



**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCION
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

Tesis

COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES Y SU
RELACIÓN CON LAS DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES

PRESENTA

Lilia Guerrero Martínez

**PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LOS
ÁMBITOS ANTRÓPICOS**

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITÉ TUTORAL

Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala

Dr. Gil Humberto Ochoa González

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez

Aguascalientes, Ags., a 26 junio 2020.

Dr. en C. T. C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **LILIA GUERRERO MARTÍNEZ** con ID 120505 quien realizó la tesis titulada: **COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES Y SU RELACIÓN CON LAS DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 16 día de junio de 2020.



Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Dr. en C. T. C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **LILIA GUERRERO MARTÍNEZ** con ID 120505 quien realizó la tesis titulada: **COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES Y SU RELACIÓN CON LAS DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a 04 de junio de 2020.


Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Dr. en C. T. C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **ASESOR** designado del estudiante **LILIA GUERRERO MARTÍNEZ** con ID 120505 quien realizó la tesis titulada: **COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DE ACUÍFERO DEL VALLE DE AGUASCALIENTES Y SU RELACIÓN CON LAS DISCONTINUIDADES SUPERFICIALES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que ella pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 2 de junio de 2020.


Gil Humberto Ochoa González
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

Fecha de dictaminación dd/mm/aa: _____

NOMBRE: Lilía Guerrero Martínez

ID 120505

PROGRAMA: Doctorado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos **LGAC (del posgrado):** Ingeniería Civil

TIPO DE TRABAJO: () Tesis () Trabajo práctico

TÍTULO: Comportamiento hidrodinámico del acuífero del valle de Aguascalientes y su relación con las discontinuidades superficiales
Aporta elementos para entender mejor el sistema acuífero y la influencia de las discontinuidades superficiales en el agua subterránea

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado):

INDICAR SI/NO SEGÚN CORRESPONDA:

Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:

- SI El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
SI Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI Cumpe con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)

El egresado cumple con lo siguiente:

- SI Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
 No se tiene identificado SI Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI Coincide con el título y objetivo registrado
SI Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI Tiene el CVU del Conacyt actualizado
SI Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)

En caso de Tesis por artículos científicos publicados

- SI Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
SI El estudiante es el primer autor
SI El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
SI En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
SI Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
SI La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado

Sí X
No _____

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Martín Hernández Marín

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dra. Leticia Jacqueline Robles Cuellar

* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial designado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Alejandro Acosta Collazo

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. Héctor Homero Posada Ávila

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico

Lilia Guerrero-Martínez¹, Martín Hernández-Marín^{2,*}, and Thomas J. Burbey³

¹ Posgrado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, Mexico.

² Departamento de Geotecnia e Hidráulica, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, Mexico.

³ Department of Geosciences, Virginia Tech, 4044 Derring Hall, Blacksburg, VA 24061, USA.

*mhernandez@correo.uaa.mx

ABSTRACT

Groundwater recharge (GWR) is analyzed and evaluated within the Aguascalientes Valley by means of a modified linearized Boussinesq equation and the Water Table Fluctuations (WTF) technique. These techniques use the specific yield, water table variations and the sub-surface drainage of groundwater. The methodology is applied to the semiarid Aguascalientes valley, which contains a thick vadose zone. The combination of the analytical solution based on the Boussinesq equation and the WTF technique, allows the method to be applied in areas with deep groundwater levels, such as the Aguascalientes valley, without the need for high temporal resolution data. The data for the application of the method were provided by various government agencies and includes information on 145 wells positioned within the valley during the period 1985-2015. The specific yield and the transmissivity were integrated from the results of two previous investigations. Results indicate that the variation of recharge ranges from 0.86 to 525.69 mm/year in the analyzed period, with the highest recharge rates occurring in the north and center parts of the valley and is likely attributed to high specific yield and vertical hydraulic conductivity due to the presence of coarse permeable soils present in the area. Conversely, the lowest recharge rates were found to occur near the north and south borders of the valley.

Key words: groundwater recharge; Aguascalientes valley; Water Table Fluctuation; Boussinesq equation; groundwater drainage.

RESUMEN

En la presente investigación, la recarga de agua subterránea (GWR) se analiza y evalúa dentro del Valle de Aguascalientes mediante el ajuste a la ecuación linealizada de Boussinesq y la técnica Water Table Fluctuation (WTF), que involucra el rendimiento específico, la variación

del nivel freático y el drenaje subsuperficial de aguas subterráneas. La metodología se aplica al semiárido valle de Aguascalientes que contiene una zona vadosa espesa. La combinación de la solución analítica basada en la ecuación de Boussinesq y la técnica WTF permite que el método se aplique en áreas con niveles profundos de aguas subterráneas, como el valle de Aguascalientes, sin la necesidad de datos de alta resolución temporal. Los datos para la aplicación del método fueron provistos por varias agencias gubernamentales a través de la información de 145 pozos ubicados a lo largo del valle durante el período 1985-2015. El rendimiento específico se integró a partir de los resultados de dos trabajos anteriores, así como la transmisividad. Como resultado, la variación de la altura de recarga se obtuvo de 0.86 a 525.69 mm/año en el período analizado, las tasas de recarga más altas se presentan al norte y al centro del valle, probablemente atribuidas a un alto rendimiento específico y conductividad hidráulica debido a la presencia de suelos permeables gruesos presentes en el área, por otro lado, las fronteras norte y sur del valle tienen las tasas de recarga más bajas.

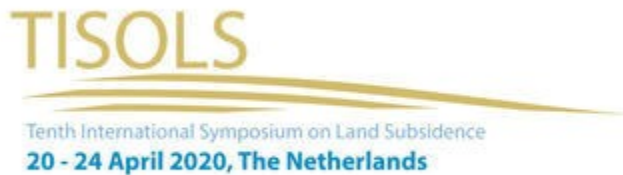
Palabras clave: recarga de agua subterránea; valle de Aguascalientes; Water Table Fluctuation; ecuación de Boussinesq; drenaje subterráneo.

INTRODUCTION

Historically, humanity has faced the complication of obtaining water because it is a necessary and indispensable resource in our daily activities. In many locations, surface water for human consumption has diminished over the last several decades leading to a necessary increase in groundwater extraction, particularly in many arid and semi-arid regions. For this reason, many semiarid regions have experienced a considerable reduction of groundwater storage as pumping has greatly exceeded natural recharge. Subsequently, researchers in these critical regions are focusing on studies aimed at understanding recharge processes and determining effective ways in which recharge

From: TISOLS organising committee
Sent: Monday, November 18, 2019 7:29 AM
To: Lilia Guerrero Martinez
Subject: Your full paper is accepted with minor changes

[Is this mail not displayed properly? Click here to view it online.](#)



Dear Lilia Guerrero-Martínez,

Thank you for submitting your paper, titled "Hydraulic behavior of subsidence-induced surface discontinuities in the hydrogeology of the Aguascalientes valley.", to TISOLS. Your submission has been accepted with a request for minor changes. You can find the comments through the website, for which we sent you the login information earlier. Also, the reviewer may have contacted you directly with an annotated version of your paper – this is the case for some of the submissions and we could not make a quick fix for that through the website.

Please make your changes and resubmit your paper through the website before Dec. 1st, 2019. We look forward to meeting you in Gouda and Delft in April 2020!

Will you please rename your revised paper starting with the word "Revised"?

In case of any questions, please do not hesitate to contact us.

Kind regards,
Peter Fokker
Chair, Scientific Committee of TISOLS



AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por su apoyo y patrocinio para la realización de este trabajo de investigación, por permitirme desarrollarme como profesionista y brindarme las herramientas necesarias para lograr el grado. De igual manera quiero agradecer al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Universidad Jesuita de Guadalajara, por recibirme en sus instalaciones para realizar una estancia la cual me permitió desarrollar parte fundamental de mi tesis, también agradezco a la empresa GEO, Geofísica Aplicada a la Geotecnia por apoyarme con la obtención de datos geológicos y de temperaturas y niveles estáticos de los pozos dentro del valle de Aguascalientes. Igualmente, agradezco a la Comisión Nacional del Agua Aguascalientes y a PROACTIVA Medio Ambiente CAASA, por los datos proporcionados de propiedades físicas del agua de pozos dentro del valle de Aguascalientes.

De manera particular agradezco a mi tutor el Dr. Martín Hernández Marín por su apoyo y dedicación, por siempre estar al pendiente del proceso y ayudarme a solucionar y entender cualquier situación.

Del mismo modo, agradezco a mis cotutores el Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala por siempre darme ánimos y ayuda para solucionar mis dudas y sobre todo por brindarme su confianza y amistad, y al Dr. Gil Humberto Ochoa González por recibirme de una manera muy cálida dentro de ITESO y apoyarme en lo que necesité.

Y por último, agradezco a Dios por darme la oportunidad de realizar este gran proyecto, por las enseñanzas y dificultades ya que de ellas aprendí y mejore como persona y profesionista.

DEDICATORIA

Dedicada a mi esposo y mi hermana, quienes siempre creen en mí, me brindan su apoyo incondicional, y comprensión.



Índice general	1
Resumen	2
Abstract	3
Introducción	4
Capítulo I. "Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, México"	8
Capítulo II. "A statistical approach to determine the impact of a fault on groundwater flow"	25
Capítulo III. "Modelación numérica del impacto de las discontinuidades superficiales en acuífero del valle de Aguascalientes"	46
Discusión	82
Conclusión	90
Referencias	92
Anexos	102

Resumen

En la presente tesis se analiza y evalúa el comportamiento hidrodinámico del sistema del acuífero de Aguascalientes, y de manera particular el impacto de las discontinuidades superficiales sobre el agua subterránea del valle, mediante análisis estadístico de parámetros que pueden caracterizar el comportamiento hidráulico de una falla. De manera conjunta se integra un modelo que represente al acuífero del valle de Aguascalientes y que tome en consideración el efecto de falla Oriente dentro del sistema. Además, se realiza una cuantificación de la recarga natural, considerado plantear el análisis a través de la combinación de la solución analítica basada en la ecuación de Boussinesq y la técnica WTF, la cual también se integra dentro del modelo. Para la obtención de información se consultaron secretarías del Estado tales como PROACTIVA medio Ambiente CAASA y la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA Aguascalientes, además de la empresa GEO, las cuales proporcionaron información de propiedades físicas del agua de pozos dentro del valle de Aguascalientes. De manera puntual, los resultados de mayor recarga se ubican en las partes norte y centro del valle y la más baja ocurre a lo largo de los límites norte y sur con rangos de 0.86 a 525.69 mm / año en el período de 1985 al 2015. En lo que concierne al comportamiento hidráulico de la falla Oriente se aplicó un ajuste matemático derivado de la prueba t-student. Los resultados muestran que tres de siete zonas identificadas indican un comportamiento hidráulico de tipo barrera, con valores que oscilan entre los 5 y 18 metros de caída de carga hidráulica y de 4.7°C a 5.8°C en las variaciones de temperatura. A partir de este análisis se determinaron 12,700 metros con comportamiento de barrera de 35,000 metros analizados de la falla Oriente. La inclusión del comportamiento hidráulico de la falla en el modelo matemático enriquece la solución ya que en ningún trabajo previo se tenía contemplado. De manera general se logró modelar y simular el comportamiento del sistema del Acuífero Valle de Aguascalientes en donde los niveles calculados y medidos tienen una dispersión de 5 a 7.5 metros en los extremos y alrededor de 25 metros en el centro del valle, para un periodo de simulación de 32 años.

Abstract

In this thesis, the hydrodynamic behavior of the Aguascalientes aquifer system is analyzed and evaluated, particularly the impact of a fault on groundwater flow, through statistical analysis of parameters that can characterize the dynamic behavior of a fault. A model that represents the aquifer in the Aguascalientes valley is integrated and is taken the effect of the Oriente fault within the system. In addition, a quantification of the natural recharge is carried out, considering proposing the analysis through the combination of the analytical solution based on the Boussinesq equation and the WTF technique, which is also integrated into the model. To obtain such information, State government offices were consulted such as PROACTIVE CAASA Environment and the National Water Commission of Aguascalientes, CONAGUA, in addition to the company GEO, which provide information on the physical properties of well water within the Aguascalientes valley. Partucularly, the recharge results indicate a variation of recharge ranges from 0.86 to 525.69 mm / year in the period from 1985 to 2015, with the highest recharge rates occurring in the north and center parts of the valley and is likely attributed to high specific yield and vertical hydraulic conductivity due to the presence of coarse permeable soils present in the area. Regarding the hydraulic behavior of the Oriente fault, a mathematical adjustment derived from the t-student test was applied. The results indicated in three identified areas indicate a barrier-type hydraulic behavior, with values ranging between 5 and 18 meters of hydraulic load drop and from 4.7 ° C to 5.8 ° C in temperature variations. From this analysis, 12,700 meters with a barrier behavior of 35,000 meters were analyzed from the Oriente fault. The inclusion of the hydraulic behavior of the fault in the mathematical model enriches the solution since it was not contemplated in any previous work. In general, a model was simulated the behavior of the Aguascalientes Valley Aquifer system where the calculated and measured levels have a dispersion of 5 to 7.5 meters at the ends and around 25 meters in the center of the valley, for a period of 32 year simulation.

Introducción

Las aguas subterráneas son un recurso de gran importancia para el desarrollo de cualquier país, siendo principalmente para abastecimiento público, industrial y de riego. La Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2016), menciona que más de 65% del volumen proviene de los acuíferos del país, y sobre todo en las zonas áridas y semiáridas como el valle de Aguascalientes donde el agua subterránea suele ser la única fuente de abastecimiento. En la actualidad, esto ha generado una enorme presión sobre los recursos naturales, siendo el agua, uno de los más escasos, ya que, los pocos cuerpos de agua son para uso agrícola lo que agudiza la situación y genera problemas directamente asociados a la sobreexplotación, dentro de los que se encuentran, el incremento de metales pesados en el agua debido a su extracción a profundidades cada vez mayores, y la deformación superficial observada como subsidencia y fracturamiento (Pacheco-Martínez et al. 2013).

La problemática de subsidencia y fracturamiento no solo es generada por el bombeo, el valle de Aguascalientes forma un graben tectónico, limitado a nivel regional por dos fallas normales, con orientación Norte-Sur de 80 km de longitud y 25 km de ancho aproximadamente en donde las condiciones hidrológicas, hidrogeológicas y antropogénicas favorecen la deformación del terreno. El bombeo intensivo de las aguas subterráneas ha provocado una disminución de los niveles de agua, especialmente debajo de la ciudad de Aguascalientes agravando la situación de la aparición de discontinuidades, por lo que el gobierno continuamente mapea fisuras y fallas, actualmente cerca de 325,000 metros lineales han sido mapeados en todo el valle (SIFAGG 2019). Cabe destacar que las discontinuidades centrales muestran características similares a las fallas Oriente y Poniente, como su orientación y geometría, además investigaciones recientes mencionan que las fallas que limitan al valle participan directamente en el origen del graben de Aguascalientes (Pacheco-Martínez et al. 2015).

Varios autores han estudiado y analizado el comportamiento del valle de Aguascalientes, involucrando diferentes escenarios, pero la mayoría se basan en conjuntos separados de datos, actualmente se ha pensado en la posibilidad de correlacionar las discontinuidades superficiales con el acuífero, en este caso se ha establecido la posibilidad de que las fallas o discontinuidades superficiales sean canales preferenciales de flujo de agua de lluvia (Hernández-Marín et al., 2017).

A partir de esto se plantea el conocer el comportamiento de las discontinuidades superficiales para determinar si actúan como un canal o barrera dentro del sistema

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

acuífero, haciendo especial énfasis en la falla Oriente la cual se cree se extiende profundamente a través de las capas estratigráficas cuaternarias e incluso puede llegar a la roca del sótano terciario, como se infiere por su origen y longitud total, y de la cual solo se tiene actividad registrada en la subsuperficie Hernández-Marín et al., (2017).

Esta situación conduce a preguntarse ¿cuál es la relación entre el funcionamiento hidráulico de las discontinuidades y el comportamiento hidráulico del acuífero del valle de Aguascalientes?, sobre todo, de la falla Oriente la cual podría presentar teóricamente un comportamiento de conducto-barrera ya que ha mostrado que se ha reactivado en algunas zonas debido al estrés inducido recientemente por el bombeo, que se intensificó a fines de la década de 1970 (Pacheco-Martínez et al., 2013) pero al mismo tiempo se han observado de algunos segmentos de esta falla que indican la presencia de sustancias cementantes como el carbonato de calcio que penetra en las fracturas, lo que puede limitar el transporte de agua superficial a la zona de la falla.

De esta manera se establece el objetivo general de esta investigación el cual es establecer el comportamiento hidrodinámico del sistema del acuífero de Aguascalientes, así como aportar elementos para entender el impacto de las discontinuidades superficiales sobre el agua subterránea del valle, mediante análisis estadístico de parámetros que pueden caracterizar el comportamiento hidráulico de una falla.

En ese sentido, el trabajo de investigación es conformar un modelo que represente al acuífero del valle de Aguascalientes y que tome en consideración el efecto de las discontinuidades. Además, se realiza una cuantificación de la recarga natural, considerado plantear el análisis a través de la combinación de la solución analítica basada en la ecuación de Boussinesq y la técnica WTF, la cual permite que el método se aplique en áreas con niveles profundos de agua subterránea, como el valle de Aguascalientes debido a la cuantificación del drenaje, sin la necesidad de datos de alta resolución temporal.

De esta manera se integran los capítulos correspondientes a esta tesis los cuales llevan por nombre "Estimación de la recarga natural de agua subterránea en el semiárido valle de Aguascalientes, México" haciendo referencia al cálculo de la recarga dentro del valle de Aguascalientes, y el cual es un artículo publicado en la Revista Mexicana de Ciencias Geológicas (Anexo I). El segundo capítulo, lleva por nombre "Ajuste estadístico para determinar el impacto de una falla en el flujo de agua subterránea" en el cual se analiza el comportamiento de una de las fallas de delimitan al valle de Aguascalientes, de este análisis se desprenden 2 publicaciones la primera titulada "Comportamiento

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

hidráulico de discontinuidades superficiales inducidas por subsidencia en la hidrogeología del valle de Aguascalientes” aceptada para su publicación en Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences (Anexo II), y el segundo es un manuscrito en proceso de revisión en la revista Environmental and Engineering Geoscience (Anexo III). Por último, el capítulo III titulado “Modelación numérica del impacto de las discontinuidades superficiales en acuífero del valle de Aguascalientes” se está preparando para someterse y el cual integra la información de los capítulos anteriores y se realiza una modelación del comportamiento del acuífero.

A continuación, se despliegan las características generales de cada capítulo.

Capítulo I tiene como objetivo evaluar la recarga natural mediante la aplicación de un ajuste analítico de la técnica de fluctuación del nivel freático (WTF), en combinación con la ecuación de Boussinesq para la cuantificación del drenaje. La técnica involucra el rendimiento específico, la variación del nivel freático y el drenaje subsuperficial de aguas subterráneas (Cuthbert, 2010). La combinación de la solución analítica permite que el método se aplique en áreas con niveles profundos de aguas subterráneas, sin la necesidad de datos de alta resolución temporal, debido a la estimación del cálculo del drenaje neto, ya que a medida que la lluvia infiltrante se mueve a través de la zona no saturada, frecuentemente se observa un retraso y una atenuación gradual de la señal de lluvia al aumentar la profundidad hasta el nivel freático, por lo tanto, en situaciones de nivel freático poco profundo, el drenaje es casi instantáneo por lo que no es necesaria una cuantificación de este, pero en zonas con grandes espesores de zona vadosa el drenaje de la cuenca juega un papel importante en la estimación de recarga. (Cuthbert, 2010). Los datos para la aplicación del método fueron provistos por varias agencias gubernamentales a través de la información de 145 pozos ubicados a lo largo del valle durante el período 1985-2015. Como resultados se crea un mapa de recarga con isovalores sobre el área de estudio donde las variaciones de los isovalores de recarga se emplean en el contexto de la hidrogeología general de la región. La variación de la altura de recarga se obtuvo de 0.86 a 525.69 mm / año en el período de 1985 al 2015, donde las tasas de recarga más altas se presentan al norte y al centro del valle, probablemente atribuidas a un alto rendimiento específico y conductividad hidráulica debido a la presencia de suelos permeables gruesos presentes en el área, por otro lado, las fronteras norte y sur del valle tienen las tasas de recarga más bajas.

En cuanto al **capítulo II**, el objetivo principal es mostrar cómo los análisis de correlación estadísticos y paramétricos mapeados pueden usarse para definir el impacto

de un flujo normal la falla Oriente en el agua subterránea del valle, utilizando parámetros medidos en el agua los cuales pueden emplearse para definir el comportamiento hidráulico de una falla (p. ej. Bense et al., 2003a; Bense et al., 2008). Para este análisis, se utilizaron mediciones de temperatura y el nivel estático del agua subterránea de 268 pozos de extracción, pero dada la dispersión de los pozos fue necesario seleccionar el área con una mayor concentración de datos para reducir el nivel de incertidumbre. Por lo tanto, la determinación del comportamiento hidráulico se muestra con dos enfoques, el primero es cuantitativo obtenido a partir de un análisis de correlación gráfica estableciendo siete zonas a partir de valores sugeridos por la literatura, y el segundo emplea el rechazo o aceptación de la prueba de hipótesis t-student a través de la comparación de las medias de estos parámetros en ambos bloques de la falla. Este análisis puede proporcionar información sobre el impacto de una falla en el agua subterránea por lo tanto mejor comprensión del sistema acuífero. Los resultados de este análisis sugieren que el comportamiento hidráulico de la falla Oriente es variable, ya que tres de las siete zonas indican que la falla se comporta como una barrera al flujo lateral de agua subterránea, tres zonas indican que la falla se comporta como un conducto y una zona es indeterminada, por falta de información. Este análisis proporciona una forma sólida y poderosa de caracterizar el comportamiento de fallas sin invocar investigaciones hidrológicas elaboradas e invasivas y sobre todo cuando existe poca información de la zona de estudio.

A partir de estos datos se propone un modelo numérico de la hidrodinámica del sistema acuífero del Valle de Aguascalientes que integre el comportamiento hidráulico de las fallas, así como el cálculo de recarga en medios áridos. El modelo numérico es descrito en el **capítulo III**, el cual tiene como objetivo principal establecer el comportamiento hidrodinámico del sistema del acuífero de Aguascalientes a través de la integración del capítulo I y II en el software modflow, así como información correspondiente a 1110 pozos con datos de 1985 a 2017, obtenidos de la Comisión Nacional del Agua, CONAGUA Aguascalientes. Además, se integran los datos litológicos de 195 pozos con columnas estratigráficas los cuales se agruparon en dos grandes unidades hidroestratigráficas tomando en cuenta principalmente la granulometría. Como resultados se obtiene un análisis general del comportamiento del acuífero con semejanzas con estudios previos y un error porcentual que va del 0.18% al 1.20%. A pesar de que el análisis del comportamiento hidráulico de la falla Oriente se realizó con poca información y solo en un tramo de la falla, el análisis mejora la comprensión del modelo y hace énfasis en la importancia de este elemento.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Capítulo I: “Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, México.”

ABSTRACT

Groundwater recharge (GWR) is analyzed and evaluated within the Aguascalientes Valley by means of a modified linearized Boussinesq equation and the Water Table Fluctuations (WTF) technique. These techniques use the specific yield, water table variations and the subsurface drainage of groundwater. The methodology is applied to the semiarid Aguascalientes valley, which contains a thick vadose zone. The combination of the analytical solution based on the Boussinesq equation and the WTF technique, allows the method to be applied in areas with deep groundwater levels, such as the Aguascalientes valley, without the need for high temporal resolution data. The data for the application of the method were provided by various government agencies and includes information on 145 wells positioned within the valley during the period 1985-2015. The specific yield and the transmissivity were integrated from the results of two previous investigations. Results indicate that the variation of recharge ranges from 0.86 to 525.69 mm / year in the analyzed period, with the highest recharge rates occurring in the north and center parts of the valley and is likely attributed to high specific yield and vertical hydraulic conductivity due to the presence of coarse permeable soils present in the area. Conversely, the lowest recharge rates were found to occur near the north and south borders of the valley. Keywords: Groundwater recharge, Aguascalientes valley, Water Table Fluctuation, Boussinesq equation, Groundwater drainage.

INTRODUCTION

Historically, humanity has faced the complication of obtaining water because it is a necessary and indispensable resource in our daily activities. In many locations, surface water for human consumption has diminished over the last several decades leading to a necessary increase in groundwater extraction, particularly in many arid and semi-arid regions. For this reason, many semiarid regions have experienced a considerable reduction of groundwater storage as pumping has greatly exceeded natural recharge. Subsequently, researchers in these critical regions are focusing on studies aimed at understanding recharge processes and determining effective ways in which recharge can be enhanced naturally (Carrillo-Rivera, 2000, Carrera- Hernández et. al., 2016, Manna

et al., 2017, Müller et al., 2016; Scanlon, et al., 2010; Sharda, et al., 2006). Groundwater recharge (GWR) refers to the entry of meteoric water across the water table after first entering the soil zone. Recharge crossing the water table potentially enhances aquifer storage. GWR can occur in two ways, by a downward movement due to the gravity forces in the form of runoff and infiltration or by horizontal movement, which generally occurs as lateral contributions of groundwater flow from adjacent aquifers. Factors such as rate and direction of GWR depend on the hydraulic parameters of the geologic layers that make up the soil profile and aquifer systems in question (Balek, 1988). Groundwater recharge is one of the most important parameters in quantifying sustainability of aquifer systems. Several different methods have been employed to evaluate the quantity of recharge entering aquifer systems. These include physical and hydrogeochemical methods and numerical models (Scanlon et al. 2006, Simmers 1998, Scanlon et al.2002). Other study factors such as: slope, depth to groundwater, infiltration rate, are used to determine the areas most suitable for groundwater recharge (Ghayoumian et al. 2007) or in the application of geographic information systems (SIG) and numerical modeling (Chenini et al.2010). These factors are also used in the study of the temporal and spatial variation of recharge, along with the application of natural or artificial tracers (Hernandez-Marin et al. 2018, Allison et al.1994, Sophocleous 1991, Wang et al. 2008, Qin et al. 2011). It is worth mentioning that some techniques do not attempt to quantify an actual GWR rate, but rather estimate potential GWR, a term that refers to the water that infiltrates but does not instantaneously contribute to the aquifer storage, but rather where subsurface drainage actively participates so that the net storage change is not easily quantifiable. For example, in areas with a thick unsaturated zone, the direct influence of the rainfall on the water table and then on GWR varies both temporally and spatially depending on the hydrogeological conditions of the subsoil, precipitation pattern (e.g. intensity and duration) and evapotranspiration, as well as the geomorphological characteristics of the surface (Rushton, 1988, Scanlon et al., 2002). Taking these aspects into consideration, it becomes important to quantify the drainage in a rigorous manner to minimize the error in the quantification of an actual recharge rate that affects overall aquifer storage (Cuthbert, 2010).

In recent years, analytical techniques have been proposed for the evaluation of GWR. Many of these approaches assume that temporary changes in the groundwater level are controlled by two main factors: the balance of recharge and net drainage of groundwater (Crosbie, et al., 2005; Cuthbert, 2010; Jie, et al., 2011). These two factors

can be applied to GWR when the aquifer systems are separated from the surface by a thick vadose zone. In this way, the potential recharge of aquifers under known climatic conditions depends mainly on the infiltration from surface water bodies and the lateral contributions. The aim of this research is to evaluate the potential GWR by applying an analytical adjustment of the Water Table Fluctuation (WTF) technique, in combination with the Boussinesq equation for the quantification of drainage. This methodology is applied to the aquifer of the Aguascalientes Valley, where the territory is classified as semi-arid (POEA, 2013) and 94% of water use originates from underground sources (CONAGUA & SEMARNAT, 2016). The WTF method is based on two intrinsic factors of the aquifer: (1) variations of the static water levels and (2) specific yield. The Boussinesq equation is related to hydraulic conductivity and aquifer thickness (or transmissivity). A further goal is to create a recharge map containing isovalues over the study area and the variations in the recharge isovalues will be discussed in the context of the overall hydrogeology of the region. This analysis will raise awareness about the sustainable management of the local aquifer, as well as to help in decision-making of actions such as the establishment of waste disposal areas, or the delimiting of areas vulnerable to groundwater pollution and to better understand their possible occurrence.

CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA

The study area corresponds to the valley of Aguascalientes in the state with the same name, occupying a strip having a North-South orientation and extending a length of approximately 80 km and a width of 25 km as shown in Figure 1.

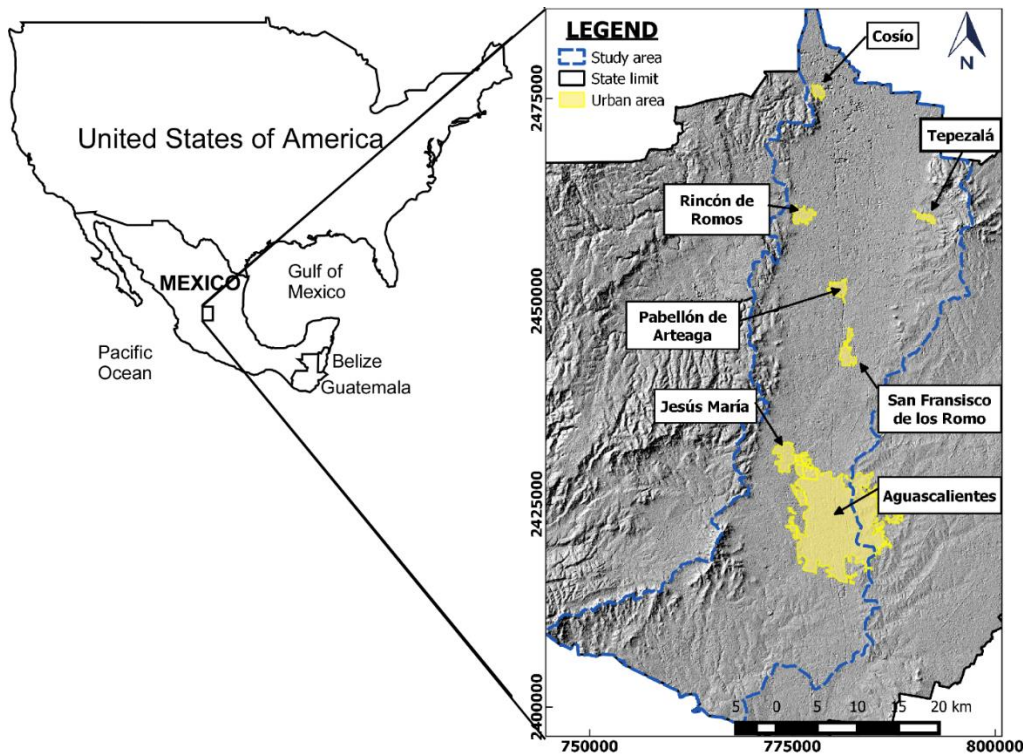


Figure 1. Location of the study area. The main urban centers of the zone are highlighted in yellow.

This zone is in a tectonic graben as described by Aranda-Gómez (1989). The San Pedro River represents the main hydrographic feature of the Valley and flows from north to south almost through the center of the valley. The main land uses in the study region include agriculture with intensive irrigation and livestock (63%), natural pasture (16%), shrubs (15%), oak forest (3.9%), mesquites (0.2%), with the remaining 1.9% corresponding to urban areas, where more than 85% of the population of the state resides (CONABIO et al., 2008, INEGI, 2018). It is important to mention that of the 50 thousand hectares dedicated to the agricultural activities within the valley, almost the entire area is irrigated with groundwater, although there is an important potential for the reuse of groundwater from irrigation, (CONAGUA, 2005; Pacheco-Martínez et al., 2013). In terms of climate, 68% of the territory of Aguascalientes is semi-arid with an average maximum temperature of 25° C, and an annual average rainfall of 526 mm and annual average potential evaporation of 2,200 mm. The rainy season occurs mainly during summer, with only occasional rainfall during the other seasons of the year (INEGI, 1993). Geomorphologically, the study area is relatively flat with small hills distributed within the area and increasing slopes toward the mountains. The valley is located between the Tepezalá mountains of to the east and the Sierra Fría mountains in the west. The average altitude of the Aguascalientes Valley is 1,900 m. The valley includes two important physiographic provinces. The Mesa Central is in the east, while the Sierra

Madre Occidental is to the west and consists of valleys and elongated mountain ranges oriented mainly NW-SE and NE-SW (CONAGUA, 2018). According to UNAM-UAQ (unpublished data, 2002) a predominance of alluvial and fluvial deposits occurs within the valley with the topmost sedimentary sequence composed primarily of detrital rocks derived from unconsolidated alluvial materials and classified as clays, silts, sands and gravels according to their grain size. The general stratigraphic sequence was determined through vertical electric soundings (SEVs) that were performed throughout the study area (Zermeño-Villalobos, 2016). Beneath the detrital rocks it was determined that the unconsolidated deposits exhibit a variable thickness from a few meters in the periphery of the valley, to up to 380 meters in the center (Hernandez-Marin et al 2018). Approximately 200-300 meters of compacted lithified sediments (conglomerates and sandstones) and fractured igneous rocks (rhyolites and ignimbrites) occur below the fluvio-alluvial refill that occupies the center of the valley. The compacted conglomerates outcrop mostly in the west, while igneous rocks can be observed in the east, conforming to the orientation of the mountain ranges. An analysis of the lithology of the unconsolidated central sediments was evaluated based on the SEV results and the lithological records of deep well logs, which suggests a stratigraphic configuration of coarse sediments such as gravel and sand, with smaller portions of clay and silt. Groundwater is determined to flow from north to south according to water level observations from measured wells. The chief aquifer of the Aguascalientes valley is considered unconfined (DOF, 2012), but with a thick vadose zone. As expressed by some local drilling engineers (Fuentes-López, expert in geophysics and geology, personal communication, 2018), currently no uprising of water levels in wells occurs during drilling, despite the presence of a thick vadose zone. Therefore, the local aquifer is considered as free or unconfined because this type of aquifers is defined by its response to groundwater pressure, regardless of the thickness of the vadose zone.

