



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO PARA EL DESARROLLO
INTEGRAL REGIONAL CIIDIR – OAXACA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES

INGENIERÍA

MODELADO COMPUTACIONAL DEL SISTEMA ACUÍFERO
GRANULAR DE NAZARENO ETLA, OAXACA,
UTILIZANDO VISUAL MODFLOW

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA

LEONARDO ARTURO GARCÍA GARCÍA

BAJO LA DIRECCIÓN DE

DR. SALVADOR ISIDRO BELMONTE JIMÉNEZ

Y

M. C. MARÍA DE LOS ÁNGELES LADRÓN DE GUEVARA TORRES

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Diciembre de 2014



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 26 del mes de noviembre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Modelado computacional del sistema acuífero granular de Nazareno Etla, Oaxaca, utilizando Visual MODFLOW".

Presentado por el alumno:

García Apellido paterno	García materno	Leonardo Arturo nombre(s)							
		Con registro: <table border="1"><tr><td>B</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>6</td><td>5</td></tr></table>	B	1	2	0	0	6	5
B	1	2	0	0	6	5			

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

M. en C. María de los Angeles Ladrón de Guevara Torres

Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Magdaleño Caballero Caballero



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACION PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

Dr. José Rodolfo Martínez y Cárdenas
Encargado de la Dirección



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Oaxaca de Juárez el día 26 del mes de noviembre del año 2014, el (la) que suscribe García García Leonardo Arturo, alumno (a) del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro B120065, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y la M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres y cede los derechos del trabajo titulado: "Modelado computacional del sistema acuífero granular de Nazareno Etlá, Oaxaca, utilizando Visual MODFLOW", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx o luerossesc@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

García García Leonardo Arturo



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue construir un modelo computacional del sistema acuífero de Nazareno Etla, Oaxaca. El desarrollo consta de dos partes: la caracterización hidrogeológica y el modelado en tres dimensiones. Se recabó información hidrogeológica en campo (carga hidráulica, conductividad hidráulica, geometría del acuífero), y se realizó una revisión bibliográfica para obtener información sobre coeficiente de almacenamiento específico y porosidad. El modelo se construyó en Visual MODFLOW 4.2. Una superficie de 4.8 km² fue discretizada en celdas de 100 por 100 m, distribuidas en 15 filas y 32 columnas; se consideraron dos unidades estratigráficas: superior (arena y grava) e inferior (arena y arcilla). El modelo se corrió para un periodo de un año (2013-2014). Se calibró en estado estacionario (sin variación de la carga hidráulica en el tiempo), obteniéndose un Error Normalizado de la Raíz Media Cuadrada (*nRMS error*) de 6.421%. Posteriormente, se calibró en estado transitorio (con variación de la carga hidráulica por extracción de agua por bombeo), obteniéndose un *nRMS error* de 5.859% para 365 días y de 6.012% para 730 días. El modelo se consideró calibrado y validado al alcanzar un *nRMS error* menor a 10 %. Se concluye que el modelo computacional representa adecuadamente la dinámica del sistema acuífero de Nazareno Etla, y puede usarse como herramienta en la toma de decisiones para mejorar el manejo del agua subterránea del municipio.

Palabras clave: Modelo, Hidrogeología, Geometría, Calibración, *nRMS error*

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a computational model of the aquifer system Nazareno Etla, Oaxaca. The development consists of two parts: the hydrogeological characterization and modeling in three dimensions. Hydrogeological information (hydraulic head, hydraulic conductivity, aquifer geometry) was collected at field, and a literature review was conducted to obtain information on specific storage coefficient and porosity. The model was constructed in Visual MODFLOW 4.2. An area of 4.8 km² was discretized into cells of 100 100 m, in 15 rows and 32 columns; two layers were considered: upper (sand and gravel) and bottom (sand and clay). The model was run for a period of one year (2013 to 2014). It was calibrated at

steady state (no change in hydraulic head over time), giving a Normalized Root Mean Square Error (*nRMS error*) of 6.804%. Then, it was calibrated in transient state (with variation of the hydraulic head by pumping) to give a 6.662% *nRMS error*. The model was considered calibrated and validated to achieve a lower *nRMS error* than 10 %. In conclusion, the computational model represents adequately the dynamics of the aquifer system of Nazareno Etlá, and can be used as a tool in decision making to improve groundwater management in the municipality.

Key words: Model, Hydrogeology, Geometry, Calibration, *nRMS error*

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
INTRODUCCIÓN	6
CAPÍTULO 1	7
CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE NAZARENO ETLA, OAXACA	7
INTRODUCCIÓN	7
METODOLOGÍA	8
Zona de estudio	8
Marco geológico superficial.....	10
Hidrografía	10
Recolección de datos.....	11
Cálculo de la carga hidráulica, h (Piezometría)	12
Estimación de la geometría del acuífero (espesor, B)	12
Determinación de la conductividad hidráulica, K	12
Coeficiente de almacenamiento específico (S_s) y porosidad total (n_T).....	14
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
Carga hidráulica, h (Piezometría).....	14
Conductividad hidráulica, K	16
Perfiles obtenidos con los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).....	18
CONCLUSIONES	21
REFERENCIAS	22
CAPÍTULO 2	25
MODELO COMPUTACIONAL CON VISUAL MODFLOW DEL SISTEMA ACUÍFERO GRANULAR DE NAZARENO ETLA, OAXACA	25
INTRODUCCIÓN	25
METODOLOGÍA	26
Zona de estudio	26
Información disponible	27
Construcción del modelo conceptual	29
Construcción del modelo computacional	29
Discretización.....	29

Asignación de zonas inactivas.....	29
Propiedades hidrogeológicas.....	30
Condiciones de frontera	31
Calibración.....	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
Modelo conceptual	39
Calibración en estado estacionario	40
Calibración en estado transitorio.....	41
Redistribución de la conductividad hidráulica (unidad estratigráfica superior).....	43
Carga hidráulica obtenida con Visual MODFLOW	44
CONCLUSIONES.....	46
REFERENCIAS	46
CONCLUSIONES GENERALES	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio en Nazareno Etna, Oaxaca	9
Figura 2. Presas de gaviones en el río Zautla: a) Presa 1; b) Presa 2	10
Figura 3. Geología superficial e hidrografía de la zona	11
Figura 4. Localización de norias de monitoreo; sitios de pruebas de infiltración, y SEV. Perfiles geoelectricos: A-A', B-B', C-C' y D-D'.....	13
Figura 5. Configuración de la carga hidráulica, m (marzo de 2013).....	15
Figura 6. Configuración de la carga hidráulica, m (abril de 2014)	15
Figura 7. Gráficas generadas con datos de pruebas de infiltración	17
Figura 8. Distribución de la conductividad hidráulica (m/d) en la unidad estratigráfica superior (arena y grava).....	18
Figura 9. Perfiles geoelectricos obtenidos con los SEV.....	19
Figura 10. Geometría de las unidades estratigráficas, m: a) base de la unidad superior; base de la unidad inferior.....	20
Figura 11. Variación del espesor total del acuífero	21
Figura 12. Localización de la zona de estudio en Nazareno Etna, Oaxaca, México.....	27

Figura 13. Procedimiento para estudios de modelado de sistemas de agua subterránea (Modificado de Lachaal et al., 2012).....	28
Figura 14. Discretización del dominio del modelo	30
Figura 15. Corte de la sección X-X' de la Figura 14: unidades estratigráficas consideradas	30
Figura 16. Distribución de cargas constantes en límites norte y oeste, y caracterización de los ríos	32
Figura 17. Distribución de norias de observación	37
Figura 18. Distribución de pozos de extracción	38
Figura 19. Modelo conceptual del sistema acuífero de Nazareno Etna	39
Figura 20. Gráfica de calibración en estado estacionario	41
Figura 21. Gráfica de calibración en estado transitorio: 365 días (2013-2014)	42
Figura 22. Gráfica de calibración en estado transitorio: 730 días (2013-2015)	43
Figura 23. Distribución final de la conductividad hidráulica en la unidad estratigráfica superior	44
Figura 24. Carga hidráulica con Visual MODFLOW, m (365 días)	45
Figura 25. Carga hidráulica con Visual MODFLOW, m (730 días)	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. S_s y n_T asignados a las unidades estratigráficas del acuífero de Nazareno Etna	14
Tabla 2. Conductividad hidráulica, K (m/d) en el estrato superior	17
Tabla 3. Norias de observación utilizadas para calibrar el modelo	36
Tabla 4. Pozos profundos utilizados para calibrar en estado transitorio	38
Tabla 5. Unidades estratigráficas del sistema acuífero	40

INTRODUCCIÓN

Un modelo es una representación de un fenómeno o sistema natural. Aplicado a un acuífero, permite conocer los mecanismos que intervienen en su comportamiento ante diversos escenarios, y brinda la posibilidad de realizar predicciones a través de la simulación. Ambientalmente, es una herramienta que contribuye a mejorar el manejo del recurso hídrico subterráneo para garantizar su conservación a través de un aprovechamiento controlado del agua.

Este trabajo se origina por la necesidad de evaluar el funcionamiento de dos presas de gaviones construidas en el río Zautla (afluente del río Atoyac) con el fin de recargar el sistema acuífero. Es necesario un modelo para predecir el comportamiento del sistema ante el alumbramiento de pozos de extracción, o la identificación de puntos de recarga de agua subterránea. Se analiza la forma en que un modelo puede convertirse en una herramienta para garantizar el mejoramiento en el manejo del acuífero en la comunidad. La obtención de datos que deriven en información hidrogeológica específica de la zona de estudio, en combinación con información regional que cubra la escasez de datos en sitios determinados, permitirá construir un modelo aceptable.

El objetivo de este trabajo fue construir un modelo computacional del sistema acuífero de Nazareno Etlá, Oaxaca. La descripción de su construcción se presenta en dos partes. En la primera, se aborda la recolección de datos de campo, así como la revisión de trabajos previos, para caracterizar hidrogeológica y geoméricamente la zona de estudio (Capítulo 1). En la segunda, se configura el modelo conceptual, con la información de la primera parte, que permitió construir el modelo computacional tomando en cuenta las expresiones matemáticas y condiciones de frontera propias del sistema modelado; además, se realiza la calibración y validación del modelo (Capítulo 2).

CAPÍTULO 1

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE NAZARENO ETLA, OAXACA

INTRODUCCIÓN

La caracterización de un acuífero describe cuantitativamente las propiedades hidrogeológicas del medio subterráneo en el que se encuentra. Tiene como finalidad evaluar la presencia, disponibilidad y calidad de agua subterránea (Hund-Der & Ya-Chi, 2013). Además, la caracterización de la variación espacial de parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, carga hidráulica) permite el desarrollo de modelos de flujo de agua subterránea (Bridge & Hyndman, 2004). Doetsch *et al.* (2010) mencionan que la caracterización es un prerrequisito para el modelado con fines predictivos. La mayoría de las caracterizaciones consideran dos tipos de datos: físicos (muestras de sedimentos y registros de perforaciones) y geofísicos (estudios sísmicos, radar de penetración del subsuelo, arreglos de resistividad de corriente directa) (Engdahl *et al.*, 2010). Sin embargo, la información referente al subsuelo generalmente es escasa y de difícil acceso (Chesnaux *et al.*, 2011).

Flores-Márquez *et al.* (2001) caracterizaron el acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca, mediante gravimetría, sondeos electromagnéticos superficiales y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV). Determinaron que el acuífero se compone de arenas, cantos rodados, gravas y aluvión, con una capa subyacente de arcilla saturada a una profundidad mayor de 50 m. CONAGUA (2009) presentó un estudio de disponibilidad de agua subterránea del acuífero de Valles Centrales, Oaxaca. Estableció que el aluvión es la principal formación que constituye el acuífero, y la más importante con fines de explotación. Estimó un espesor saturado de 15 a 100 m.

En Nazareno Etlá, Oaxaca, se construyeron dos presas de gaviones en el río Zautla. Estas resultaron de la ejecución del componente “Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA), del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales” (COUSSA, 2011).

Las presas de gaviones favorecen la infiltración de agua al retener azolves, para propiciar la recarga del acuífero (SAGARPA, 2009). No se ha caracterizado hidrogeológicamente la zona para conocer el medio en que se pretende que estas estructuras contribuyan a la recarga.

En este estudio se caracterizó el sistema acuífero granular de Nazareno Etlá, Oaxaca, para conocer la distribución de sus parámetros hidrogeológicos, así como su geometría. La información servirá para construir un modelo computacional de flujo que evalúe la eficiencia de las presas de gaviones para recargar el acuífero y que sirva para predecir su comportamiento ante diversos escenarios.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

La zona de estudio está en el municipio de Nazareno Etlá, Oaxaca, México, a 13 km al noroeste de la ciudad de Oaxaca de Juárez. Es parte de los Valles Centrales, y abarca 3.69 km² dentro de la microcuenca del río Zautla (afluente del río Atoyac) (Figura 1). La zona se delimitó considerando la ubicación de las presas de gaviones, la distribución de norias para monitorear el nivel freático y la disponibilidad de espacio para emplear métodos geoelectrónicos para la caracterización.

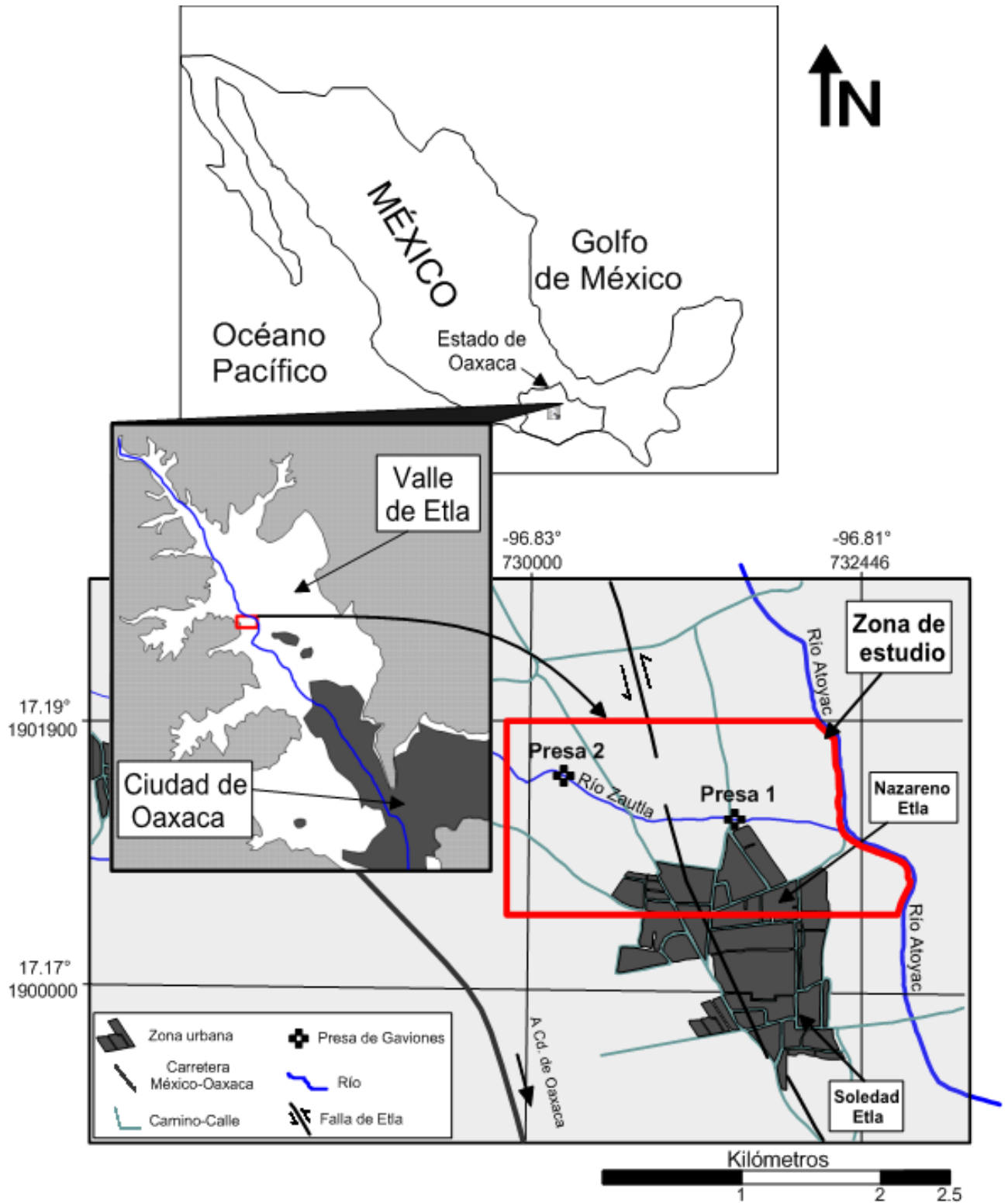


Figura 1. Localización de la zona de estudio en Nazareno Etla, Oaxaca

Las presas de gaviones se encuentran en el río Zautla (Figuras 1 y 2). Están hechas a base de prismas rectangulares de alambre galvanizado, que se rellenan con piedra con el objetivo de formar la presa de control (SAGARPA, 2009). La Presa 1 fue construida en 2012 y ocupa un volumen de 260 m³; tiene 30 m de ancho, una altura total de 5 m y una altura de 3 m hasta el vertedor (Figura 2a). La Presa 2 fue construida en 2013; tiene un volumen de 162 m³ y 26 m de ancho por 4 m de altura total (3 m hasta el vertedor) (Figura 2b).



