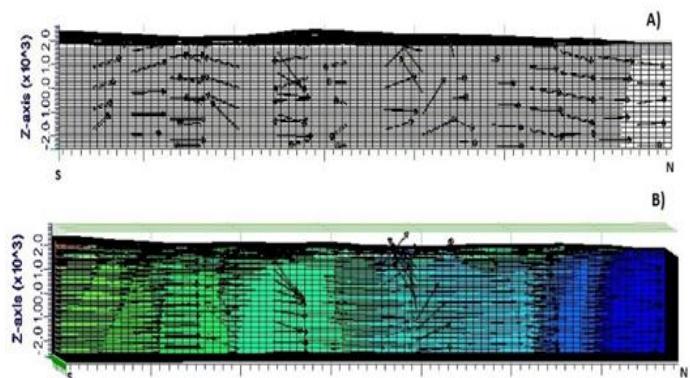


Fig. 6. Vista de costado en dirección sur-norte de la malla de modelación. (A) A cada 1600 vectores. (B) A cada 800 vectores.

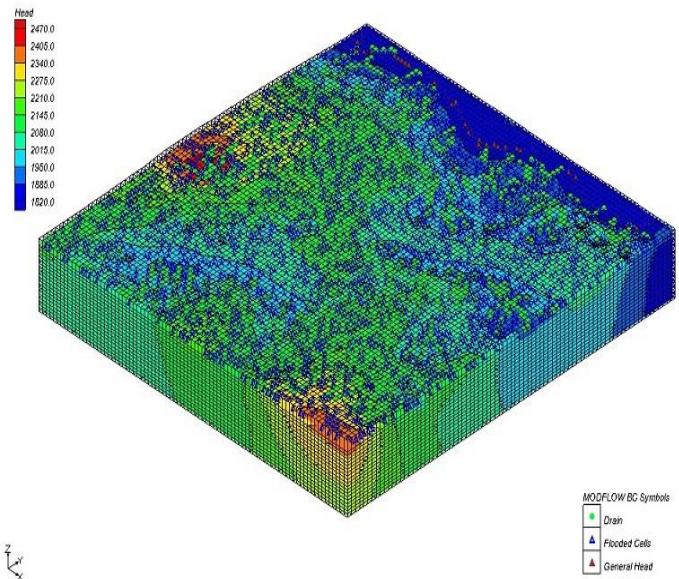


Fig. 7. Solución de Modflow con celdas de drenaje (verde), celdas completamente inundadas (azules) y de potencial constante (rojas) en la vista superior, además de la solución correspondiente observada de forma oblicua en toda la malla.

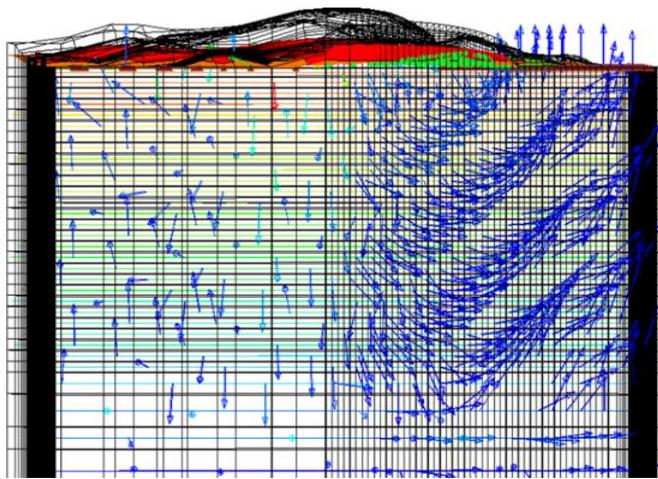


Fig. 8. Dirección de flujo subterráneo desde los márgenes del Volcán Quinceo-Tetillas y la zona norte del acuífero de Morelia, hasta el sur del Lago de Cuitzeo.

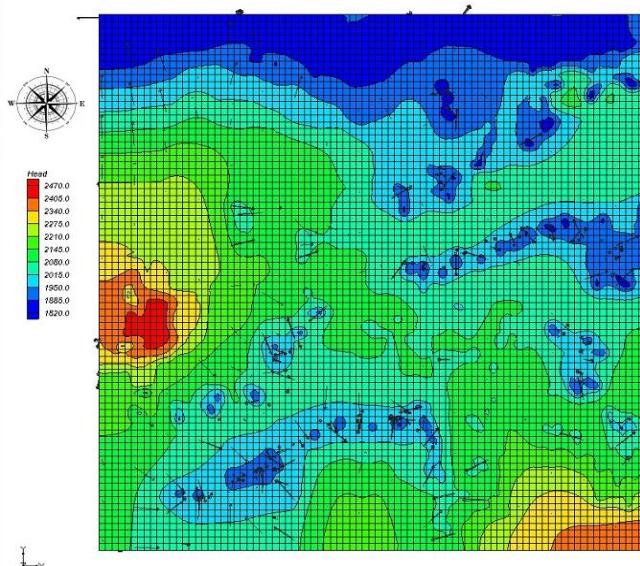


Fig. 9. Dirección de flujo en la malla de modelación en vista plana a cada 80 vectores de velocidad.