METHODOLOGY

Conceptualization and analysis of the WTF technique and the quantification of drainage.

According to Vélez-Otálvaro (2004) the methods to determine the GWR can be classified into 5 categories: direct measurements, water balance, chemical tracers, Darcy-Law approximations, and empirical methods. This author also states that some of the most reliable methods for estimating the recharge of semi-arid zones such as the Aguascalientes valley are chemical tracers, direct measurements and water balance. In

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

this research the water balance method is used to quantify recharge and specifically invokes the method of variations of groundwater, defined as Water Table Fluctuation or WTF. This method has been used in several research investigations. Healy and Cook (2002), for example, presented an excellent review of theory and its applications. Cuthbert (2010) performed an analysis that includes underground drainage to minimize the error in the recharge estimate by developing an expression for the drainage component, which is a function of the hydraulic gradient and transmissivity and therefore hydraulic conductivity and saturated thickness. In general, the WTF technique is applicable to several hydrologic scenarios, including ones in which the water table is deep and / or where groundwater levels can vary smoothly, if the hydrogeological properties of the aquifer are relatively well known. The expression used in the method assumes that temporal water-level changes of an aquifer are controlled by the recharge balance R (mm / year) and the net drainage of groundwater D (mm / year) at a given observation point for a certain period of time t . The recharge can be calculated as:

$$R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} + D \quad (1)$$

Where S_y represents the specific yield, $\frac{\partial h}{\partial t}$ is the temporal variation of the water table in the study area, and D is the drainage. The WTF method frequently ignores factors such as trapped air or barometric fluctuations that may affect the water level (Healy and Cook, 2002). In addition, the water that infiltrates and moves through the unsaturated zone can vary significantly in time and quantity, depending on certain conditions such as evapotranspiration, porosity, hydraulic conductivity, specific yield, and depth. The main limitations of the WTF technique are the difficulties of defining and estimating the specific yield as well as the quantification of drainage in areas with thick unsaturated zones, since in shallow water tables, the error in drainage may be minimal because the water level may increase significantly during a rainfall period. Therefore, in areas with a considerably deep water table, it is important to rigorously estimate the drainage to minimize the error in the quantification of the recharge, as suggested by Cuthbert, (2010). This author also establishes the equation for the drainage calculation considering the case of an ideal homogeneous horizontal aquifer limited at one end with $x = 0$, conceptually representing a boundary without flow (e.g. the mountains along the basin perimeter), and at the other end with $x = L$ where a river exists and exhibits a constant head boundary condition, as shown in Figure 2. This idealized scenario is a typical conceptual representation of many aquifer systems.

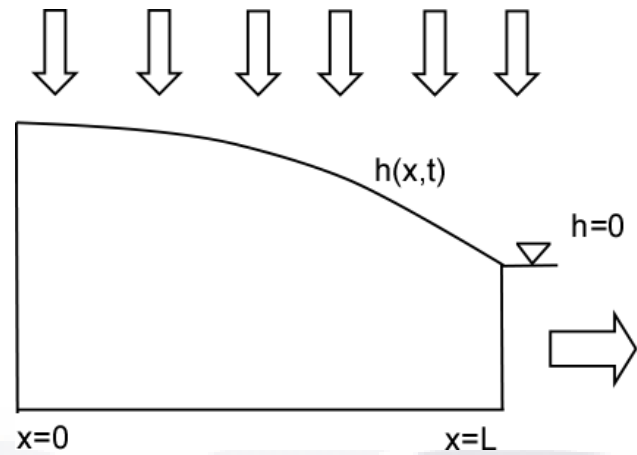


Figure 2. Idealized conceptual section of an aquifer that receives recharge with sinusoidal variation of the water level $h(x, t)$ (Cuthbert, 2010).

The calculation of the drainage is based on the one-dimensional Boussinesq equation of the groundwater flow for an aquifer that receives homogeneous recharge and that follows a sinusoidal pattern. The applicable equation is the following:

$$D = \frac{2\pi T}{L^2 - x^2} \quad (2)$$

Where T is the transmissivity (m^2/d) and \bar{h} is the hydraulic gradient. Recalling that the transmissivity is the product of the aquifer thickness b (m) and the average value of the hydraulic conductivity k (m/d) (Freeze and Cherry, 1979). By combining equations 1 and 2, the recharge and drainage can be calculated for a period of time as:

$$R = S_y \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{2\pi T}{L^2 - x^2} \quad (3)$$

Specific Yield (S_y) Estimation

The specific yield S_y is a fundamental parameter in the WTF method and can be defined as the volume of water released per unit area of the unconfined aquifer when the water table decreases by one unit of height. However, this definition is only valid under conditions of equilibrium and small-scale experiments. Currently, there are several methods to measure S_y , such as laboratory, fieldwork, empirical, etc. However, they all have a degree of associated uncertainty. Commonly, S_y is assumed to be a constant value (Healy and Cook, 2002, Tritscher et al., 2000), although this parameter varies depending on the different intrinsic conditions of the aquifer such as the local water flow, the depth of the phreatic level and the heterogeneity of the soil (Fetter, 2001). Thus, its variability depends on the factors that are considered for its calculation and the means in which they are obtained (Childs, 1960). The specific yield is inherently treated as a

storage term independent of time in the WTF method, which in theory explains the instantaneous release of stored water.

APPLICATION OF THE METHOD

Estimation and distribution of specific yield S_y

The distribution of the specific yield throughout the study zone was mapped based on the results of two previous investigations, (UNAM-UAQ unpublished data, 2002; CONAGUA 2015). In the first report, a numerical groundwater model was developed using the Visual- Modflow package program, in which a map of the variation of S_y was developed through model calibration, which yielded a S_y isocurve map for year 1996. The investigators used a total of 160 wells during their modeling analysis. In the second report, the results of 13 pumping tests ranging from hours to days were performed in the north and center of the Aguascalientes Valley. Time-drawdown curves were developed from the pumping tests and compared with the theoretical curves developed by Boulton (1963), Neuman and Witherspoon (1972) and Moench (1994) for the calculation of the specific yield at each pumping test location. Linear interpolation was then used to create a map of the variations of S_y in the area where the pumping tests were performed. The S_y maps from both investigations were combined algebraically using the multilevel B-spline interpolation method to create a new map of the variation of the specific yield in the study area. The new map is shown in Figure 3.

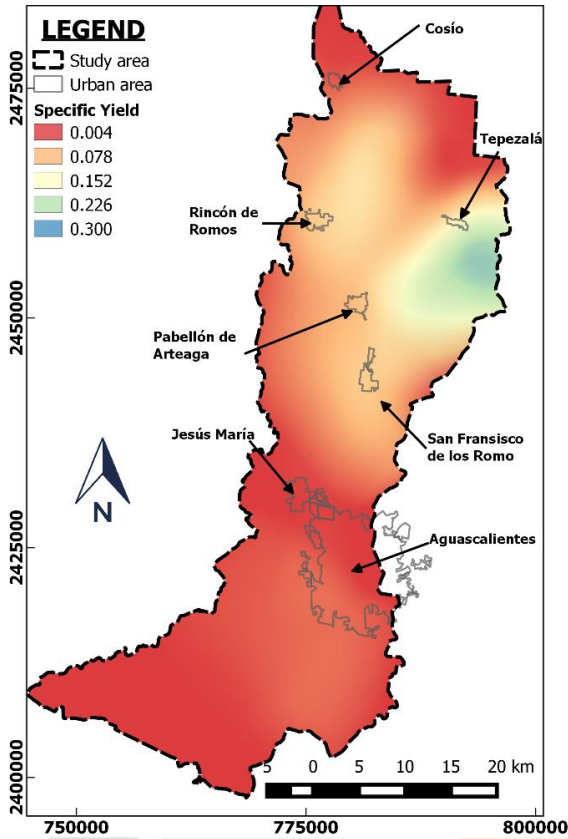


Figure 3. Distribution of the specific yield in the study area. This map combines the results from UNAM-UAQ (unpublished data, 2002) and CONAGUA (2015) using the interpolation Multilevel B-Splines method.

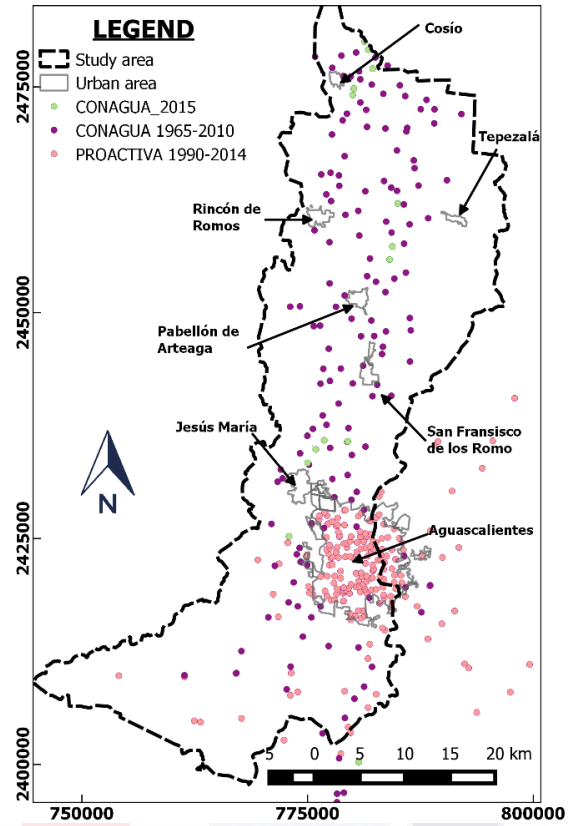


Figure 4. Location of wells used in this study and provided by CONAGUA and PROACTIVA Medio Ambiente CAASA.

Evaluation of groundwater levels

Groundwater levels were obtained by analyzing data provided by government agencies such as PROACTIVA medio Ambiente CAASA, which is the company commissioned for the distribution of water in the municipality of Aguascalientes, and the CONAGUA. Both agencies provided the static water levels of wells measured throughout the Valley during the period 1968-2015. This investigation focuses only on the period between 1985 and 2015. Figure 4 shows a map with the location of the wells with the provided data, the measurements in the wells are mostly annual and sometimes monthly. Unfortunately, as in many cases, not all the wells have complete data that could be used for direct application of the method, thus, a classification of the wells was performed in order to discard those without sufficient information. To determine which and how many wells would be included in the study, we first considered those active during 2015, recalling that this is the most recent year of the analysis period. The

availability of regular measurement records was also considered. In some cases, the missing data was completed by applying one of four statistical methods according to the amount of missing data and the location of the well in the valley. The methods applied were linear regression, neighborhood averages, average ratios and the correlation method. As a final analysis, 145 wells were used for the application of the WTF technique. Estimation of underground drainage to estimate the underground drainage, the methodology described by Cuthbert (2010) was considered. As mentioned earlier, this author proposed a conceptual model with the section of a free aquifer of length $x = L$. In the study area, this model is represented by a section of the basin of the Aguascalientes valley, where the San Pedro River would form a constant hydraulic head boundary, while the model periphery represents a no-flow condition at $x = 0$ as shown in Figure 5 (see also Figure 2 and Eq. 3). The values of transmissivity were taken from reports of various agencies of both public and private sectors (Table1). Similarly, as was done for creating a map of S_y , the B-Spline Multilevel technique was used as an interpolation method to obtain the distribution of the transmissivity distribution in the study area as shown in Figure 6.

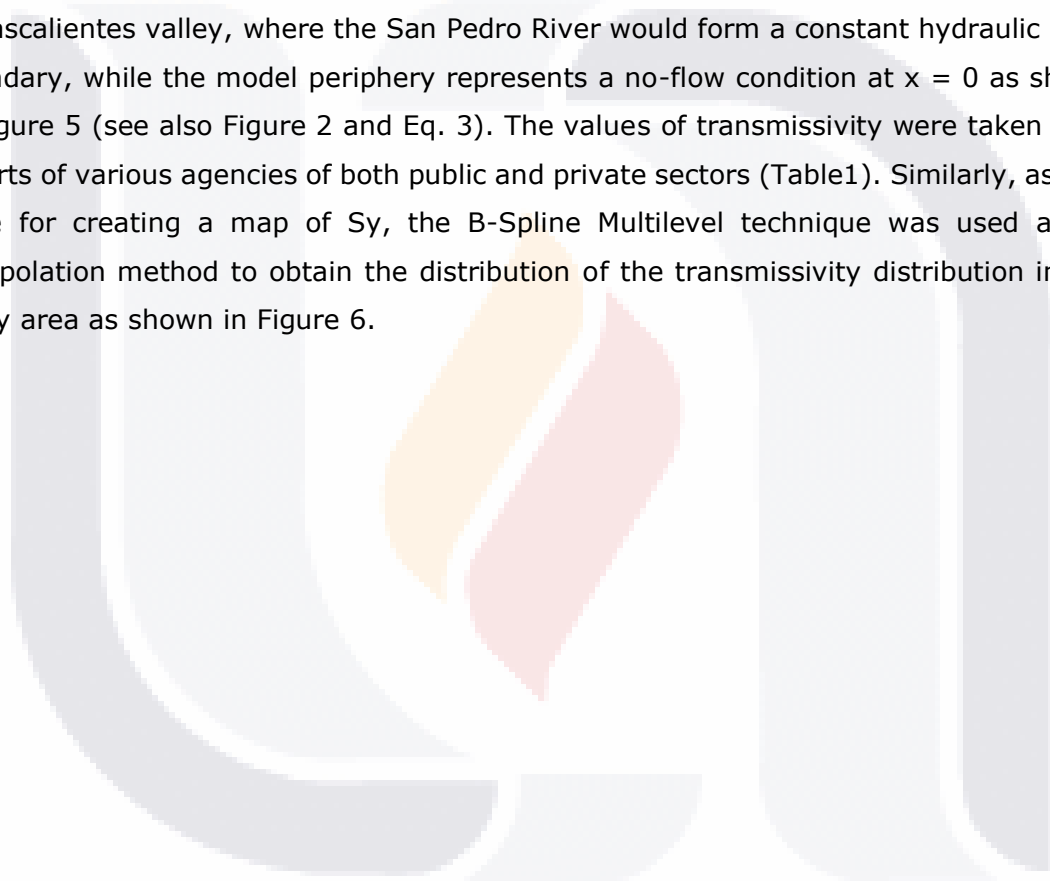


Table 1. Transmissivity values taken from various agencies of the public and private sectors (CONAGUA, 2015). Coordinates in WGS 84 / UTM Zone 13Q North.

Well ID	UTM Coordinate		T (m ² /day)	Well ID	UTM Coordinate		T (m ² /day)
	X	Y			X	Y	
68-22	775938	2416730	846.72	27	788605	2425861	13.0464
51-50	782121	2434346	388.8	34	783284	2422929	655.776
33-43	780214	2452735	1123.2	41	782917	2422196	402.624
23-4	777303	2461804	518.4	44	782137	2422104	538.272
24-57	786328	2461753	544.32	53	783513	2421050	384.48
3-10	777821	2484558	362.88	56	782871	2419905	686.016
78-6	780934	2406973	95.04	58	784385	2420180	113.184
68-16	774098	2417086	146.88	64	781765	2416606	26.0928
79-1	799641	2412077	1468.8	66	785165	2419492	13.1328
60-26	779474	2425622	129.6	69	786770	2418943	12.8736
50-64	775976	2433108	26.784	98	789155	2415186	2.68704
51-87	790663	2435136	23.328	I	783485	2418911	1099.95
PAB-4	790683	2438531	49.248	II	784144	2417735	244.512
42-79	778242	2441802	648	III	785023	2418770	409.536
42-33	780569	2444860	864	X	790796	2452293	607.392
33-52	784818	2455822	138.24	VIII	794399	2449891	9.504
43-4	798648	2445439	250.56	VII	799734	2448679	72.4896
23-3	775953	2462251	181.44	VI	772512	2461130	55.0368
24-6	781780	2470351	475.2	IV	778544	2465290	1161.99
15-2	780668	2480729	250.56	V	783632	2465257	209.952
41	787028	2475627	19.872	88	779641	2476307	11.7504
1	779000	2485523	551.23	7A	786555	2474032	55.1232
19	778799	2482188	436.32	90	779302	2468233	13.824
3	781994	2430787	51.235	68	777563	2447623	58.4928
9	785164	2429507	8.0697	172	772481	2431870	7.56
21	782129	2424253	328.32	178	780264	2399489	5.14944

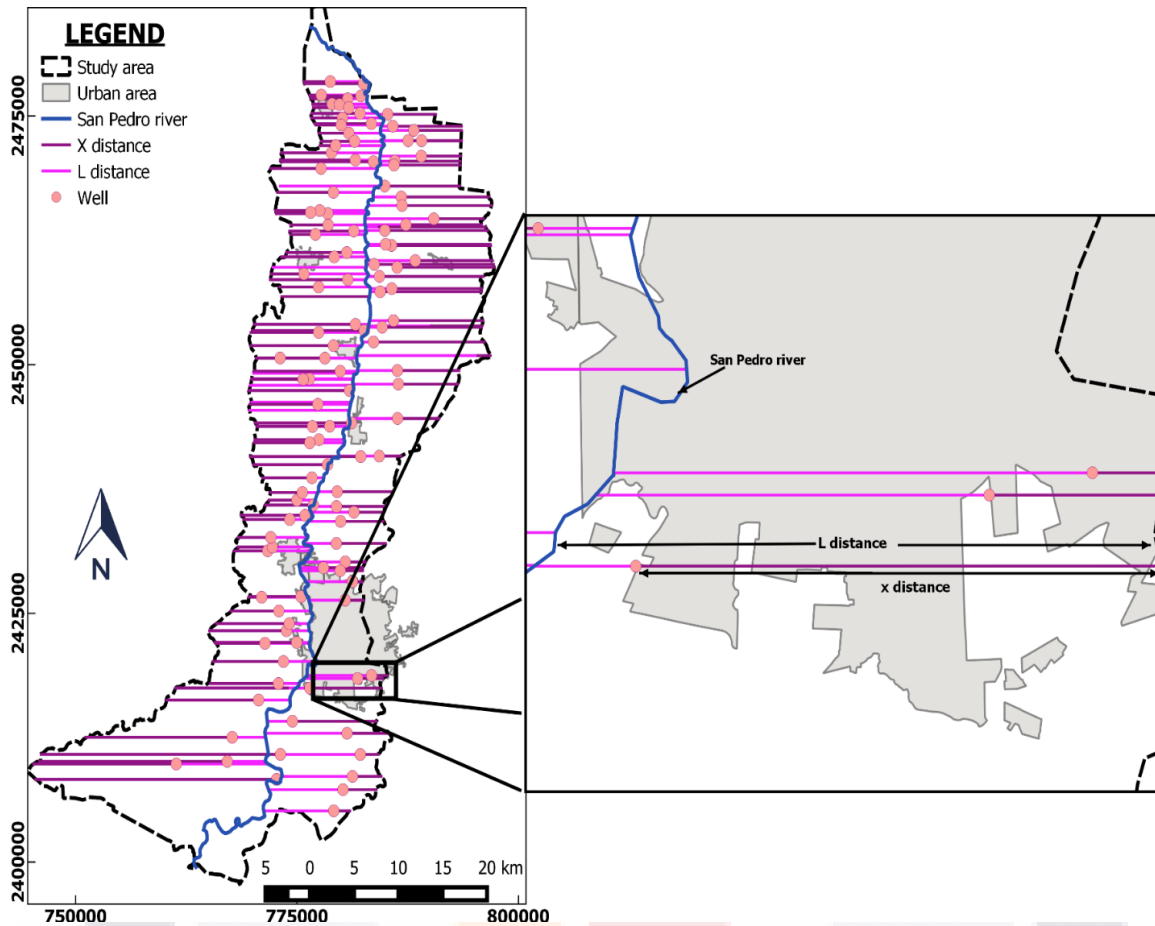


Figure 5. All sections (represented as horizontal lines) on the Aguascalientes valley were used to estimate the drainage, with $x = 0$ representing the no-flow boundary, and $x = L$ representing a constant-head boundary, which coincides with the location of the San Pedro River through the center of the valley.

RESULTS

The GWR was calculated for each of the 145 wells using Eq. 3 along with the isocurves from Figures 3 and 6. The calculated GWR and the parameters used in the computation are compiled in Table 2 (which only shows the results of 30 wells for brevity). This table also includes some of the annual data over the span of the 30-year analysis. GWR shown in table 2 was converted into a digital map for further analysis. The results reveal the regions with the highest and lowest estimated GWR within the study area. The greatest recharge is located mainly in the northern and central parts of the valley, where a maximum recharge of 525.67 mm/year is estimated. Conversely, at the north and south boundaries of the study site, as well as in the metropolitan area of the city of Aguascalientes, the lowest values of GWR are estimated to be on the order of

0.086 mm/year. Figure 7 shows the calculated distribution of the recharge for the study area.

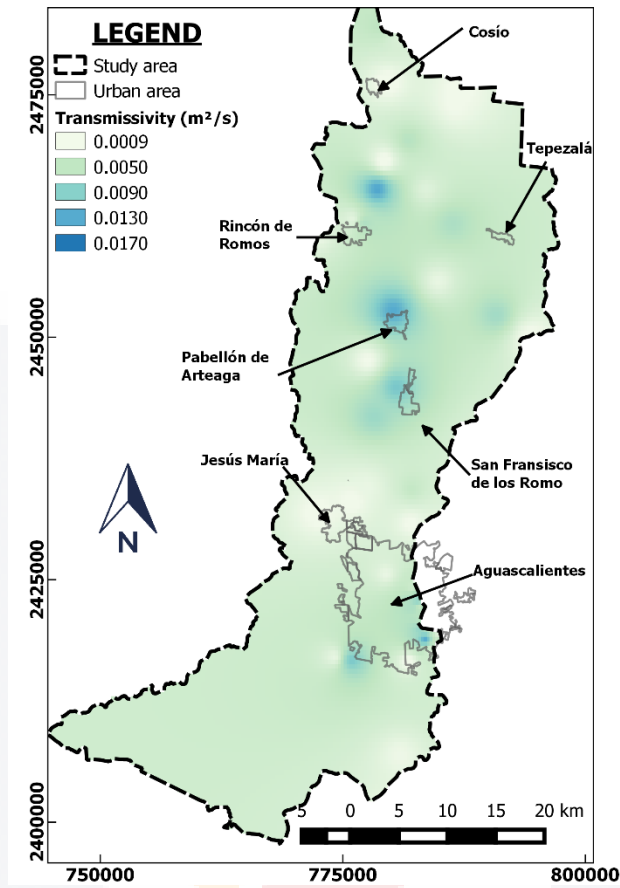


Figure 6. Distribution of transmissivity. Map resulting from the Multilevel B-Splines interpolation and the data of Table 1.

Table 2. Representative sample of results of the application of the WTF method (Δh^*) and the analytical solution of the Boussinesq equation (D^*) for the estimation of GWR (R^*). The differences in the value of the column of S_y and T are determined by the location of the well on the maps of specific yield and transmissivity, respectively. h^* corresponds to the hydraulic gradient of the wells analyzed to the San Pedro River, x^* is the distance from the boundary of the basin to the location of the well, L^* is the total distance from the boundary of the basin to the San Pedro River, passing through the analyzed well; T indicates the transmissivity, D^* is the drainage calculated with equation 2; S_y indicates the specific yield, Δh^* is the variation hydraulic head between the first and last years of analysis (from 1985 to 2015); and R^* indicates the annual recharge obtained through the proposed methodology. Coordinates in WGS 84 / UTM Zone 13Q North.

Id. Well	UTM Coordinate		\bar{h}^* (m)	x^* (m)	L^* (m)	T^* (m ² /d)	D^* (mm/d)	S_y^*	Δh^* (mm)	R^* (mm/year)
	X	Y								
1	778394.6	2484628	0.020	4108.600	9267.440	423.360	0.087	0.004	36926.781	5.134
4	781311.2	2480026	0.015	4108.600	9267.440	259.200	0.042	0.004	53880.000	7.406
6	780709.7	2476737	0.010	4108.600	9267.440	86.400	0.010	0.004	57869.300	7.918
7	783861.7	2477367	0.004	4108.600	9267.440	181.440	0.008	0.004	85882.023	11.745
10	778877.9	2471298	0.004	5647.180	14086.210	293.760	0.005	0.080	57729.936	153.951
11	786033.2	2470462	0.004	12846.190	14411.690	259.200	0.018	0.004	51989.000	7.124
12	781580.1	2470578	0.004	8457.590	13485.980	432.000	0.012	0.004	60167.400	8.235
13	788169.5	2473568	0.021	5373.620	7070.390	98.323	0.070	0.004	64326.668	8.862
14	785940.1	2470072	0.037	12696.830	14518.230	267.494	0.145	0.004	6655.400	1.054
15	778958.6	2476200	0.011	2176.640	9161.830	42.336	0.004	0.004	46484.005	6.357
17	778468.7	2465203	0.001	5791.200	14414.310	1140.480	0.007	0.100	49921.400	166.411
18	781394.1	2463445	0.002	7230.370	12755.150	437.184	0.006	0.200	55283.600	368.563
19	784890.3	2467963	0.009	12411.420	14881.270	3162.240	0.321	0.004	52230.800	7.460
20	779191.5	2460838	0.002	5933.510	13432.770	451.872	0.006	0.100	52855.500	176.191
21	785664.4	2461996	0.007	11204.060	12330.950	535.680	0.096	0.082	56919.500	155.676
22	784988.9	2462107	0.006	10587.270	12199.260	453.600	0.056	0.200	48847.704	325.707
23	780607.9	2461276	0.004	6786.290	12907.140	449.280	0.010	0.082	65161.700	178.119
25	777425.6	2457806	0.000	4378.570	13380.330	419.040	0.000	0.082	44765.546	122.359

27	777473.5	2442462	0.006	7211.950	13387.010	599.616	0.019	0.082	44147.392	120.689
28	780722.9	2458545	0.004	8737.350	14505.950	428.544	0.008	0.100	65455.900	218.195
30	783625.3	2452290	0.001	13941.470	16109.780	518.400	0.004	0.082	58538.500	160.009

DISCUSSION

The results from Figure 7 clearly show that the center and north portions of the valley have the largest rates of GWR. These areas of high recharge can be attributed in part to the dominant type of soil, which corresponds to course-grained alluvial deposits with relatively high values of specific yield and hydraulic conductivity (0.010 to 0.30 and 0.2 to 20 m/d respectively). Furthermore, as a consequence of the predominance of this type of soil, the estimated drainage increases in the vicinity of the San Pedro River, which is likely enhanced by extensive agricultural practices in this area due to the high return volume of irrigation water to the subsoil. Conversely, the regions with the lowest estimated rates of GWR, located at the north and south boundaries of the valley, as well as in the metropolitan area of the city of Aguascalientes, is attributed to the large discharge of groundwater that lowers water levels and consequently thickens the vadose zone and results in reduced levels of estimated recharge. Also, possibly contributing to the reduced estimates of recharge is, the presence of sandstones and conglomerates exhibiting a low specific yield and small hydraulic head variations. Interestingly, these low recharge areas are where the highest calculated contributions by drainage occur. Clearly, the high drainage does not appear to make a significant difference in the general estimation of recharge. When comparing the recharge estimated in this study with that estimated by UAQ-UNAM (unpublished data, 2002) using natural tracers (O-18 and Deuterium) the zones with the largest potential for recharge coincide with the results estimated in this investigation. Furthermore, they also determine that the zone with the lowest potential for recharge is within the city of Aguascalientes, which also coincides with the results presented here. On the other hand, an estimation of natural recharge reported by CONAGUA (2018) takes into account a water balance with four factors: underground horizontal flow input based on the static level and Darcy's law ($83.1 \times 10^6 \text{ m}^3$), horizontal flow outputs with an estimated volume of $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$, pumping of $427.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ and storage change, taking into account the configuration of the evolution of the static level registered during the period 2000-2014, with an annual average of $-180.2 \times 10^6 \text{ m}^3$, the natural recharge estimated by CONAGUA is $249.6 \times$

106 m³, but if only the vertical recharge is taken into account CONAGUA recharge is 166.5 x 106 m³, which is 0.9% less than the total recharge estimated in this investigation (168 x 106 m³). Despite the different methods used in the calculation of the vertical recharge, the results are almost equal, these comparisons indicate that the technique proposed in this work is applicable to the Aguascalientes valley, although it may be necessary to apply new methodologies or to include new factors in the future to reduce uncertainty in estimated recharge. Some of the factors to consider may be water bodies, effects of anisotropy, and climate data for long term periods.

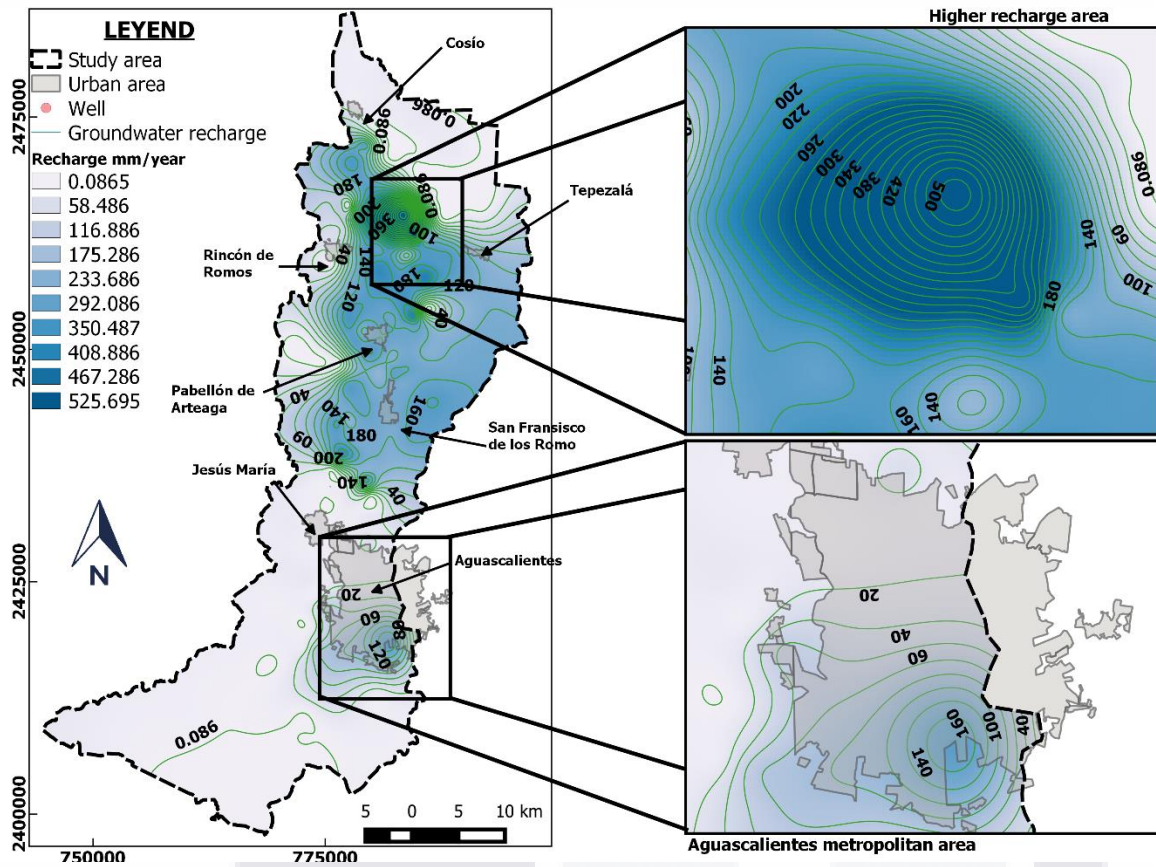


Figure 7. General map of GWR rate.