Figura 2. Presas de gaviones en el río Zautla: a) Presa 1; b) Presa 2

Marco geológico superficial

A escala regional, la geología superficial está representada por una unidad de material aluvial que contiene sedimentos no consolidados, como cantos rodados, gravas, arenas, arcillas y limos. Su espesor varía de 15 m a 100 m, aproximadamente. El basamento geológico está formado por roca metamórfica (Anortosita) de origen precámbrico (SGM, 2007; CONAGUA 2009), conocida como Complejo Oaxaqueño (Flores-Márquez *et al.*, 2001) (Figura 3).

Hidrografía

El río Atoyac (al este) y el río Zautla (que atraviesa el municipio de oeste a este) conforman la hidrografía de la zona de estudio (Figuras 1 y 3). El primero es perenne; el segundo, intermitente (SGM, 2007). El río Atoyac es la principal corriente superficial de la región de

Valles Centrales (Belmonte-Jiménez *et al.*, 2003; Belmonte-Jiménez *et al.*, 2005), y el río Zautla es su afluente (Figura 3).

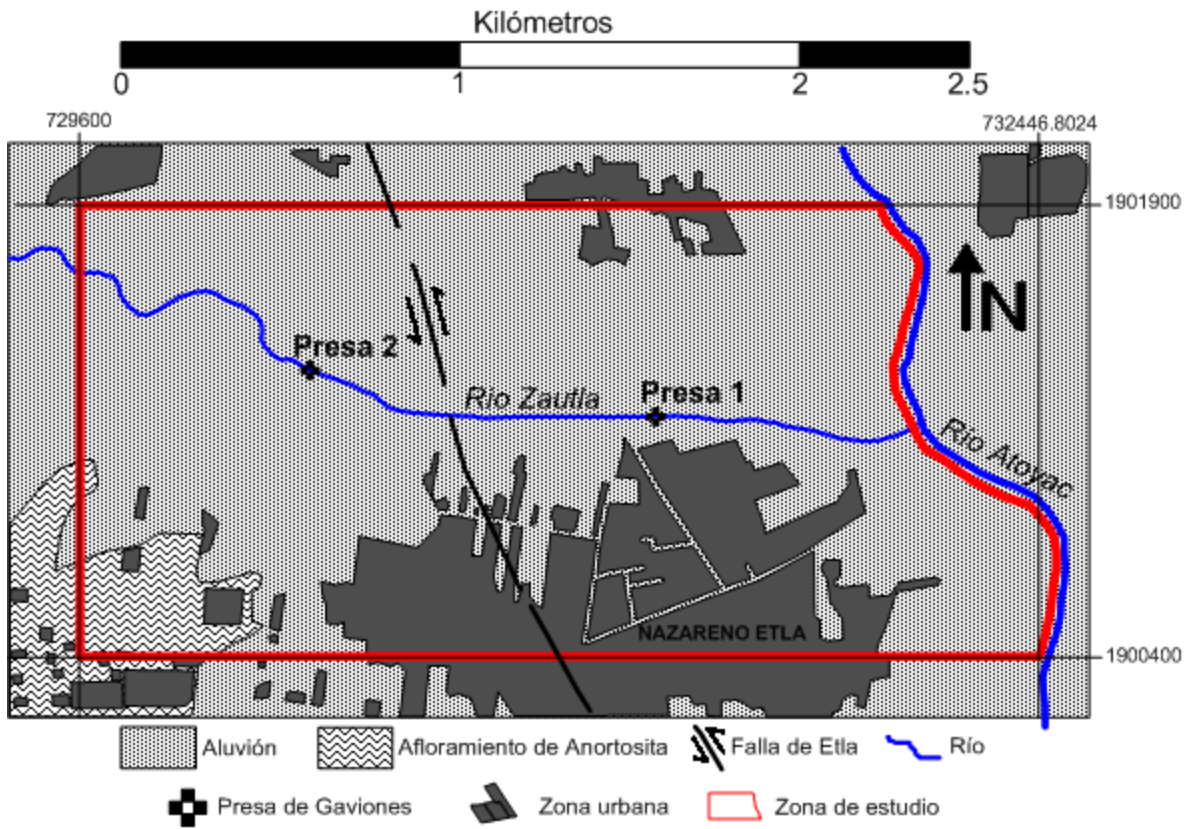


Figura 3. Geología superficial e hidrografía de la zona

Recolección de datos

Se realizó un estudio de campo para recabar datos sobre carga hidráulica o piezometría (h), conductividad hidráulica (K) y espesor del acuífero (B). La revisión de trabajos previos (Flores-Márquez *et al.*, 2001; Belmonte-Jiménez *et al.*, 2003; Flores-Márquez *et al.*, 2008; Bautista-Perdomo, 2013) permitió recabar información sobre el coeficiente de almacenamiento específico S_s y complementar la información con los datos recabados en campo.

Cálculo de la carga hidráulica, h (Piezometría)

Se seleccionaron 44 norias distribuidas en la zona de estudio, alrededor de las presas de gaviones (Figura 4). Fueron georreferenciadas en el sistema Universal Transversal Mercator (UTM), con equipo GPS postproceso. En cada una se midió la Profundidad del Nivel Freático (PNF). También se registró la altitud de la noria (AN) respecto al nivel medio del mar con ayuda de un Modelo Digital de Elevación (MDE).

La carga hidráulica (h) fue calculada restando la PNF de la AN. La información fue procesada en Surfer 10 para configurar la variación espacial y temporal de este parámetro en dos temporadas: marzo de 2013 y abril de 2014.

Estimación de la geometría del acuífero (espesor, B)

Se realizaron once Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) para conocer el espesor del acuífero (Figura 4). Se efectuaron en arreglo Schlumberger (Kirsch, 2006) y se interpretaron por modelado inverso usando el software IPIWIN (Bobachev *et al.*, 2000). Se configuraron 4 perfiles geoeléctricos, los cuales representaron las unidades estratigráficas del acuífero de acuerdo a la resistividad (Ωm) que ofrecía cada sedimento. Se obtuvo la geometría de cada unidad estratigráfica auxiliándose del MDE.

Determinación de la conductividad hidráulica, K

Se realizaron pruebas de infiltración para medir la tasa de infiltración y determinar la conductividad hidráulica de la superficie del suelo (Figura 4). En estas pruebas, se empleó un infiltrómetro de carga variable, el cual es un cilindro metálico de 1 m de largo por 0.15 m de diámetro, que permitió completar la prueba de infiltración rápidamente al utilizar una profundidad de agua significativa para acelerar el proceso de infiltración (Bouwer, 2002).

El infiltrómetro se introdujo en el suelo a una profundidad aproximada de 0.70 m. Se vertió agua en su interior y se midió la profundidad inicial del nivel de agua (tiempo cero, t_0), así como la profundidad a diferentes intervalos de tiempo ($t_1, t_2, t_3 \dots t_i$). Se calcularon los abatimientos en la columna de agua restando a la longitud del tubo las profundidades del

nivel de agua. La diferencia de altura a cada intervalo de tiempo determinó el abatimiento. Los datos recabados se procesaron con el método de Darcy (Sumner, 2000) para obtener el valor de la conductividad hidráulica con la expresión 1:

$$K = \frac{L}{t} \ln \frac{h_1 + L}{h_2 + L} \dots\dots\dots (1)$$

Los valores de K calculados en cada prueba se graficaron logarítmicamente en función del tiempo; la conductividad hidráulica, K , se determinó cuando los valores de la función se aproximaron a su asíntota. Este procedimiento se realizó en seis sitios.

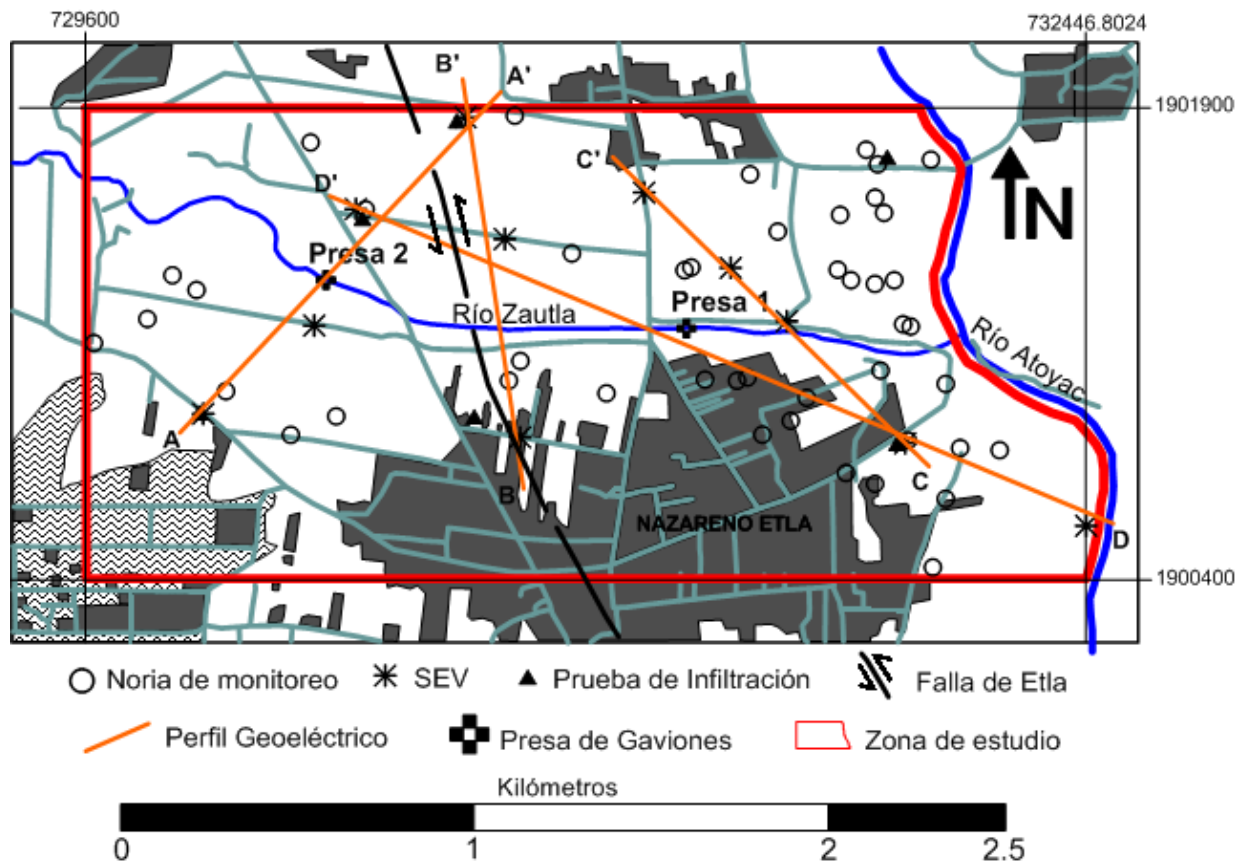


Figura 4. Localización de norias de monitoreo; sitios de pruebas de infiltración, y SEV. Perfiles geoelectricos: A-A', B-B', C-C' y D-D'

Coefficiente de almacenamiento específico (S_s) y porosidad total (n_T)

Flores-Márquez *et al.* (2008) reportaron valores de coeficiente de almacenamiento específico (S_s) y porosidad total (n_T) de las unidades estratigráficas del acuífero del Valle de Etlá. Se utilizaron los valores correspondientes a los dos estratos superficiales (aluvión y arena-arcilla), debido a su similitud con la información inferida a partir de la interpretación de los SEV realizados en Nazareno Etlá (Tabla 1).

Tabla 1. S_s y n_T asignados a las unidades estratigráficas del acuífero de Nazareno Etlá

Unidad*	S_s (1/m)	n_T
Arena y grava	0.0005	0.18
Arena y arcilla	0.00005	0.25

*Unidad estratigráfica determinada a partir de interpretación de los SEV (consultar sección RESULTADOS Y DISCUSIÓN).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carga hidráulica, h (Piezometría)

En las Figuras 5 y 6 se presenta la configuración de la carga hidráulica calculada a partir de los datos de campo (profundidad del nivel freático) en el periodo de un año: marzo de 2013 (Figura 5) y abril de 2014 (Figura 6). No hay una variación considerable entre los dos monitoreos. El mayor cambio estuvo en el sureste de la zona de estudio (noria 23), donde se presentó un descenso de 2 metros en el nivel freático, respecto al primer monitoreo. Se observa que la dirección del flujo es noroeste-sureste, lo cual concuerda con la información reportada por Flores-Márquez *et al.* (2008) para el modelado numérico del acuífero del Valle de Etlá, así como con la configuración obtenida por Bautista-Perdomo (2013) para el modelo de flujo del acuífero de Valles Centrales.