8. Observaciones

La metodología propuesta en este artículo no ha sido terminada en su totalidad. La precisión de la aproximación a la solución correspondiente depende de una serie de parámetros: el criterio de error utilizado, el tamaño de las celdas, la conductividad y el coeficiente de almacenamiento específico. También hay incertidumbres respecto a las condiciones hidrogeológicas de frontera, que representan numerosas hipótesis simplificadas de la realidad en campo.

Es importante señalar que los métodos numéricos conllevan sus propias limitaciones en cuanto a convergencia y estabilidad. Para los procesos de modelación futura en Modflow consideramos que además de mejorar los parámetros físicos que han servido como insumos para el modelo, se requiere de una malla con celdas que cubran un menor volumen, además de extender la profundidad de la misma para tener resultados más precisos del comportamiento en la región del acuífero de Álvaro Obregón, y del acuífero regional de manera general. Es importante señalar que si se amplía la zona de modelación se abarcaría con mayor detalle la sierra de Mil Cumbres y principalmente los márgenes hacia el sur del acuífero de la ciudad de Morelia donde la presa de Cointzio podría simular celdas de potencial constante y analizar la dirección de flujo subterráneo en esa zona del acuífero regional.

Es fundamental completar la simulación en Tough2 para resolver la ecuación general de calor 3D para obtener información del comportamiento del flujo de calor transiente en la zona de modelación y verificar la interpretación a partir de la modelación en Modflow, así como datos de presión y permeabilidad del acuífero geotérmico a partir de la comprensión del sistema de fallas en la localidad de San Agustín del Maíz. La modelación transiente en Modflow o del campo geotérmico, requiere de una serie de datos que aún son desconocidos pero que se pretende analizar en las próximas etapas del proyecto de modelación.

9. Conclusiones

Actualmente los métodos numéricos representan una herramienta importante para la generación de modelos que permiten comprender el comportamiento de los diferentes sistemas hidrogeológicos relacionados con zonas con potencial geotérmico en el país. El procesamiento de los datos en Modflow permitió elaborar gráficas de flujo subterráneo en el acuífero regional a partir

del potencial hidráulico, donde destaca la dirección de flujo preferencial hacia los márgenes SE-SW del Lago de Cuitzeo.

Es indispensable continuar con el procesamiento de datos y utilizar los parámetros y condiciones establecidas en la malla 3D para resolver la ecuación general de flujo de calor 3D. Ello permitirá conceptualizar con mayor precisión el comportamiento del acuífero geotérmico en San Agustín del Maíz y aportar información precisa para el desarrollo de campos geotérmicos en la localidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Dr. Andrea Borgia (EDRA-Italia) por la capacitación en el uso de los software de modelación a los integrantes del Proyecto 17 del CeMIE-Geo, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Referencias

- Borgia, A., L. Cattaneo, D. Marconi, C. Delcroix, E.L. Rossi, G. Clemente, C.G. Amoroso, F. Lo Re, and E. Tozzato, 2011. Using a MODFLOW grid, generated with GMS, to solve a transport problem with TOUGH2 in complex geological environments: The intertidal deposits of the Venetian Lagoon. *Computers & Geosciences*, 37, pp. 783-790.
- Cedillo, F., R. Silva y H. Vargas, 1981. Estudio geohidrológico Los Azufres-Cuitzeo, estado de Michoacán. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectrivos, México. Inédito.
- CONAGUA, 2009. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro, Estado de Michoacán. Comisión Nacional del Agua, México, DF. Inédito.
- Ferrari, L., 2000. Avances en el conocimiento de la faja volcánica transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. LIII, pp. 84-92.
- Garduño-Monroy, V.H., E. Arreygue-Rocha, I. Israde-Alcántara, y G. Rodríguez-Torres, 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 1, pp. 37-54.
- Garduño Monroy, V.H., A. Jiménez Haro, A. Samper, A. Mazzoldi, J.A. Guevara Alday, N. Trujillo Hernández, G. Bernejo, E. Olvera, A.V. Rentería, A. Maciel Rivera, y J.J. Gómez Cortés, 2014. Estudio de fracturamiento-fallamiento y campo de deformación actual, apoyados con sísmica y tomografía en los campos geotérmicos del sur de Cuitzeo-Michoacán, México. Proyecto 17 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. Inédito.
- Lesser y Asociados, 2000. Seguimiento del estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Cuitzeo, Gto. Estudio para la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. Inédito.
- Medina Vega, V.H., 2008. Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímico para generar un modelo conceptual del Acuífero de Cuitzeo, Michoacán, México. Tesis de Maestría, Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Inédito.
- Pasquarel G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Tibaldi, and L. Vezzoli, 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. *The Geological Society of America, Map and Chart series*, MCH072.
- Vargas Ledezma, H., 1985. Sinopsis de estudio geohidrológico Los Azufres-Cuitzeo, Estado de Michoacán. Reporte GG 1/85. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectrivos, Departamento de Exploración, México. Inédito.
- Sanders, L., 1998. *A manual of field hydrogeology*. Ed. Prentice Hall, 381 p.
- Segovia, N., R.M. Barragán, E. Tello, R. Alfaro, and M. Mena, 2005. Geochemical characteristics and ^{222}Rn measurements at Cuitzeo Basin (Mexico) thermal springs and artesian wells. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, April 2005.