CONCLUSIONS

This investigation presents a methodology for the estimation of groundwater recharge (GWR) by employing an analytical solution of Boussinesq for unconfined flow into the Water Table Fluctuation (WTF) method. The study area encompasses the semi-arid valley of Aguascalientes, in central México. This rectangular north-south trending valley represents a tectonic graben that is about 80 km in length and 25 km in width. The estimated GWR is variable throughout the valley with an estimated maximum annual

value of 526.26 mm and a minimum annual rate of 0.86 mm. The areas with the greatest estimated recharge are located at the northern and central parts of the valley and is attributed to agricultural practices and coarser-grained soils in these areas. Conversely, the lowest estimated recharge occurs along the north and south boundaries of the study area and within the city of Aguascalientes. These low values are attributed to heavy pumping, which lowers the water level and increases the thickness of the vadose zone as well as to lithologies having a low specific yield. The results present similarity in volume and space, with previous studies.



Capítulo II. "A STATISTICAL APPROACH TO DETERMINE THE IMPACT OF A FAULT ON GROUNDWATER FLOW"

ABSTRACT

Previous investigations have shown that geologic faults can have direct and profound influence on groundwater flow. Faults have been shown to act as hydraulic barriers to lateral groundwater flow. Understanding and quantifying the local hydrologic parameters that can be used to accurately identify fault behavior is an important step in characterizing aquifer systems. The high hydraulic gradients induced by pumping groundwater across faults, and the analyses of highly variable groundwater temperatures vicinity of a fault, are shown here to be important indicators of fault behavior and identify whether faults behave as barriers to transverse or even vertical flow. Variable magnitude of hydraulic parameters in both blocks along a fault trace denotes in various zones barrier or conduit behavior. In this investigation, large temperature and hydraulic gradients are mapped across of one section the Oriente fault in the Aguascalientes Valley, central México, from information provided from 268 pumping wells. Graphical analysis is used to first establish 7 zones along the section of the Oriente fault and then a second analysis invokes a student's t-test to compare the means of water temperature and groundwater levels on the study zone. The results of this analysis suggest that the hydraulic behavior of the Oriente fault is variable, as three of the seven zones indicate that the fault behaves as a barrier to lateral groundwater flow, three zones indicate that the fault behaves as a conduit, and one zone it is undetermined. This analysis provides a powerful way to characterize fault behavior without invoking invasive hydrological investigations.

Key words: Groundwater flow impact from faults, Fault, student's t-test, geothermal anomalies, hydraulic gradient, Aguascalientes Valley, Oriente fault.

INTRODUCTION

Fault zones are heterogeneous structures that can act as barriers or conduits to groundwater flow in both space and time (Knipe, 1993; Caine et al., 1996). In general, the hydraulic behavior of a fault zone is a direct function of two factors: (1) the volume of material mechanically altered, and (2) the permeability of the fractured and granular materials (Caine et al., 1996). These two factors may be a direct consequence of other factors, such as the stress regime total throw, lithology or the relative activity of the fault zone over time, the latter of which is an important factor to consider in groundwater

flow. For instance, an inactive fault may be less permeable due to the presence of chemical precipitates sealing the small fractures and intergranular pores resulting in smaller fluid pathways. Conversely, since an active fault can maintain a continuous breaking of rocks and sediments in the fault zone, its permeability can be increased. In addition, when the geological materials adjacent to the fault plane are predominantly under a tensile stress state, as in normal faults, the permeability is preferably high, while under compressive stress conditions, as is typical for reverse faults, the porosity is reduced, resulting in lower permeability (Apaydin 2010). Hydraulically, a fault or any other discontinuity such as earth fissures can behave as either barriers or conduits to transverse (normal to fault plane figure 1) or vertical flow. An example of a vertical fault conduit is when there are cross-fault segments that enhance permeability and provide for a vertical (down the fault plane) channel effect. This channel effect increases the connectivity, and subsequently increases the effective permeability (Berkowitz 1995).

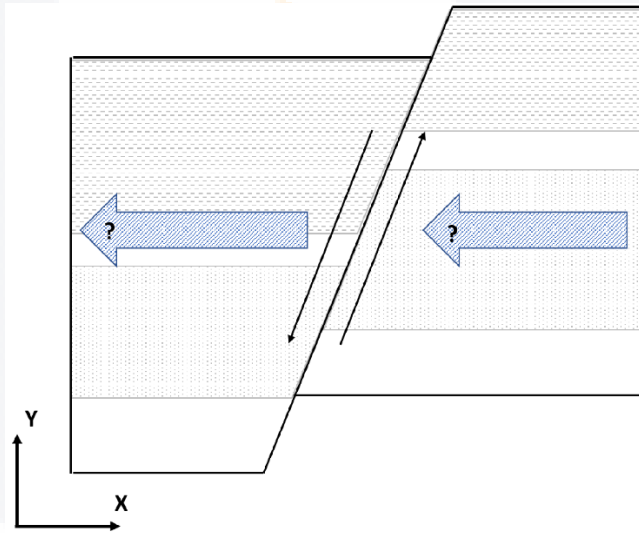


Figure 1. Cross-section of the flow direction analyzed on the fault zone. The blue arrows represent the direction of flow (Normal to the fault plane).

Fault systems with parallel fractures also can effect the hydraulic conductivity of the rock mass. When several fractures occur having the same orientation as the main fault, the permeability of the entire system is increased (Kristiansen, 2011). Hernández-Marín et al., (2017) described this effect in an experiment where poured water entering a fault opening was monitored and analyzed. In this particular study the fault exhibited a high capacity for infiltration into the fault. Since the fault behaved as a permeable pathway for the water, it allowed the fault to be readily analyzed using electrical resistivity tomography. This involved conducting a series of electrical resistivity profiles

normal to fault plane at different time intervals while water was continuously poured into the fault zone. The analysis demonstrated that the recharge water moved longitudinally more parallel to the strike of the fault than transversely within the fault.

Another condition that influences the hydraulic flow, especially in the vertical flow direction, is the occurrence of relay ramps as described by Fossen and Rotevatn (2016), who employ the term to define two normal faults having the same dip direction in their overlapping zone and structural interaction. Furthermore, they indicated that the structural complexity of relay ramps, (possessing a large number of faults and fractures with a wide range of orientations) exercises an important control over fluid transport. These structures can act as vertical conduits for the migration of all types of fluids, including hydrocarbons, carbon dioxide, hydrothermal solutions, magma and groundwater. However, due to the nature of their physical properties these structures can act as hydraulic barriers to horizontal flow while serving as conduits to vertical flow of groundwater (Bense and Van Balen, 2004, Rotevatn et al., 2009). However, the conduit effect can be reduced both horizontally and vertically if low permeabilities exist in the host rock (Rotevatn and Fossen, 2011).

Another way in which faulting, and fissuring can create hydraulic conduit behavior is from the juxtaposition of different hydrostratigraphic units occurring at different depths. The greater the density of fractures and variations in fracture orientation, the greater the permeability (Manzocchi et al., 2010). On the other hand, the permeability of a fault can be reduced if the clay content increases in the fault core. This is common when the fault is located in sedimentary basins (Egholm et al., 2008; Caine et al., 1996) where abnormally high hydraulic and thermal gradients have been observed.

Recent empirical investigations have been carried out to predict the hydraulic properties of a fault zone in order to identify anomalies in parameters including hydraulic heads and geothermal signals (i.e. Bense et al., 2003a; Bense et al., 2008; Anderson and Fairley, 2008). In these investigations, the authors obtained empirical values to define the hydraulic behavior, following the hypothesis that faults behave as a barrier system if the water temperature and the hydraulic head on both sides of the fault present differences equal or larger than 4° C and 10 m, respectively.

The chief objective of this investigation is to show how statistical and parametric mapped correlation analyses can be used to define the impact of a normal flow to the fault on groundwater of the Oriente fault, located in the Aguascalientes Valley, México (figure 2). For this analysis, temperature variations of the water and hydraulic heads are

used to describe the impact of the fault on the groundwater hydraulics with measurements in February 2017 for both parameters on selected pumping wells. The determination of the impact of the fault on the groundwater hydraulics based on a quantitative function of the graphical correlation analysis, and rejection or acceptance of the hypothesis test. This analysis can provide insights into the hydraulic behavior of a fault and provide a better understanding of the aquifer system of the Aguascalientes Valley.

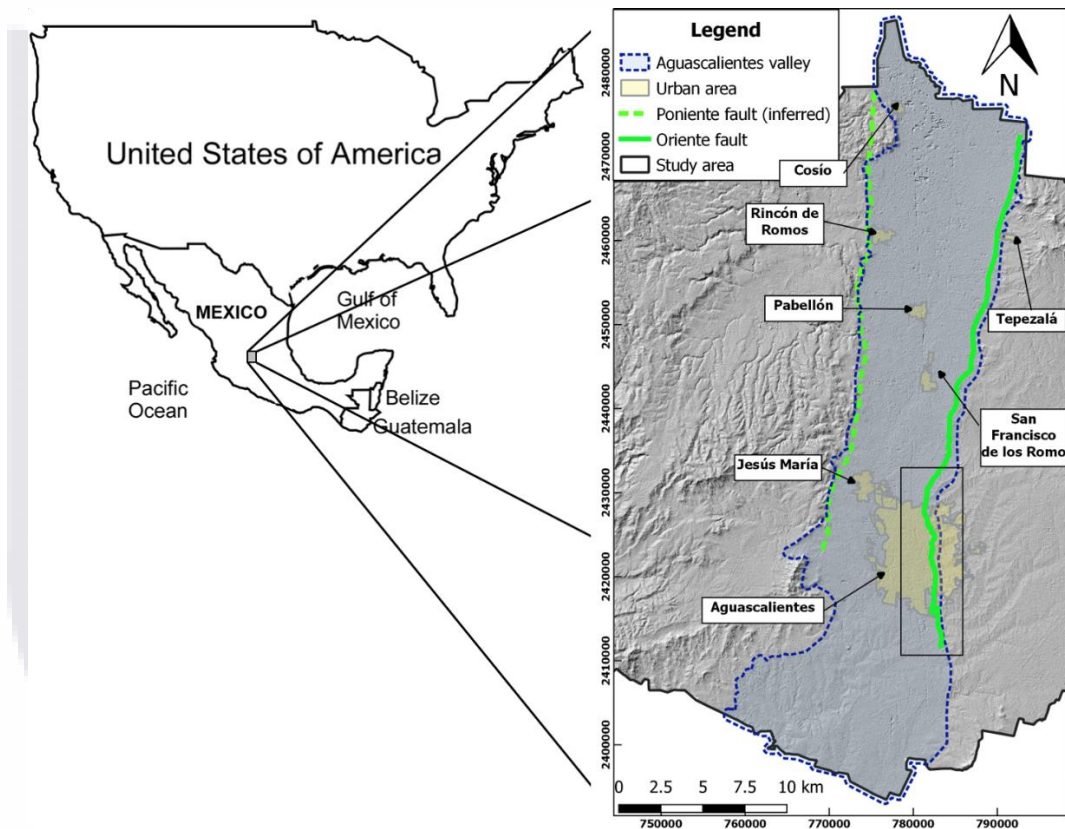


Figure 2. Location of the study area located inside the State of Aguascalientes.

CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA

The study area is within the Aguascalientes valley and includes the Oriente fault (Oriente means eastern in Spanish), which flanks the Aguascalientes tectonic graben to the east (figure 2). The Oriente fault (shown in figure 3a and 3b) originated from tectonism and is part of a system of tensional structures it that includes the primary Oriente and Poniente faults on the east and west flanks, respectively. These two structures are accompanied by a considerable number of secondary discontinuous faults

with orientations almost parallel to the primary ones (Aranda-Gomez, 1989). The Oriente fault is believed to extend deeply through the Quaternary stratigraphic layers as suggested by Hernandez-Marin et al., (2017) and may even reach the Tertiary basement rock at depth, as inferred by its origin and impressive overall length. In addition, it has been suggested that this fault has been reactivated from recent groundwater pumping-induced stress, which became intensive in the late 1970's from the sudden additional need of groundwater resources, therefore, its activity only affects the Quaternary sedimentary layers (Pacheco-Martínez et al., 2013). These facts suggest that the recent activity of this fault, at least on the surface or near-surface, is caused totally or in part by heavy pumping and subsequent land subsidence occurring mostly in the center of the valley (Chaussard et al., 2014, Pacheco-Martínez et al., 2015). However, as mentioned by Hernández-Marín et al. (2017), the fault reactivation can be due other processes such as tectonism, because of there is not enough evidence to discard them. Despite the recent efforts to understand the mechanical and hydraulic behavior of the Oriente fault, the inspected activity has been limited to the near surface. For instance, Hernandez-Marin et al. (2017), monitored vertical displacement and applied a time-domain geophysical resistivity surveying for understanding the local stratigraphy and the patterns of the subsurface flow. Additionally, several observations of some segments of this fault indicate the presence of cementing substances such as calcium carbonate penetrating into the fractures, which can limit the transport of surface water into the fault zone.



Figures 3a and 3b. Surficial view of the Oriente fault located in a vast non-urban area inside Aguascalientes city. The large number of fractures associated to the master fault has impeded the construction of more infrastructure at this locality.

IDENTIFICATION OF HYDROGEOLOGICAL UNITS

As mentioned in the Official Journal of the Federation (DOF, 2012), the aquifer of the Aguascalientes Valley is classified as an unconfined, and it is mostly made up of gravels, sand and few clays. According to UNAM-UAQ (2002), in this area there is a predominance of alluvial and fluvial fillings, while observations in quarries and open pits suggest that the uppermost sequence is composed by detrital sediments and sedimentary rocks, the first derived from unconsolidated materials, mostly sands and gravels, and in minor proportion silts and clays, and the later composed by compacted conglomerates and sandstones that contains clasts of volcanic rocks in a matrix of coarse to medium sand, silt, clay and precipitated substances (González-Cervantes, et al., 2019). Occasional igneous rocks transported from the western mountains complete the description of the uppermost sequence. According to study elaborated by UNAM-UAQ (2002), the approximate thicknesses of the sediments in the valley varies from 200 to 300 meters.

Through Vertical Electrical Sounding (VES) carried out and analyzed throughout the study area, 3 main hydrogeologic units were recognized: Unit 1 on the center of the valley of alluvial and fluvial origin (gravels, sand, silt and clays), Unit 2 to the east, made of sedimentary rocks (conglomerates, sandstones, littered sands) and Unit 3 to the west, a unit of volcanic rocks mostly (rhyolites and ignimbrites), (Hernández-Marín, et al., 2018) (figure 4).

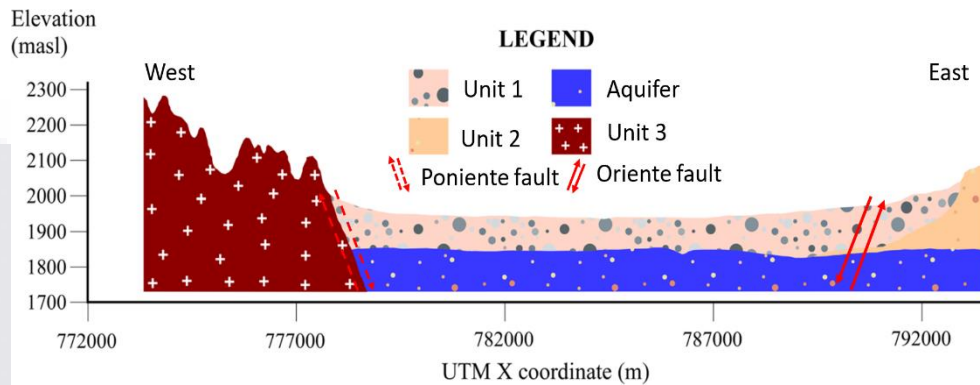


Figure 4. Example of the stratigraphic hydro profile across the valley. This profile shows the configuration of hydrostratigraphy in the north of the study area and the localization of the Oriente fault. The water table corresponds to the upper limit of the hydro-stratigraphic "Aquifer" layer. Modified of Hernández-Marín et al., 2017.

HYDRAULIC AND THERMAL EFFECT OF THE ORIENTE FAULT

To determine the hydraulic impact of the Oriente fault on the local groundwater flow using hydraulic heads and temperatures of the groundwater, a detailed spatial analysis (map) of the available parameters of the study site is needed (Bense et al., 2003a; Bense et al., 2003b). In this investigation, water temperature and water-level data are obtained from 268 wells along the Aguascalientes valley, given the large amount of data in the Aguascalientes metropolitan area, especially on the Oriente fault, the analysis is limited to this area, the figure 5 shows the location of the 268 wells and the 85 wells selected for statistical analysis. The wells within the valley corresponding to the hanging wall block on hydrogeologic unit 1 are described by Hernández-Marín et al. (2018), with an average depth of 350 m. The hydraulic conductivities in this area are of the order of 1×10^{-3} m/day, then, this unit is favorable for groundwater production with low to intermediate flow rates, with an average pumping of 3.10×10^5 m³ in 2017 (Conagua, 2018). Wells in the footwall block are located within hydrogeologic units 1 and 2. They are at an average depth of 430 m with a hydraulic conductivity up to 50 m/day in some locations and the annual average pumping for 2017 was of 5.00×10^5 m³ (Conagua, 2018).

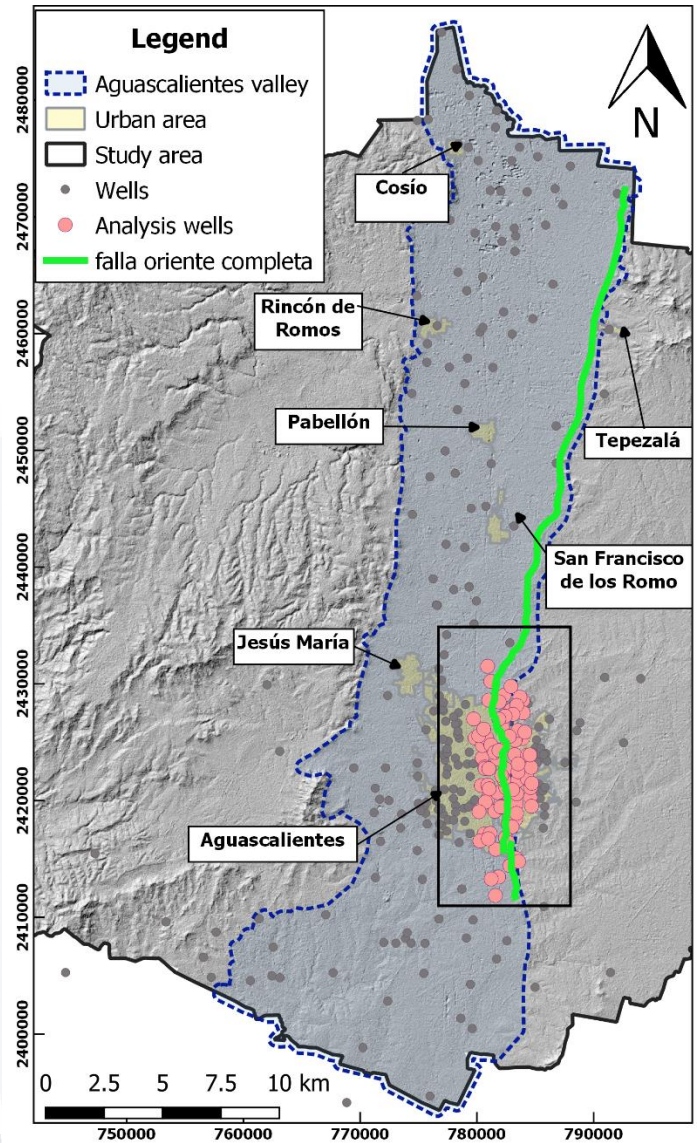


Figure 5. Location of wells with temperature and groundwater level data.

Water temperature and hydraulic head were measured in a field campaign on February 2017 for both parameters. In particular, water temperature was measured at the static level of the well. It is important to mention that no local current sources of heat flow have been reported, that could rise the temperature of water in wells, for instance, plutonic bodies, radioactive elements, or volcanic activity. It is important to mention that regional tertiary volcanic activity was accompanied by activity in major fault systems and that a hiatus in volcanic activity also coincides with a period of fault inactivity. This suggests that the deformation was strongly controlled, or linked, to the presence of magmas and hydrothermal fluids in the crust (Loza-Aguirre et al., 2008).

METHODOLOGY

As mentioned earlier, water temperature and water-level data were measured from 268 wells along the Aguascalientes valley. In addition, in order to provide a visual spatial representation of these hydraulic properties, a 20x20 meter resolution map of the water temperature and groundwater level data were created for delimited the study area inside Aguascalientes valley, from which visual comparisons can be made in relation to the location of the Oriente fault and basin features (figures 6 and 7). Figure 6 shows the thermal anomalies observed within the study area. The most notable temperature anomalies occur primarily the east of the trace of the Oriente fault. The anomalies along the fault indicate the probable presence of a barrier-type response of the fault to transverse underground flow from the east. Moreover, these temperature zones coincide quite closely with large water-level variations (large hydraulic gradients) shown in figure 7.

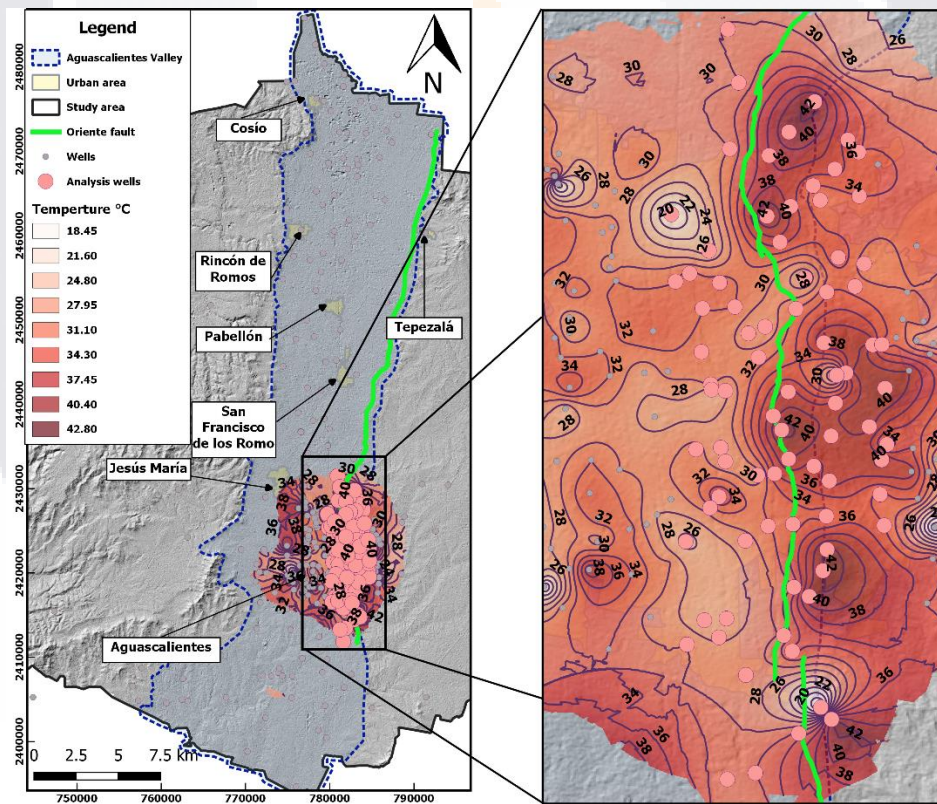


Figure 6. Water temperature variations within the study area for 2017. The magnified image on the right represents the test area, which is chosen for its high density of pumping wells.

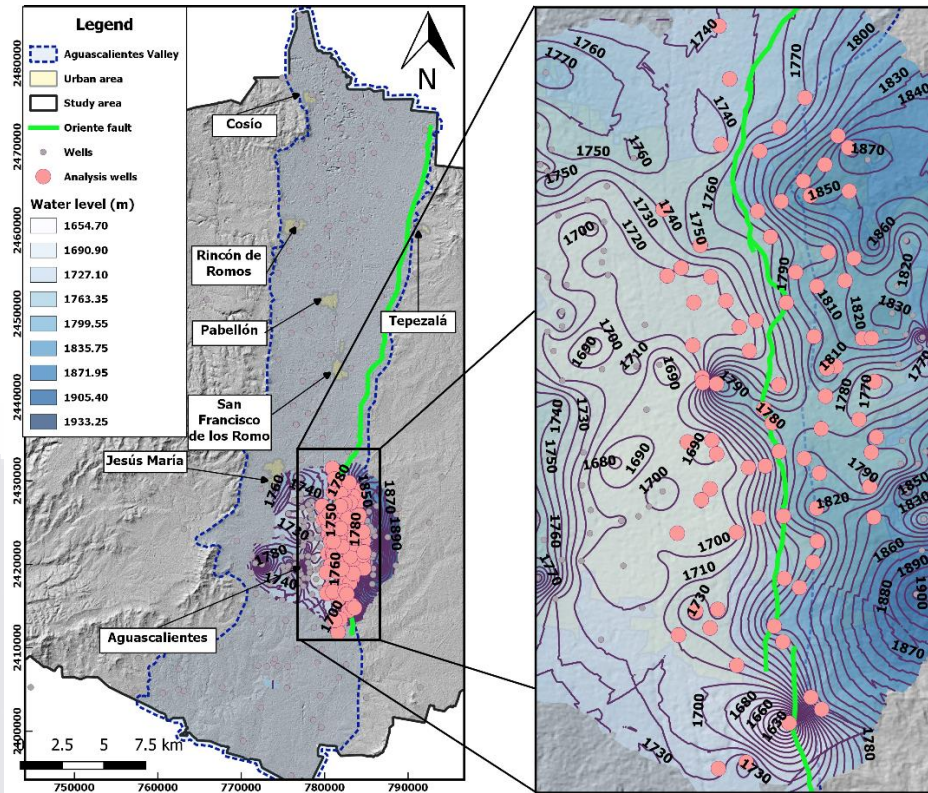


Figure 7. Spatial variations of the static water level within the study area for 2017.

These coupled parameter values suggest an inferred barrier to groundwater flow from the east at the location of the Oriente fault occurs where the temperature and hydraulic gradients are high, while the fault may be behaving a conduit in locations where these gradients are low. We applied the rates that indicate the impact of the fault on the groundwater hydraulics shown by Bense et al., (2003a); and Bense et al., (2008) and then statistically we demonstrated its hydraulic effect based on the available data from temperatures and static levels, and from these estimated new conditional values of the two physical parameters. A flowchart showing the actions involved in the development of this process is presented in figure 8.

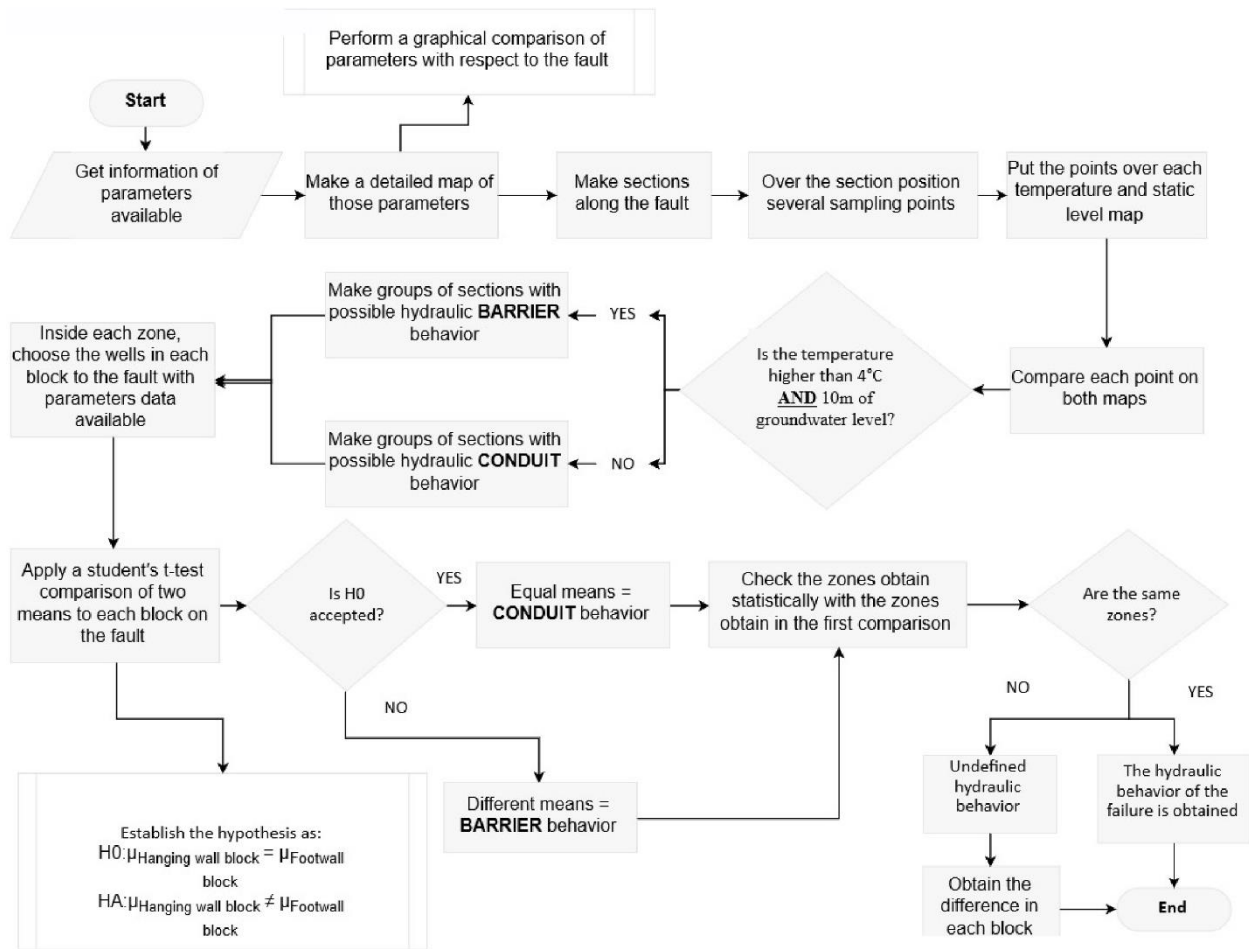


Figure 8. Flowchart of the methodology proposed for the determination of the hydraulic behavior of a fault

In order to define the hydraulic behavior based in the initial conditional values, a particular mapping method is adopted where only those wells within a distance of 2,000 m on both sides of the fault trace are used in the analysis. In the selected area, several 4,000 m perpendicular sections are delineated across the fault trace approximately every 250 m (figures 9 and 10).

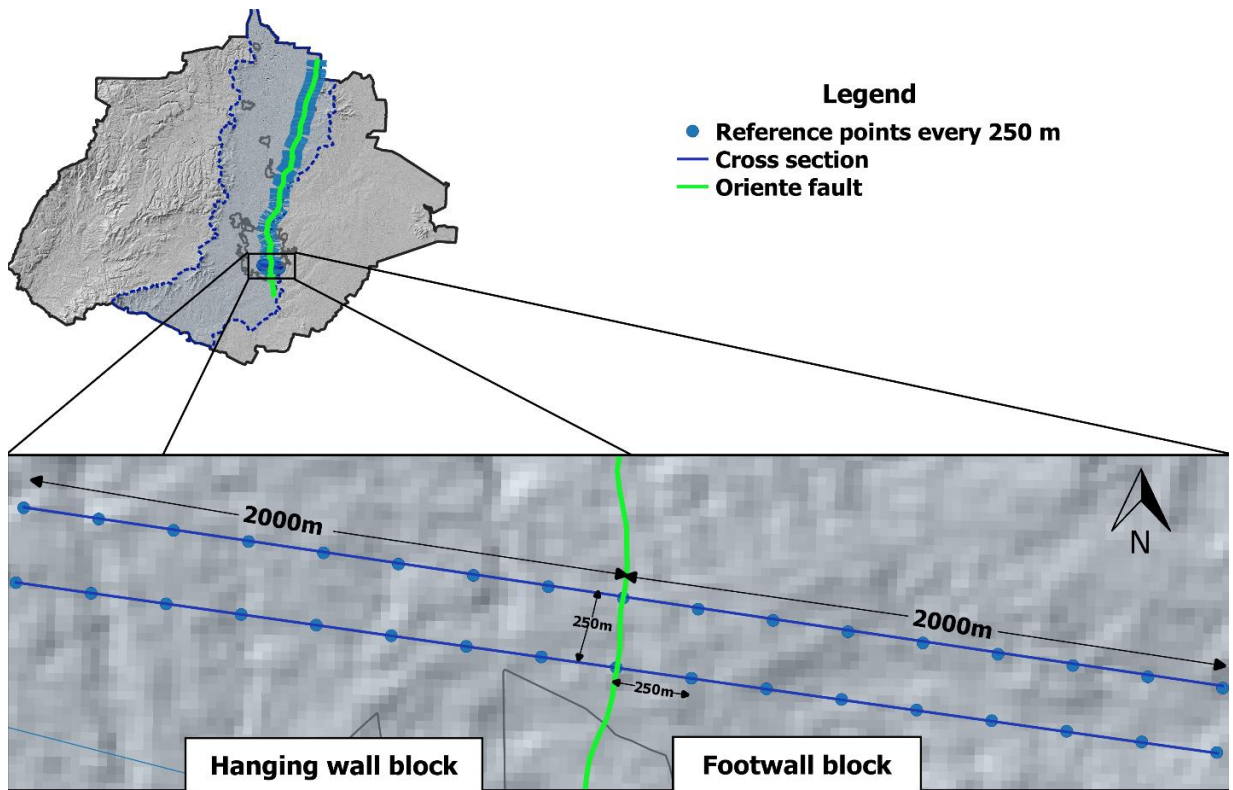


Figure 9. Arrangement of section lines and sampling points across the trace of the Oriente fault.