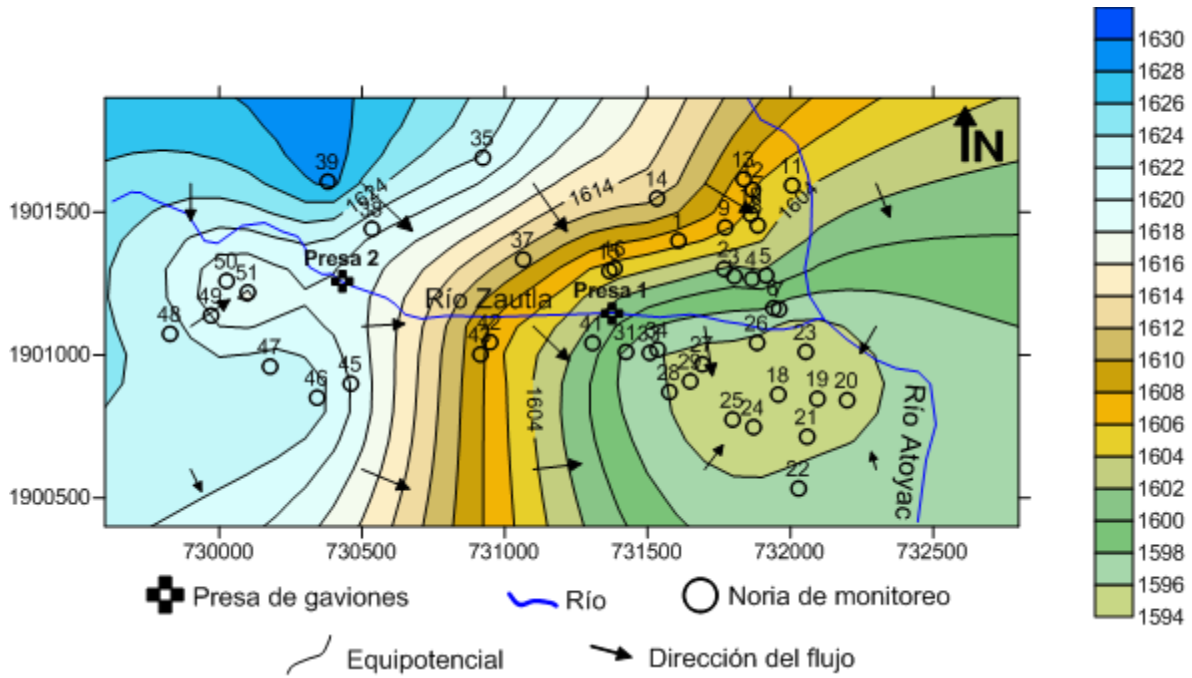


Figura 5. Configuración de la carga hidráulica, m (marzo de 2013)

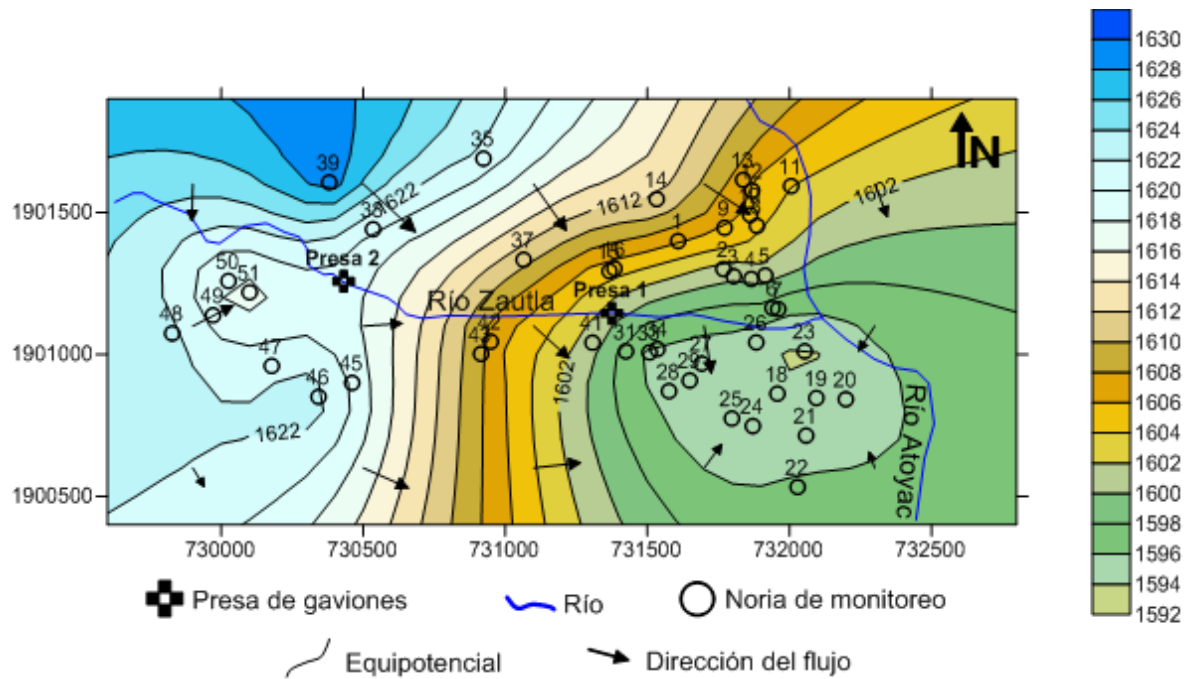


Figura 6. Configuración de la carga hidráulica, m (abril de 2014)

Conductividad hidráulica, K

Los valores de conductividad hidráulica se obtuvieron de las gráficas generadas con datos de las pruebas de infiltración (Figura 7). En cada punto, el valor se determinó cuando la curva tenía un comportamiento asintótico. Los valores variaron de 18 a 59 m/d (Tabla 2) y correspondieron a la unidad estratigráfica superior del acuífero, compuesta de arena y grava (Figura 9).

Los valores están en el mismo orden de magnitud que los obtenidos por Bautista-Perdomo (2013) para Valles Centrales con pruebas de bombeo, los cuales varían de 3.76 a 49.19 m/d, y asigna a la zona de Nazareno Etlá 18.9 m/d aproximadamente. Existe variación en orden de magnitud respecto a los resultados de Flores-Márquez *et al.* (2008) a partir de pruebas de bombeo (0.3456 a 8.64 m/d); la variación se atribuye al uso de metodología y escala de estudio diferentes.

Los valores obtenidos se interpolaron en Surfer 10, con el método de Kriging, para obtener la configuración espacial de la conductividad hidráulica en la unidad estratigráfica superior (Figura 8).

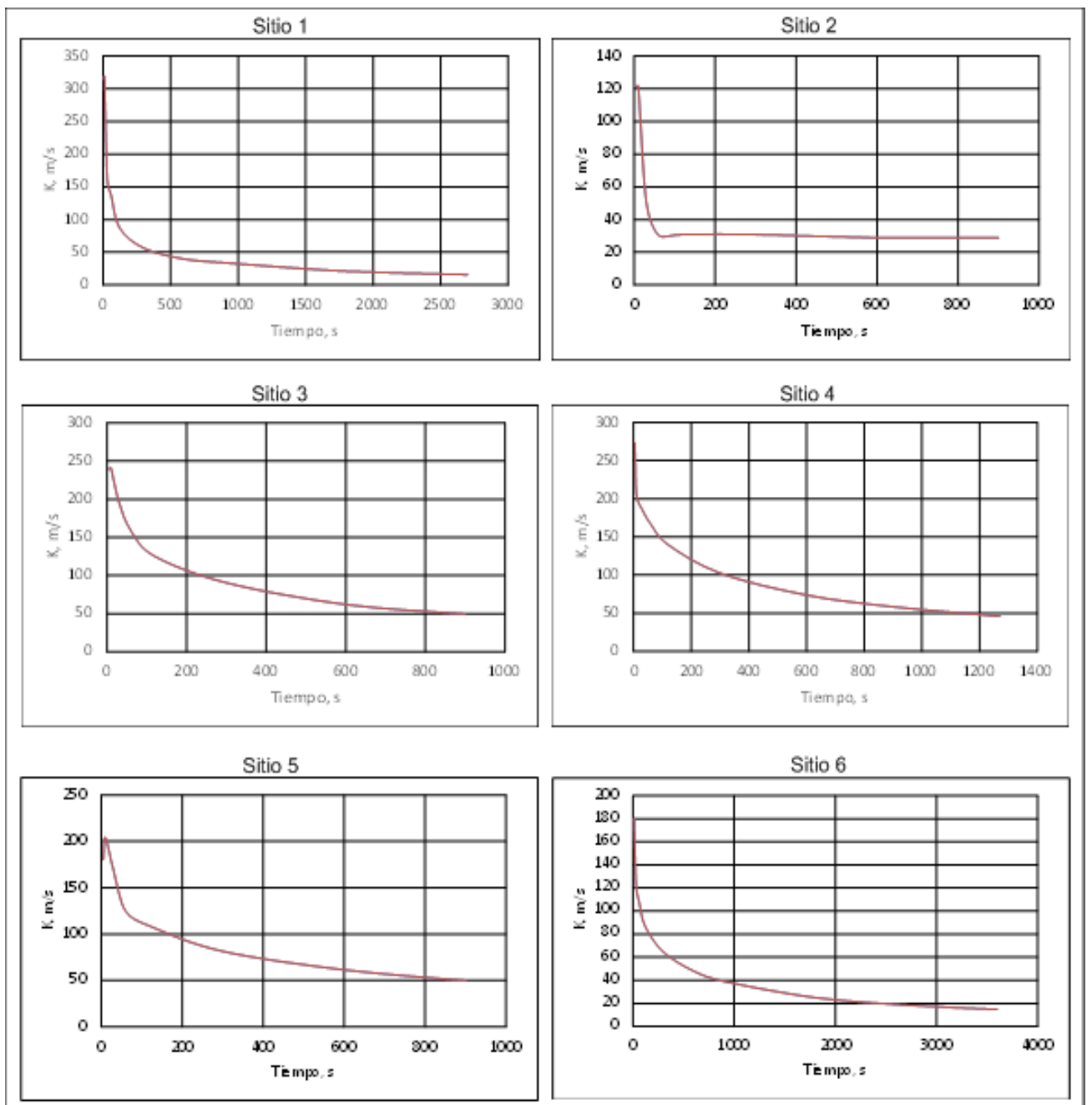


Figura 7. Gráficas generadas con datos de pruebas de infiltración

Tabla 2. Conductividad hidráulica, K (m/d) en el estrato superior

Sitio	1	2	3	4	5	6
K (m/día)	18.302	29.943	46.766	59.308	34.900	19.326

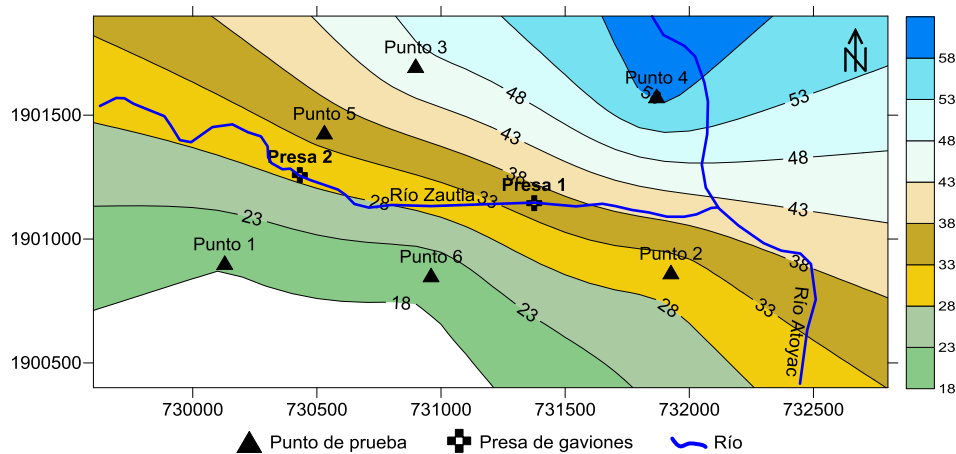


Figura 8. Distribución de la conductividad hidráulica (m/d) en la unidad estratigráfica superior (arena y grava)

Se asignó una conductividad hidráulica uniforme de 3.76 m/d para la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla) (Figura 9). Este valor es el mínimo que reporta Bautista-Perdomo (2013) para el acuífero de Valles Centrales. No se realizaron mediciones directas en esta unidad estratigráfica para determinar su conductividad hidráulica, sin embargo, su composición indicó que ésta era baja respecto a la de la unidad superior, compuesto de arena y grava (la información sobre la composición estratigráfica se detalla en la siguiente sección).

Perfiles obtenidos con los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

La interpretación de los SEV's arrojó cuatro perfiles geoelectrónicos, en los cuales se observa que el espesor del acuífero varía de 27 a 75 m, aproximadamente. Se identificaron dos unidades sedimentarias a partir de la resistividad estratigráfica ante la inducción de voltaje; la unidad estratigráfica superior, compuesta de arena y grava, y la inferior, compuesta de arena y arcilla. También se identificaron lentes arcillosos dentro de la unidad de arena y arcilla (Figura 9).

Los resultados coinciden con la información de los perfiles obtenidos por Flores-Márquez *et al.* (2001) para el Valle de Etna, los cuales indican que el acuífero se compone básicamente de arenas, cantos rodados, gravas y aluvión, que descansan sobre una capa de arcilla.