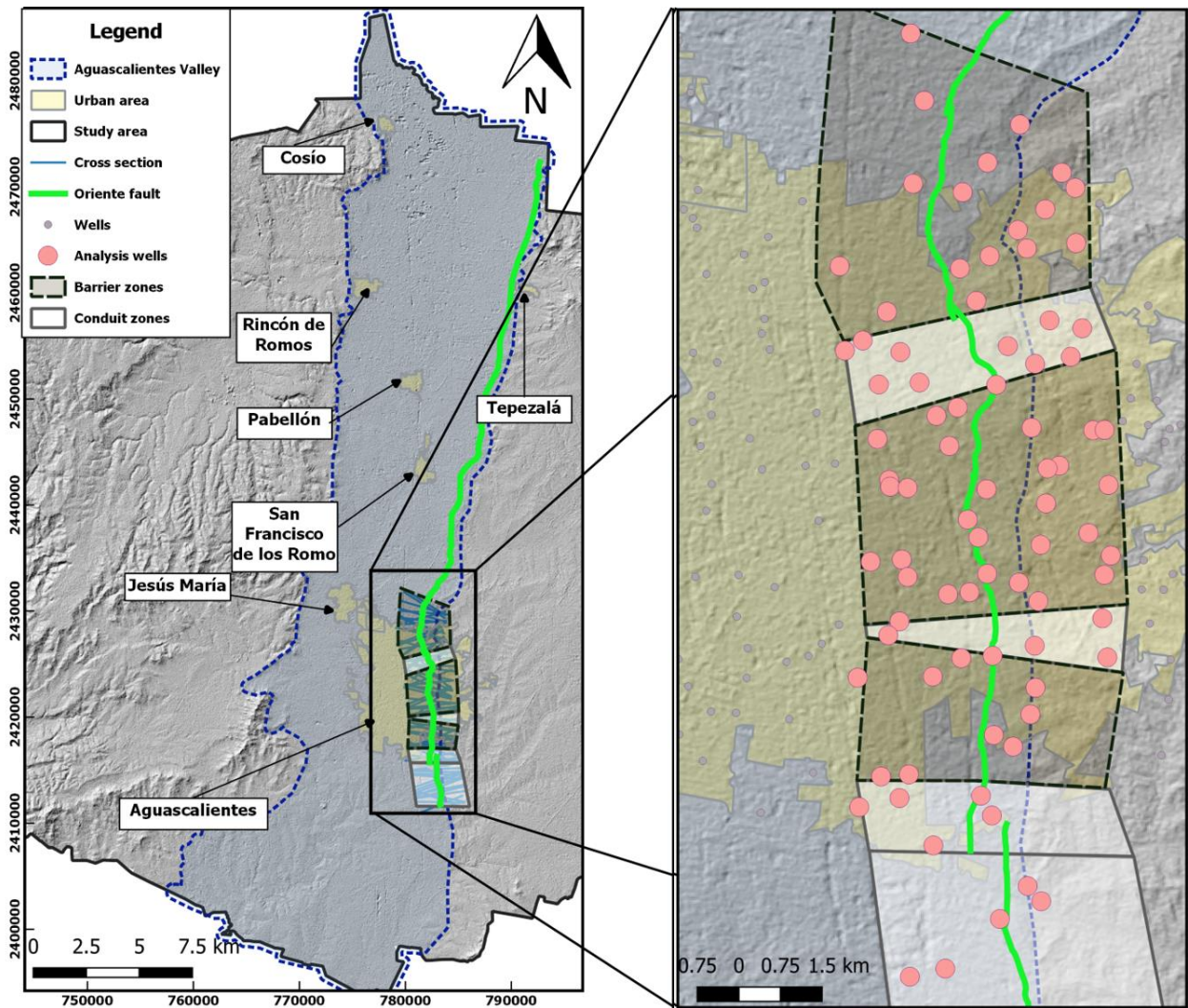


Figure 10. Identification of the hydraulic behavior of the Oriente fault based in the adopted initial conditional values of temperature and groundwater levels. The zones with tones in dark gray represent the barrier zones, in which the temperature condition is higher than 4°C and the static level is greater than 10m. The zones with tones in light gray represent the areas where both parameters do not satisfy the previous condition, and therefore the fault is assumed to behave as conduit according to the conditional value.

The geometric configuration of the section lines and the sampling points are depicted in figure 9 and is based on the geographical distribution of the wells with respect to the Oriente fault, as well as the number of wells in each block of the fault.

Once the zones are identified as barriers or conduits to lateral flow based in the initial conditional values of variation proposed by Bense et al., (2003a) and Bense et al., (2008), a map of the hydraulic response of the fault is created (Figure 10). Finally, in order to demonstrate the resulting hydraulic behavior shown in figure 10, based of synthetic data, a student's t-test comparison of two means (TTCTM) was used with real

information of the wells but due to the difficulty in directly comparing the variations of temperature and groundwater levels in each block of the fault. This difficulty arises from the large differences in the number of wells within each block, and the subsequent unequal distances from each well to the fault. In this case, the TTCTM was applied to each delimited area through a graphic analysis. However, within each area there are few wells with data information, therefore, was necessary to make inferences with small samples ($n < 30$) for the application of the TTCTM. Regarding the validity of the TTCTM, it was necessary to specify that the total number of wells in the margin of the Oriente fault is around 700 wells, from which, data of 85 wells were obtained arbitrarily for the application of this test. It was verified that the population is not normally distributed, but the means are, according to the central limit theorem (CLT), and finally, in this hypothesis test different and unknown variance are assumed.

Some advantages of using this TTCTM include: 1) the ability to readily compare both fault blocks, 2) the possibility to identify any variation in the measured parameters (in this case hydraulic load drops and temperature variations) between both blocks of the fault, and 3) the ability to estimate the value of the potential differences between two populations with few data and random geographical distribution. To summarize, a TTCTM creates a statistical statement that has to be proved with the characteristics of one or more data populations based on a random sample of the population on which the hypotheses are made (Alvarado and Obji, 2008).

For this analysis, a null hypothesis is first established, which indicates that the means of the two populations are equal ($H_0: \mu_{\text{Hanging wall block}} = \mu_{\text{Footwall block}}$), then an alternative hypothesis is established ($H_a: \mu_{\text{Hanging wall block}} \neq \mu_{\text{Footwall block}}$) where the means are assumed to be different. To implement these tests, equations 1 and 2 are used to obtain *p-value*, under the assumption that the unknown variances are not equal and only a few data points are available ($n < 30$) (Montgomery and Runger, 2013, Box et al., 2008). Under this model, the equations can be expressed as:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - \Delta_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \tag{1}$$

with degrees of freedom given by:

$$f = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \tag{2}$$

where

t = the test statistic;

\bar{X}_1, \bar{X}_2 = sample means where 1 = Hanging wall block and 2 = Footwall block;

Δ_0 = difference of means;

n_1, n_2 = size of samples with 1 = Hanging wall block and 2 = Footwall block;

S_1^2, S_2^2 = variances of samples with 1 = Hanging wall block and 2 = Footwall block;

which is calculated from

$$S^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}; \tag{3}$$

f = degrees of freedom.

The analyses are carried out to determine whether the fault as a barrier-type or a conduit-type of impact on the ground water flow. This is achieved by comparing the statistical means of the static level and that of the temperature in each block of the fault. The level of significance is established at $\alpha = 0.05$, hence the *p-value* defined as a statistical measurement that varies between 0 and 1 representing a barrier value when $p \leq 0.05$. If the *p-value* results are below the established α , then the null hypothesis is rejected, and the result is 'statistically significant'. That is, there is statistical evidence that a difference in temperature or static level exists between both blocks of the fault. The lower the level of significance " α ", the stronger the evidence that a difference between both blocks is not coincidental (random). The confidence level is designated by $(1 - \alpha) * 100\%$, and for this analysis, the confidence level is estimated at the 95% level (Tiola, 2009).

If H_0 is accepted, this implies that the *p-value* is larger than 0.05 and the null hypothesis is rejected as $H_0: \mu_{Hanging\ wall\ block} > \mu_{Footwall\ block}$ and $H_a: \mu_{Hanging\ wall\ block} < \mu_{Footwall\ block}$. However, if H_0 is less, then we consider $H_0: \mu_{Hanging\ wall\ block} < \mu_{Footwall\ block}$ and $H_a: \mu_{Hanging\ wall\ block} > \mu_{Footwall\ block}$.

The associated probability of accepting or rejecting the null hypothesis is a function of the confidence level, which represents the probability that the estimated parameter is within the confidence interval. The minimum interval of the difference between both means, Δ_0 from equation 1 is estimated.

RESULTS

The applied statistical model demonstrates an approach to determine the hydraulic response of the ground water caused by the fault using available parameters of the water, regardless of the conditional values presented in the literature. The model results demonstrate the impact of a fault zone on groundwater flow for the portion of the fault examined in this study. For this, zones were drawn in the study area on the Oriente fault, which are assigned characteristics of barrier or conduit. Zones with magnitudes surpassing the conditional values from 4 °C and 10 m, indicate that a fault is inhibiting a normal flow to the default plane, and therefore may exhibit barrier-type behavior. Conversely, magnitudes below the conditional values suggest that the fault exhibits conduit-type behavior. For the quantitative verification of the hydraulic impact of the fault on the ground water flow, a student's t-test is performed to compare the two means. If the *p-value* is less than 0.05 the fault is behaving as a barrier. Conversely, if the *p-value* is greater than 0.05, the fault is behaving as a conduit.

Application of the statistical method

After the initial evaluation of temperatures and hydraulic gradients in the analyzed wells, the conditional temperature and groundwater-level variations are chosen to 4°C and 10 m, respectively, to compare data between hanging wall block and footwall block wells with respect to the Oriente fault. From these initial conditions, the study area on the Oriente fault is divided into seven zones obtained from the graphical analysis (z1 through z7 in Figure 11) represented as a barrier (grey color) or conduit (white color) zones. The interpretation of the *p-value* defines the threshold that indicates whether the fault zone behaves as a barrier or a conduit at the 95% confidence interval. Using the software R, the *p-value* was calculated for each zone, and then, from the *p-value*, it was established that zones 3, 5 and 7 had temperature variations between both blocks of 5.232° C, 5.79° C, and 4.7 ° C, respectively, and groundwater level variations of 19.19 m, 18.66 m and 5.88 m, respectively; thus, suggesting that the Oriente fault behaves as a barrier within these zones.

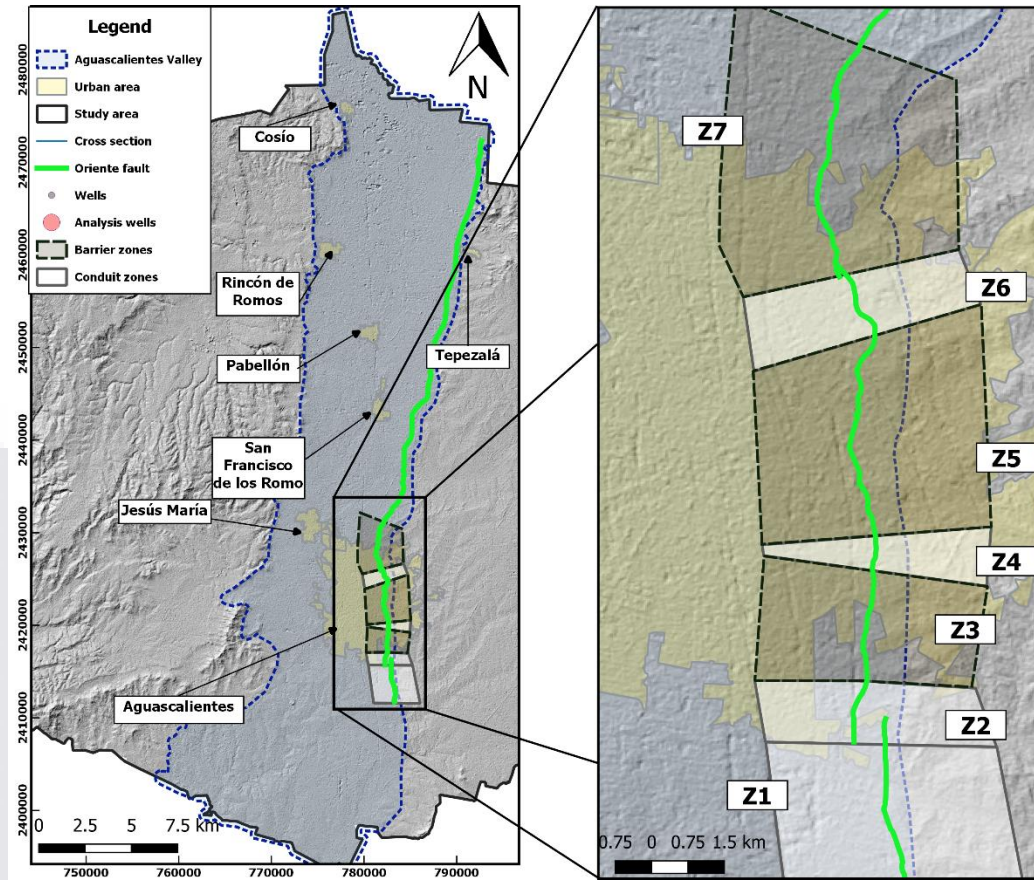


Figure 11. Mapped barrier and conduit zones along the examined portion of the Oriente fault (z1 through z7) based on results of the student's t test.

On the other hand, zones 1, 2 and 6, have temperatures and groundwater level variations below the conditional values. Hence, these zones exhibit hydraulic conduit-type behavior, which indicates that there are no variations in the means. Finally, zone 4 did not have sufficient well data to perform analysis. Table 1 shows the results of the statistical analysis for the 8 fault zones. The results of the evaluation of the Oriente fault through the application of the hypothesis test are shown in table 2, which presents the minimum variation of the parameters for barrier-type behavior along the Oriente fault. These minimum values are 28.29 m for the static water level with a p -value of 4.11×10^{-12} ($p < 0.05$); and 4.65°C for the temperature, with a p -value of 7.77×10^{-10} ($p < 0.05$).

Table 1. Conditional values of hydraulic behavior in Oriente fault

Zone	Parameter	Water level (m)	Temperature ° C	Hydraulic Behavior
z1	Estimation of "p-value"	0.1744>0.05	0.8616>0.05	CONDUIT
	Result of the hypothesis test	H ₀ is ACCEPTED. equal means	H ₀ is ACCEPTED. equal means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	0	0	
z2	Estimation of "p-value"	0.07632>0.05	0.37262>0.05	CONDUIT
	Result of the hypothesis test	H ₀ is ACCEPTED. equal means	H ₀ is ACCEPTED. equal means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	0	0	
z3	Estimation of "p-value"	0.0031<0.05	0.0039<0.05	BARRIER
	Result of the hypothesis test	H ₀ is REJECTED. different means	H ₀ is REJECTED. different means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	19.19	5.232	
z4	Insufficient data			
z5	Estimation of "p-value"	7.4e-4<0.05	1.93e8<0.05	BARRIER
	Result of the hypothesis test	H ₀ is REJECTED. different means	H ₀ is REJECTED. different means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	18.66	5.79	
z6	Estimation of "p-value"	0.031>0.05	0.7424>0.05	CONDUIT
	Result of the hypothesis test	H ₀ is ACCEPTED. equal means	H ₀ is ACCEPTED. equal means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	0	0	
z7	Estimation of "p-value"	0.016<0.05	0.04255 <0.05	BARRIER
	Result of the hypothesis test	H ₀ is REJECTED. different means	H ₀ is REJECTED. different means	
	Difference between blocks (variations of means, Δ ₀)	5.88	4.73	

Table 2. Summary of the evaluation of the hypothesis test applied in a general way on the Oriente fault.

Parameter	Water level (m)		Temperature ° C	
	Hanging wall block	Footwall block	Hanging wall block	Footwall block
Location with respect to the Oriente fault	Hanging wall block	Footwall block	Hanging wall block	Footwall block
Mean	175.79	140.27	29.91	36.02
No. of data	32	51	32	51
Estimation of "p-value"	4.119e-12		7.777e-10	
Result of the hypothesis test	H ₀ is REJECTED . different means		H ₀ is REJECTED . different means	
Difference of means (Δ_0)	28.29		4.65	

DISCUSSION

In general terms, high hydraulic gradients observed in water-level measurements across fault blocks suggest barrier-type to hydraulic groundwater flow (Bense et al., 2008). However, such behavior should be corroborated with the analysis of other parameters that confirms such behavior. In this investigation, a statistical analysis of temperature and groundwater levels and their resulting flow patterns is adopted to assess the impact of the fault on hydraulic behavior. The analysis presented here indicates that groundwater temperatures and hydraulic heads vary for each zone along the trace of the Oriente fault. These variations depend in part on the number of wells and their distance to the fault plane. Based on the results shown in figure 11, from the seven identified zones, zones 3, 5 and 7 of the selected fault branches indicate barrier-type hydraulic behavior with calculated new conditional values for each case. For example, the value obtained for the static levels in zone 7 is less than the conditional value of 10 m. This may be due to the particular conditions of that part of the fault, even though the statistical analysis shows that the *p-value* is less than 0.05, with a value less of half of the established *p-value* ($0.0016 < 0.05$).

Conversely, zones 1, 2 and 6, do not show variations in the statistical mean since the *p-value* is larger than 0.05. Generally speaking, the hypothesis test indicates that the fault behaves as a barrier for groundwater flow when water-level variations are greater than 28.29 m of and temperature variations are greater than 4.65°C. However, the impact of the fault on the groundwater hydraulics with respect to horizontal flow is independent of vertical flow since fault zones behaving as barriers to transverse flow can still allow for rapid vertical infiltration as discussed by Hernandez-Marin et al., (2017), who demonstrated that the tested part of the Oriente fault behaves as a conduit to vertical flow due to the large measured rate of infiltration. However, the authors

concluded that the infiltrated water occurred only in close proximity to the fault plane. This suggests a complex hydraulic behavior with the fault exhibiting conduit-type hydraulic behavior in the vertical direction, but barrier-type behavior in the horizontal or transverse direction. This confirms what is observed for zone 5. The zone 4 exhibit conduit-type behavior to horizontal flow. Consequently, alternative methods may be necessary to corroborate these results, for example, define observation wells at equal distances in both blocks of the fault and take measurements from them, since the number of wells in this region may not be sufficient to justify the statistical application used in this study. Likewise, it is necessary to continue with studies in this area, especially in the analysis of the flow vertical to the fault plane, since this could generate local biases, especially in zones classified as barriers.

Identification of preferential horizontal flow to wit normal to the fault plane, is not only important for understanding the overall regional and local groundwater flow system, but also for identifying potential environmental concerns, since the impact of the fault on the groundwater hydraulics of the faults can determine the more vulnerable localities to transverse flow of contaminants. Both processes should be considered in studies related to water management, pollution and environmental impact. The results of this analysis, however, should be corroborated with results from other techniques regarding the hydraulic behavior of faults to vertical flow. Only then can we obtain a more complete hydraulic characterization of surface discontinuities.

CONCLUSIONS

A statistical analysis using large variations in groundwater temperature and water levels was used to assess the behavior of the Oriente Fault, a normal fault structure reactivated by subsidence that flanks the Aguascalientes graben on the east. The surface expression suggests that the fault is at least 80 km long and evidence indicates that the fault has hydraulic contact with the local aquifer system at depth. In an effort to understand the impact on the hydraulic behavior of the groundwater, previous investigations used conditional values of water temperatures and groundwater level variations of 4°C and 10 m, respectively as guidelines to determine whether a fault behaves as a barrier or conduit to horizontal flow.

However, through an analysis using a student's t-test comparison of the two means, a complementing procedure is performed in this investigation to more accurately estimate hydraulic characteristics of the Oriente fault when the number of data points is

small. Using the available well information within 2,000m on each side of the fault, a student's t-test is applied to compare the two means for small data sets (10 to 15 measurements per zone). This results in dividing the length of the fault within the study area into seven zones. Three of the zones indicate barrier-type behavior based on the conditional values of water temperature and groundwater level. The results of the proposed methodology also indicate that the Oriente fault may exhibit alternating barrier and conduit behavior to lateral horizontal flow along its length.

The zone with the greatest variations in measured temperature and groundwater level is zone 5, with a mean temperature variation of 5.79°C and a hydraulic head decrease of at least 18.36 m. For zones behaving as a conduit to horizontal flow, a student's t-test comparison of the means indicates that average water temperature and hydraulic gradient variations are too small to provide any meaningful result, that is, the calculated *p-value* is larger than the established 0.05, indicating a 95% confidence level. As a whole, the Oriente fault has an average temperature variation of at least 4.65°C and an average groundwater level variation of 28.29 m across the fault. These anomalies are much higher than the average across the valley and indicate the propensity for the fault to restrict horizontal flow, but since four of the seven zones suggest a conduit-type behavior, it can be concluded that the Oriente fault has conduit and barrier characteristics in various zones along the fault. One way to justify the physical behavior of the fault acting as a conduit and barrier for lateral flow is due to its heterogeneous material composition and varying mechanical behavior, for instance, during local displacements occurring in some points along the fault, causing the breaking of the material adjacent to the fault, or after the cementing process, which causes the hardening of the material. This analysis presents a first approach to the impact of the Oriente fault on groundwater, but more research is needed for better characterization.

Capítulo III. “Modelación numérica del impacto de las discontinuidades superficiales en acuífero del valle de Aguascalientes.”

Modelo conceptual

El principal objetivo de esta parte del estudio es definir el modelo conceptual que mejor represente el comportamiento hidrogeológico en la zona de estudio con base a los antecedentes y análisis hidrológicos e hidrogeológicos recopilados.

Límites del sistema

La zona de estudio se encuentra delimitada por dos fallas normales, la falla Oriente con una longitud aproximada de 150 km y la falla Poniente con una longitud aproximada de 70 km ambas con una dirección preferencial de norte a sur.

Condiciones iniciales y de frontera

La resolución de la ecuación diferencial de un flujo en cualquiera de sus formas supone asociarlas a condiciones iniciales y de contorno. La condición inicial describe la distribución de los valores de la altura piezométrica en algún tiempo inicial, frecuentemente $t=0$ (estado estacionario), en todos los puntos del dominio considerado. De forma general en 2D se escribe

$$h(x,y,0) = f(x,y) \quad \forall x,y \in \Omega \text{ y } t = 0 \text{ Ecuación 1}$$

Donde $f(x,y)$ es una función matemática que indica la distribución de la altura piezométrica h y Ω es el dominio del acuífero.

Las condiciones de contorno informan acerca de la interacción entre el sistema analizado y el medio exterior, existen tres tipos de condiciones en un modelo de flujo (Sahuquillo et al., 2010; Sinclair, 2012):

- Condición de Dirichlet, de primer tipo o de borde con *altura piezométrica prescrita*. La altura piezométrica es prescrita en un borde. La forma matemática en régimen permanente es

$$h(x,y) = f_1(x,y) \quad \forall x,y \in \Gamma_1 \text{ y } t > 0 \text{ Ecuación 2}$$

y en régimen transitorio

$$h(x,y,t) = f_1(x,y,t) \quad \forall x,y \in \Gamma_1 \text{ y } t > 0 \text{ Ecuación 3}$$

Donde f_1 es la función conocida y Γ_1 es el borde considerado.

- Condición de Neumann, de segundo tipo, de borde con un gradiente de altura piezométrica prescrito (flujo prescrito). La forma matemática de escribir esta condición es:

$$q_n = f_2(x, y, t) \quad \forall x, y \in \Gamma_2 \text{ y } t > 0 \text{ Ecuación 4}$$

Donde q_n es la componente del flujo normal al borde considerado Γ_2 , y f_2 es una función conocida. Para el caso de un medio isótropo, el flujo q_n puede ser dado utilizando la ley de Darcy.

- Condición de Cauchy, de tercer tipo, de borde con un flujo dependiente de la altura piezométrica o condición mixta por ser una combinación de las condiciones de Dirichlet y Neumann.

$$q_n = f_3(x, y, t) \quad \forall x, y \in \Gamma_3 \text{ y } t > 0 \text{ Ecuación 5}$$

Donde q_n es la componente del flujo normal al borde considerado Γ_3 , y f_3 es una función conocida.

Para los límites del acuífero se tomó en cuenta la condición a) condición de Dirichlet, la cual establece que el nivel del agua subterránea se especifica a lo largo del perímetro del acuífero del valle de Aguascalientes, en este caso ésta se prescribe a priori con los niveles al inicio y al fin del periodo, las condiciones de frontera especificadas para las simulaciones de flujo en estado transitorio fueron conducidas para el periodo entre 1985 y 2017, del cual se tenía información disponible, las condiciones iniciales en 1985 fueron definidas asumiendo las cargas hidráulicas registradas en ese mismo año.

En cuanto a la recarga se aplicó la condición b) condición de Neumann, la cual es especificado como una función del tiempo y el espacio.

Niveles de agua

Para la obtención de los niveles de agua se recurrió a la comisión nacional del agua CONAGUA en donde se proporcionaron datos de niveles del año 1968 al 2017. Los pozos proporcionados contienen información correspondiente a bombeos, elevación de brocal, profundidad del nivel estático y profundidad del pozo, a partir de estos datos se obtuvo la configuración de elevación del nivel estático para el valle de Aguascalientes para el año de 1985 al 2017 lo cual establece un periodo de análisis de 32 años.

El flujo subterráneo de agua sigue una dirección preferente Norte-Sur. Las zonas de recarga hacia el acuífero están conformadas por la Sierra de Tepezalá al este y Sierra Fría al oeste del acuífero; hacia el norte del acuífero recibe la recarga proveniente del acuífero de Ojocaliente en el Estado de Zacatecas. La descarga se encuentra hacia el sur

del acuífero que a su vez recarga al acuífero Encarnación perteneciente al Estado de Jalisco.

1985-Inicio del modelo

Para el inicio del modelo, se recolecto información de 110 pozos los cuales se muestran gráficamente en la figura 1, con el menor nivel en 1740 msnm y el mayor en 1920 msnm con un gradiente de NO-SE.

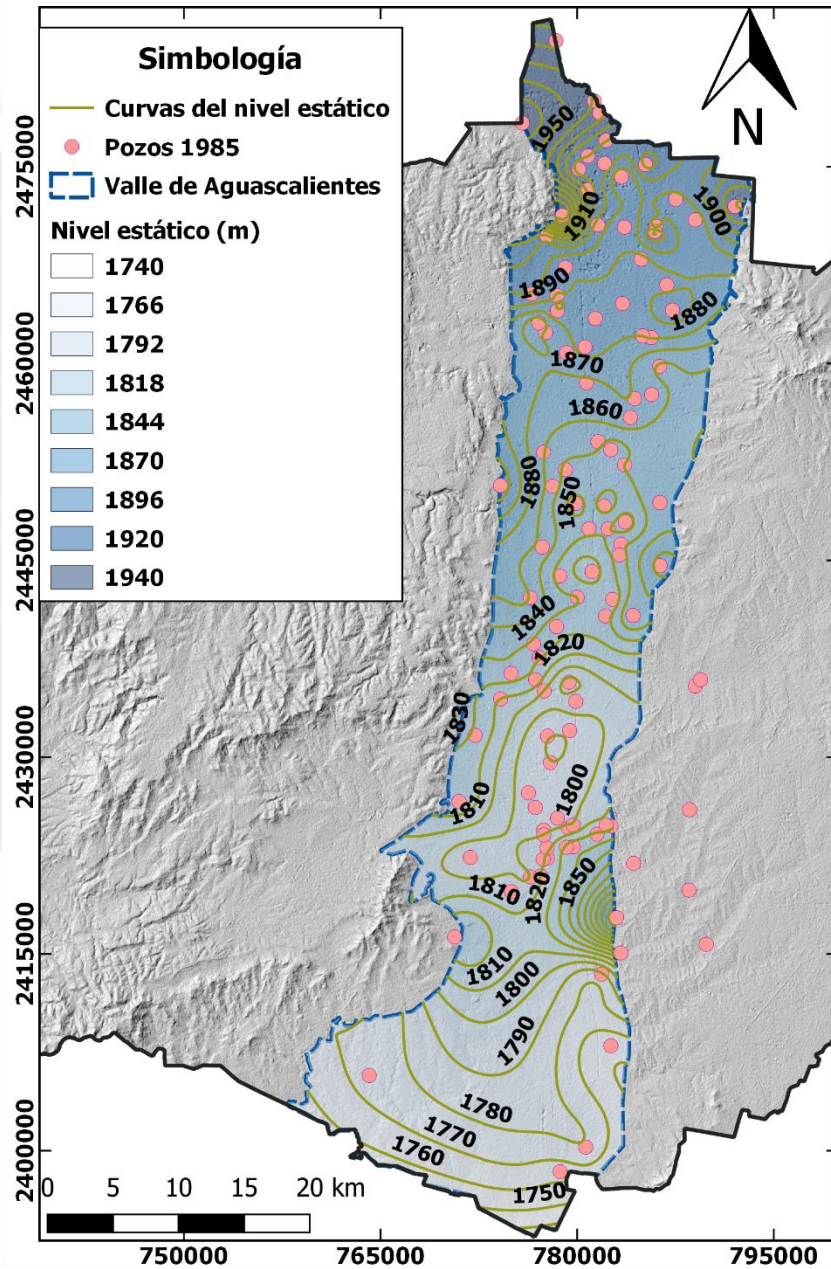


Figura 1. Ubicación de pozos y niveles estáticos del año 1984. Información de Conagua Aguascalientes.

2017-Fin del modelo

Para el final del periodo analizado, se recolecto información de 1110 pozos los cuales se muestran gráficamente en la figura 2a). En cuanto a la figura 2b) se muestra la representación de los niveles obtenidos para el año 2017, en el cual el mayor nivel se encuentra a los 1900 msnm y el menor en 1720 msnm con un gradiente de NO-SE.

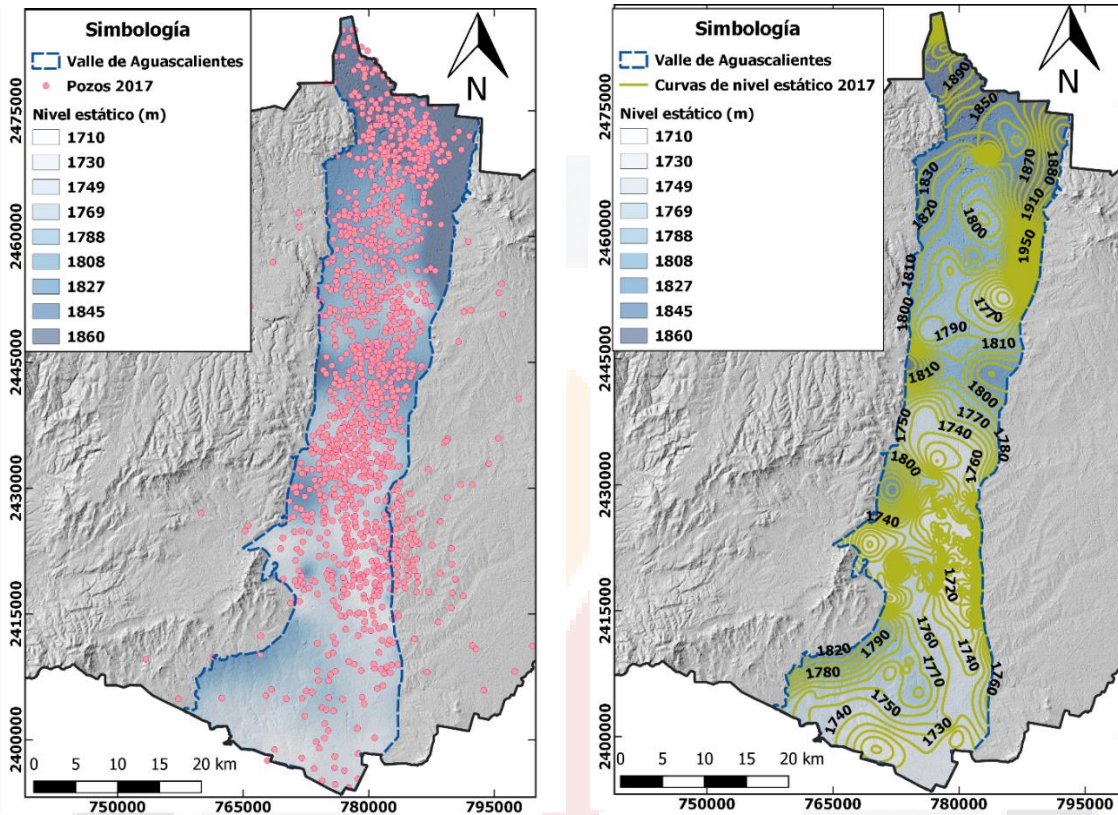


Figura 2a). Ubicación de pozos para el año 2017. Información Conagua Aguascalientes.

Figura 2b). Niveles estáticos del año 2017. Información Conagua Aguascalientes.

Identificación de unidades hidrogeológicas

Como lo menciona el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2012), el acuífero del valle de Aguascalientes está clasificado como un acuífero libre, por lo que se compone en su mayoría de gravas, arenas y pocas arcillas. A través de sondeos eléctricos verticales (SEVs) realizados y analizados a lo largo de la zona de estudio se reconocen 3 unidades principales: al poniente, una unidad de rocas volcánicas mayormente (riolitas e ignimbritas), al centro sedimentos de origen aluvial y fluvial (gravas, arenas, limos y arcillas) y al oriente, rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas) (Hernández-Marín, et. al 2017)(figura 3).

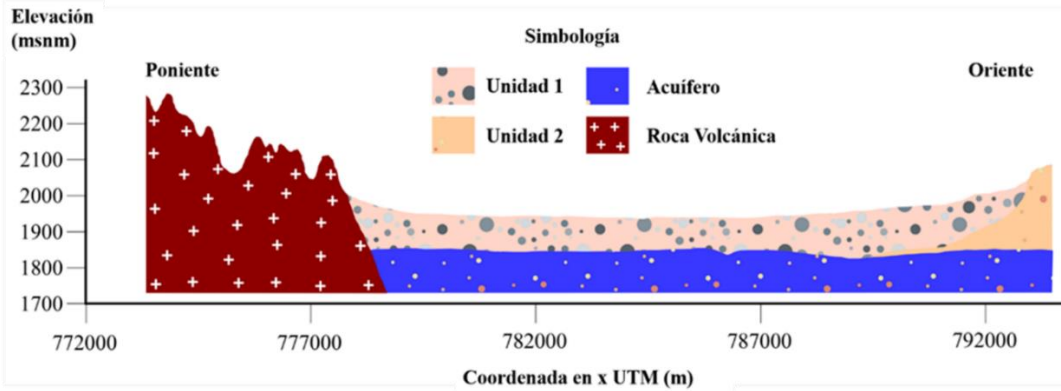


Figura 3. Ejemplo del perfil hidroestratigráfico a través del valle. Este perfil muestra la configuración de la hidrostratigrafía en el norte del área de estudio. El nivel freático corresponde al límite superior de la capa hidroestratigráfica "Acuífero". Modificada de Hernández-Marín et. al 2017.

Con base en los datos recopilados y en la revisión bibliográfica realizada, sobre la correspondiente estratigrafía y estudios geofísicos de la zona de estudio, se realizó la definición de unidades con propiedades hidrogeológicas similares, agrupándolas en unidades localmente definidas y georreferenciadas, para tal caso se revisaron 195 pozos con columnas estratigráficas obtenidas de tres fuentes de información, por medio de perforación de pozos, de CONAGUA Aguascalientes, de Proactiva medioambiente CAASA y de la empresa GEO Geofísica aplicada a la geotecnia figura 4.

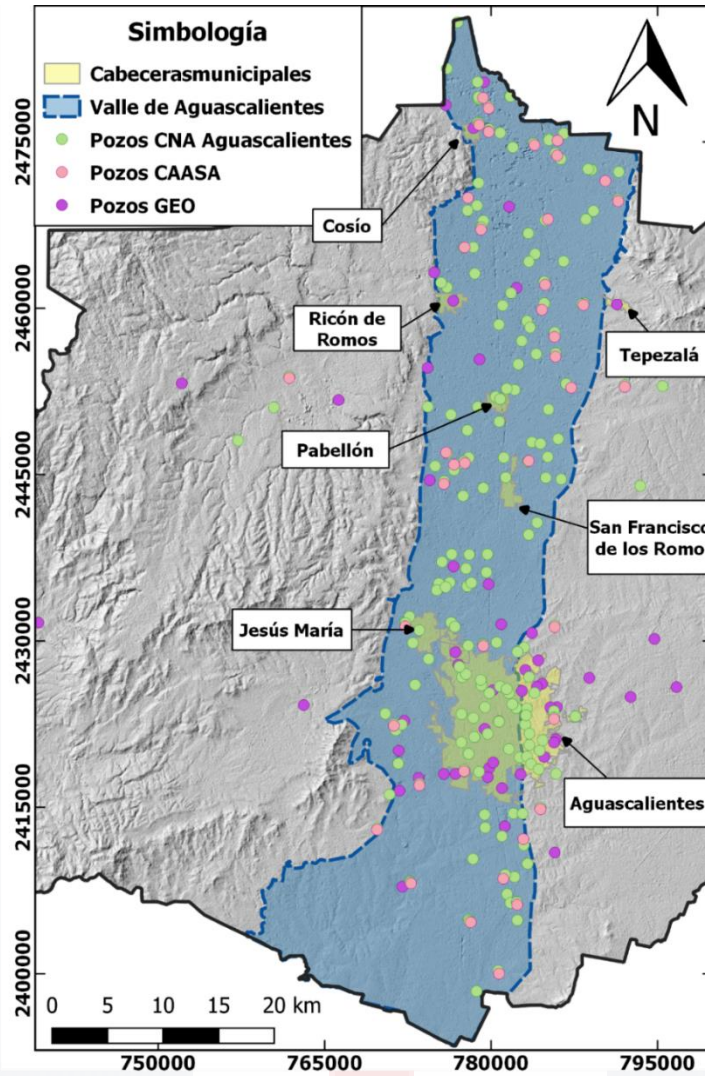


Figura 4. Pozos de extracción con información estratigráfica de tres fuentes de información diferentes, CONAGUA Aguascalientes, Proactiva Medio Ambiente CAASA y Empresa GEO.

Los datos se agruparon en 2 grandes unidades hidro-estratigráficas, tomando en cuenta principalmente la granulometría, la primera unidad se compuso de material granular como lo es las gravas, arenas gravilla y boleos, consideradas capas de alta permeabilidad. Por el contrario, la segunda capa se agrupó en material fino con poco material granular, en el cual se agruparon arenas limosas, arenas arcillosas, arcilla y limo, considerada con permeabilidad menor, además se pudo conformar una capa más denominada "roca" obtenida de algunos pozos que llegaban al basamento del valle. La distribución de las capas se muestra en la figura 5.

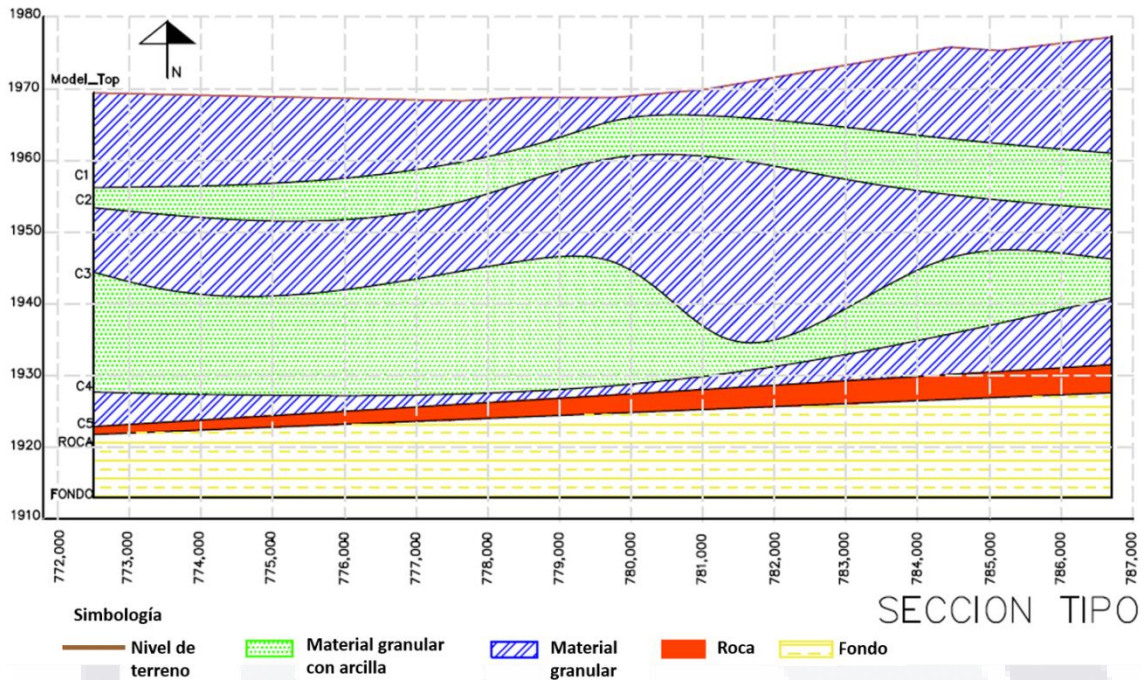


Figura 5. Sección tipo. En la imagen se pueden observar la clasificación hidro estratigráfica tomada en cuenta en base a la granulometría. La capa azul corresponde a materiales granulares como lo son las gravas, arenas gravilla y boleos, consideradas capas de alta permeabilidad. En la capa verde se agrupo en material fino con poco material granular, en el cual se agruparon arenas limosas, arenas arcillosas, arcilla y limo, considerada con permeabilidad menor, además se agregó una capa denominada "roca" obtenida de algunos pozos que llegaban al basamento y por último una capa denominada "fondo" que simularía el fondo del valle.

A partir de la clasificación anterior se asoció un valor de conductividad hidráulica a las capas, estos valores se tomaron de estudios previos en el área y de la literatura (Freeze and Cherry 1979). La conductividad asociada a las capas se muestra en la tabla 1. En cuanto a la conductividad de la roca no se encontraron datos en investigaciones anteriores por lo que se consideró la obtenida en la literatura. Las capas se consideraron individualmente como medios anisótropos con $K_x=K_y$ y $K_z=K_x/10$.

En cuanto a la conductividad establecida en estudios previos en el valle de Aguascalientes, a continuación, se enlistan los datos encontrados

- En 1997 pruebas de bombeo realizadas por la UNAM, determinaron conductividades de entre 5.8×10^{-4} a 5.8×10^{-6} m/s para la conductividad horizontal y de 1.16×10^{-3} a 1.16×10^{-7} m/s para la conductividad vertical.
- En 2002 UAQ-UNAM (*estudio no publicado*) mencionan que escasas pruebas de bombeo realizadas en estudios anteriores revelan una variación en las conductividades hidráulicas horizontales que van de 1.6×10^{-5} a 2.43×10^{-6} m/s, y en sentido vertical los valores varían en un rango de 1.60×10^{-6} a 2.43×10^{-8} m/s.

Siendo valores validos sólo para el acuífero libre. Y en donde se considera un medio anisotrópico con menor conductividad vertical que horizontal.

Además, a partir del modelo realizado por la UAQ-UNAM en 2002, determinaron conductividades entre 1.16×10^{-4} a 5.78×10^{-6} m/s considerando $k_x = k_y$ y $k_z = k_x/10$.

- En 2014, se ejecutaron 30 pruebas de bombeo de larga duración. Los resultados de su interpretación indican valores de conductividad hidráulica entre 2.3×10^{-4} a 2.4×10^{-6} m/s. Ambos parámetros, son representativos de materiales de granulometría fina, en general de permeabilidad media a baja. Estos valores siguen vigentes para CONAGUA en 2018.

Tipo de unidad hidro-estratigráfica	Conductividad Hidráulica (m/s)					
	Literatura	UNAM, 1997	UAQ- UNAM 2002 Estado del arte	UAQ- UNAM 2002 Resultados	CONAGUA 2014-2018	Selección para el modelo
Material granular (capa azul)	1×10^{-5}	5.8×10^{-4}	1.6×10^{-5}	1.16×10^{-4}	2.3×10^{-4}	1.90×10^{-4}
Material granular con contenido de arcilla (capa verde)	1×10^{-6}	5.8×10^{-6}	2.43×10^{-6}	5.78×10^{-6}	2.4×10^{-6}	7.80×10^{-6}
Roca (basalto permeable)	6×10^{-6}					6×10^{-6}
Fondo (Roca ígnea y metamórfica no fracturada)	9×10^{-9}					9×10^{-9}

Tabla 1. Relaciones de la conductividad hidráulica de la literatura y estudios previos en la zona de estudio, la última columna indica la conductividad que se toma como inicial para el modelo.

Falla oriente

El sistema de fallas consta de dos elementos diferentes: el primero son las fallas que delimitan al valle la falla Oriente y Poniente y, el segundo, las fisuras dentro del valle. Ambas con orientación NE-SO, como se observa en la figura 6. De las fallas regionales, la falla Oriente es la que muestra actividad mecánica, y de la cual, se ha documentado que su reactivación está ocurriendo como resultado del bombeo de aguas subterráneas, proceso que se intensificó a finales de los años 1970's y principio de los 1980's. A partir de esos años, se registraron las primeras manifestaciones de hundimientos diferenciales (subsistencia) que ocurre principalmente en el centro del valle. Las variaciones en las mediciones de desplazamiento de la falla oriente, sugieren su actividad, además de producir una constante rotura mecánica en el material geológico

adyacente a lo largo de su traza. El material sedimentario observado adyacente a la falla corresponde a caliches (rocas sedimentarias formadas a partir de la cementación de sedimentos por precipitados de carbonato de calcio), que conforman una roca arenisca de consolidación variable que predomina en el Valle de Aguascalientes. En específico, este tipo de material geológico es altamente resistente al esfuerzo de compresión; sin embargo, se rompe frágilmente ante esfuerzos de tensión y cortante relativamente bajos (Frías-Guzmán y Hernández-Marín, 2018), esta acción genera que el material se rompa con relativa facilidad lo que a su vez aumenta la permeabilidad en el plano de falla y zonas contiguas (Hernández-Marín, 2017).



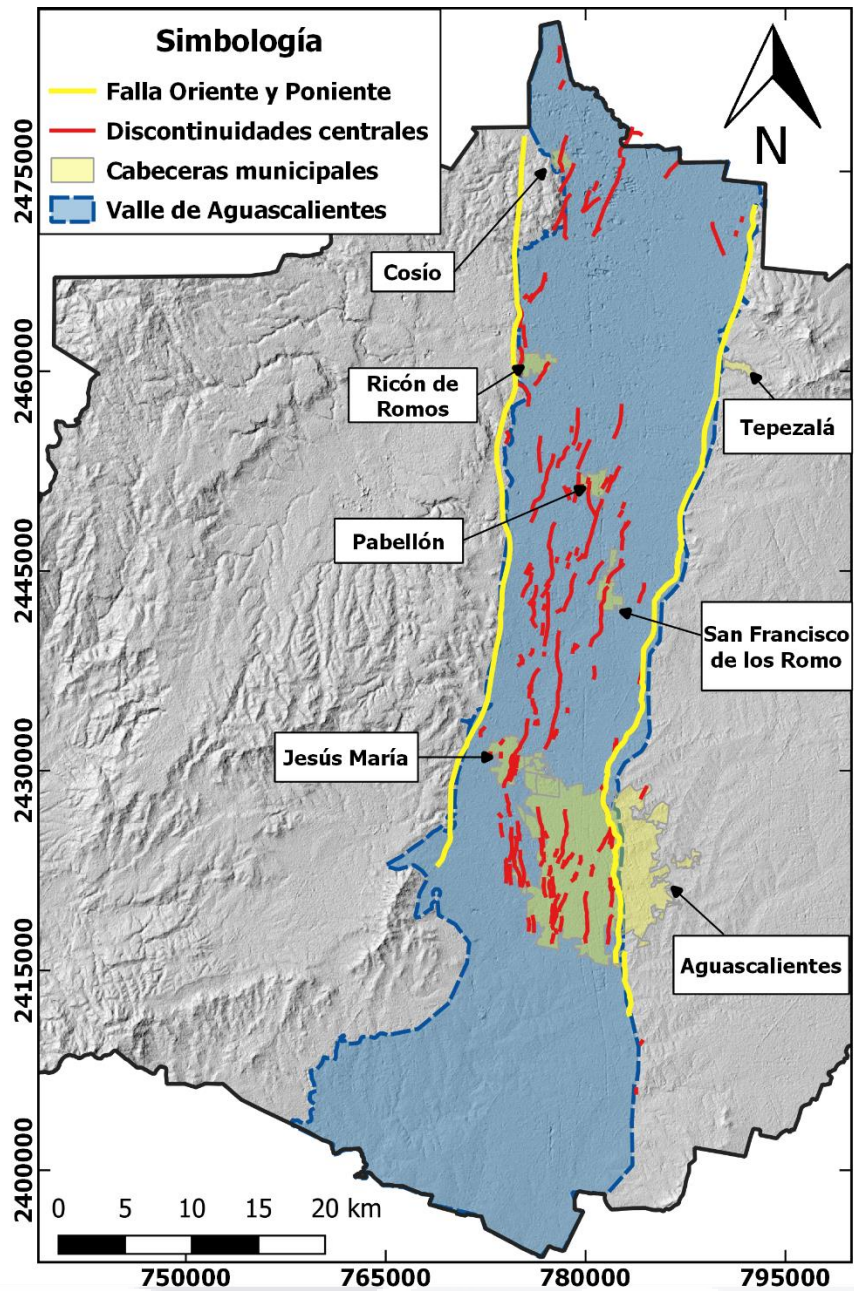


Figura 6. Localización de las discontinuidades superficiales dentro del valle de Aguascalientes. SIFAGG 2019.

Las discontinuidades que delimitan el valle se proponen dentro del modelo a 90° con respecto a la horizontal, la determinación de esta geometría se basa en observaciones de campo tal como se expresa en Hernández-Marín et. al 2017, quienes mencionan que la inclinación de las fallas, sobre todo de la falla Oriente es casi vertical, y teniendo en consideración que el sistema de fallas centrales comparte geometría con

las fallas oriente y poniente, esta condición podría replicarse en las fallas centrales en todo el sistema.

En cuanto a la determinación de su comportamiento hidráulico, se identifican tres zonas con comportamiento de barrera sobre la traza de la falla Oriente, estas zonas son el resultado del análisis realizado en el capítulo II. La conductividad hidráulica asociada a estos segmentos se basó en observaciones de canteras, zanjas y otros pozos abiertos, cercanos a la falla Oriente, donde los sedimentos observados son principalmente arenosos con un grado de litificación de pequeño a moderado debido a la precipitación de carbonatos y probablemente silicatos, que actúan como cementantes (Hernández-Marín et al., 2017). El efecto de la litificación sedimentaria puede ser una reducción gradual de la conductividad hidráulica en algunas áreas. Dado que no se tiene información sobre el comportamiento hidráulico de la falla Oriente, se realizó una búsqueda en la literatura de casos similares, en donde se encontró que en 2015 Ochoa-González propone una conductividad horizontal de 4.4×10^{-7} m/s representando un comportamiento hidráulico de barrera en la falla. Así mismo Burbey en 2009 propone valores de 1×10^{-6} m/s para un comportamiento de barrera. Teniendo en cuenta estas consideraciones se plantea un valor de conductividad hidráulica en la falla Oriente de $k=7.2 \times 10^{-7}$ que sería un promedio de la literatura citada.

Mecanismos de recarga y descarga

Descarga

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo. De manera natural, todavía se presenta una salida subterránea en la porción sur del acuífero, en las inmediaciones del poblado Peñuelas, hacia el acuífero Encarnación, del estado de Jalisco.

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos e hidrometría, llevado a cabo por CONAGUA en 2018, el volumen de extracción asciende a 427.6 Mm³ anuales, de los cuales 258.70 Mm³ (60.51%) son para uso agrícola, 132.95 Mm³ (31.10%) para uso público-urbano, 19.15 Mm³ (4.48%) para usos múltiples, 11.58 Mm³ (2.71%) para uso industrial, 2.44 Mm³ (0.57%) para servicios, 2.13 Mm³ (0.50%) para uso pecuario y 0.61 Mm³ (0.14%) para uso doméstico.

Para la obtención de los gastos de bombeo se recurrió a la comisión nacional del agua CONAGUA en donde se proporcionaron datos de bombeos del año 1985 y 2017.

Para el inicio del modelo, se recolectó información de 110 pozos los cuales se muestran gráficamente en la figura 1 de este capítulo, con un bombeo de 6.38 m³/s.

En cuanto al final del periodo de análisis, se recolecto información de 1110 pozos los cuales se muestran gráficamente la figura 2b de este capítulo, con un bombeo de 13.52 m³/s.

Recarga

La recarga de agua subterránea se analizó y evaluó dentro del valle de Aguascalientes mediante el ajuste a la ecuación linealizada de Boussinesq y la técnica Water Table Fluctuation (WTF), que involucra el drenaje subsuperficial de aguas subterráneas. La figura 7 del capítulo I, muestra la distribución calculada de la recarga para el área de estudio, correspondiente a 168x10⁶ m³ anuales.

Modelo conceptual

A partir de la información descrita se configuro el modelo conceptual observado en la figura 7 dentro del cual se toman en cuenta los 5 parámetros descritos con anterioridad (Comportamiento hidráulico de la falla Oriente, Descripción hidroestratigráfica, Niveles estáticos al inicio y final del periodo planteado, Recarga en medios áridos y Bombeo).

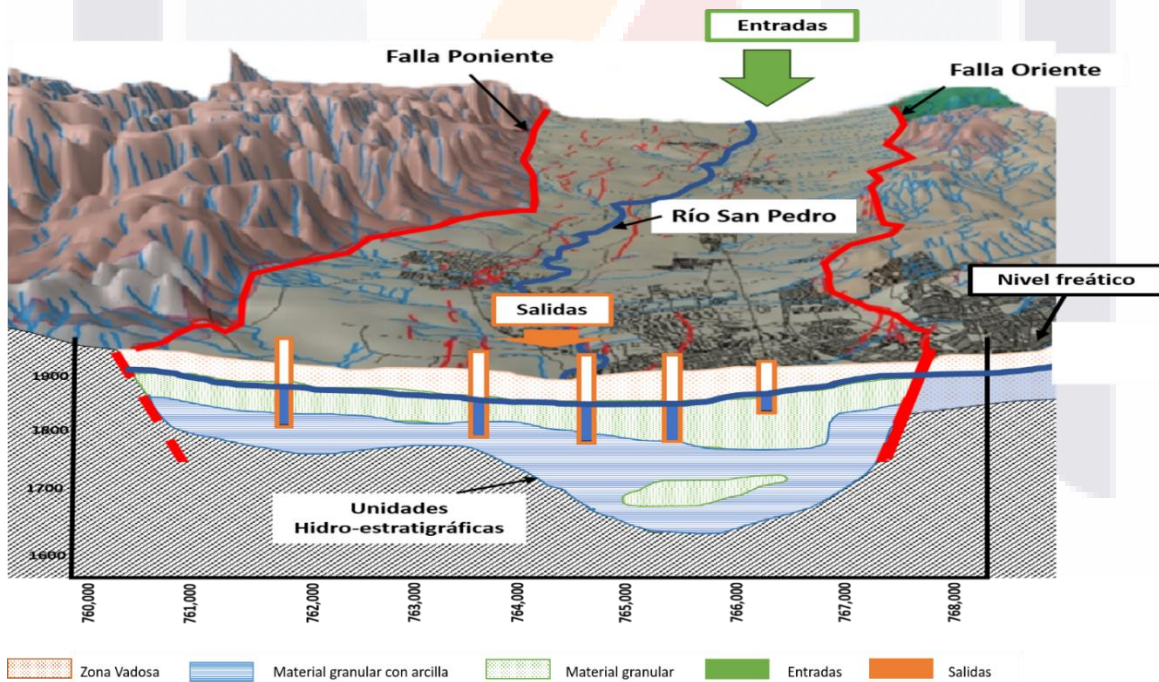


Figura 7. Modelo conceptual

MODELO NUMÉRICO

Características de modflow

MODFLOW es el software de modelamiento de agua subterránea desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2019). Las capacidades de MODFLOW permiten representar el flujo regional o local de agua subterránea y su interacción con los cuerpos de agua superficial.

Según Montoya (2013), en general se consideran las siguientes razones del porque MODFLOW es una de las mejores opciones para modelación de agua subterránea.

- Porque es libre y no tiene costo: MODFLOW al ser desarrollado por una institución pública de Estados Unidos se distribuye gratuitamente. Existen pre y post visualizadores comerciales; sin embargo, la USGS ha desarrollado ModelMuse que es visualizador libre y de alto rendimiento.
- Está bien documentado: Cada parte de MODFLOW tiene su manual, cada parte del software que representa un proceso físico relevante al flujo de agua subterránea tiene un documento que habla sobre las principales consideraciones tomadas en la simulación.
- Es modular y continuamente actualizado: La última versión de MODFLOW es MODFLOW 2006 (USGS, 2019). Dada su estructura modular existen distintos paquetes que son acoplados a MODFLOW.
- Se basa en diferencias finitas: Dada su discretización en celdas rectangulares, el control volumétrico de lo que entra e igual al que sale.
- Representación precisa de procesos físicos de agua subterránea: tales como la evapotranspiración, lagos y ríos también están bien acoplados en el código.

Como se mencionó el flujo de agua subterránea se simula utilizando una aproximación de diferencias finitas orientadas en bloques. Las distintas capas pueden ser libre o confinadas, en donde el movimiento del agua subterránea en tres dimensiones para un acuífero anisotrópico, no homogéneo es derivado a partir de la Ley de Darcy y la ecuación de continuidad. En general, la ecuación que representa el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso, con flujo no estacionario, puede ser descrita por la ecuación diferencial parcial siguiente, (Mc Donald y Harbaugh,1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde

k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} : conductividad hidráulica del medio poroso a lo largo de los ejes de coordenadas X, Y, y Z; las mismas que son asumidas ser paralelas a los ejes principales;

h : carga hidráulica;

S : coeficiente de almacenamiento del medio poroso;

W : flujo volumétrico por unidad de volumen, positivo para el flujo de salida y negativo para el flujo de entrada;

t : es el tiempo.

$k_{xx}(xyz)$, $k_{yy}(xyz)$, $k_{zz}(xyz)$ y $S(xyz)$ pueden ser funciones del espacio y $W(xyzt)$ puede ser una función del espacio y tiempo. La ecuación anterior y las condiciones de frontera, así como las condiciones iniciales de un sistema acuífero constituyen la representación matemática de un sistema de flujo de agua subterránea. Al ser esta es una ecuación diferencial de segundo orden la aplicación de una solución aproximada a través de métodos numéricos, tales como diferencias y elementos finitos es lo más común y recomendado (Harbaugh, 2005; Konikow, 2008).

Condiciones fronteras empleadas en modflow

Las condiciones de frontera constituyen un aspecto clave para la buena representación del sistema de agua subterránea. En general, estas permiten definir las fronteras físicas e hidráulicas del sistema acuífero. Como se mencionó hay tres tipos de condiciones de contorno comúnmente establecidas (Dirichlet, Neumann y Cauchy), en esta investigación se consideraron las cuales que describen las condiciones de borde "CDH", "WELL" y "RECHARGE" empleadas en el modelo.

La condición de Dirichlet es aplicada a la carga hidráulica la cual fue determinada en la frontera del acuífero del valle de Aguascalientes como función del tiempo y del espacio. La condición de frontera de carga constante (Constant-head boundary CHD), representa una carga hidráulica que no es afectada por la simulación del sistema de agua subterránea, es fijada en espacio, sin embargo, puede cambiar en tiempo para el modelo transitorio. Se usa para representar la carga hidráulica observada a lo largo de una división de aguas o un límite arbitrario del dominio computacional (USGS,2019).

En cuanto a la condición de Neumann, estas son condiciones de frontera de gradiente y carga especificada, donde bajo esta condición, el gradiente de la carga hidráulica es detallado en la frontera como una función del tiempo y el espacio. En MODFLOW, el flujo especificado en las fronteras debe ser configurado con los paquetes

de "RECHARGE", "WELL". El paquete recarga es usado para simular un flujo especificado distribuido sobre la parte superior del modelo, y es expresado en unidades de longitud /tiempo (m/s). En cuanto a los pozos este se representa a través del paquete "WELL" y se representa un flujo especificado en celdas individuales con unidades gasto/tiempo (m^3/s).

Configuración del modelo

Después de haber desarrollado el modelo conceptual se recomienda la implementación de fases para el desarrollo del modelo, las cuales se describen a continuación (Kresic, 2006; Bear and Cheng, 2010):

- Definición del dominio y la geometría del modelo. En este caso se trabajó sobre el acuífero del valle de Aguascalientes con un total de 7 capas mostradas en la figura 5 (Sección tipo), a su vez la capa 1 y 7 (llamada fondo) se dividieron en 3 capas con división regular para mantener la geometría de bloques proporcionales comparados con las demás capas. Para cada una de las capas se integró una interpolación a partir de la agrupación de las dos unidades hidro-estratigráficas.
- La creación de la malla para la discretización espacial del modelo se especificó con un ancho de 350m x 350m.
- En cuanto a la definición de la distribución de la conductividad hidráulica, los valores se presentan en la tabla 1, de este capítulo.
- Lo que concierne a las condiciones iniciales, en este caso se tomaron los datos obtenidos por CONAGUA para el año 1985 como condiciones iniciales, las cuales hacen referencia a los niveles y bombeos del año de inicio en un periodo estacionario.
- Respecto al tiempo de análisis, se establecieron periodos de estrés cada ocho años con un total de cuatro periodos de estrés en estado transitorio (1993, 2001, 2009 y 2017) y uno es estado estacionario (1985). Además, se establecieron ocho step en cada intervalo, para obtener los cálculos cada año. En cuanto al solucionador empleado se manejó MODFLOW NWT.

Calibración del Modelo

La calibración es un proceso mediante el cual los parámetros del modelo, como la conductividad hidráulica, son ajustados hasta que los resultados de este concuerden o sean cercanos a valores históricos medidos u observados. En este caso se compararon los niveles estáticos al final e inicio del periodo.

Al no contar directamente con un software de calibración dentro del paquete de ModelMuse, se utilizó la calibración manual, el proceso de calibración consistió en tomar como referencia 5 puntos dentro del valle de Aguascalientes representados en la figura 8 y que corresponden a pozos en los cuales se midió el nivel en el año 1985 y 2017. A partir del nivel estático medido en los pozos se corrió el modelo y se compararon las cargas hidráulicas modeladas contra las observadas, ajustando la conductividad hidráulica mediante la metodología de prueba y error.

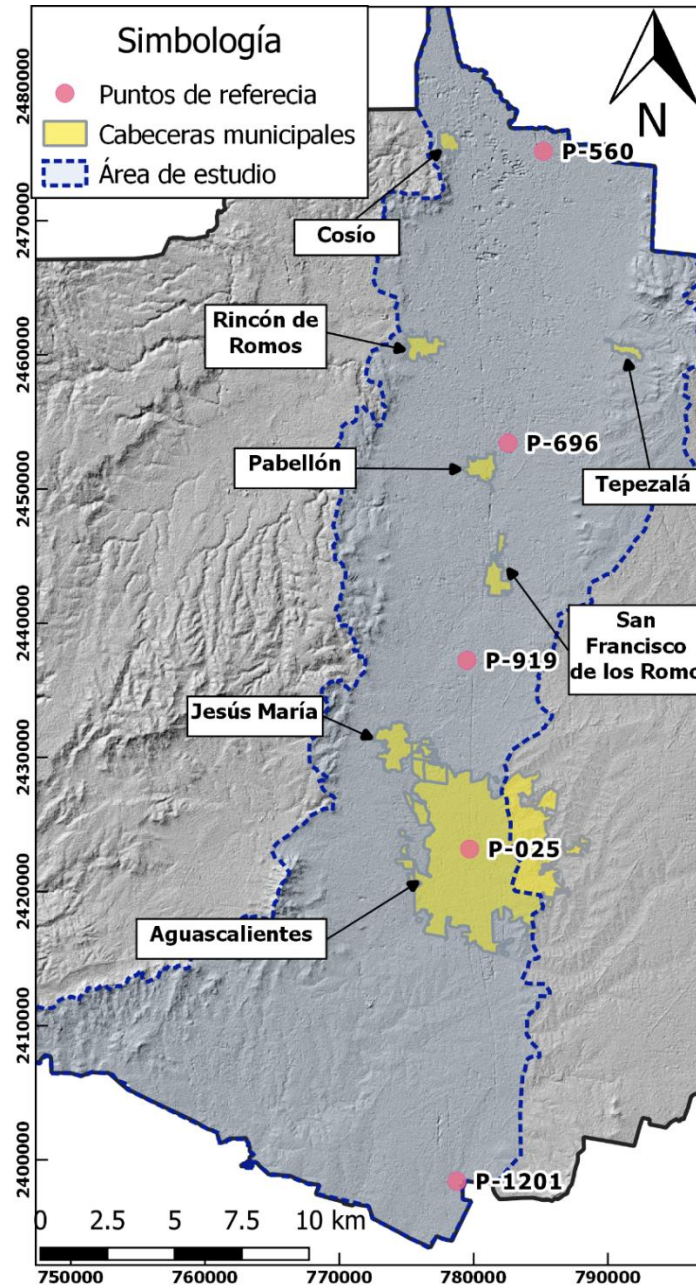


Figura 8. Localización de los puntos de control, para la calibración manual.