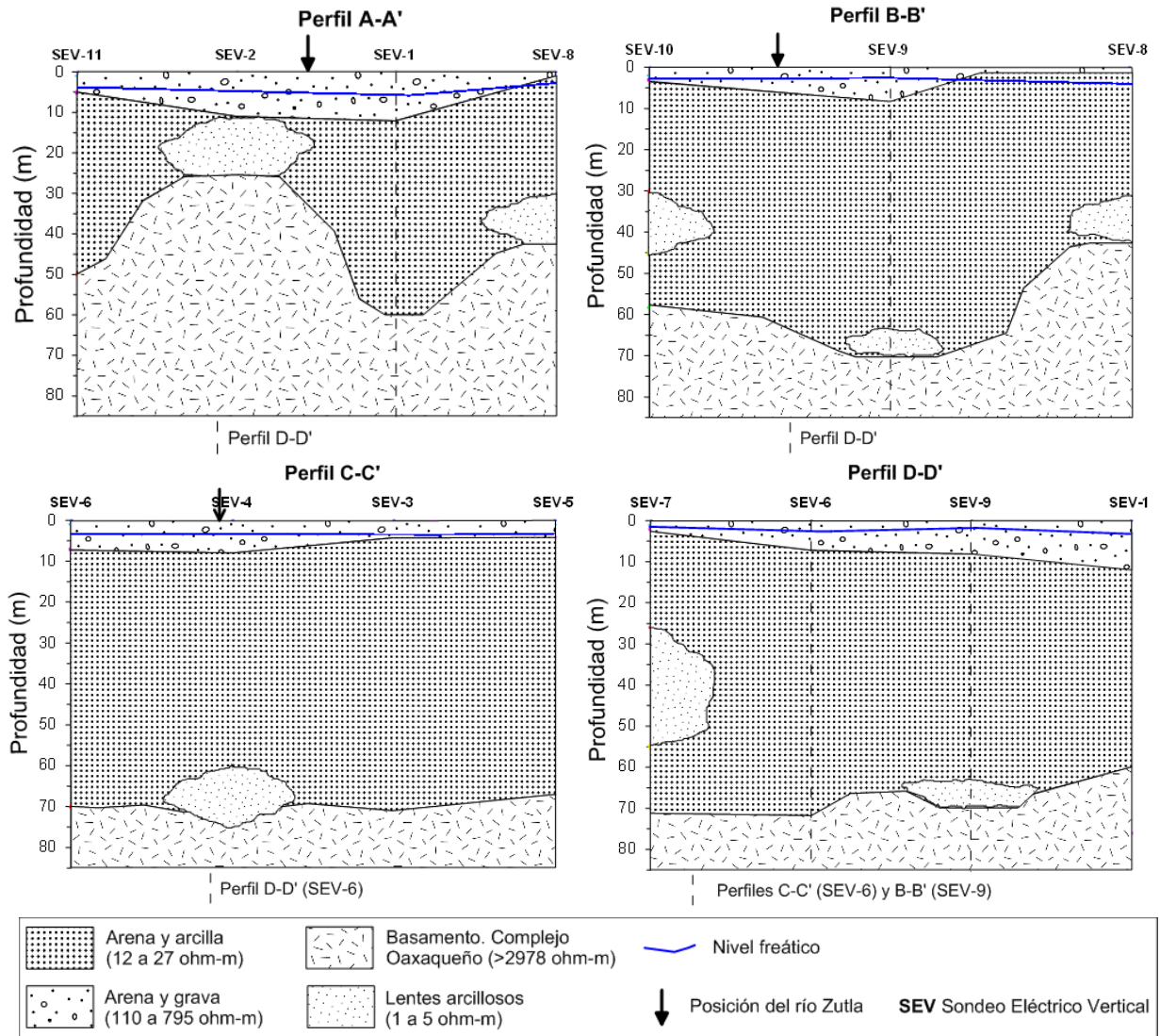
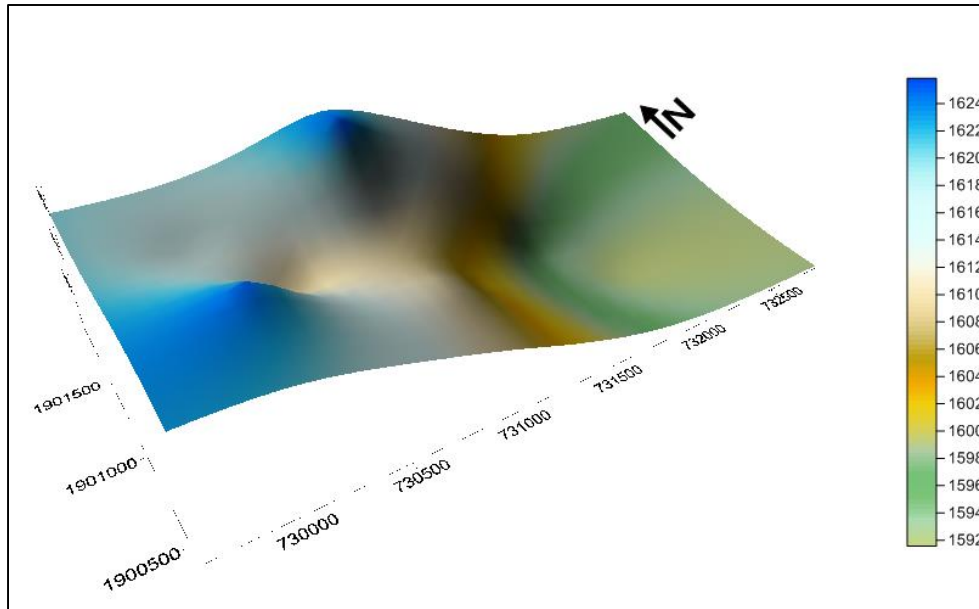
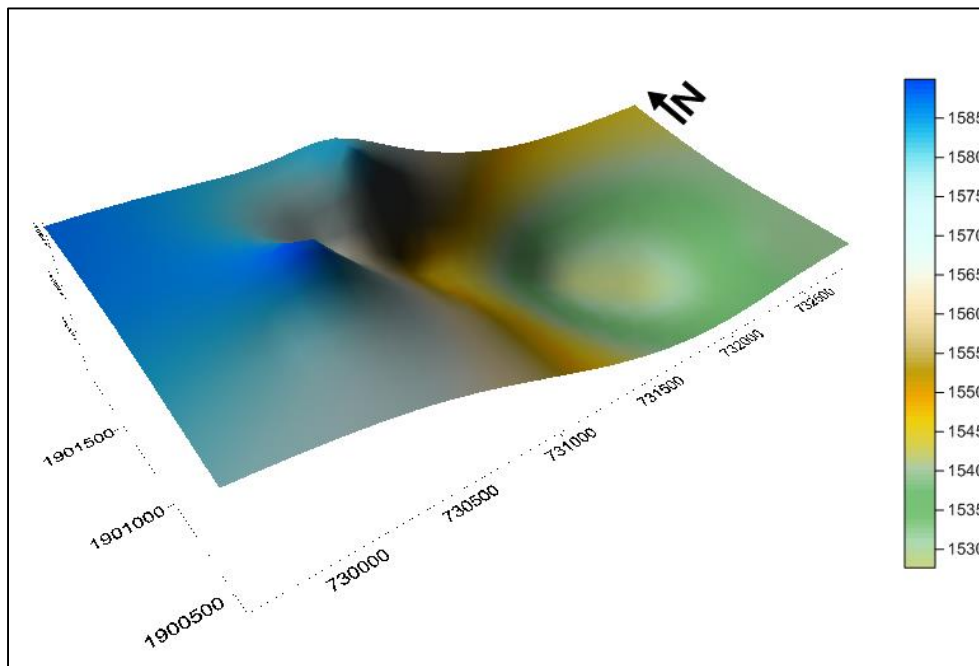


Figura 9. Perfiles geoelectricos obtenidos con los SEV

La geometría del acuífero se obtuvo a partir de los SEV; está representada por la configuración de la altitud respecto al nivel medio del mar, correspondiente a la base de cada uno de las unidades identificadas (Figura 10). También se obtuvo la configuración del espesor total del acuífero auxiliándose del MDE (Figura 11).



a)



b)

Figura 10. Geometría de las unidades estratigráficas, m: a) base de la unidad superior; base de la unidad inferior

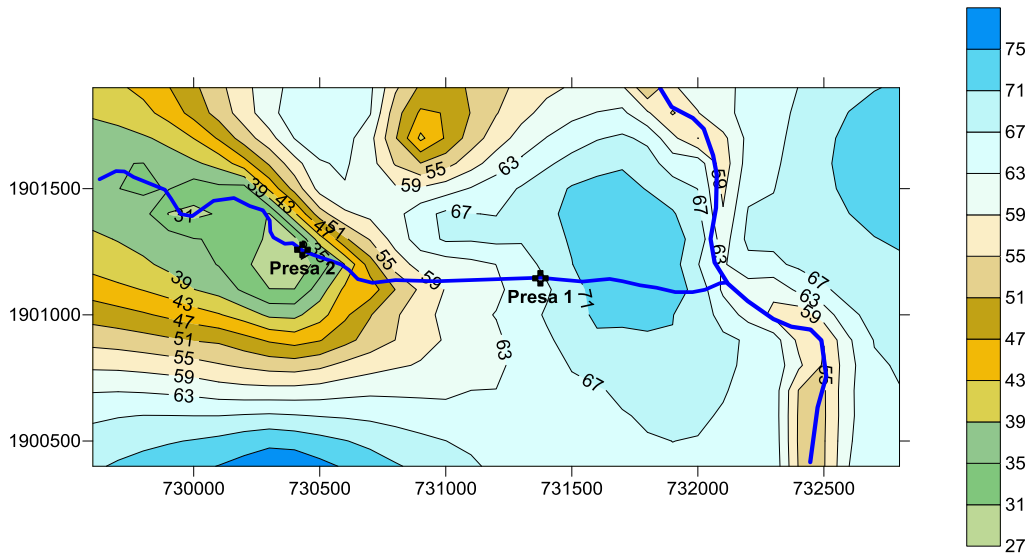


Figura 11. Variación del espesor total del acuífero

Coefficiente de almacenamiento específico (S_s) y porosidad total (n_T)

Se asignaron un coeficiente de almacenamiento específico, S_s , y una porosidad total, n_T , de 0.0005 m^{-1} y 0.18 , respectivamente, a la unidad estratigráfica superior (arena y grava), y de 0.00005 m^{-1} y 0.35 a la inferior (arena y arcilla). La asignación estuvo en función de los valores reportados por Flores-Márquez *et al.* (2008) para este tipo de litología en el acuífero del Valle de Etlá.

CONCLUSIONES

En el periodo de un año, no hay cambios considerables en la configuración de la carga hidráulica que indiquen la influencia de las presas de gaviones en el flujo de agua subterránea. Por lo tanto, estas estructuras no han contribuido a la recarga del acuífero en este periodo.

La conductividad hidráulica obtenida con pruebas de infiltración está en el mismo orden de magnitud que la calculada a partir de pruebas de bombeo a escala regional, por lo tanto, la metodología utilizada para determinar la conductividad hidráulica superficial fue adecuada.

La configuración de la conductividad hidráulica superficial indica que las presas de gaviones están en sitios con valores medios y bajos (23 a 28 m/d) en relación al valor más alto (59 m/d), en consecuencia, su ubicación no es la apropiada para generar recarga.

El acuífero se compone de dos unidades estratigráficas: superior (arena y grava) e inferior (arena y arcilla). La unidad inferior es la principal aportadora de agua al acuífero, ya que los perfiles geoelectrónicos indican que tiene mayor espesor (15 a 67 m) que la unidad superior (1 a 11 m).

REFERENCIAS

- Bautista-Perdomo, J. M. 2013. *Modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca*. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca IPN. 141 p.
- Belmonte-Jiménez, S. I., J. O. Campos-Enríquez & J. Herrera-Barrientos. 2003. Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca, México. *Revista Geofísica* 59, 19-32.
- Belmonte-Jiménez, S. I., J. O. Campos-Enríquez & M. A. Alatorre-Zamora. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional* 44(3), 283-300.
- Bobachev, A. A., I. N. Modin & V. A. Shevnin. 2000. *IPI2Win Guía de Usuario*. Universidad Estatal de Moscú. Facultad de Geología. Departamento de Geofísica. Geoscan - M Ltd.: Moscú, Rusia.
- Bower. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal* 10, 121-142.
- Bridge, J. S. & D. W. Hyndman. 2004. *Aquifer Characterization*. Society for Sedimentary Geology: Tulsa, OK.
- Chesnaux, R., M. Lambert, J. Walter, U. Fillastre, M. Hay, A. Rouleau, R. Daigneault, A. Moisan & D. Germaneau. 2011. Building a geodatabase for mapping hydrogeological features and 3D modeling of groundwater systems: Application to the Saguenay–Lac-St.-Jean region, Canada. *Computers & Geosciences* 37, 1870-1882.

- CONAGUA. 2009. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2025) Valles Centrales estado de Oaxaca*. Diario Oficial de la Federación: México.
- COUSSA. 2011. *Lineamientos Operativos Específicos para la Aplicación de Recursos del Componente de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA), del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales*. Subsecretaría de Desarrollo Rural: México.
- Doetsch J., N. Linde, I. Coscia, S. A. Greenhalgh & A. G. Green. 2010. Zonation for 3D aquifer characterization based on joint inversions of multimethod crosshole geophysical data. *Geophysics* 75, G53-G64.
- Engdahl, N. B., G. S. Weissmann & N. D. Bonal. 2010. An integrated approach to shallow aquifer characterization: combining geophysics and geostatistics. *Comput Geosci* 14, 217–229.
- Flores-Márquez, E. L., R. E. Chávez, R. G. Martínez-Serrano, J. Herrera-Barrientos, A. Tejero-Andrade & S. Belmonte. 2001. Geophysical characterization of the Etna Valley aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional* 40(4), 245-257.
- Flores-Márquez, E. L., R. G. Martínez-Serrano, R. E. Chávez, Y. Crusillo, G. Jiménez & O. Campos-Enríquez. 2008. Numerical modeling of Etna Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios. *Geofísica Internacional* 47, 27-40.
- Hund-Der, Y. & C. Ya-Chi. 2013. Recent advances in modeling of well hydraulics. *Advances in Water Resources* 51, 27-51.
- Kirsch, R. 2006. *Groundwater geophysics. A tool for hydrogeology*. Reinhard Kirsch. Landesamt für Natur und Umwelt. Abt. Geologie/Boden: Flintbek Germany.
- SAGARPA. 2009. *Manual de Presas de gaviones*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación: Estado de México, México.
- SGM. 2007. *Carta Geológico Minera Oaxaca de Juárez E14-D47 Oaxaca*. Servicio Geológico Mexicano: Pachuca, Hidalgo, México.
- Sumner M. 2000. *Handbook of Soil Science*. CRC Press: USA.

CAPÍTULO 2

MODELO COMPUTACIONAL CON VISUAL MODFLOW DEL SISTEMA ACUÍFERO GRANULAR DE NAZARENO ETLA, OAXACA

INTRODUCCIÓN

El modelo computacional de un sistema acuífero es una herramienta para proponer alternativas que ayuden a mitigar y controlar el impacto antropogénico sobre el agua subterránea. Considera la distribución espacial y temporal de parámetros hidrogeológicos para simular el movimiento del agua subterránea (Bonomi, 2009). Además, el modelo proporciona una idea amplia sobre la dinámica del sistema acuífero, así como perspectivas futuras, al contemplar el estrés climático y antropogénico (Zume & Tarhule, 2011). Diversas herramientas computacionales se usan para modelar sistemas acuíferos. La más utilizada es *Visual Modular three Dimensional Flow* (Visual MODFLOW), herramienta computacional que utiliza el Método de Diferencias Finitas (MDF) para modelar el movimiento del agua subterránea (Harbaugh, 2005; Waterloo Hydrogeological Inc., 2006; Wang *et al.*, 2008).

Flores-Márquez *et al.* (2008) configuraron un modelo del Valle de Etlá, Oaxaca, con visual MODFLOW. Estimaron descensos de aproximadamente 6 m para el año 2015, si continúan las condiciones actuales de extracción. Bautista-Perdomo (2013) empleó este programa para modelar el acuífero de Valles Centrales, Oaxaca. Predijo abatimientos del nivel freático de hasta 60 m para el año 2034, bajo un escenario de cambio climático. Missimer *et al.* (2014) modelaron el comportamiento de un acuífero al oeste de Arabia Saudita bajo un sistema de recarga artificial que combina el uso de presas, para captar agua fluvial, y pozos, para almacenarla e inyectarla al acuífero. Los resultados indican que los pozos pueden almacenar más de 1000 m³/d bajo un sistema de alimentación por gravedad, y más de 3900 m³/d con un sistema de recarga presurizado.

En Nazareno Etna, Oaxaca, se construyeron dos presas de gaviones. Estas estructuras favorecen la recarga de acuíferos (SAGARPA, 2009). No se han realizado estudios que comprueben la eficiencia de las presas de gaviones en Nazareno Etna, sin embargo, existe información hidrogeológica de la zona (Véase Capítulo 1) que puede ser aprovechada.

El objetivo de este estudio fue construir un modelo computacional del sistema acuífero granular de Nazareno Etna para evaluar el funcionamiento de las presas de gaviones como fuentes de recarga. Además, el modelo puede servir para predecir el comportamiento del acuífero ante diversos escenarios al aumentar periódicamente la cantidad de datos necesarios para respaldar la predicción.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

La zona de estudio está en el municipio de Nazareno Etna, Oaxaca, México, a 13 km al noroeste de la ciudad de Oaxaca de Juárez. Es parte de los Valles Centrales, y abarca 3.69 km² dentro de la microcuenca del río Zautla (afluente del río Atoyac) (Figura 12). La zona se delimitó considerando la ubicación de las presas de gaviones, la distribución de norias para monitorear el nivel freático y la disponibilidad de espacio para emplear métodos geoelectrónicos para la caracterización. La información sobre las presas de gaviones se abarcó en el Capítulo 1 de este trabajo.