A partir de establecer las cargas hidráulicas y las conductividades obtenidas de la literatura (material granular de 1.9×10^{-4} m/s y material granular con contenido de arcilla con 7.8×10^{-6} m/s) se realizó la primera corrida. En general los valores iniciales tomados de la literatura para la conductividad hidráulica muestran una mala correlación con variaciones de hasta 60m con respecto a los valores observados, por lo que se decidió realizar un ajuste, tomando como punto de partida el doble de la conductividad planteada en un principio y posteriormente la mitad de ese valor, los datos se muestran en la tabla 2.

Unidad hidroestratigráfica	A partir de la literatura y estudios previos	Ajuste 1 (k*2)	Ajuste 2 (k*0.5)
Capa Granular	1.90E-04	3.80E-04	9.50E-05
Capa Granular con arcilla	7.80E-06	1.56E-05	3.90E-06
Roca	6.00E-07	6.00E-07	6.00E-07
Fondo	9.00E-09	9.00E-09	9.00E-09

Tabla 2. Ajuste de la conductividad hidráulica.

Para cada caso $k*2$ y $k*0.5$ se realizó una corrida y luego se compararon los resultados con la finalidad de encontrar la conductividad que mejor represente al acuífero de valle de Aguascalientes. La conductividad que mostro un mejor ajuste fue $k*0.5$, tal como se muestra en la tabla 3, en la cual se expresa el error relativo en cada punto de observación dado por la ecuación 7, (Montgomery y Runger, 2013) y la conductividad respectiva.

La ecuación del error relativo está dada por:

$$Error\ Relativo = \frac{H_{obs} - H_{cal}}{H_{obs}} * 100 \quad Ecuación\ 7$$

Donde:

H_{obs} = Carga observada, h_{cal} = Carga calculada.

Conductividad K(m/s) Literatura	Capa Granular	1.90E-04	Capa Granular con arcilla	7.80E-06
--	----------------------	-----------------	----------------------------------	-----------------

No. De Pozo	Cargas observadas		Cargas calculadas		2017		1985	
	Nivel 1985	Nivel 2017	Nivel 2017	Nivel 1985	Error Relativo (%)	Diferencia (m)	Error Relativo (%)	Diferencia (m)
1_P-560	1915	1848	1858	1921	0.51	10	0.33	6
2_P-696	1843	1763	1789	1856	1.48	26	0.70	13
3_P-919	1802	1762	1773	1830	0.64	11	1.57	28
4_P-025	1752	1703	1728	1800	1.48	25	2.74	48
5_P-1201	1761	1722	1721	1770	0.06	1	0.51	9

Conductividad K(m/s) k*2	Capa Granular	3.80E-04	Capa Granular con arcilla	1.56E-05
---------------------------------	----------------------	-----------------	----------------------------------	-----------------

No. De Punto	Cargas observadas		Cargas calculadas		2017		1985	
	Nivel 1985	Nivel 2017	Nivel 2017	Nivel 1985	Error Relativo (%)	Diferencia (m)	Error Relativo (%)	Diferencia (m)
1_P-560	1915	1848	1848	1907	0.02	0	0.44	8
2_P-696	1843	1763	1778	1846	0.87	15	0.18	3
3_P-919	1802	1762	1776	1822	0.77	14	1.10	20
4_P-025	1752	1703	1724	1792	1.26	21	2.27	40
5_P-1201	1761	1722	1720	1765	0.12	2	0.23	4

Conductividad K(m/s) k*0.5	Capa Granular	9.50E-05	Capa Granular con arcilla	3.90E-06
-----------------------------------	----------------------	-----------------	----------------------------------	-----------------

No. De Punto	Cargas observadas		Cargas calculadas		2017		1985	
	Nivel 1985	Nivel 2017	Nivel 2017	Nivel 1985	Error Relativo (%)	Diferencia (m)	Error Relativo (%)	Diferencia (m)
1_P-560	1915	1848	1847	1911	0.05	1	0.21	4
2_P-696	1843	1763	1775	1845	0.68	12	0.11	2
3_P-919	1802	1762	1769	1813	0.40	7	0.61	11
4_P-025	1752	1703	1723	1776	1.17	20	1.37	24
5_P-1201	1761	1722	1720	1760	0.12	2	0.06	1

Tabla 3. Comparación de conductividades para cada caso $k*2$ y $k*0.5$

Los valores de conductividad que mostraron menor variación fueron para la capa granular de 9.5×10^{-5} m/s y para la capa granular con contenido de arcilla 3.9×10^{-6} m/s, con errores de 0.05% al 1.17% para el año de 2017 con variaciones de 1 a 20 metros, en cuanto al año 1985 los errores presentados son de 0.06% a 1.37% con variaciones de 1 a 24 metros.

A partir de determinar la conductividad de cada capa de manera general, se analizaron los datos en cada punto de observación para los periodos establecidos (1985, 1993, 2001, 2009 y 2017). Para lo cual se realizaron gráficos de comparación de las cargas observadas y las cargas calculadas mostrados de la figura 9 a la figura 13 y de la tabla 4 a la tabla 8. En los cuales de manera general se muestra los datos observados y calculados en cada periodo de análisis y el error relativo correspondiente.

Además, se calcula el porcentaje de error (MRMSE), tal como lo expresa la ecuación 9 y el cálculo de la dispersión promedio (MAD) la cual está dada por la ecuación 10 (Montgomery y Runger, 2013).

$$MRMSE = \frac{RMSE}{H_{obsMax} - H_{obsMin}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(H_{obs i} - H_{cal i})^2}{n}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$MAD = \frac{H_{obs} - H_{cal}}{n} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: $RMSE$ =Error mínimo cuadrático; $H_{obs i}$ =Carga medida observada; $H_{cal i}$ =Carga calculada por el modelo; n =Numero de mediciones; $MRMSE$ =Porcentaje de error, MAD = Dispersión promedio.

P1201				
Año	Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)	Diferencia (m)	Error Relativo
1985	1761	1760	1	0.06
1993	1755.6	1750	6	0.32
2001	1753	1740	13	0.74
2009	1746.3	1730	16	0.93
2017	1722	1720	2	0.12

Dispersión promedio (MAD) 7.58
 Porcentaje de error (MRMSE) 0.43 %

Tabla 4. Valores observados y calculados para el pozo P-1201, al sur del valle en el municipio de Aguascalientes, la tabla muestra la diferencia en metros y el error relativo en cada periodo de análisis, además se muestra la dispersión promedio (MAD) de todos los datos analizados y el porcentaje de error general.

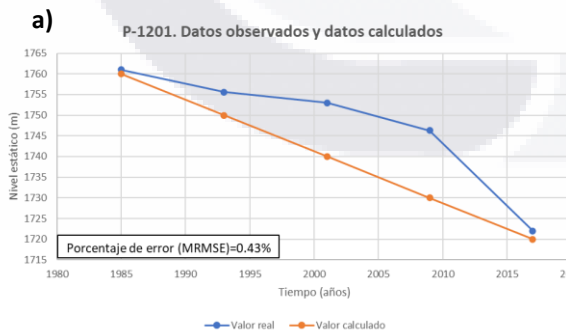


Figura 9a. Gráfica de datos observados contra calculados para el pozo P-1201, en los diferentes periodos de análisis.

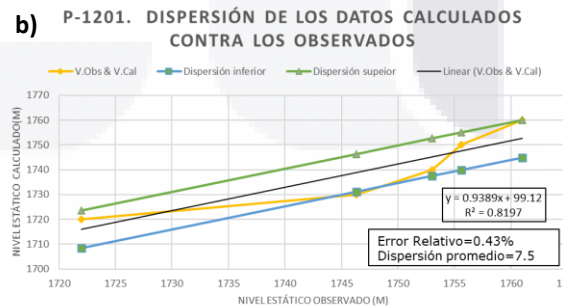


Figura 9b. Grafica de dispersión de los datos calculados contra los datos observados para el pozo P-1201. La línea verde y azul representan la dispersión máxima, además se muestra la recta de regresión con una línea negra.

P-025				
Año	Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)	Diferencia (m)	Error Relativo
1985	1752	1776	24	1.4
1993	1737.405	1762	25	1.4
2001	1722.81	1754	31	1.8
2009	1717.69	1749	31	1.8
2017	1703	1723	20	1.2

Dispersión promedio (MAD) 26.22
 Porcentaje de error (MRMSE) 1.20 %

Tabla 5. Valores observados y calculados para el pozo P-025, al sur del valle en el municipio de Aguascalientes, la tabla muestra la diferencia en metros y el error relativo en cada periodo de análisis, además se muestra la dispersión promedio (MAD) de todos los datos analizados y el porcentaje de error general.

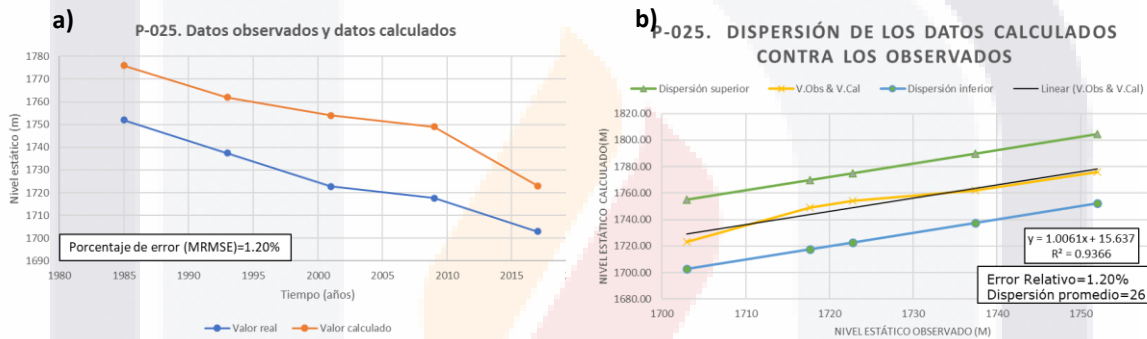


Figura 10a. Grafica de datos observados contra calculados para el pozo P-025, en los diferentes periodos de análisis.

Figura 10b. Grafica de dispersión de los datos calculados contra los datos observados para el pozo P-025. La línea verde y azul representan la dispersión máxima, además se muestra la recta de regresión con una línea negra.

P 919				
Año	Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)	Diferencia (m)	Error Relativo
1985	1802	1813	11	0.61
1993	1791.5	1810	19	1.03
2001	1766.95	1787	20	1.13
2009	1766.94	1782	15	0.85
2017	1762	1769	7	0.40

Dispersión promedio (MAD) 14.32
 Porcentaje de error (MRMSE) 0.80 %

Tabla 6. Valores observados y calculados para el pozo P-919, al sur del valle en el municipio de Aguascalientes, la tabla muestra la diferencia en metros y el error relativo en cada periodo de análisis, además se muestra la dispersión promedio (MAD) de todos los datos analizados y el porcentaje de error general.

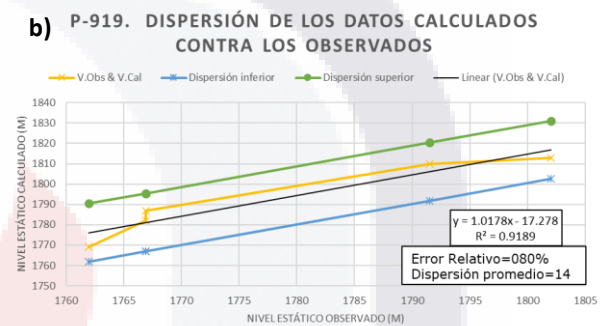
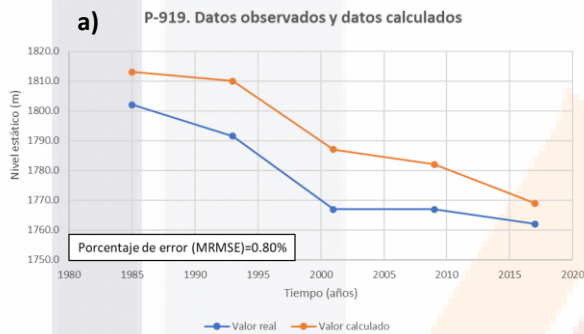


Figura 11a. Grafica de datos observados contra calculados para el pozo P-919, en los diferentes periodos de análisis.

Figura 11b. Grafica de dispersión de los datos calculados contra los datos observados para el pozo P-919. La línea verde y azul representan la dispersión máxima, además se muestra la recta de regresión con una línea negra.

P 696				
Año	Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)	Diferencia (m)	Error Relativo
1985	1843	1845	2	0.11
1993	1825.1	1837	12	0.65
2001	1810.1	1822	12	0.66
2009	1798	1806	8	0.44
2017	1763	1775	12	0.68

Dispersión promedio (MAD) 9.16
 Porcentaje de error (MRMSE) **0.26 %**

Tabla 7. Valores observados y calculados para el pozo P-696, al sur del valle en el municipio de Aguascalientes, la tabla muestra la diferencia en metros y el error relativo en cada periodo de análisis, además se muestra la dispersión promedio (MAD) de todos los datos analizados y el porcentaje de error general.

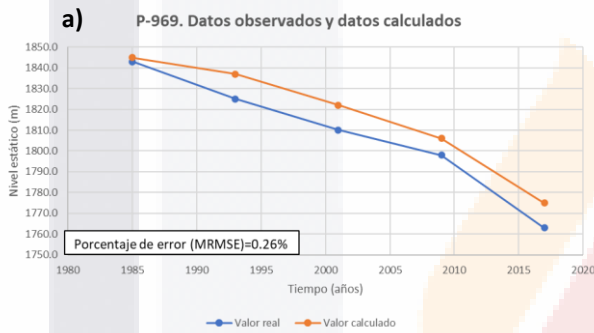


Figura 12a. Grafica de datos observados contra calculados para el pozo P-696, en los diferentes periodos de análisis.

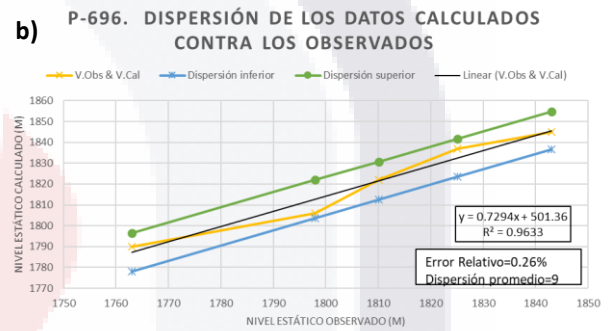


Figura 12b. Grafica de dispersión de los datos calculados contra los datos observados para el pozo P-696. La línea verde y azul representan la dispersión máxima, además se muestra la recta de regresión con una línea negra.

P 560				
Año	Carga observada (msnm)	Carga calculada (msnm)	Diferencia (m)	Error Relativo
1985	1915	1911	4	0.21
1993	1899.42	1894	5	0.29
2001	1874.98	1880	5	0.27
2009	1854.48	1866	12	0.62
2017	1848	1847	1	0.05
Dispersión promedio (MAD)		5.39		
Porcentaje de error (MRMSE)		0.18 %		

Tabla 8. Valores observados y calculados para el pozo P-560, al sur del valle en el municipio de Aguascalientes, la tabla muestra la diferencia en metros y el error relativo en cada periodo de análisis, además se muestra la dispersión promedio (MAD) de todos los datos analizados y el porcentaje de error general.

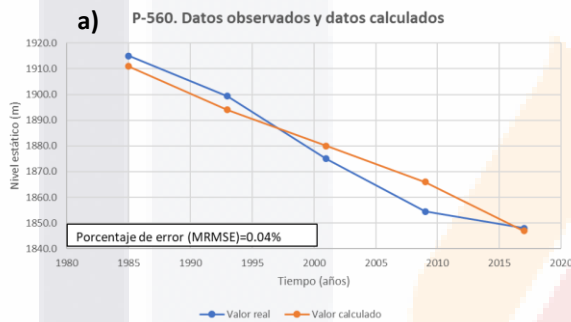


Figura 13a. Grafica de datos observados contra calculados para el pozo P-560, en los diferentes periodos de análisis.

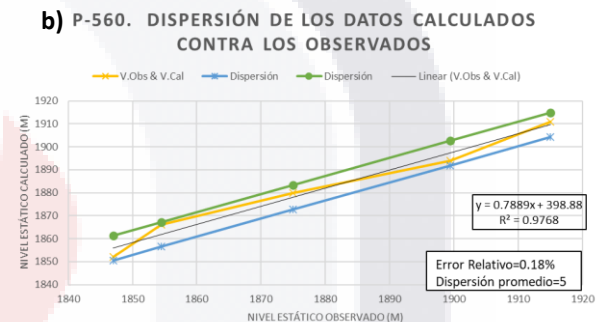


Figura 13b. Grafica de dispersión de los datos calculados contra los datos observados para el pozo P-560. La línea verde y azul representan la dispersión máxima, además se muestra la recta de regresión con una línea negra.

El pozo con mayor variación fue el Pozo P-025, con una diferencia de hasta 31 metros y porcentaje de error 1.8% para las mediciones del 2001 y 2009. Seguido por el pozo P-919 con variación de hasta 20 metros y porcentaje de error de 1.13% para las mediciones del 2009. Los pozos P-1201, P-696 y P560 muestran variaciones de 1 a 16 metros, de 2 a 12 metros y de 1 a 5 metros respectivamente. De manera general se obtuvo la dispersión promedio (MAD) de cada punto y porcentaje de error (MRMSE) en cual está dado por la ecuación 8, la mayor dispersión es de 26 metros que corresponde al pozo P-025 y la menor dispersión es de 5m para el pozo P-560, en cada grafico se representa la dispersión de los datos observados con respecto a los datos calculados, para ello se aplicó la ecuación 10.

Para poder evaluar los segmentos con comportamiento de barrera dentro del modelo, se localizaron puntos de referencia a cada lado de los tramos de la falla Oriente, con un total de 30 puntos a lo largo de la traza, tal como se muestra en la figura 14.

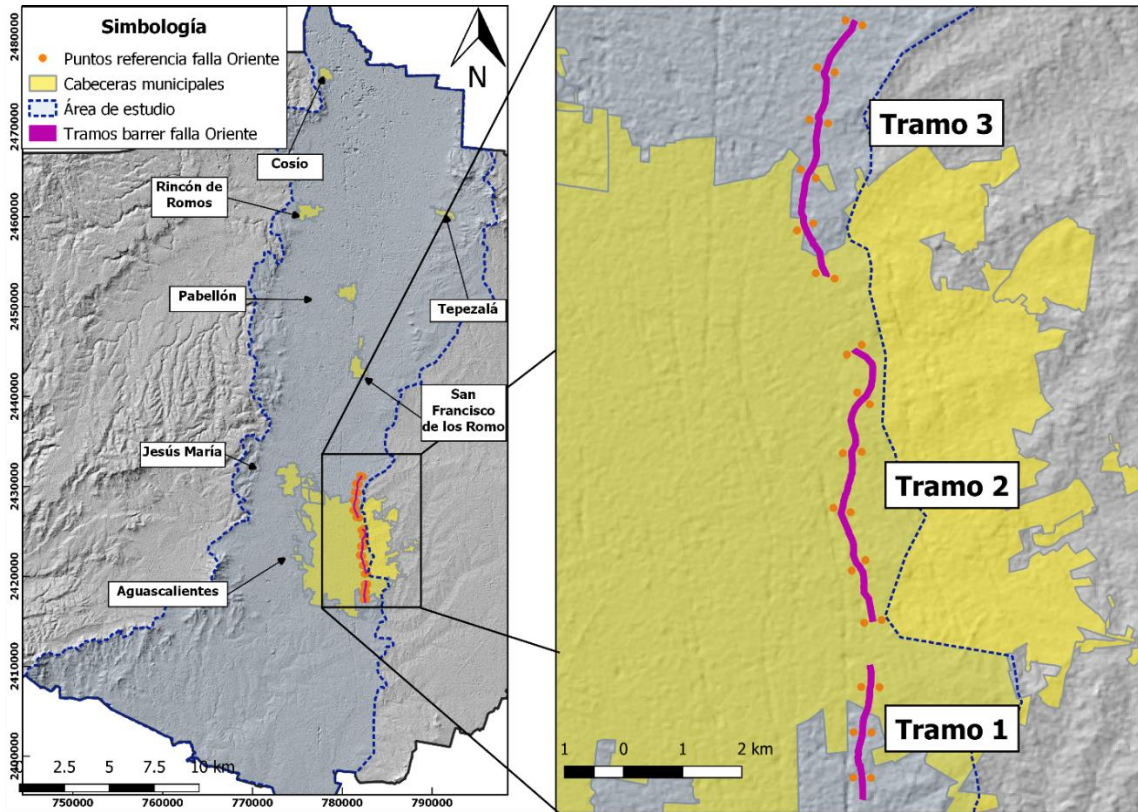


Figura 14. Ubicación de los tramos y puntos de referencia para la falla Oriente.

El primer análisis se propuso con un valor de conductividad hidráulica de 7.2×10^{-7} m/s para los 3 tramos, los datos obtenidos se muestran en la tabla 9.

Tramo 1						
Punto de Observacion	Carga Calculada (msnm)	Punto de Observacion	Carga Calculada (msnm)	Prom. Dif Calculada (m)	Dif. Observada (m) *Ajuste estadístico	Error relativo (%)
1	1751.2	7	1742.6	8.7	19.2	54.8
2	1744.4	27	1735			
3	1752.8	5	1744.8			
Promedio	1749.5	Promedio	1740.8			
Tramo 2						
8	1748.6	6	1735	12.7	18.7	31.8
10	1748	9	1735			
12	1759.6	11	1750.1			
14	1751.2	13	1735			
16	1750.9	15	1735			
18	1750.6	17	1742.4			
Promedio	1751.5	Promedio	1738.8			
Tramo 3						
19	1763.4	19	1755.5	6.6	5.4	-23.0
21	1767.2	21	1759.8			
23	1766.5	23	1759.9			
24	1766.4	24	1756.7			
26	1796.4	26	1784.4			
29	1809.2	29	1813.1			
Promedio	1778.2	Promedio	1771.6			

Tabla 9. Comparación de las cargas observadas y calculadas por MODFLOW para los puntos de control de la falla Oriente, con conductividad hidráulica constante $k=7.2 \times 10^{-7}$.

Tomando en consideración el análisis realizado en el capítulo II y teniendo en cuenta que los impactos de la falla Oriente en el agua subterránea son diferentes en cada segmento de la falla, se manejó una conductividad diferente para cada tramo de la falla, el ajuste en cada caso se comparó con las variaciones obtenidas en el análisis estadístico. En la tabla 10 se muestra la conductividad correspondiente a cada tramo, los valores calculados y el promedio de la diferencia calculada el cual se compara con los valores obtenidos en el capítulo II, además en la última columna se calculó el error relativo aplicando la ecuación 7.

Tramo 1 k=7.5e-8						
Punto de Observacion	Carga Calculada (msnm)	Punto de Observacion	Carga Calculada (msnm)	Promedio Dif Calculada (m)	Dif. Observada (m) *Ajuste estadístico	Error relativo (%)
1	1742.6	7	1757.66	18.35	19.19	4.4
2	1735	27	1760			
3	1744.8	5	1759.79			
Promedio	1740.8	Promedio	1759.2			
Tramo 2 k=7.2e-9						
6	1745	8	1763.1	20.05	18.66	7.4
9	1745	10	1761.72			
11	1750.1	12	1767.25			
13	1745	14	1776.77			
15	1745	16	1766.4			
17	1752.4	18	1767.55			
Promedio	1747.1	Promedio	1767.1			
Tramo 3 k= 6e-7						
19	1755.5	19	1761.8	5.34	5.38	0.74
21	1759.8	21	1766.75			
23	1759.9	23	1765.65			
24	1756.7	24	1765.94			
26	1784.4	26	1794.7			
29	1813.1	29	1806.6			
Promedio	1771.6	Promedio	1776.9			

Tabla 10. Comparación de las cargas observadas y calculadas por MODFLOW para los puntos de control de la falla Oriente, con conductividad hidráulica variable en cada tramo, además se observa en la última columna el error relativo para cada conductividad.

RESULTADOS DEL MODELO

MODFLOW se encarga de mostrar de una manera gráfica estos resultados por medio de líneas de contornos de igual carga hidráulica mostrando información relacionada con las líneas piezométricas, es decir niveles y abatimientos. Los valores iniciales producto del análisis conceptual fueron introducidos en el modelo, arrojando para la primera corrida valores de carga muy altos con respecto a los niveles estáticos del inicio y fin del periodo de análisis proporcionados por CONAGUA, por tanto, se decidió variar los parámetros hasta obtener resultados con mayor grado de correlación con los medidos. En cuanto a los valores establecidos para la modelación, la conductividad hidráulica para la capa de material granular se estableció en 9.5×10^{-5} m/s y para la capa de material granular con contenido de arcilla en 3.9×10^{-6} m/s ya que estos valores de conductividad mostraron un menor error con respecto a los datos obtenidos de la literatura y de investigaciones previas. Las imágenes 15 y 16 muestran la vista en planta y en corte frontal de la modelación para el año 2017, con los parámetros finales.

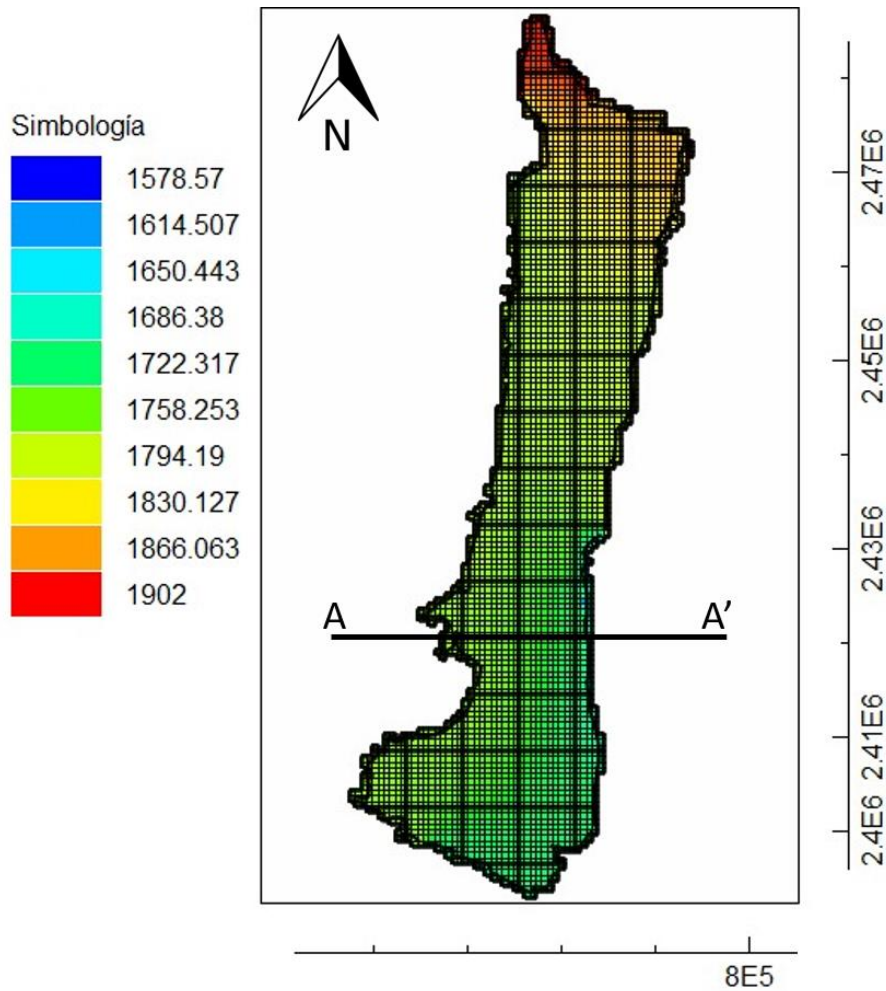


Figura 15. Vista en planta de los resultados obtenidos de la modelación en MODFLOW para el año 2017.

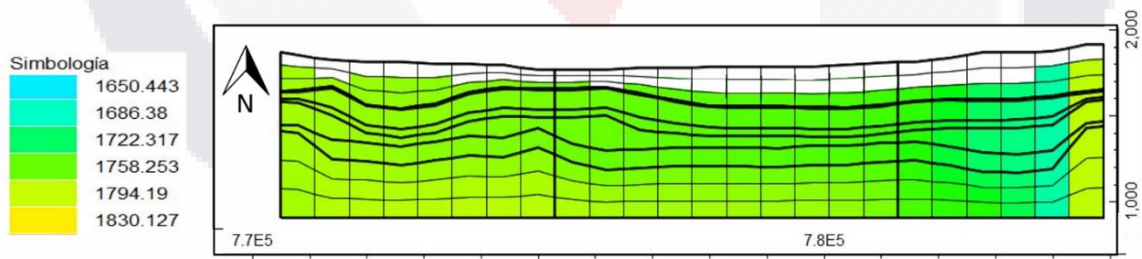


Figura 16. Vista en corte frontal de los resultados obtenidos de la modelación en MODFLOW para el año 2017. Corte A-A'.

Para la calibración manual del modelo, se localizaron 5 pozos a lo largo del valle los cuales se tomaron como referencia para comparar los niveles estáticos del modelo. El pozo con mayor variación fue el pozo P-025 ubicado en la zona metropolitana de Aguascalientes con un porcentaje de 1.20% y con dispersión promedio de 26 metros respecto a los valores observados, seguido del pozo P-919 ubicado en el municipio de

San Francisco de los Romo con un porcentaje de error de 0.80% y dispersión promedio de 14 metros, los pozos P-1210, P-696 y P-560, muestran porcentajes de error de 0.043%, 0.26% y 0.18% respectivamente con variaciones de 7.5, 9 y 5 metros. Las mayores variaciones se presentan en la zona metropolitana de Aguascalientes probablemente debido a que se han ido incrementando los pozos de extracción, pero no se cuenta con información detallada, lo que dificulta la modelación e incrementa el error porcentual. Como se muestra en la figura 17, la mayor cantidad de pozos sin datos se encuentra alrededor del Pozo P-025, seguido del pozo P-919.

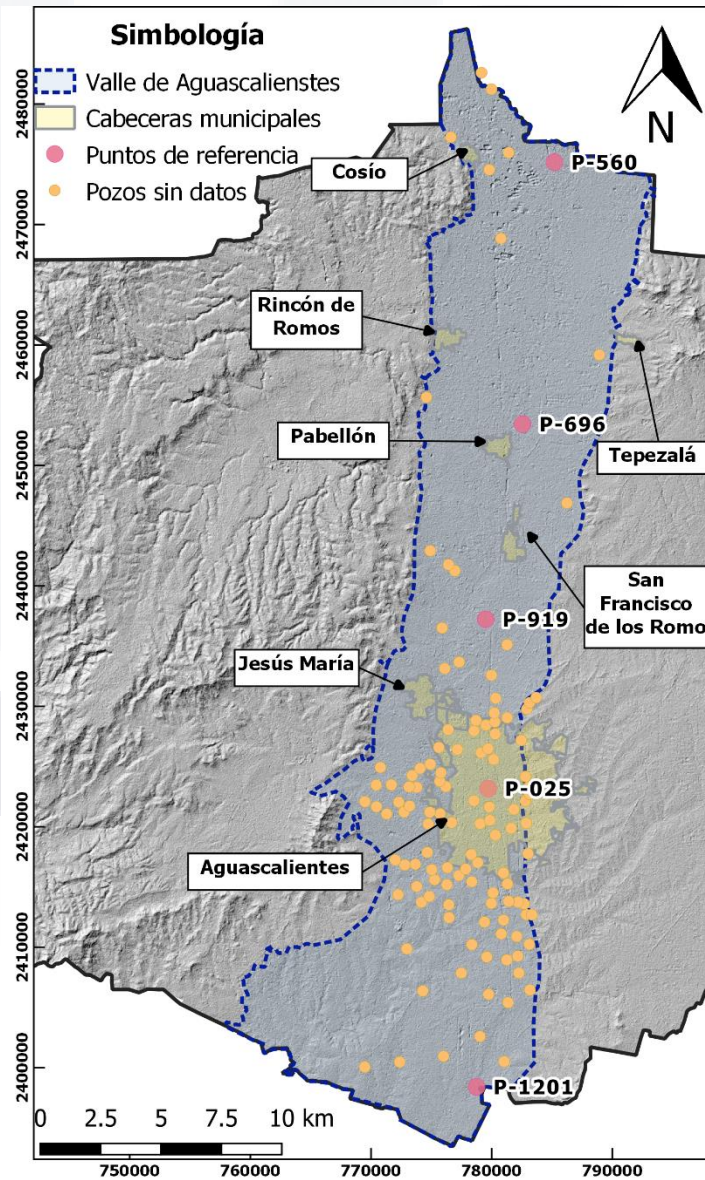


Figura 17. Localización de pozos sin datos dentro del valle de Aguascalientes.