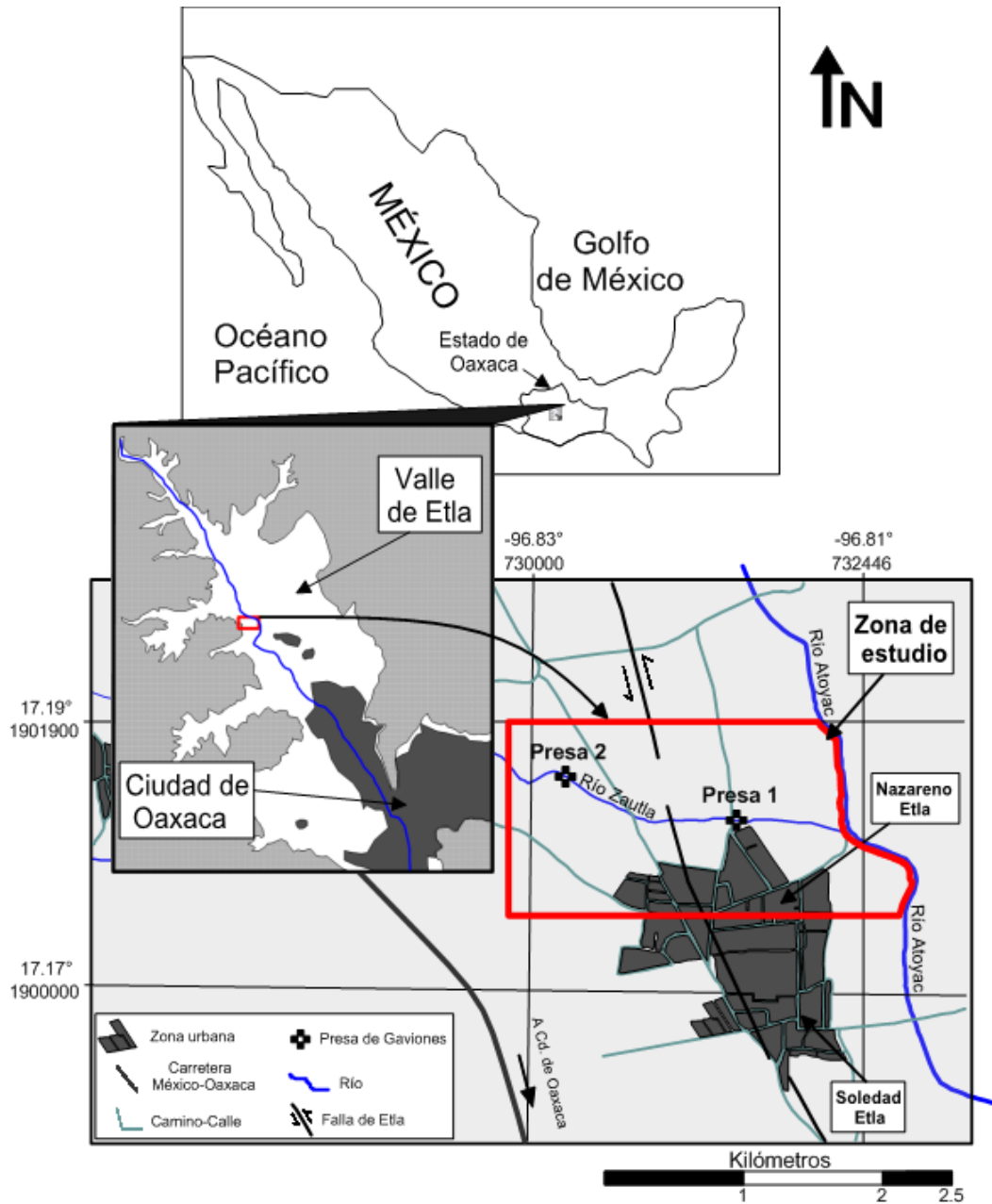


Figura 12. Localización de la zona de estudio en Nazareno Etla, Oaxaca, México

Información disponible

El estudio de modelado consiste en: 1) recolectar y organizar información hidrogeológica de la zona de estudio, 2) configurar un modelo conceptual con la información recolectada que represente gráficamente el sistema acuífero, y 3) construir el modelo computacional

utilizando la expresión matemática que lo caracteriza, las condiciones de frontera y las condiciones iniciales (Lachaal *et al.*, 2012).

Se aprovechó información recabada previamente sobre la zona de estudio (Véase Capítulo 1) para configurar el modelo conceptual, y posteriormente construir el modelo computacional, de acuerdo a la metodología que se observa en la Figura 13.

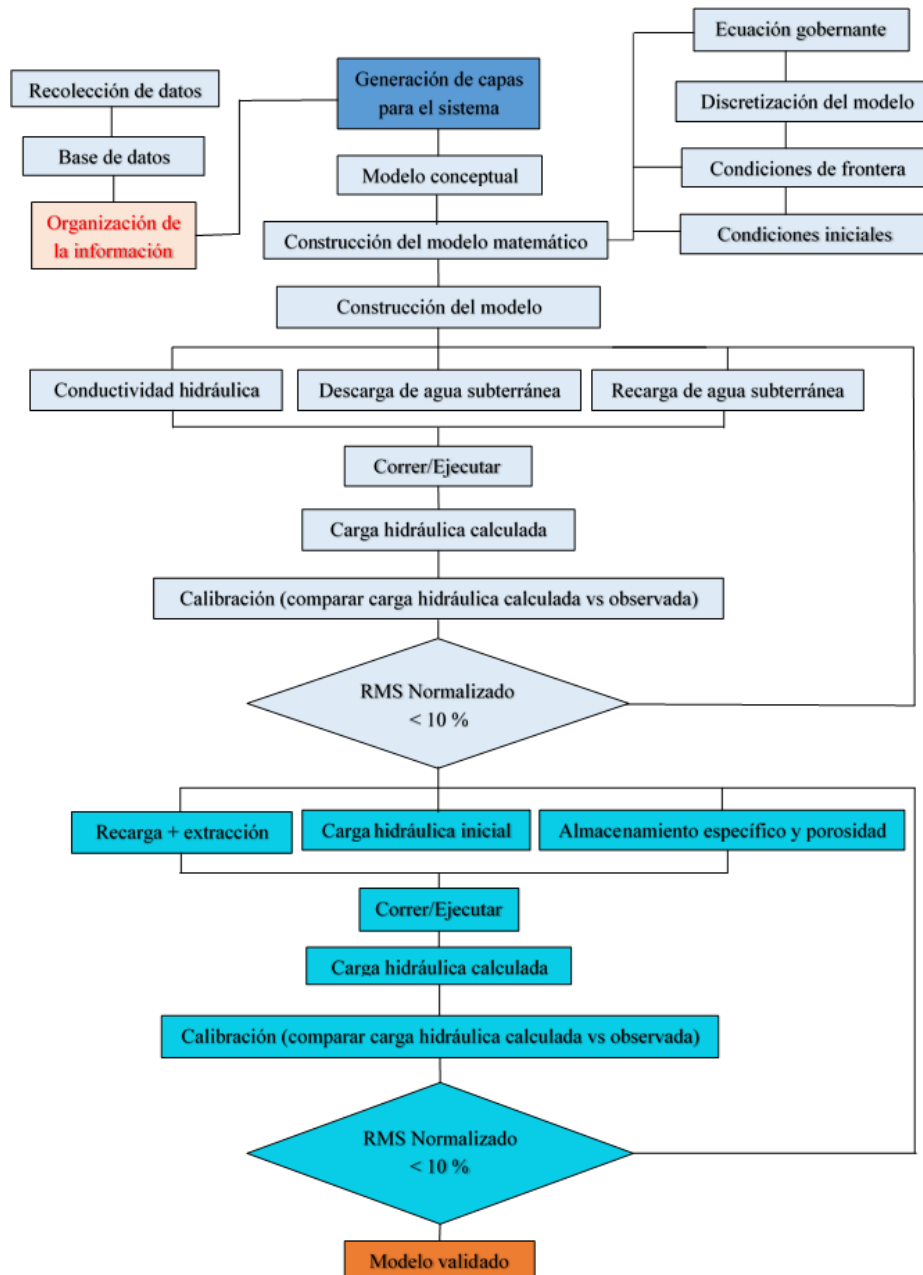


Figura 13. Procedimiento para estudios de modelado de sistemas de agua subterránea (Modificado de Lachaal *et al.*, 2012)

Construcción del modelo conceptual

La información hidrogeológica y geométrica disponible sobre el acuífero (Flores-Márquez *et al.*, 2001; SGM, 2007; Flores-Márquez *et al.*, 2008; Bautista-Perdomo, 2013) permitió configurar el modelo conceptual del sistema acuífero. Las variables hidrogeológicas introducidas fueron la carga hidráulica (piezometría), correspondiente al mes de marzo de 2013, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento específico (S_s). La información geométrica (inferida a través de SEV) permitió establecer la variación del espesor del acuífero. También se detallaron la topografía, con un Modelo Digital de Elevación (MDE), y la hidrografía de la zona (Véase Capítulo 1).

Construcción del modelo computacional

Discretización

El modelo conceptual fue utilizado como referencia para construir el modelo computacional. Se utilizó Visual MODFLOW 4.2 para discretizar el dominio del modelo (zona de estudio) en una malla compuesta por 480 celdas, distribuidas en 15 filas por 32 columnas; cada celda tuvo dimensiones x y y de 100 x 100 m; la dimensión z estuvo en función de la variación del espesor del acuífero (Figura 14). Para ubicar los ríos, las norias de monitoreo y las presas de gaviones, se utilizó como base un archivo *Drawing Exchange Format* (DXF) generado en AutoCAD.

Asignación de zonas inactivas

Del total de celdas, 369 se consideraron como activas y 111 como inactivas (Figura 14). Se asumieron tres zonas inactivas: zona A, al noroeste, considerada inactiva para ajustar la configuración espacial de la carga hidráulica arrojada por el modelo (una vez calibrado) a la configuración inicial de los valores medidos en campo (marzo de 2013); zona B, al suroeste, reconocida como inactiva o zona de no flujo, debido al afloramiento de Anortosita (SGM, 2007); zona C, al este del río Atoyac, considerada inactiva al asumir a este río como frontera hidrológica o natural del modelo.

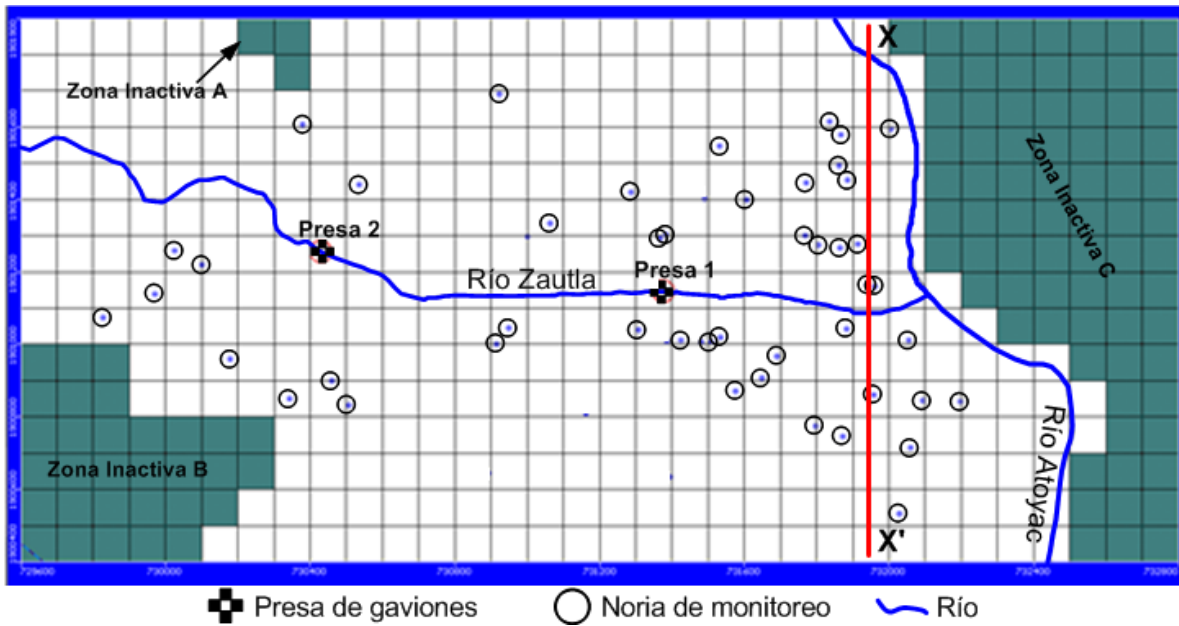


Figura 14. Discretización del dominio del modelo

Propiedades hidrogeológicas

Se definieron dos unidades estratigráficas a partir de la información obtenida de la interpretación de los SEV (Véase Capítulo 1): la unidad superior, compuesta de arena y grava, y la inferior, formada por una mezcla de arena y arcilla; el basamento (Complejo Oaxaqueño) subyace a estas capas a profundidades que van de 27 a 75 m. Al introducir esta información a MODFLOW, se consideró a la unidad estratigráfica superior como acuífero libre, y a la inferior, como acuífero semiconfinado (Figura 15).

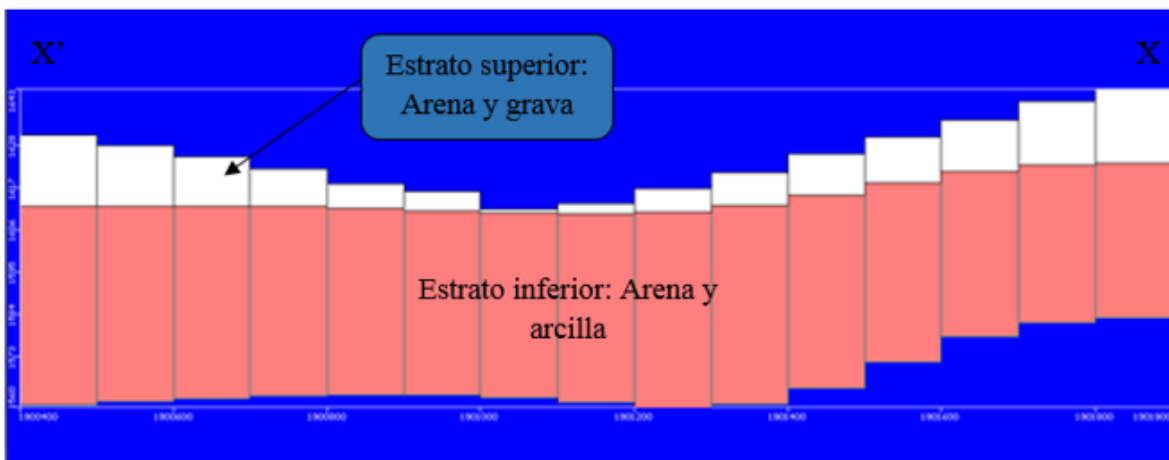


Figura 15. Corte de la sección X-X' de la Figura 14: unidades estratigráficas consideradas

La carga hidráulica inicial asignada fue la calculada a partir de monitoreos del nivel freático en 44 norias (Véase Capítulo 1), en marzo de 2013. La configuración de este parámetro se introdujo al modelo en formato *Gridded Data* (grd) desde Surfer 10.

La configuración inicial de la conductividad hidráulica para la unidad estratigráfica superior (arena y grava) fue la obtenida a través de pruebas de infiltración (Véase Capítulo 1). La información se introdujo al modelo en archivo *Gridded Data* (grd) proveniente de Surfer 10. Para la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla), se consideró la información aportada por Bautista-Perdomo (2014) con base en pruebas de bombeo para asumir condiciones homogéneas e isotrópicas, y asignar una conductividad hidráulica uniforme de 3.76 m/d.

A la unidad estratigráfica superior, se asignó un coeficiente de almacenamiento específico (S_s) de 0.0005 1/m y una porosidad total (n_T) de 0.18, y a la unidad inferior, un S_s de 0.00005 1/m y una n_T de 0.35. Estos valores se encuentran entre los que reportan Flores-Márquez *et al.* (2008) para la estratigrafía del acuífero del Valle de Etna, Oaxaca.

Condiciones de frontera

El modelo numérico resuelve la ecuación general de flujo utilizando condiciones de frontera en un tiempo específico (Dutton & Mace, 2002); las que se utilizaron en este estudio se mencionan a continuación:

Cargas constantes

Se asignaron condiciones de frontera de carga constante o tipo Dirichlet (Kumar-Roy, 2008) en los límites norte y oeste del dominio del modelo. Los valores de estas cargas variaron de 1613 a 1628 m, con base en la configuración de la carga hidráulica inicial. Los límites norte y oeste corresponden a regiones del modelo donde la carga hidráulica (piezometría) presenta los valores más altos (Figura 16).

Ríos

Los ríos que caracterizan hidrográficamente la zona de estudio son el Atoyac y el Zautla. El primero es la principal corriente superficial en la región (Belmonte-Jiménez *et al.*, 2003; Belmonte-Jiménez *et al.*, 2005); el segundo es su tributario. Las celdas correspondientes a la ubicación de éstos ríos se caracterizaron para indicar su presencia (Figura 16). Se utilizó la información hidrogeológica y geométrica disponible (Capítulo 1), así como un MDE, para obtener topografía y espesor de la unidad estratigráfica superior (arena y grava) para los dos ríos; de esta forma se determinaron carga hidráulica, topografía, espesor de la capa o lecho del río (espesor de unidad estratigráfica superior), ancho y longitud, y conductividad hidráulica.

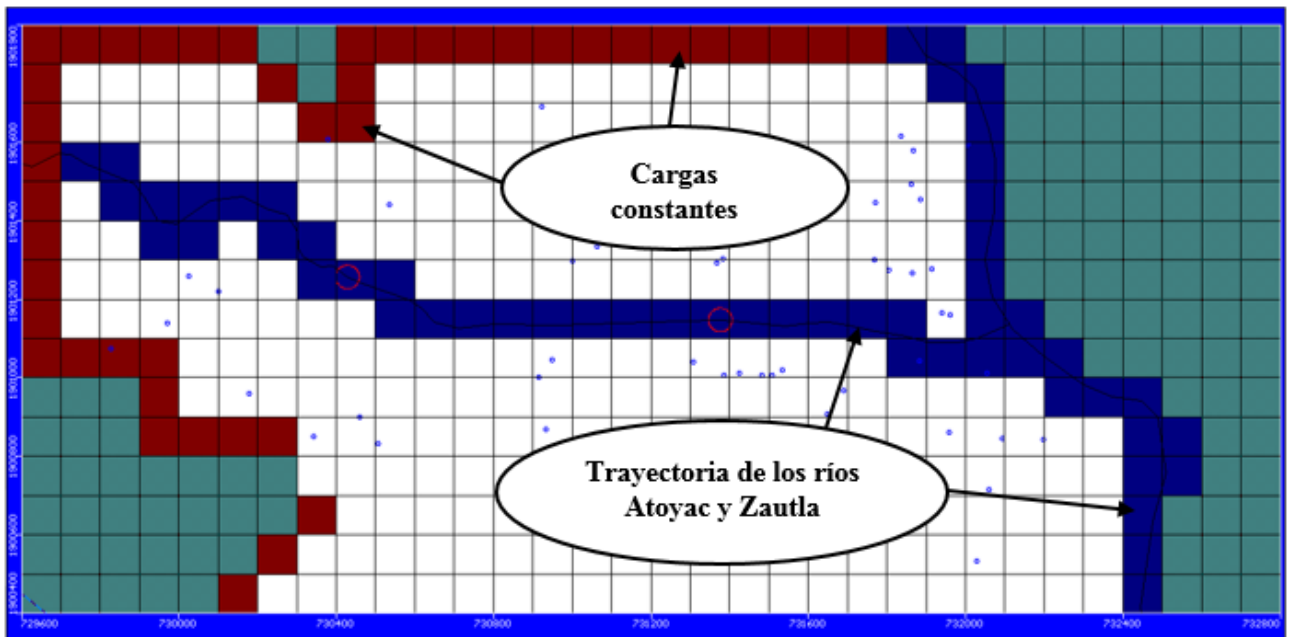


Figura 16. Distribución de cargas constantes en límites norte y oeste, y caracterización de los ríos

Recarga

Bautista-Perdomo (2013) obtuvo una distribución de la recarga para la región de Valles Centrales en la Cuenca Alto Atoyac. Su información sirvió para asignar a la zona de estudio una recarga de 24.99 mm/año uniformemente. Se asignó un valor de 31.48 mm/año en las celdas que representaron la ubicación de las presas de gaviones para simular la recarga que

podieran aportar estas estructuras; este valor representa la máxima recarga que se lleva a cabo en Valles Centrales.

Evapotranspiración

Se utilizó información de la estación meteorológica 20034, ubicada en la Villa de Etila (a 4 km de la zona de estudio) para calcular la evapotranspiración real (*ET_{real}*). Se empleó el método de Turc con la expresión 2:

$$ET_{real} = \frac{P}{[0.9 + (P/I_T)^2]^{1/2}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

ET_{real}: es la evapotranspiración anual (mm)

P: es la precipitación anual (mm)

I_T se obtiene a partir de la temperatura media del aire, T (°C), con la expresión 3:

$$ET_{real} = 300 + 25T + 0.05T^3 \dots\dots\dots (3)$$

El valor obtenido de *ET_{real}* se asignó uniformemente en el dominio del modelo.

Calibración

Con la calibración, se busca obtener un ajuste óptimo entre los datos calculados y los medidos en campo y reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros hidrogeológicos (Zume & Tarhule, 2011; Lachaal *et al.*, 2012). La calibración de un modelo computacional no garantiza que éste sea representativo del sistema modelado, ya que la incertidumbre permanece y puede trasladarse a los resultados; sin embargo, los datos de alimentación del modelo pueden ser sustituidos eventualmente por otros más detallados que representen mejor al sistema (Goderniaux *et al.*, 2009).

Visual MODFLOW resuelve la ecuación de flujo del agua subterránea (4) en estado estacionario, sin variación de la carga hidráulica en el tiempo (sin extracción por bombeo), y

en estado transitorio, cuando la carga hidráulica varía en el tiempo (existe extracción por bombeo) (ver proceso de modelado en Figura 13).

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

K : Tensor de conductividad hidráulica (m/día)

$\frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y}, \frac{\partial h}{\partial z}$: Gradiente hidráulico (adimensional)

S_s : Coeficiente de almacenamiento específico (1/m)

$\frac{\partial h}{\partial t}$: Variación de la carga hidráulica en el tiempo (m/d)

W : Balance de agua subterránea (recarga-descarga, m³)

En estado estacionario, no hay cambio en la carga hidráulica en el tiempo, por lo tanto, el término $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$. Esto implica que S_s también se anula de la ecuación 1; además, al no haber variación de la carga hidráulica en el tiempo, se asume que la entrada de agua al sistema es igual a la salida ($W=0$). Consecuentemente, el flujo en estado estacionario en tres dimensiones es descrito por una ecuación diferencial conocida como ecuación de Laplace (5) (Fetter, 2001):

$$K \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

En estado transitorio, la carga hidráulica varía en el tiempo, por lo tanto, se considera el coeficiente de almacenamiento, S_s . Además, la entrada de agua al sistema no es igual a la salida, por lo tanto, se toma en cuenta el balance de agua subterránea, W . Bajo estas condiciones, Visual MODFLOW resuelve la ecuación de flujo en la forma de la ecuación 4.

El error normalizado de la Raíz Media Cuadrada (*nRMS error*) es la expresión estadística que utiliza Visual MODFLOW para evaluar la relación entre los valores de carga hidráulica

obtenidos a partir de datos de campo y los calculados por el modelo mediante regresión lineal (Waterloo Hydrogeological Inc., 2006). El *nRMS error* se obtiene a partir de la expresión 6:

$$RMS\ error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i^2} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

RMS error: error de la Raíz Media Cuadrada

n: número de datos observados (número de norias usadas para calibrar)

R_i: diferencia entre los valores calculados (*X_{Cal}*) y los valores observados (*X_{Obs}*); se obtiene mediante 7:

$$R_i = X_{Cal} - X_{Obs} \dots\dots\dots (7)$$

El *nRMS error* es igual al *RMS error* dividido por la máxima diferencia de los valores (niveles de carga hidráulica) observados. Se expresa con la ecuación 8:

$$nRMS\ error = \frac{RMS\ error}{(X_{Obs})_{Max} - (X_{Obs})_{Min}} \dots\dots\dots (8)$$

Scibek *et al.* (2007), Nettasana *et al.* (2012) y Appiah-Adjei *et al.* (2013) obtuvieron valores de *nRMS error* de 8%, 5.5% y 1.85%, respectivamente, utilizando Visual MODFLOW para modelar acuíferos libres. Se considera que un *nRMS error* menor a 10% es aceptable para considerar que un modelo está calibrado y validado.

Se seleccionaron 24 norias de observación (*n* = 24) para realizar la calibración (Tabla 3), primero en estado estacionario y después en estado transitorio, para dos periodos: 365 días (2013-2014) y 730 días (2014-2015). La distribución de las norias de observación se muestra en la Figura 17.

Tabla 3. Norias de observación utilizadas para calibrar el modelo

NORIAS DE OBSERVACIÓN	COORDENADAS UTM (Zona 14)	
	X	Y
NO01	731608.248	1901399.639
NO02	731767.678	1901300.952
NO03	731803.838	1901275.537
NO04	731865.728	1901266.037
NO05	731914.932	1901278.107
NO06	731940.705	1901163.900
NO07	731960.634	1901159.483
NO08	731885.728	1901452.970
NO09	731771.82	1901446.321
NO10	731861.831	1901491.841
NO11	732006.102	1901593.266
NO12	731868.39	1901577.679
NO13	731837.183	1901615.21
NO14	731532.910	1901547.409
NO18	731957.824	1900861.489
NO19	732094.956	1900846.326
NO25	731797.539	1900774.06
NO26	731883.358	1901042.32
NO38	730534.589	1901441.28
NO39	730380.216	1901606.484
NO45	730460.788	1900899.523
NO48	729827.713	1901073.982
NO49	729971.215	1901137.872
NO51	730100.074	1901218.890

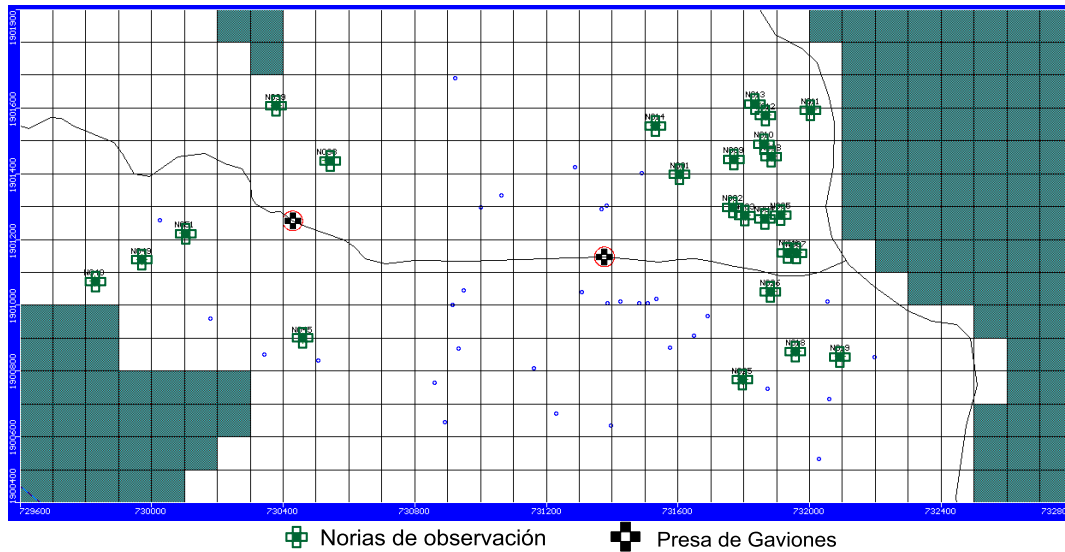


Figura 17. Distribución de norias de observación

En la primera corrida, el *nRMS error* no fue aceptable. Se realizó una redistribución de la conductividad hidráulica, ampliando y/o reduciendo la zona de influencia de cada valor puntual medido en campo (zonificación). Se alcanzó una segunda y definitiva distribución de este parámetro, con la cual se consiguió un *nRMS error* aceptable.

El siguiente paso fue calibrar el modelo en estado transitorio para observar la evolución del sistema acuífero, considerando la extracción de agua por bombeo. Se consideraron los gastos de pozos profundos concesionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el municipio de Nazareno Etla. También existen norias de las que se extrae agua para uso doméstico y riego, sin embargo, la ausencia de datos sobre caudales de extracción de estas norias, obligó a considerar solamente las cantidades disponibles en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) para los pozos profundos (CONAGUA, 2014). La información se presenta en la Tabla 4. La distribución de los puntos de extracción se muestra en la Figura 18.

Tabla 4. Pozos profundos utilizados para calibrar en estado transitorio

Pozos de Extracción	Volumen de Extracción m ³ /día	Coordenadas UTM (Zona 14)	
		X	Y
PP20	2200	732198.8	1900842
PP21	1100	732058.8	1900714
PP22	300	732029.1	1900533
PP23	3300	732054	1901011
PP24	1500	731871.2	1900747
PP29	2000	731649.3	1900908
PP37	7.34	731064.5	1901334
PP46	12.33	730342.7	1900851
PP50	1500	730025.7	1901259
PP56	0.53	730859.8	1900765
PPSSS	100	731425.3	1900570
PPNAZARENO1	800	729885.9	1901364
PPNAZARENO4	4800	731826.2	1901092

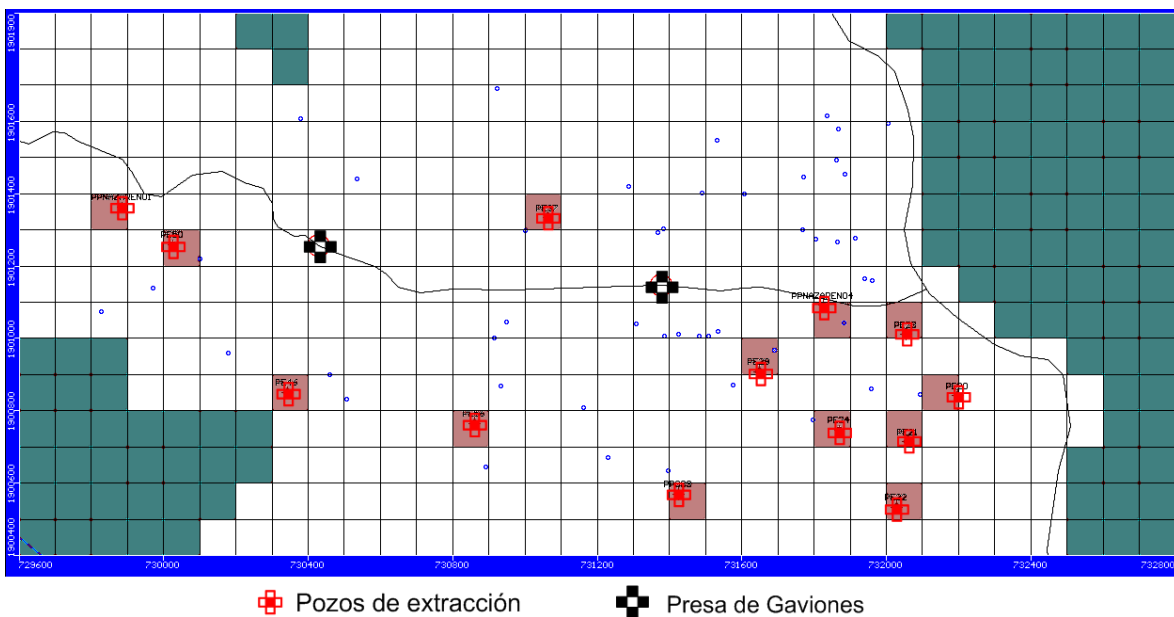


Figura 18. Distribución de pozos de extracción

La corrida del modelo en estado transitorio arrojó un *nRMS error* aceptable, por lo tanto, el modelo se consideró calibrado. Los resultados de la calibración, así como de la construcción del modelo conceptual y la simulación del modelo computacional, se presentan a continuación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo conceptual

El modelo conceptual configurado con información hidrogeológica y geométrica (véase Capítulo 1) se muestra en la Figura 19. Las características estratigráficas se presentan en la Tabla 5. El acuífero está constituido por dos unidades: la superior, de arena y grava, y la inferior, de arena y arcilla. Se observa un afloramiento de roca hacia el suroeste, identificado como anortosita del proterozoico medio y considerado como extensión del basamento (Complejo Oaxaqueño) sobre el que descansa el relleno sedimentario (Flores-Márquez *et al.*, 2007; SGM, 2007). La ET_{real} estimada para la zona de estudio fue de 535.8 mm/año.