De manera general, se consideró que los datos con mayor incertidumbre eran los correspondientes a las cargas hidráulicas en estado transitorio, debido a la falta de mediciones directas en cada periodo, seguidos por los datos correspondientes a la conductividad, ya que existe incertidumbre en las profundidades reales del acuífero y en los valores específicos de estas, debido a que la recopilación de información solo estuvo en función de investigaciones previas y de la literatura. No obstante, los valores obtenidos del modelo resultan significativos y demostrativos.

En cuanto a la conductividad de los segmentos de la falla Oriente con comportamiento de barrera se localizaron 30 puntos a lo largo de los tramos, 15 a cada lado de la falla (figura 14). Al comparar las variaciones resultado del capítulo II con los datos obtenidos a través de la modelación y considerando una misma conductividad para todos los tramos, los errores relativos en cada segmento de falla eran muy grandes, lo que dio origen a asignarle a cada tramo una conductividad diferente derivado del comportamiento físico y mecánico de la falla, lo cual dio como resultado para el tramo 1 una conductividad $K=7.5 \times 10^{-8} \text{m/s}$, para el tramo 2, $k=7.2 \times 10^{-9} \text{m/s}$, y para el tramo 3, $k=6 \times 10^{-7} \text{m/s}$.

A escala regional, las direcciones de flujo tienen orientación Noroeste-Sureste. Se aprecia el aumento de carga hidráulica hacia el Norte, alcanzando un valor máximo de 1920 msnm a 1740msnm para el año 1985 (figura 18a) y para el 2017, 1900 msnm al norte y al sur de 1720 msnm (figura 19a).

En general, al comparar las cargas observadas con respecto a las cargas modeladas por MODFLOW, para el año 1985 (figura 18b), las cargas muestran comportamientos similares, y la presencia de la falla Oriente no muestra afectaciones en el flujo regional.

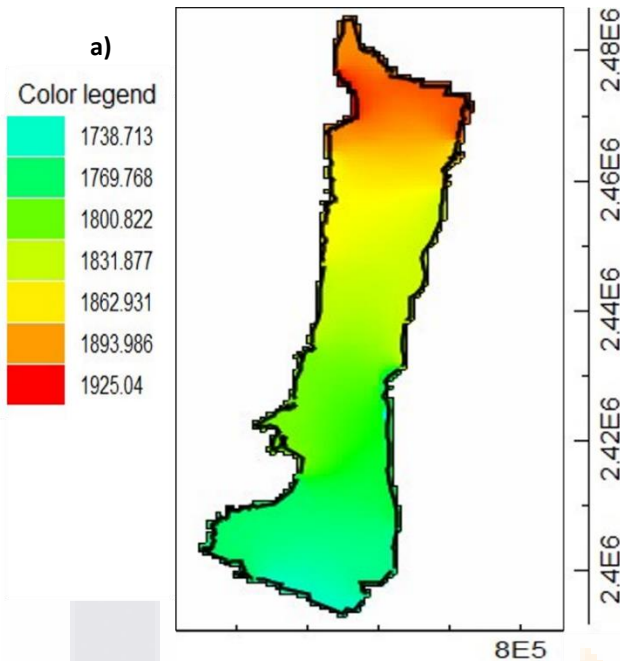


Figura 18a. Carga hidráulica simulada para el año 1985.

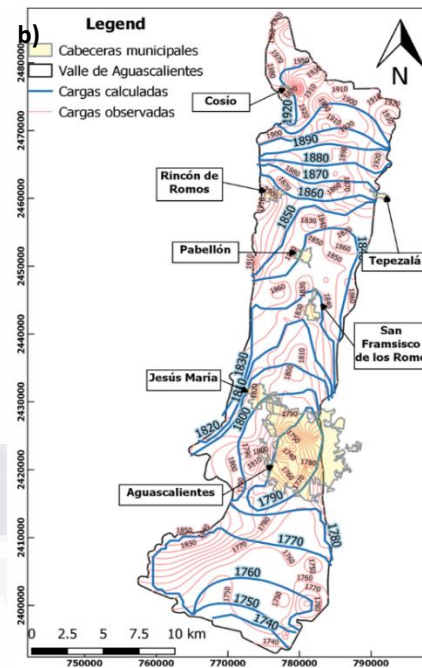


Figura 18b. Comparación de las cargas observadas representadas en color rosa y cargas calculadas representadas en color azul.

Con respecto al año 2017 (figura 19b) , las cargas muestran la dirección general de flujo Noroeste-Sureste con conductas equivalentes entre cargas observadas y calculadas, sin embargo, es necesario realizar una calibración automática para reducir el error mostrado y que las curvas de las cargas calculadas se ajusten de mejor manera.

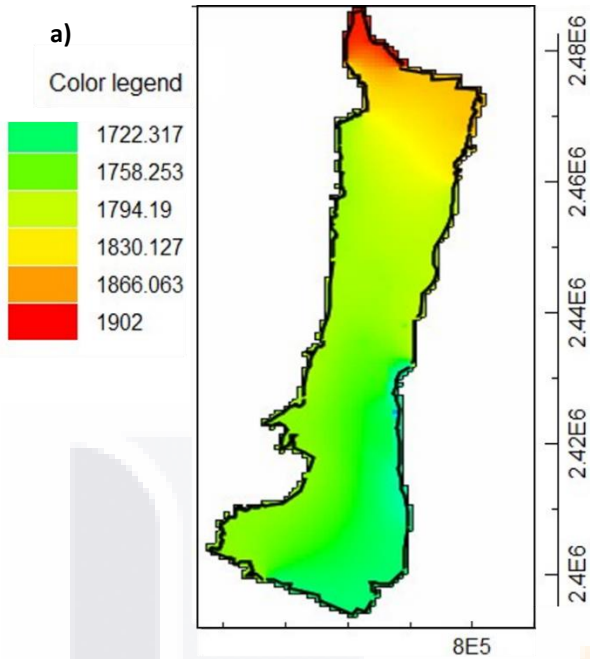


Figura 19a. Carga hidráulica simulada para el año 2017.

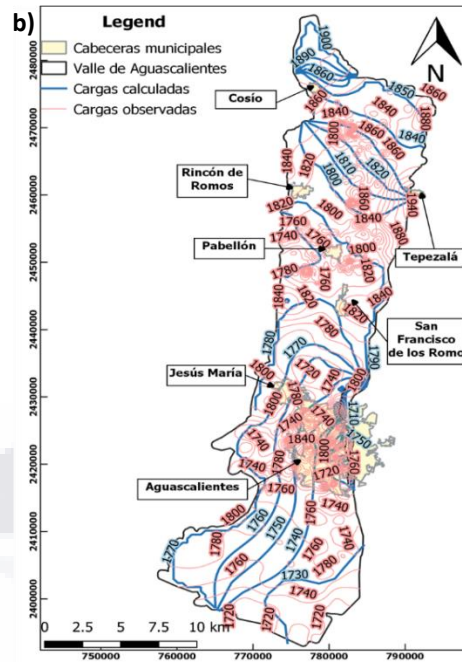


Figura 19b. Comparación de las cargas observadas representadas en color rosa y cargas calculadas representadas en color azul.

Dentro del análisis del flujo calculado por MODFLOW para el año 2017, se puede observar que los segmentos la falla Oriente muestran una modificación en el flujo general dentro del valle (figura 20), aportado información valiosa del comportamiento general del acuífero y de la importancia del análisis del comportamiento de las fallas.

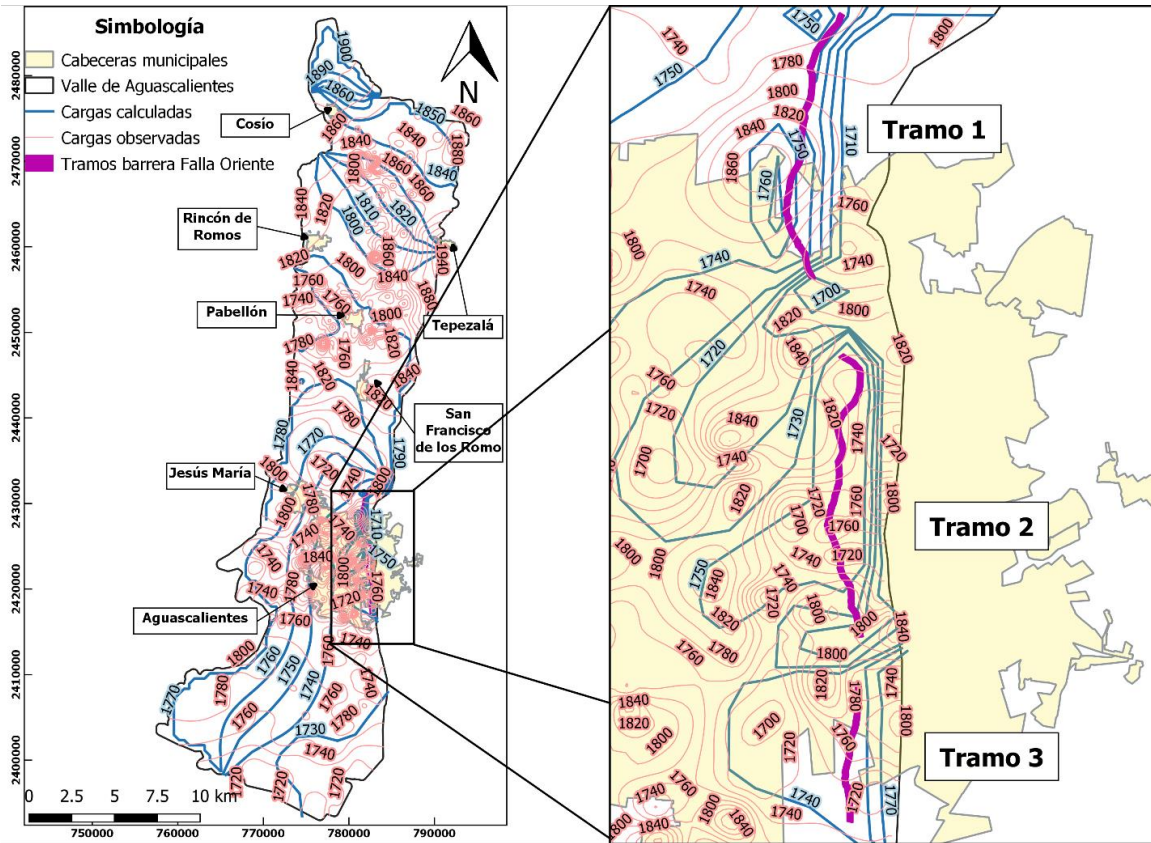


Figura 20. Comparación de las cargas observadas y cargas calculadas obtenidas a partir de la simulación e MODFLOW para el año 2017 haciendo referencia a los segmentos con comportamiento de barrera de la falla Oriente.

De manera particular las cargas en esta zona (figura 21), son representadas por el modelo a través de las imágenes 22, 23 y 24 las cuales representan los cortes A-A', B-B' y C-C' respectivamente.

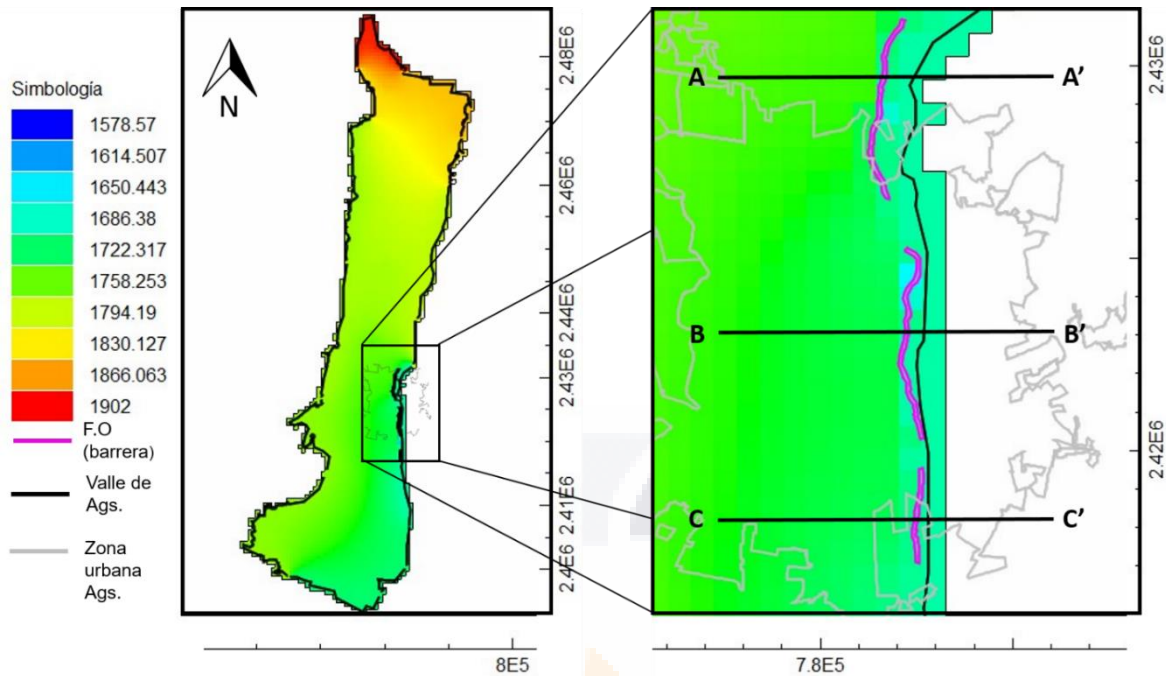


Figura 21. Carga hidráulica simulada en MODFLOW para el año 2017 haciendo referencia a los segmentos con comportamiento de barrera de la falla Oriente.

Con referencia al corte A-A' de la figura 21, perteneciente al tramo 1, en los resultados se puede observar la variación simulada en ambos bloques de la falla con un promedio de las observaciones del lado derecho de la falla de 1759msnm y a la izquierda de 1740msnm. Estas variaciones se obtuvieron con una conductividad de 5×10^{-8} (figura 22).

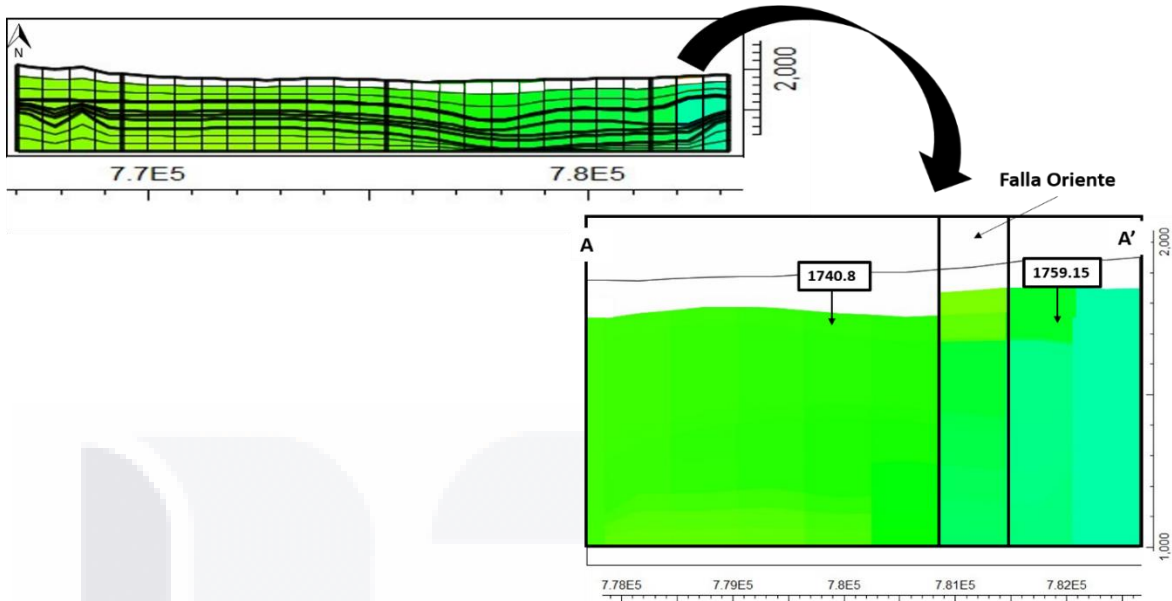


Figura 24. Carga hidráulica simulada en MODFLOW para el año 2017, tramo 1 de la falla Oriente, con una conductividad de $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$.

En lo que corresponde al tramo 2 el promedio de las observaciones del lado derecho de la falla es de 1709 msnm y a la izquierda es de 1738 msnm con una conductividad de 3×10^{-9} (figura 23).

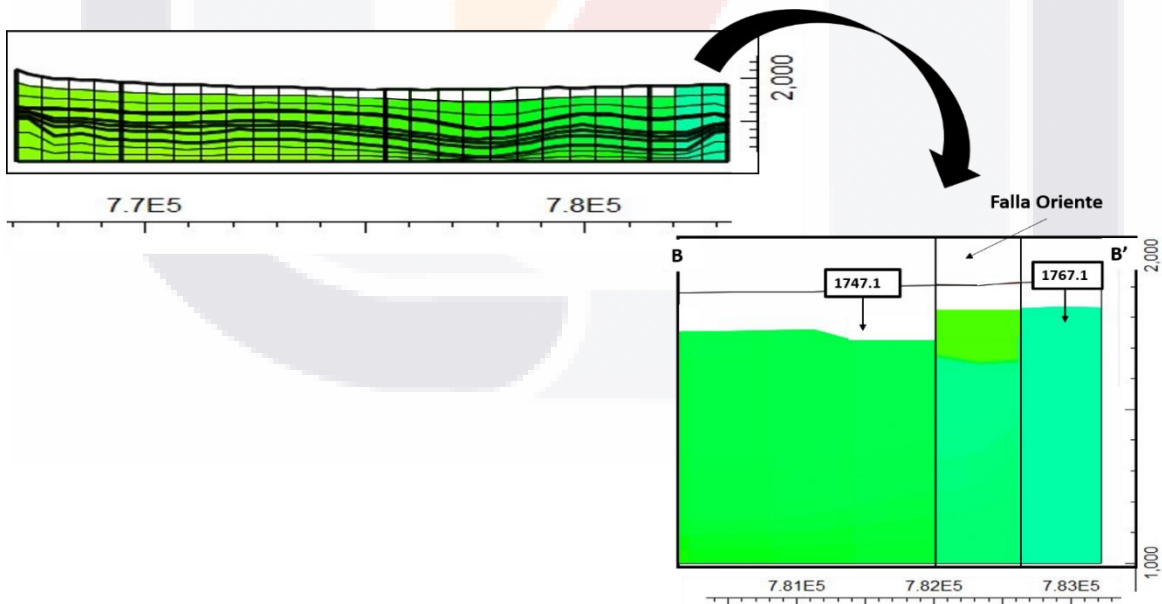


Figura 23. Carga hidráulica simulada en MODFLOW para el año 2017, tramo 2 de la falla Oriente, con una conductividad de $3 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

Y por último en el tramo 3 el promedio de las observaciones del lado derecho de la falla es de 1776 msnm y a la izquierda es de 1771 msnm con una conductividad de 6×10^{-7} (figura 24).

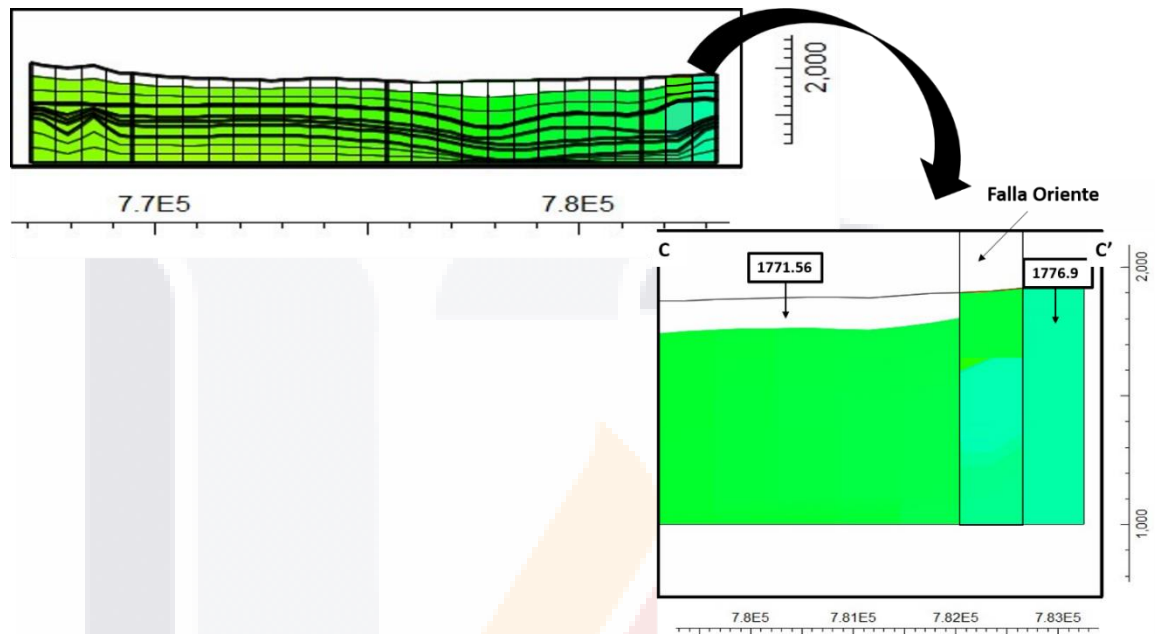


Figura 24. Carga hidráulica simulada en MODFLOW para el año 2017, tramo 2 de la falla Oriente, con una conductividad de 6×10^{-7} m/s.

Conclusión del modelo

Se llevó a cabo la simulación numérica del flujo de agua subterránea en el valle de Aguascalientes, tanto en estado estacionario como transitorio, mediante el software MODFLOW-NWT y su interfaz ModelMuse, la cual reproduce la configuración del nivel freático observado desde 1985 hasta 2017. Con respecto al comportamiento del modelo se concluye que:

- Los valores iniciales producto del análisis conceptual fueron introducidos en el modelo, arrojando para la primera corrida valores de carga muy altos con respecto a los datos proporcionados por CONAGUA valores de hasta 60 metros de diferencia
- Se decidió variar los parámetros hasta obtener resultados con mayor grado de correlación con los medidos; se consideró que los datos con mayor incertidumbre eran los correspondientes a las cargas hidráulicas en estado transitorio, debido a la falta de mediciones directas en cada periodo, seguidos por los datos correspondientes a la conductividad, ya que existe incertidumbre en las profundidades reales del acuífero y en los valores específicos de estas ya que la recopilación de información solo estuvo en función de investigaciones previas y de la literatura.
- A escala regional, se aprecia el aumento de carga hidráulica hacia el Norte, alcanzando un valor máximo de 1900 msnm y un valor mínimo al sur de 1720 msnm para el año 2017 y de 1920msnm a 1740msnm para el año 1985.
- De manera general, se representa un flujo de Noroeste-Sureste a través de cargas hidráulicas con comportamientos similares de las cargas calculadas y observadas.
- La determinación del impacto de la falla Oriente en el nivel de agua subterránea dentro del modelo se encontró en función de la asignación de un valor de permeabilidad diferente para cada tramo para un mejor ajuste con los valores obtenidos en el capítulo II. Las conductividades resultantes son las siguientes:
 - Tramo 1= $K=7.5 \times 10^{-8}$ m/s
 - Tramo 2= $K=7.2 \times 10^{-9}$ m/s
 - Tramo 3= $K=6 \times 10^{-7}$ m/s
- Es importante mencionar que el análisis de esta falla se realizó con poca información y solo en un tramo de la falla, por lo que, el tener más mediciones de los pozos que rodean la falla Oriente, así como de las discontinuidades centrales mejoraría la comprensión del modelo. A pesar de esto, las

características empleadas para la modelación de la falla Oriente podrían tomarse como referencia de las discontinuidades menores.

- El ajuste de la conductividad hidráulica proporcione una mejor calibración del modelo, pero es necesario emplear métodos automáticos que delimiten aún más las pequeñas variaciones de la conductividad hidráulica.
- Para la construcción del modelo el estimar cada variable que afecta el funcionamiento fue de gran importancia. La cuantificación de la recarga natural es muy pequeña comparada con la extracción por lo que no se ve reflejada de manera importante en el acuífero, probablemente este en función de que el valor de entrada en la recarga se cuantifica en promedio en $4\text{m}^3/\text{s}$, pero esta cantidad es menos de la mitad del gasto bombeado por segundo, el cual está en el rango de $13.5\text{ m}^3/\text{s}$.
- La descarga principal del modelo se realiza por bombeo, aunque este parámetro es observable en las variaciones de carga hidráulica, probablemente sea necesaria la implementación de los todos los pozos que se encuentran localizados en el valle para tener una mejor representación de los niveles al centro, ya que, el pozo P-025, presento un error porcentual mayor y es donde existe una mayor cantidad de pozos con datos incompletos.
- Cabe destacar que no fue posible integrar el río San Pedro al modelo debido la falta de datos sobre características hidráulicas y geométricas, sin embargo, este es un parámetro de gran importancia debido a la cantidad de descargas residuales y a la potencial infiltración de estas en el acuífero, en este contexto sería importante analizar la ubicación exacta de los puntos con descargas, el tirante y el tamaño de la sección analizada.

Discusión

El objetivo general planteado en la investigación incluye establecer el comportamiento hidrodinámico del sistema del acuífero de Aguascalientes, y como aportar elementos para entender el impacto de las discontinuidades superficiales, en este aspecto, existen diferentes investigaciones enfocadas en caracterizar el valle de Aguascalientes, algunas son descriptivas e informativas (Conagua, 2014; Conagua, 2018; INEGI, 2018, *no publicado*) otras invitan a la reflexión y dialogo sobre la planeación del agua (COTAS et. al, 2006), algunas otras muestran escenarios de simulación (COTAS et. al, 2006; Ortiz, 2005), y aunque todas aportan información valiosa, aún hay algunas diferencias entre ellas, sobre todo en la delimitación del valle, en la actualización de datos y efectos derivados de la extracción como lo son las discontinuidades superficiales.

Por lo tanto, la importancia de este estudio radica en dos factores principalmente, el primero está enfocado en la cuantificación de la recarga natural dentro del valle de Aguascalientes y el segundo es el impacto que tienen las fallas sobre el agua subterránea del valle.

El primero hace referencia a un análisis de la evaluación de la recarga para zonas áridas descrito por Cuthbert 2010, en el cual se toma en consideración el afluente principal del estado que, aunque actualmente no presenta flujo base, recibe el aporte de varias corrientes y las aguas residuales crudas y tratadas de los diferentes sectores de la población (Colis et al 2011), con un total de 24 cursos de agua lo que equivale aproximadamente $130 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$, incluyendo las aguas residuales tratadas y crudas generadas por los diversos sectores del estado (CONAGUA 2007). Como se mencionó anteriormente, el río San Pedro no cuenta con flujo base, pero dada la cantidad de agua que fluye por él, este mantiene una carga constante dentro del valle, en este sentido, sería importante analizar la ubicación de estas zonas ya que como lo menciona Colis et al., 2011 y Castañé et al., 1998 derivado de un análisis de calidad del agua del río San Pedro, este muestra una falta de patrones espaciales debido a una desordenada e intermitente forma de verter las descargas de aguas residuales crudas y tratadas al cauce, lo que deriva del gran número de descargas clandestinas localizadas a lo largo del río.

Otro punto para considerar es que el análisis de cuantificación de la recarga es posterior al abatimiento y donde las variaciones representan las diferentes avenidas reflejadas en el agua subterránea, es decir, las fluctuaciones que se observan

anualmente son debidas a variaciones de la recarga anual, efectuadas como la respuesta a la precipitación en un año determinado. Si bien la recarga es mucho menor a la extracción, y muestra un nivel freático decreciente, existen pequeñas variaciones con las cuales se cuantifica la recarga (figura 1b, 1c y 1d), y en donde es particularmente importante la cuantificación del drenaje, ya que, al incrementarse la profundidad del nivel freático, el agua tarda más tiempo en atravesar la zona no saturada y llegar al acuífero y por lo tanto se vuelve indispensable añadir este factor.



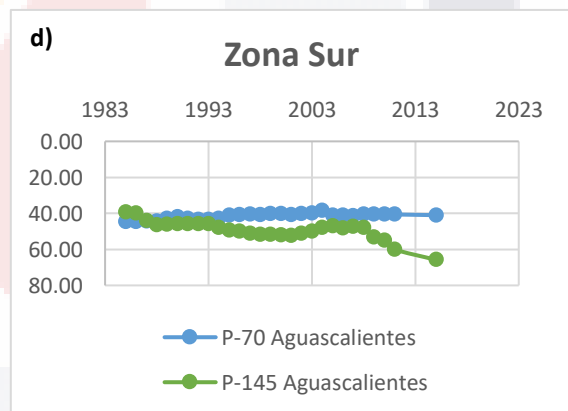
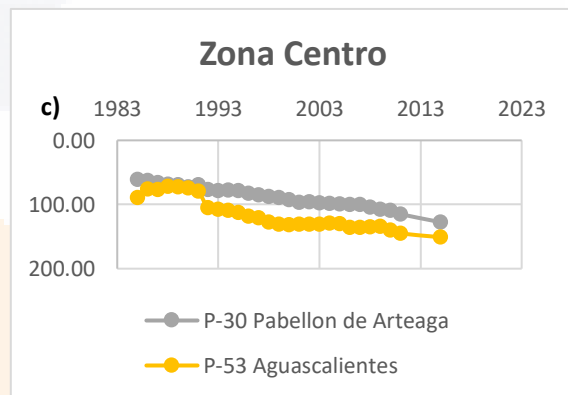
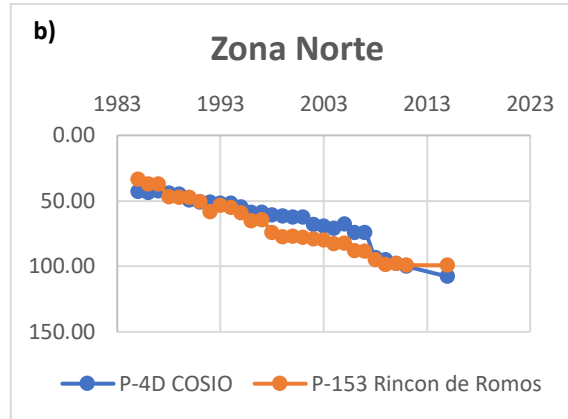
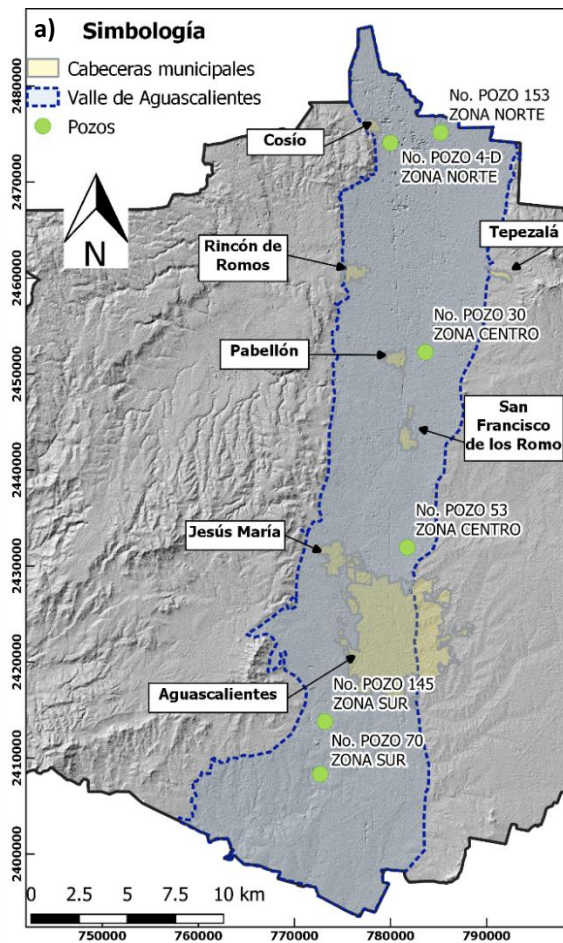


Figura 1. a) Localización general de pozos dentro del valle, b) Series de tiempo de pozos al norte del valle. c) Series de tiempo de pozos al centro del valle. d) Series de tiempo de pozos al sur del valle. Las figuras 1b, 1c y 1d representan las series de tiempo de niveles freáticos de pozos representativos en los cuales se observa que los niveles freáticos. Las series de tiempo de los pozos en la zona norte 1b y centro 1c muestran un comportamiento similar el tiempo, en cuanto a la zona sur figura 1d los niveles se mantienen. En concreto se debe resaltar la importancia de la obtención de información proveniente de mediciones in-situ, ya que muestra las variaciones reales del nivel, y aunque se desconozca cuando ocurrió la precipitación, se sabe la variación real del mismo.