Para simplificar el modelo computacional, no se consideraron los lentes arcillosos identificados dentro de la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla) (consultar Capítulo 1). Se consideraron dos unidades estratigráficas definidas, sin embargo, para modelar el acuífero del Valle de Etna, Flores-Márquez *et al.* (2008) consideraron seis estratos sedimentarios con espesores de 20 a 500 m. La discrepancia en el número de unidades estratigráficas consideradas indica que en todo el acuífero del Valle de Etna no existe la misma secuencia sedimentaria.

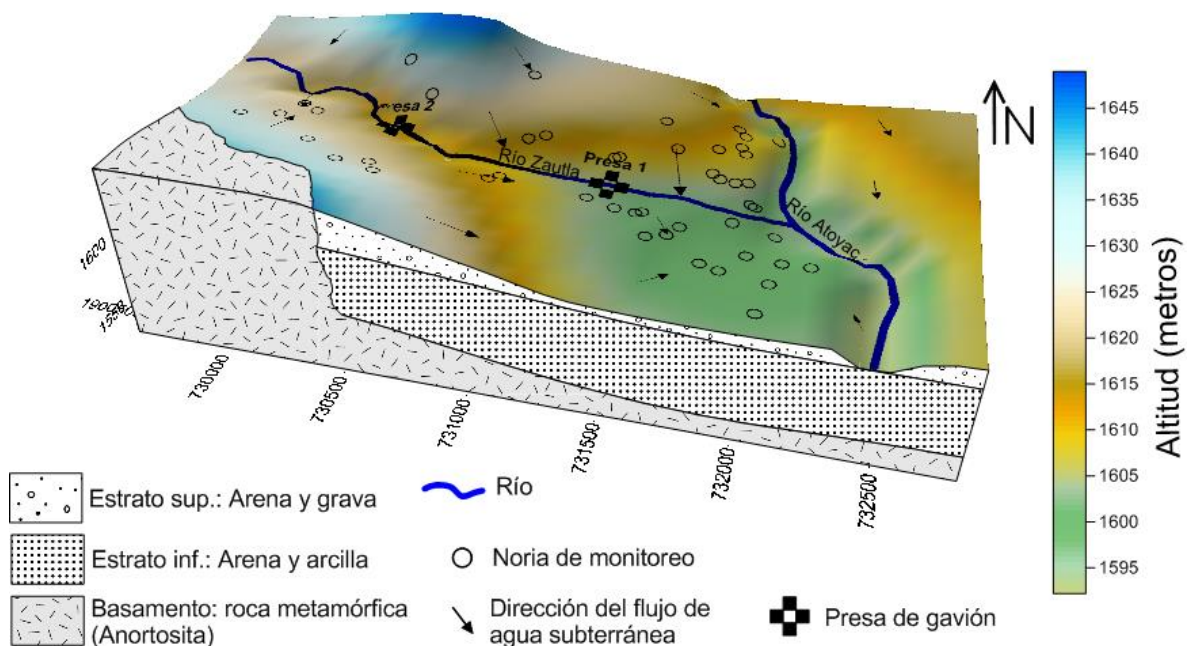


Figura 19. Modelo conceptual del sistema acuífero de Nazareno Etna

Tabla 5. Unidades estratigráficas del sistema acuífero

Unidad estratigráfica	Clasificación hidroestratigráfica	Estrato	Espesor (B), m	Conductividad (K), m/d
Superior	Unidad de alta permeabilidad.	Arena y grava	1 - 30	19 - 59
Inferior	Unidad de baja permeabilidad.	Arena y arcilla.	15 - 70	3.76
Basamento	Unidad no permeable (basamento).	Complejo Oaxaqueño.	-	-

Calibración en estado estacionario

La conductividad hidráulica y la configuración de cargas constantes en los límites norte y oeste del modelo afectan la ecuación general de flujo de agua subterránea en estado estacionario. La variación de estos parámetros, mediante un ensayo de prueba y error, mostró que la conductividad hidráulica era la variable más determinante para el desarrollo del modelo de flujo; su ajuste generó la gráfica de calibración que se muestra en la Figura 20. Se obtuvo un *nRMS error* de 6.421%, con lo cual el modelo se consideró calibrado en estado estacionario.

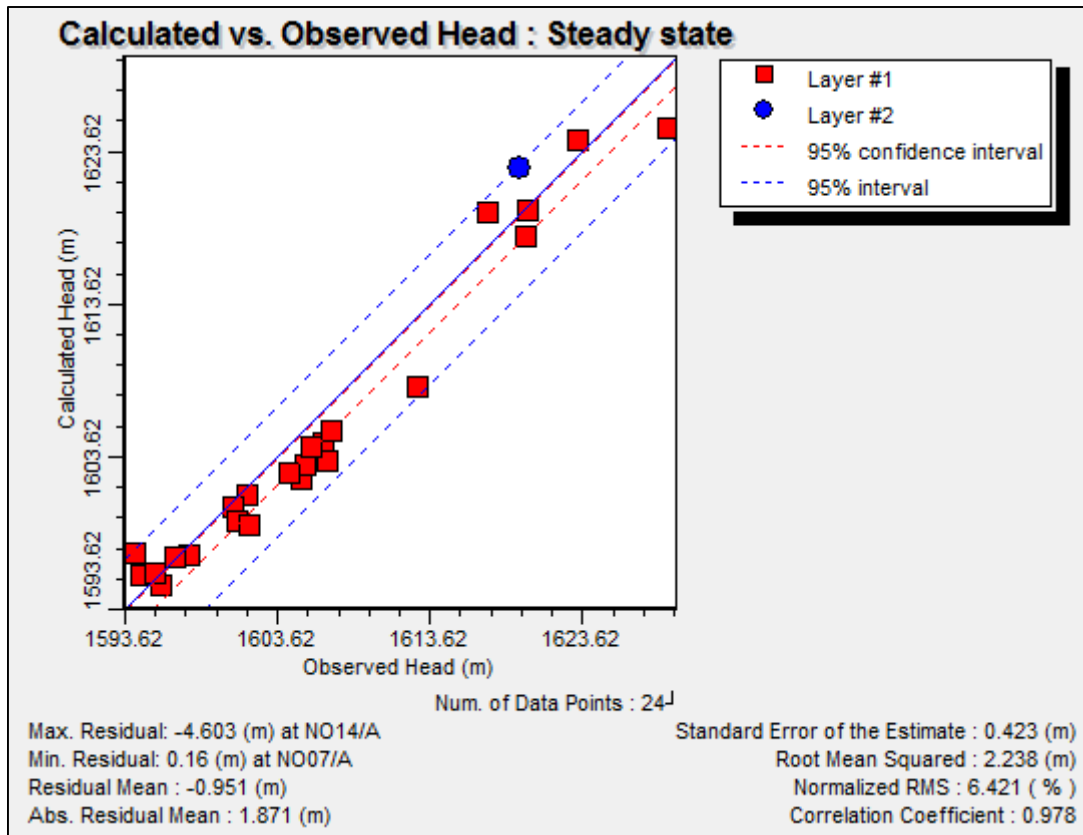


Figura 20. Gráfica de calibración en estado estacionario

Calibración en estado transitorio

En el periodo 2013-2014 (365 días), se generó la gráfica de calibración de la Figura 21. Se obtuvo un *nRMS error* de 5.859%, el cual es menor a 10%, por lo que se consideró el modelo calibrado para efectuar la simulación del flujo de agua subterránea hasta 2015.

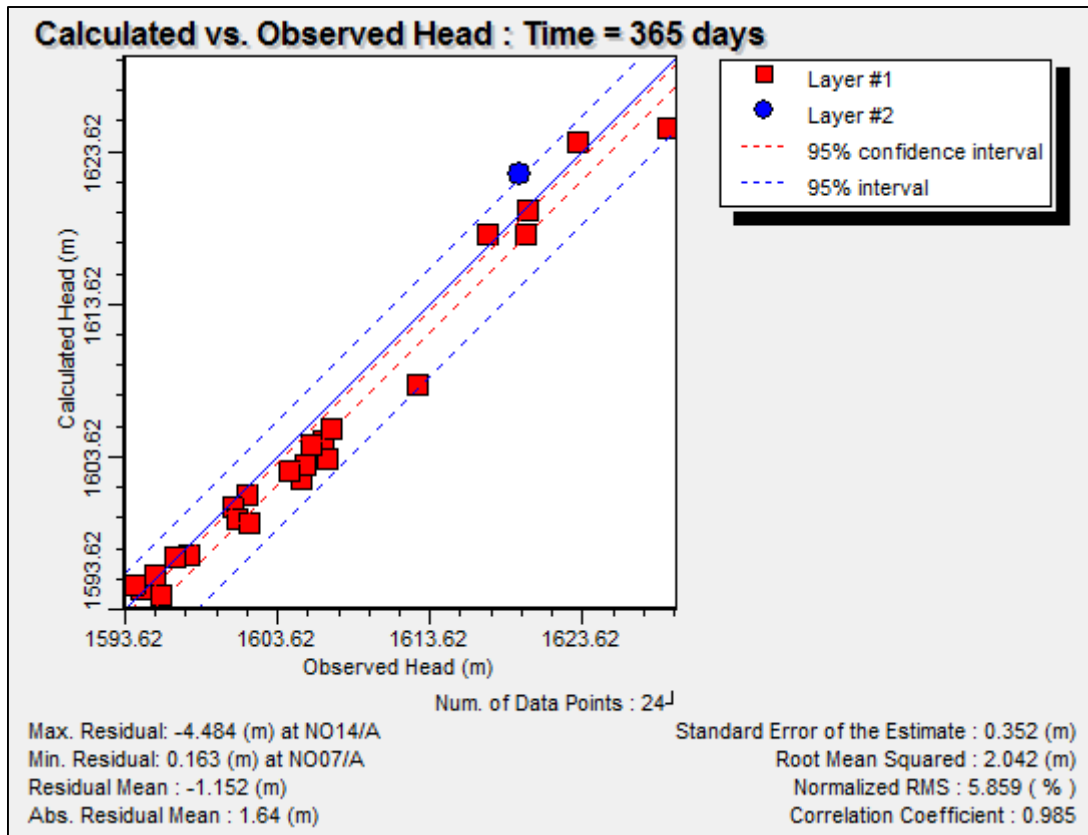


Figura 21. Gráfica de calibración en estado transitorio: 365 días (2013-2014)

Para el periodo 2013-2015 (730 días), se generó la gráfica de calibración de la Figura 22. Se utilizó la configuración de la carga hidráulica de 2014, obtenida a partir de mediciones campo (Véase Capítulo 1) para calibrar el modelo. Se obtuvo un *nRMS error* de 6.012%.

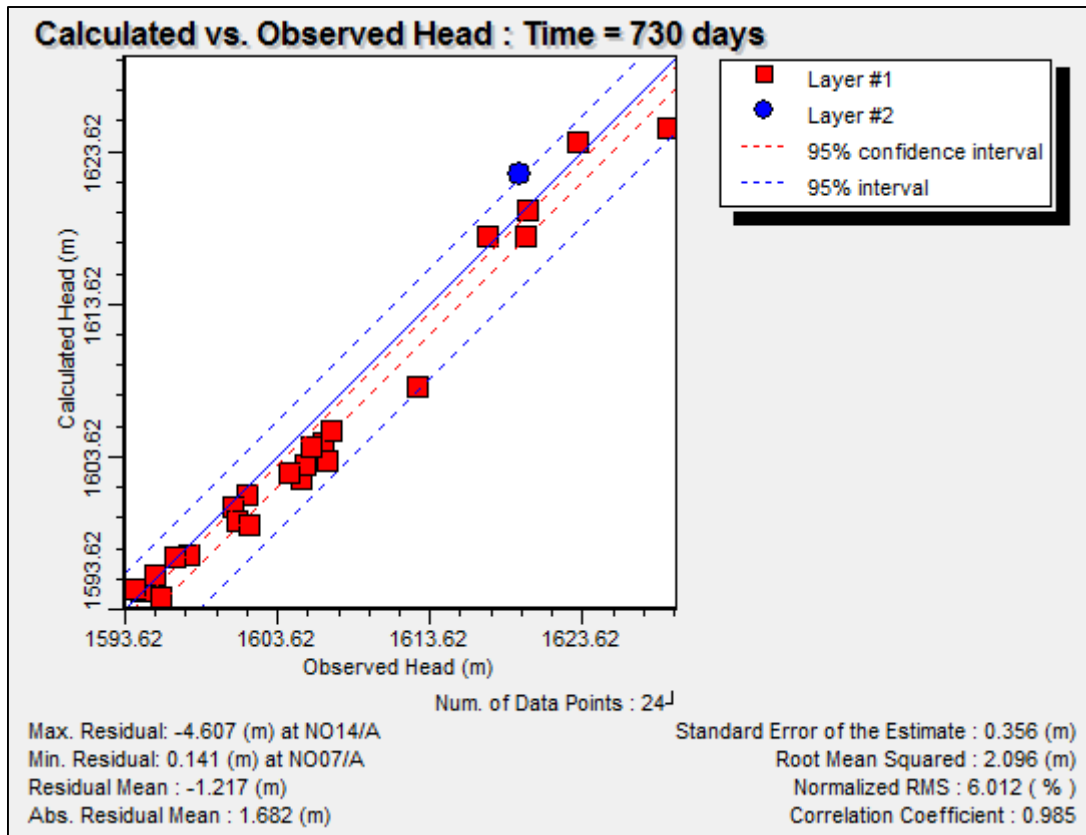


Figura 22. Gráfica de calibración en estado transitorio: 730 días (2013-2015)

Redistribución de la conductividad hidráulica (unidad estratigráfica superior)

La distribución final de la conductividad hidráulica en la unidad superior, compuesta de arena y grava, se muestra en la Figura 23; varía de 19 a 59 m/d; esta segunda distribución se realizó de acuerdo a un análisis visual de los depósitos superficiales. Para la unidad inferior, conformada de arena y arcilla, se mantuvo una conductividad hidráulica uniforme de 3.76 m/d reportada por Bautista-Perdomo (2013) con base en pruebas de bombeo (véase Capítulo 1). Furlong *et al.* (2011) siguieron un procedimiento similar para la distribución de este parámetro en tres unidades modelados. Sin embargo, el orden de magnitud de los valores es diferente (8×10^{-3} a 0.4 m/d para la unidad superior, y de 1.2 a 5m/d para la inferior) a los del presente estudio.

En la Figura 23, se observa que los valores decrecen de noreste a suroeste. Con este arreglo se alcanzó una calibración aceptable; además, se ajusta a la dirección de variación obtenida por Bautista-Perdomo (2014) para esta zona, a partir de datos de pruebas de bombeo.

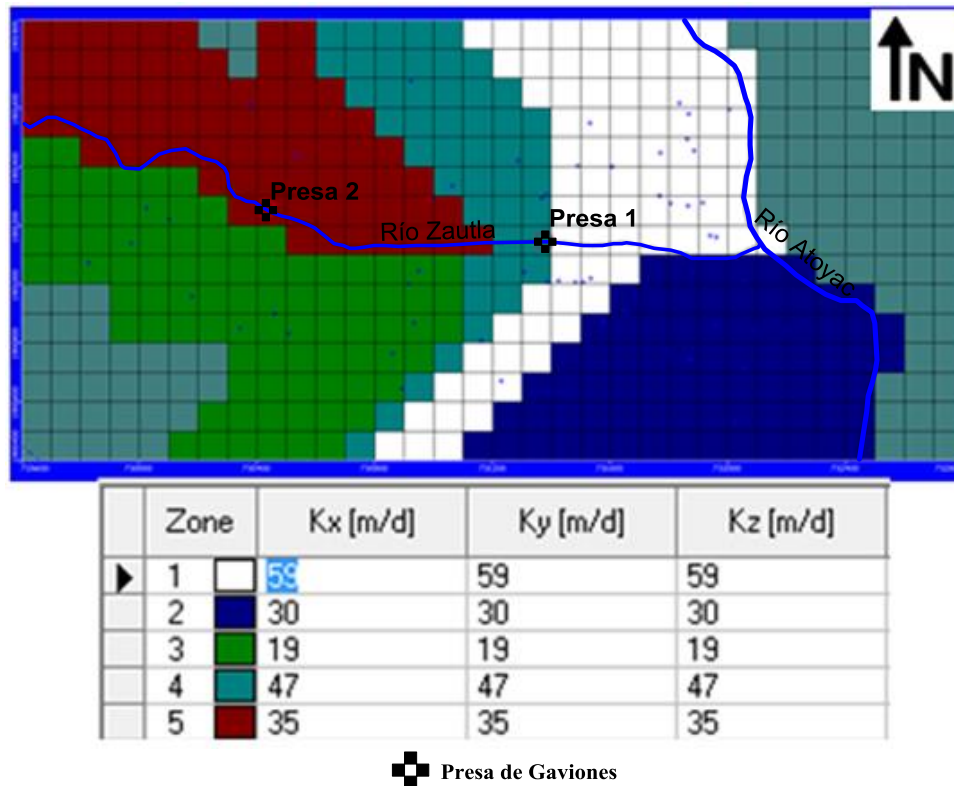


Figura 23. Distribución final de la conductividad hidráulica en la unidad estratigráfica superior

Carga hidráulica obtenida con Visual MODFLOW

Las configuraciones de la carga hidráulica obtenidas con Visual MODFLOW para 365 días (2014) y 730 días (2015) se observan en las Figuras 24 y 25, respectivamente. En ambas, la dirección general de flujo es noroeste-sureste. En el periodo de un año, no se observan cambios en la configuración de la carga hidráulica (piezometría) cuando se considera la extracción de agua, lo cual se infiere a la alta conductividad hidráulica (19 a 59 m/d) en la capa superior (arena y grava).

También se debe tomar en cuenta que en la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla) se asumió una conductividad hidráulica uniforme (3.76 m/d), lo cual puede no corresponder estrictamente con la hidrogeología de la formación geológica.

Es importante considerar que los gastos de extracción simulados por el modelo se asignaron con base en los volúmenes concesionados en el Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA, 2014), pudiendo estar sub o sobre estimados de acuerdo a los aprovechamientos reales.

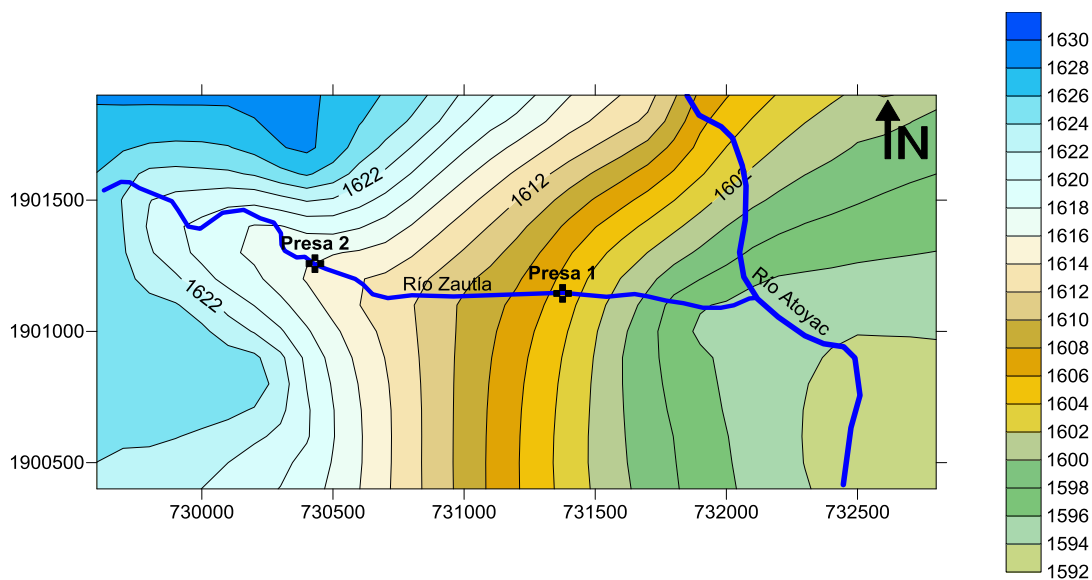


Figura 24. Carga hidráulica con Visual MODFLOW, m (365 días)

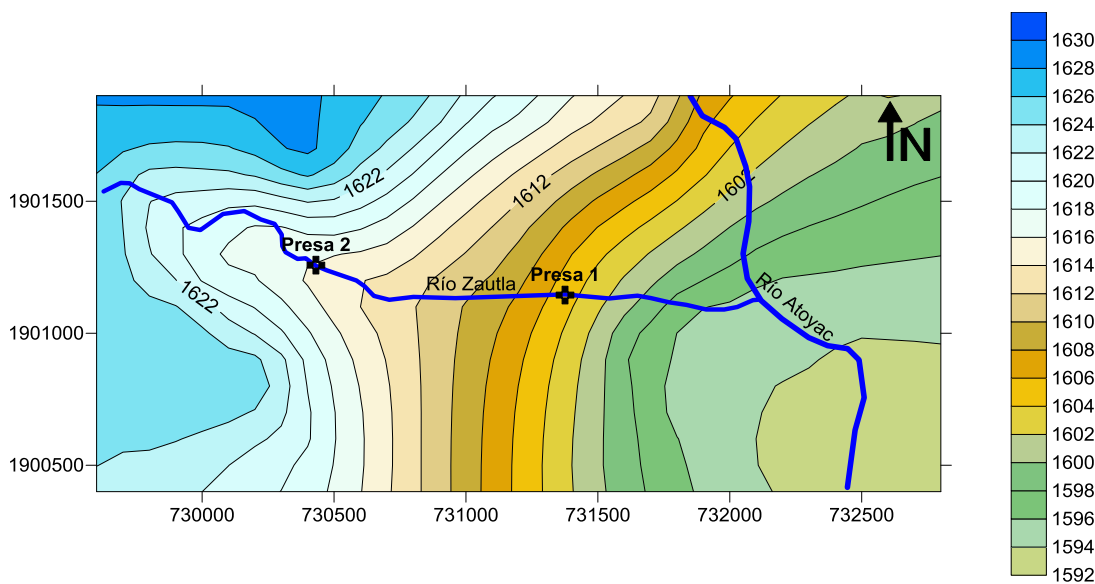


Figura 25. Carga hidráulica con Visual MODFLOW, m (730 días)

A diferencia de los mapas obtenidos a partir de mediciones en campo (consultar Capítulo 1), no se observan conos de abatimiento hacia el oeste (norias 49, 50 y 51) y sureste de la zona de estudio (norias 18, 19, 20, 21, 23, 24 y 25), lo cual significa que en estas zonas se está subestimando la extracción con el modelo computacional construido.

CONCLUSIONES

La información hidrogeológica obtenida: piezometría, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y geometría, permitió elaborar un modelo conceptual apropiado que sirvió de base para la construcción del modelo computacional del sistema acuífero de Nazareno Etna, usando el código Visual MODFLOW 4.2.

El empleo de parámetros de un modelo regional en un modelo local es adecuado cuando no se cuenta con datos suficientes, siempre y cuando se combinen con información específica disponible de la zona de estudio.

El modelo conceptual indica que la litología del acuífero estudiado es menos variada respecto a la que se encuentra en otras partes del acuífero del Valle de Etna.

La simulación y análisis de la carga hidráulica, indicó que las presas de gaviones no contribuyen a la recarga de agua subterránea.

Se recomienda determinar la conductividad hidráulica de la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla) para obtener una distribución con mayor certeza de las condiciones geológicas para incrementar la exactitud del modelo computacional.

REFERENCIAS

Appiah-Adjei , E. K., L. Shu, K. A. Adjei, M. Deng & X. Wang. 2013. Evaluation of unconfined aquifer parameters from flow to partially penetrating wells in Tailan River basin, China. *Environ Earth Sci* 69, 799–809.

- Bautista-Perdomo, J. M. 2013. *Modelo de flujo del sistema acuífero de la cuenca Alto Atoyac, Oaxaca*. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca IPN. 141 p.
- Belmonte-Jiménez, S. I., J. O. Campos-Enríquez & J. Herrera-Barrientos. 2003. Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etlá, Oaxaca, México. *Revista Geofísica* 59, 19-32.
- Belmonte-Jiménez, S. I., J. O. Campos-Enríquez & M. A. Alatorre-Zamora. 2005. Vulnerability to contamination of the Zaachila aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional* 44(3), 283-300.
- Bonomoi, T. 2009. Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media. Application to the Milan plain. *Computers & Geosciences* 35, 134–145.
- CONAGUA. *Registro Público de Derechos de Agua*. [en línea]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <
<http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115> >. [Consulta: 6 de abril de 2014].
- COUSSA. 2011. *Lineamientos Operativos Específicos para la Aplicación de Recursos del Componente de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua (COUSSA), del Programa de Sustentabilidad de los Recursos Naturales*. Subsecretaría de Desarrollo Rural: México.
- Dutton, A. R. & R. E. Mace. 2002. Evolución de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea en el acuífero de Ogallala en Texas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 19(002), 107-120.
- Fetter, C. W. 2001. *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc.: USA.
- Flores-Márquez, E. L., R. E., Chávez, R. G. Martínez-Serrano, J. Herrera-Barrientos, A. Tejero-Andrade & S. Belmonte. 2001. Geophysical characterization of the Etlá Valley aquifer, Oaxaca, México. *Geofísica Internacional* 40, 245-257.
- Flores-Márquez, E. L., R. G. Martínez-Serrano, R. E. Chávez, Y. Crusillo, G. Jiménez & O. Campos-Enriquez. 2008. Numerical modeling of Etlá Valley aquifer, Oax., Mexico: Evolution and remediation scenarios. *Geofísica Internacional* 47, 27-40.

- Furlong B. V., M. S. Riley, A. W. Herbert, J. A. Ingram, R. Mackay & J. H. Tellam. 2011. Using regional groundwater flow models for prediction of regional wellwater quality distributions. *Journal of Hydrology* 398, 1-16.
- Goderniaux, P., S. Brouyère, H. J. Fowler, S. Blenkinsop, R. Therrien, P. Orban, & A. Dassargues. 2009. Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology* 373, 122-138.
- Harbaugh, A.W. 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6A16: Reston, Virginia.
- Kumar-Roy, Kalyan. 2008. *Potential Theory in Applied Geophysics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Calcutta, India.
- Lachaal, F., A. Mlayah, M. Bédir, J. Tarhouni & C. Leduc. 2012. Implementation of a 3-D groundwater flow model in a semi-arid region using MODFLOW and GIS tools: The Zéramdine–Béni Hassen Miocene aquifer system (east-central Tunisia). *Computers and Geosciences*, 48, 187–198.
- Missimer, T. M., W. Guo, R. G. Maliva, J. Rosas & K. Z. Jadoon. 2014. Enhancement of wadi recharge using dams coupled with aquifer storage and recovery wells. *Environ Earth Sci*. Published online: 25 de Junio de 2014.
- Nettasana, T., J. Craig & B. Tolson. 2012. Conceptual and numerical models for sustainable groundwater management in the Thaphra area, Chi River Basin, Thailand. *Hydrogeology Journal* 20, 1355–1374.
- SAGARPA. 2009. *Manual de Presas de gaviones*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación: México.
- Scibek, J., D. M. Allen, A. J. Cannon & P. H. Whitfield. 2007. Groundwater surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology* 333, 165-181.
- SGM. 2007. *Carta Geológico Minera Oaxaca de Juárez E14-D47 Oaxaca*. Servicio Geológico Mexicano: Pachuca, Hidalgo, México.

- Wang, S., J. Shao, X. Song, Y. Zhang, Z. Huo & X. Zhou. 2008. Application of MODFLOW and geographic information system to groundwater flow simulation in North China Plain, China. *Environ Geol* 55, 1449–1462.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. 2006. *Visual MODFLOW Premium. A professional application for 3D groundwater flow and contaminant transport modeling. User's manual.* Schlumberger Company: Ontario Canada.
- Zume, J. T. & A. A. Tarhule. 2011. Modelling the response of an alluvial aquifer to anthropogenic and recharge stresses in the United States Southern Great Plains. *J. Earth Syst. Sci.* 120, 557–572.

CONCLUSIONES GENERALES

La información hidrogeológica y las condiciones de frontera asignadas permitieron obtener un *nRMS error* de 5.859% para 365 días y de 6.012% para 730 días en la calibración. El modelo computacional logró representar aceptablemente la dinámica del sistema acuífero estudiado al obtener un *nRMS error* menor a 10%.

La configuración de la carga hidráulica obtenida con el modelo no muestra completamente los conos de abatimiento observados en la configuración obtenida con mediciones en campo, por lo tanto, la extracción de agua simulada por el modelo (6, 431,373 m³/año), con base en el Registro Público de Derechos de Agua, subestima la extracción real actual en el acuífero.

En la calibración, la conductividad hidráulica (*K*) fue la variable más influyente en la configuración de la carga hidráulica (*h*), lo cual se reflejó en la variación del *nRMS error*.

La redistribución de la conductividad hidráulica en la unidad estratigráfica superior permitió calibrar aceptablemente el modelo (*nRMS error* < 10%), por lo tanto la configuración de esta variable es representativa de las condiciones reales del sistema acuífero.

En la calibración del modelo, se observó que la variación del coeficiente de almacenamiento específico (*S_s*) no es determinante en la dinámica del acuífero, por lo que este parámetro se

asignó uniformemente a las unidades estratigráficas superior e inferior: 0.0005 1/m y 0.00005 1/m, respectivamente, con base en la información regional disponible.

La información base del modelo computacional permitió predecir el comportamiento dinámico del acuífero hasta 2015. El modelo puede actualizarse en la medida en que se detalle la hidrogeología del acuífero y se acumule información histórica de la carga hidráulica (piezometría), lo cual aumentaría el alcance de las predicciones, por lo que puede usarse como herramienta en la toma de decisiones para mejorar el manejo de los recursos hídricos subterráneos del municipio.

Es recomendable actualizar el modelo mediante estudios hidrogeológicos que detallen la distribución de la conductividad hidráulica en la unidad estratigráfica inferior (arena y arcilla) y del coeficiente de almacenamiento en ambas unidades (superior e inferior), y con la implementación de una red de monitoreo del nivel freático.

Es necesario cuantificar y registrar los gastos reales de bombeo para simular adecuadamente el comportamiento del acuífero y disponer medidas para hacer eficiente el uso del agua que se extrae, así como proponer puntos de recarga.

Se requiere realizar este tipo de estudios para respaldar los proyectos que contemplen obras de conservación y aprovechamiento del recurso hídrico, tanto a nivel municipal como regional, previo a su ejecución.