Precisamente dentro del área de estudio la profundidad del nivel del agua es mayor a los 100m y en donde la condición de zona semiárida implica grandes tiempos de tránsito dentro de la zona no saturada, por lo que fue importante implementar la estimación del drenaje.

Cabe señalar que se han realizado investigaciones previas en donde a través de diferentes metodologías se proporcionan tiempos de tránsito, pero estos son muy variados dentro del valle, por lo que, es necesario realizar más estudios al respecto.

Una de las acciones para conocer los tiempos de tránsito fue realizar una correlación estadística entre el pozo P 055 y la estación climatológica Aguascalientes II ubicados a una distancia de 150m y con datos históricos de 12 años (2003-2015), y en la cual se determinó la correlación estadística entre ambos puntos. Los resultados mostraron a los 24 meses existía la mayor correlación con un valor de 0.87, aun así, no se puede asegurar que este periodo de 2 años sea un número fijo para todo el valle ya que solo se realizó en un punto y con una cantidad limitada de datos (Guerrero-Martínez, 2016)

Por otro lado, se recurrió al trabajo de Hernández-Marín et al., 2018, en el cual se utilizó la simulación numérica para estimar los tiempos de retraso entre un evento de precipitación particular y la recarga al acuífero. Esta simulación consistió en el desarrollo y aplicación unidimensional de modelos numéricos de diferentes columnas de suelo utilizando el programa COMSOL Multiphysics para estimar el tiempo de tránsito del agua a través de la zona vadosa (desde la superficie hasta el nivel freático). Los resultados muestran que el mínimo tiempo de tránsito en la parte norte del estudio área es de 13 años, mientras que en parte sur es de 4.25 años, en cuanto a la ciudad de Aguascalientes el tiempo de tránsito asciende hasta los 160 años.

Como se puede observar los tiempos de tránsito son muy variados dentro del valle, por lo que la implementación del cálculo del drenaje se vuelve más importante sobre todo en zonas como el valle de Aguascalientes, no obstante, puede ser necesario aplicar nuevas metodologías o incluir nuevos factores en el futuro para reducir la incertidumbre en la recarga estimada. Algunos de los factores a considerar pueden ser los cuerpos superficiales de agua, los efectos de la anisotropía y los datos climáticos a largo plazo.

De manera general los resultados de la evaluación de la recarga dentro del valle de Aguascalientes muestran que al centro y norte del valle se tienen las tasas más altas de recarga y las zonas con las tasas más bajas de recarga se ubican en los límites norte

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y sur del valle. Este análisis proporciona una recarga interpolada en todo el valle y no solo como una cuantificación general de la misma. Pero ésta es muy pequeña con respecto a la extracción.

Por otro lado, el segundo factor analizado es el impacto que tienen las fallas sobre el agua subterránea del valle, el cual no se ha tomado en consideración en ninguno de los análisis anteriores y en donde se analiza la falla Oriente, una de las fallas que delimitan el valle de Aguascalientes.

En términos generales, los altos gradientes hidráulicos observados en las mediciones del nivel del agua en los bloques de fallas sugieren un tipo de barrera para el flujo hidráulico de agua subterránea (Bense et al., 2008), por lo que algunas de las maneras de obtener información respecto al comportamiento de las fallas es mediante métodos geofísicos y eléctricos, además de la correlación de propiedades físicas medidas en las aguas subterráneas como lo son la conductividad eléctrica, alcalinidad, SDT, etc. Las cuales gráficamente muestran segmentación o unión al atravesar la discontinuidad. En esta investigación, se adopta un análisis estadístico de los niveles de temperatura y agua subterránea y sus patrones de flujo resultantes para evaluar el impacto de la falla en el comportamiento hidráulico. El análisis presentado aquí, indica que las temperaturas del agua subterránea y las cargas hidráulicas varían para cada zona a lo largo del rastro de la falla de Oriente. Según los resultados que se muestran en la figura 11, del capítulo II, tres de siete zonas identificadas muestran un comportamiento hidráulico de tipo barrera, y tres exhiben un comportamiento de tipo conducto a flujo horizontal, y cabe señalar que en la zona cuatro, los datos fueron insuficientes por lo que su comportamiento quedo indeterminado.

En términos generales, la falla Oriente muestra un complejo comportamiento hidráulico de tipo conducto en la dirección vertical, como se describe en el trabajo de Hernández-Marín et al., (2017), pero un comportamiento de tipo barrera en la dirección transversal justificado a través de la prueba t-student analizada en esta investigación, este comportamiento puede ser derivado de la composición heterogénea de la falla Oriente con respecto al tipo de material y comportamiento mecánico que la caracteriza, por ejemplo, varias observaciones de algunos segmentos de esta falla indican la presencia de sustancias cementantes como el carbonato de calcio, que pueden penetrar en las fracturas durante los desplazamientos locales que ocurren en algunos puntos a lo largo de la falla, y conseguir limitar el transporte de agua. Además, es importante mencionar que las zonas que presentan un comportamiento de barrera son zonas en donde la falla se encuentra expuesta (figura 2), manifestación del movimiento constante

de la falla Oriente y en donde con facilidad puede introducirse agua, y material fino producto del movimiento de esta. La combinación de estos factores produce un proceso de cementación, lo que provoca el endurecimiento del material y menor permeabilidad lo que podrían estar causando la segmentación del acuífero.

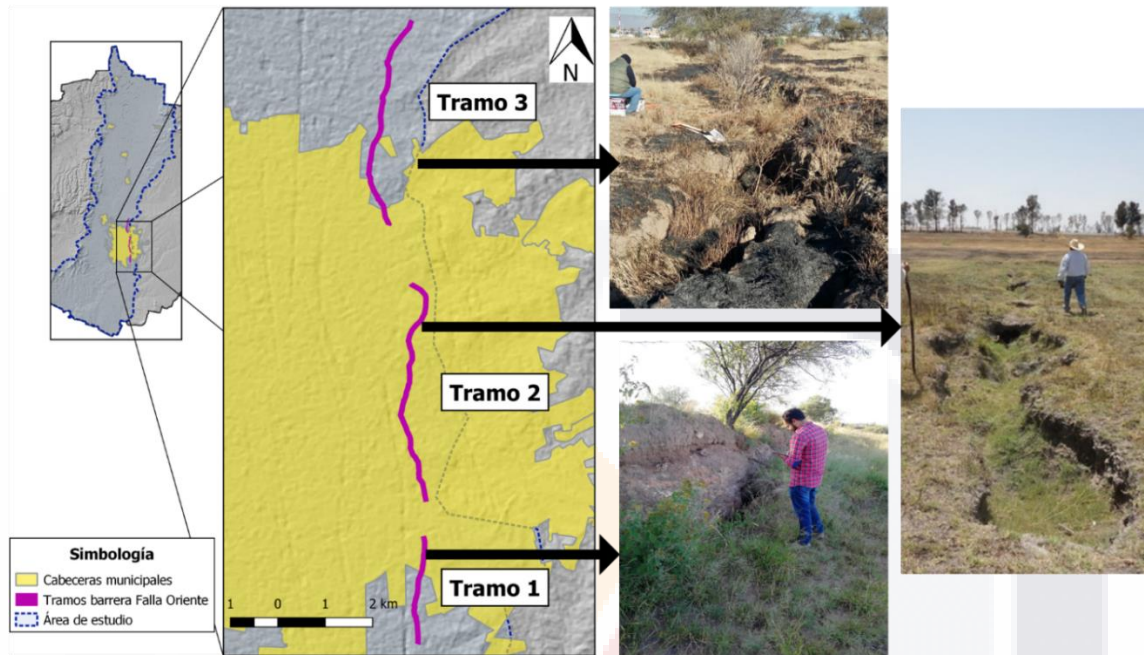


Figura 2. Tramos con comportamiento de barrera con desplazamientos.

A sí mismo, reconociendo la gran cantidad de discontinuidades menores dentro del valle, la caracterización de la falla Oriente puede aportar elementos para caracterizar el comportamiento hidráulico de fallas individuales más pequeñas. Esto podría ser parte de un análisis futuro, ya que como lo mencionan Bense et al. (2003) el conjunto de fallas menores puede tener un fuerte efecto acumulativo en la estructura interna del sistema acuífero debido al efecto hidráulico individual a pequeña escala en el flujo de agua subterránea, por lo tanto, proporcionan un efecto anisotrópico en la conductividad hidráulica a nivel regional. Es probable que la secuencia de sedimentos no consolidados sea cortada por fallas menores a poca profundidad. Sin embargo, los sedimentos más profundos se ven afectados por grandes fallas activas como la falla Oriente del valle de Aguascalientes.

Si bien este análisis muestra los primeros resultados del comportamiento de la falla Oriente, es necesario continuar con los estudios en esta área, especialmente en el análisis del flujo vertical al plano de falla, ya que esto podría generar sesgos locales, especialmente en zonas clasificadas como barreras, debido a la composición

heterogénea de la falla Oriente además se podrán aplicar métodos alternativos para corroborar estos resultados, por ejemplo, definir pozos de observación a distancias iguales en ambos bloques de la falla y tomar mediciones de ellos, ya que el número de pozos en esta región puede ser insuficientes.

Con la finalidad de integrar la evaluación de la recarga natural y el impacto de la falla Oriente dentro del valle de Aguascalientes, se implementó una modelación del acuífero el cual integra los resultados de estos dos factores, así como la estratigrafía, la dirección general del flujo y el bombeo.

Debido a que varias de las propiedades del agua subterránea son difícil de cuantificar, las fuentes de incertidumbre son variadas, en este caso las mayores variaciones se presentan en la zona metropolitana de Aguascalientes probablemente a que se han ido incrementando los pozos de extracción, pero no se cuenta con información detallada, lo que dificulta la modelación. Además, es necesario mencionar que en general, los errores pueden deberse a las mediciones en campo, tasas de bombeo, geometría del acuífero o la incertidumbre en el modelo conceptual a causa de simplificaciones de tiempo y espacio durante el proceso de modelación y luego a la calibración. Aun así, los factores que se evaluaron dentro de este estudio como la recarga, y la caracterización hidráulica de la falla Oriente disminuyen la incertidumbre.

Particularmente en los capítulos I y II, se trabajó con técnicas estadísticas para estructurar un mejor modelo hidráulico que ofrece un análisis hidrológico más acorde con las limitaciones de la información actual disponible. A pesar de ello es necesario implementar otros estudios enfocados a cada uno de los factores involucrados en el modelo, ya que la escases de información y la incertidumbre lo limita. Aun así, se debe agregar que, la construcción del modelo se considera satisfactoria, ya que modelar bajo escasez de información es complicado, y a pesar de ello, el modelo concuerda con los flujos regionales y enmarca la importancia de considerar parámetros como el comportamiento de las discontinuidades, simulado por elementos de conductividad menor al medio que la rodea.

Conclusión

En general, se logró modelar y simular el comportamiento del sistema del Acuífero Valle de Aguascalientes en donde los niveles calculados y medidos tienen una dispersión de 5 a 7.5 metros en los extremos y alrededor de 25 metros en el centro del valle, para un periodo de simulación de 32 años. Las condiciones modificadas para la calibración del modelo fueron las conductividades hidráulicas de las capas hidroestratigráficas con un valor final para la capa granular de 9.5×10^{-5} m/s y para la capa granular con contenido de arcilla 3.9×10^{-6} m/s. El evaluar factores específicos de la zona de estudio, como el análisis de recarga natural y el impacto de la falla Oriente dentro del valle, complementan al modelo.

De manera puntual, los resultados de mayor recarga se ubican en las partes norte y centro del valle y la más baja ocurre a lo largo de los límites norte y sur con rangos de 0.86 a 525.69 mm / año en el período de 1985 al 2015. Los resultados presentan similitud en volumen y espacio, con estudios previos. Es importante mencionar que durante las simulaciones la recarga no se ve reflejada de manera importante en el acuífero, probablemente porque esta es mucho menor a la extracción de agua subterránea. En lo que concierne al comportamiento hidráulico de la falla Oriente se aplicó un ajuste matemático derivado de la prueba t-student y de la variación de parámetros sugeridos en estudios previos que han demostrado ser indicadores del comportamiento hidráulico de una falla. Los resultados muestran que tres de siete zonas identificadas indican un comportamiento hidráulico de tipo barrera, con valores que oscilan entre los 5 y 18 metros de caída de carga hidráulica y de 4.7°C a 5.8°C en las variaciones de temperatura. Tres exhiben un comportamiento de tipo conducto a flujo horizontal, y una zona (la zona cuatro), un comportamiento indeterminado por datos insuficientes. La zona con las mayores variaciones en la temperatura medida y el nivel del agua subterránea es la zona 5, con una variación de temperatura media de 5.8°C y una disminución de la altura hidráulica de al menos 18 metros mostrando un comportamiento hidráulico complejo con un comportamiento hidráulico de tipo conducto en la dirección vertical (Hernández-Marín et al., 2017), pero un comportamiento de tipo barrera en la dirección horizontal o transversal. De manera general este análisis proporciona una forma sólida y poderosa de caracterizar el comportamiento de fallas sin invocar investigaciones hidrológicas elaboradas e invasivas. A partir de este análisis se determinaron 12,700 metros con comportamiento de barrera de 35,000 metros analizados de la falla Oriente. La inclusión del comportamiento hidráulico de la falla en

el modelo matemático enriquece la solución ya que en ningún trabajo previo se tenía contemplado.

Como nichos de investigación, se podían incluir escenarios alternativos, simulaciones a futuros e incrementar la interacción de las discontinuidades centrales con características propias o con datos referidos a la falla Oriente, así como las características hidráulicas y geométricas del río San Pedro. Hay una necesidad de información a nivel regional para la obtención de parámetros característicos del acuífero, por lo que convendría tener vinculación con instituciones gubernamentales y privadas para la realización de proyectos hidrogeológicos.

De manera general la perspectiva antrópica dentro mi tema de investigación se encuentra en darse cuenta de que, la mejor manera de aprovechar y contar con un futuro es a través del análisis del agua, principalmente en lugares con climas áridos o semiáridos y en proceso de industrialización, en donde la mayor parte de acuíferos en condición de sobre explotación, comparten características de subsidencia y fracturamiento, situación que ha afectado no solo la infraestructura sino el diseño urbano y en algunos casos modifica los flujos subterráneos y pone en riesgo la calidad de la reserva acuífera.

De esta manera, el platearse el análisis del comportamiento del acuífero, así como los factores directamente relacionados con este, es una herramienta fundamental para la toma de decisiones en el desarrollo de una sociedad, ya que, para atender mejor los cambiantes requerimientos de ordenación, es necesario estudiar las condiciones actuales e incluir un análisis apoyado en la dinámica ambiental real.

Referencias

- Alvarado V., Obagi A., 2008, Fundamentos de inferencia estadística, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería, 151-155.
- Allison, G. B., Gee, G. W., Tyler, S. W., 1994, Vadose-Zone Techniques for Estimating Groundwater Recharge in Arid and Semiarid Regions: Soil Science Society of America Journal, 58, 6-14.
- Apaydin A., 2010, Relation of tectonic structure to groundwater flow in the Beypazari region, NW Anatolia, Turkey. Hydrogeology J 18(6):1343–1356.
- Anderson, T. R., Fairley J. P., 2008, Relating permeability to the structural setting of a fault-controlled hydrothermal system in southeast Oregon, USA, Journal Geophysics Research., 113, B05402, doi:10.1029/2007JB004962
- Aranda-Gómez, J. J., 1989, Geología preliminar del Graben de Aguascalientes. Universidad Nacional Autónoma de México, Revista del Instituto de Geología, Revistas ,8, 22-32.
- Balek, J., 1988, Groundwater recharge concepts, in Simmers I. (eds) Estimation of Natural Groundwater Recharge. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 222. Springer, Dordrecht. 3-9.
- Barton, C.A., Zoback, M.D., Moos, D., 1995, Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. Geology 23, 683–686.
- Bense, V. F., Van Balen R. T., De Vries J. J., 2003a, The impact of faults on the hydrogeological conditions in the Roer Valley Rift System: an overview, Neth. J. Geosci./Geol. Mijnbouw, 82, 41–53.
- Bense, V. F., Van den Berg, E. H., Van Balen, R. T., 2003b, Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments; the Roer Valley Rift System, the Netherlands, Hydrogeol. J., 11, 319–332.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- Bense, V. F., Van Balen, R. T., 2004, The effect of fault relay and clay smearing on groundwater flow patterns in the Lower Rhine Embayment. *Basin Research*, 16, 397-399. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2004.00238.x
- Bense, V.F., Pearson, M.A., Chaudhary, K., You, Y., Cremer, N., Simon, S., 2008, Thermal anomalies indicate preferential flow faults in unconsolidated sedimentary aquifers. *Geophysical Research Letters*, 35, 1-6, DOI:10.1029/2008gl036017.
- Bear, J; Cheng, A., 2010, *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer.
- Berkowitz, B., (1995) Analysis of fracture network connectivity using percolation theory. *Math. Geol.* 27, 467-483.
- Box E.G., Hunter J.S., Hunter W.G., 2008, *Estadística para investigadores, Diseño, innovación y descubrimiento*, México: Reverte, 25-30
- Blanco Mercedes, E. I., y Castañeda Zavaleta M., 2017 "Directrices para el Modelamiento de Aguas Subterráneas en Perú. Aspectos Claves para el Desarrollo y Evaluación de Modelos Conceptuales y Numéricos", Reporte Técnico, DOI: 10.13140/RG.2.2.16265.49760.
- Caine, J.S., Evans, J. P., Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability, *Structure Geology*, 24, 1025, 1025-1028, [http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:FZAAPS>2.3.CO;2). Carrera-Hernández, J., Carreón-Freyre, D., Cerca-Martínez, M., Levresse, G. 2016, Groundwater flow in a transboundary fault-dominated aquifer and the importance of regional modeling: the case of the city of Querétaro, México. *Écoulement des eaux souterraines dans un aquifère transfrontalier fracturé et l'importance de la 17 modélisation régionale: le cas de la ville de Querétaro, au Mexique.*, 24(2), p373- 393.
- Carrillo-Rivera, J., 2000, Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, México. *Hydrogeology Journal*, 8(5), 503-520.

Chenini, I., Mammou A. B. El May M., 2010, Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management*, 24, 921-939.

Childs, E. C., 1960, The nonsteady state of the water table in drained land. *Journal of Geophysical Research*, 65(2), 780-782.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto del Medio Ambiente del Estado de Aguascalientes (IMAE), Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), 2008, La Biodiversidad en Aguascalientes: Estudio de Estado. México, D.F. ISBN: 978-970-9000-45-0., 43-53pp. <<https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EEB/pdf/ESTUDIO%20DE%20BIODIVERSIDAD%20EN%20AGUASCALIENTES.pdf>> Update: January 2018.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2018, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes. México D.F., Posted in *Diario de la federación* in January, 04, 2018., 8-23, 25-31pp. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329103/DR_0101.pdf Update: April 2018.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 2015, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Aguascalientes (0101), Estado de Aguascalientes. México D.F., Posted in *Diario de la federación* in April, 20, 2015, 13-15pp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) and Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2016, Estadísticas del Agua en México. México D.F., Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua, 13-15pp. <http://201.116.60.25/publicaciones/eam_2016.pdf>, Update: April 2018

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005, Evaluación externa del programa de suministro e instalación de medidores volumétricos y totalizadores en pozos de uso agrícola y pecuario en los acuíferos del Estado de Aguascalientes. In C. p. e. D. A. d. e. d. A. CODAGEA (Ed.). Aguascalientes, México, 3-8pp. <<http://www.aguascalientes.gob.mx/sedrae/see/infoestatales/2004/EvEstatalMacromedidores2004.pdf>> Update: May 2018.

Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2016, Estadísticas del Agua en México. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de: http://201.116.60.25/publicaciones/eam_2016.pdf.

Crosbie, R. S., Binning, P. J., Kalma, J. D., 2005, A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 41(1), 1-9.

Cuthbert, M. O., 2010, An improved time series approach for estimating groundwater recharge from groundwater level fluctuations. *Water Resources Research*, 46(9). 1-11.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., Amelung, F., 2014, Land subsidence in central México detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sens Environ* 140:94–106

Davatzes, N.C., Hickman, S.H., 2005, Controls on fault-hosted fluid flow; Preliminary results from the Coso geothermal field. *Geothermal Research Council Transactions*, paper, CA, p. 144.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2012, Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de los acuíferos Valle de Aguascalientes, clave 0101 en el Estado de Aguascalientes; Encarnación, clave 1422 en el Estado de Jalisco y Ojocaliente, clave 3212 en el Estado de Zacatecas. Aguascalientes, Aguascalientes, México. 06 de junio del 2012. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5249906&fecha=06/06/2012 Update: April 2018.

- Egholm, D. L., Clausen, O. R., Sandiford, M., Kristensen, M. B., Korstgård, J. A., 2008, The mechanics of clay smearing along faults. *Geology* 36(10):787–790
- Fetter, C. W., 2001, *Applied Hydrogeology*, P. Hall (ed), 4th ed, Upper Saddle River. p69- 95.
- Fossen H., Rotevatn, A., 2016, Fault linkage and relay structures in extensional settings—A review. *Earth-Science Reviews* 154 (2016) 14–28.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, P. Hall (ed.), Englewood Cliffs. p61.
- Ghayoumian, J., Mohseni Saravi M, Feiznia S., Nouri B., Malekian A., 2007, Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30, 364-374.
- González-Cervantes, N., Aranda-Gómez, J. J., Carranza-Castañeda, O., Ortega-Obregón, C., 2019, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 36, No. 2019, pp. 393-410.
- Guerrero-Martínez, L. Evaluación de la recarga natural del acuífero del valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Tesis de maestría, 176pp.
- Harbaugh, Arlen W., 2005, MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.
- Healy, R. W., Cook, P. G., 2002, Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91-109.
- Hernández-Marín, M., Guerrero-Martínez, L., Zermeño-Villalobos, A., Rodríguez- González, L., Burbey, T., J., Pacheco-Martínez, J., Martínez-Martínez S., I., González-Cervantes, N., 2018, Spatial and temporal variation of natural recharge in the semi-arid valley of Aguascalientes,

México. *Hydrogeology Journal*, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1819-x>

Hernandez-Marín, M., Pacheco-Martinez, P., Burbey, T. J., Carreon-Freyre, D. C., Ochoa-Gonzalez, G. H., Campos-Moreno, G. E., Lira-Gomez, P., 2017, Evaluation of subsurface infiltration and displacement in a subsidence-reactivated normal fault in the Aguascalientes Valley, México. *Environmental Earth Sciences*, 76:812, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7163-y>

Jie, Z., van Heyden, J., Bendel, D., Barthel, R., 2011, Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge calculations. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1487-1502.

Kattenhorn, S.A., Aydin, A., Pollard, D.D., 2000, Joints at high angles to normal fault strike: an explanation using 3-D numerical models of fault-perturbed stress fields. *J. Struct. Geol.* 22, 1–23.

Konikow, L.F., 2008, *Use of Numerical Models to Simulate Groundwater Flow and Transport*. US, Geological Survey, Reston, Virginia, USA.

Knipe, R. J., 1993, The influence of fault zones processes and diagenesis on fluid flow, in Horbury. A. D., and Robinson, A.G., eds., *Diagenesis and basin development: American Association of Petroleum Geologists Studies in geology* 36.p 135-148

Kresic, N., 2006, *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, CRC Press; Second Edition.

Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., & Iriondo, A., 2008, Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, Vol. 25, No. 3, 533-548p.

Manzocchi, T., Childs, C., Walsh, J.J., 2010, Faults and fault properties in hydrocarbon flow models. *Geofluids* 10, 94–113.

- Manna, F., Walton, K. M., Cherry, J. A., and Parker, B. L., 2017, Mechanisms of recharge in a fractured porous rock aquifer in a semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 555, 869-880.
- McDonald, M. and Harbaugh, A.W., 1988, A Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground-Water Flow Model. In: *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, U.S. Geological Survey, 588.
- Montgomery D. C., Runger G. C., 2013, *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*, México: Limusa Wiley, 295,392. Moore, S. D., 2000, *Basic practice of statistics*, New York: W.H. Freeman and company, 431-436.
- Müller, T., Osenbrück, K., Strauch, G., Pavetich, S., Al-Mashaikhi, K. S., Herb, C., Sanford, W., 2016, Use of multiple age tracers to estimate groundwater residence times and long-term recharge rates in arid southern Oman. *Applied Geochemistry*, 74, 67-83
- Pacheco-Martínez, J., Hernández-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, Á., Zermeño-De-León, M., Solís-Pinto, A., 2013, Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-180.
- Pacheco-Martínez, J., Cabral-Cano, E., Wdowinski, S., Hernández-Marín, M., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeño-de-León, E. M., 2015, Application of InSAR and Gravimetry for Land Subsidence Hazard Zoning in Aguascalientes, México. *Remote Sens* 7(12):17035–17050.
- Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes, (POEA), 2013, H Ayuntamiento del Municipio de Aguascalientes. Plan de Acción Climática Municipal Retrieved from <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Estatal/Aguascalientes/Todos%20los%20Municipios/wo84747.pdf>. > Update May 2018.
- Qin, D., Qian, Y., Han L., Wang Z., Li C., Zhao, Z., 2011, Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *Journal of Hydrology*, 405, 194-208.

- Reilly, T.E y Harbaugh, A.W., 2004, Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models”, U.S. Geological Survey (USGS), US.
- Rotevatn, A., Buckley, S.J., Howell, J.A., Fossen, H., 2009, Overlapping faults and their effect on fluid flow in different reservoir types: a LIDAR-based outcrop modeling and flow simulation study. AAPG Bull. 93, 407–427.
- Rotevatn, A., Fossen, H., 2011, Simulating the effect of subseismic fault tails and process zones in a siliciclastic reservoir analogue: implications for aquifer support and trap definition. Mar. Pet. Geol. 28, 1648–1662.
- Rushton, K. R., 1988, Numerical and Conceptual Models for Recharge Estimation in Arid and Semi-Arid Zones. In I. Simmers (ed.), Estimation of Natural Groundwater Recharge, 223-238.
- Sahuquillo, A., Cassiraga, E., Solera, A., Murillo, J. M., 2010, EDS. Madrid Instituto Geológico Minero de España, p398, ISBN 978-84-7840-852-8.
- Sinclair K. M., 2012, Australian Groundwater Modelling Guidelines, Waterlines Report Series No. 82.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., Cook, P. G., 2002, Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, 10(1), 18-39.
- Scanlon, B. R., Keese K. E., Flint A. L., Flint L. E., Gaye C. B., Edmunds W. M., Simmers I., 2006, Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. Hydrological Processes, 20, 3335-3370.
- Scanlon, B. R., Mukherjee, A., Gates, J., Reedy, R. C., Sinha, A. K., 2010, Groundwater recharge in natural dune systems and agricultural ecosystems in the Thar Desert region, Rajasthan, India. Hydrogeology Journal, 18(4), 959-972.
- Sharda, V. N., Kurothe, R. S., Sena, D. R., Pande, V. C., Tiwari, S. P., 2006, Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India. Journal of Hydrology, 329(1), 224-243.

- Simmers, I., 1998, Estimation of natural groundwater recharge. (eds) Estimation of Natural Groundwater Recharge. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 222. Springer, Dordrecht., 1-405.
- Sophocleous, M. A., 1991, Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects. *Journal of Hydrology*, 124, 229-241.
- Tritscher, P., Read, W. W., Broadbridge, P., 2000, Specific yield for a two-dimensional flow. *Water Resources Research*, 36(6), 1393-1402.
- Tiola, M. F., 2004, *Elementary Statistics*, México: Pearson Education, NC, 365-395.
- Universidad Autónoma de México (UNAM) and Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), 2002, Estudio Integral sobre la problemática del agua, subsidencia y sismicidad en el valle de Aguascalientes. Reporte no publicado. 1-433pp.
- United States Geological Survey, (USGS), 2019, MODFLOW https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects Revisado el 10 de Octubre 2019.
- United States Geological Survey (USGS), 2019, Manual de Publicaciones https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/Help/index.html?chd_time_variant_specified_head.htm Revisado el 10 de Octubre 2019.
- Vélez Otalvaro, M. V., 2004, Métodos para determinar la recarga de un acuífero. *Universidad Nacional de Colombia*, 11, 51-62.
- Wang, B., Jin M., Nimmo J. R., Yang L., Wang W., 2008, Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. *Journal of Hydrology*, 356, 209-222.
- Wallbraun, A., 1992, The impact of block-bounding faults on groundwater discharge in the Lower Rhine Embayment [in German], Ph.D. thesis, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule, Aachen.

Wels, C., 2012, Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities, British Columbia, Ministry of Environment.

Zermeño-Villalobos, A., 2016, Utilización de modelos numéricos para entender el rol de la zona vadosa en el proceso de recarga natural, Aguascalientes, Ags., Universidad Autónoma de Aguascalientes, Tesis de maestría, 160pp.





Anexo I

Estimation of natural groundwater recharge in the Aguascalientes semiarid valley, Mexico

Lilia Guerrero-Martínez¹, Martín Hernández-Marín^{2,*}, and Thomas J. Burbey³

¹ Posgrado en Ciencias de los Ámbitos Antrópicos, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, Mexico.

² Departamento de Geotecnia e Hidráulica, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, Mexico.

³ Department of Geosciences, Virginia Tech, 4044 Derring Hall, Blacksburg, VA 24061, USA.

*mhernandez@correo.uaa.mx

ABSTRACT

Groundwater recharge (GWR) is analyzed and evaluated within the Aguascalientes Valley by means of a modified linearized Boussinesq equation and the Water Table Fluctuations (WTF) technique. These techniques use the specific yield, water table variations and the sub-surface drainage of groundwater. The methodology is applied to the semiarid Aguascalientes valley, which contains a thick vadose zone. The combination of the analytical solution based on the Boussinesq equation and the WTF technique, allows the method to be applied in areas with deep groundwater levels, such as the Aguascalientes valley, without the need for high temporal resolution data. The data for the application of the method were provided by various government agencies and includes information on 145 wells positioned within the valley during the period 1985-2015. The specific yield and the transmissivity were integrated from the results of two previous investigations. Results indicate that the variation of recharge ranges from 0.86 to 525.69 mm/year in the analyzed period, with the highest recharge rates occurring in the north and center parts of the valley and is likely attributed to high specific yield and vertical hydraulic conductivity due to the presence of coarse permeable soils present in the area. Conversely, the lowest recharge rates were found to occur near the north and south borders of the valley.

Key words: groundwater recharge; Aguascalientes valley; Water Table Fluctuation; Boussinesq equation; groundwater drainage.

RESUMEN

En la presente investigación, la recarga de agua subterránea (GWR) se analiza y evalúa dentro del Valle de Aguascalientes mediante el ajuste a la ecuación linealizada de Boussinesq y la técnica Water Table Fluctuation (WTF), que involucra el rendimiento específico, la variación

del nivel freático y el drenaje subsuperficial de aguas subterráneas. La metodología se aplica al semiárido valle de Aguascalientes que contiene una zona vadosa espesa. La combinación de la solución analítica basada en la ecuación de Boussinesq y la técnica WTF permite que el método se aplique en áreas con niveles profundos de aguas subterráneas, como el valle de Aguascalientes, sin la necesidad de datos de alta resolución temporal. Los datos para la aplicación del método fueron provistos por varias agencias gubernamentales a través de la información de 145 pozos ubicados a lo largo del valle durante el periodo 1985-2015. El rendimiento específico se integró a partir de los resultados de dos trabajos anteriores, así como la transmisividad. Como resultado, la variación de la altura de recarga se obtuvo de 0.86 a 525.69 mm/año en el periodo analizado, las tasas de recarga más altas se presentan al norte y al centro del valle, probablemente atribuidas a un alto rendimiento específico y conductividad hidráulica debido a la presencia de suelos permeables gruesos presentes en el área, por otro lado, las fronteras norte y sur del valle tienen las tasas de recarga más bajas.

Palabras clave: recarga de agua subterránea; valle de Aguascalientes; Water Table Fluctuation; ecuación de Boussinesq; drenaje subterráneo.

INTRODUCTION

Historically, humanity has faced the complication of obtaining water because it is a necessary and indispensable resource in our daily activities. In many locations, surface water for human consumption has diminished over the last several decades leading to a necessary increase in groundwater extraction, particularly in many arid and semi-arid regions. For this reason, many semiarid regions have experienced a considerable reduction of groundwater storage as pumping has greatly exceeded natural recharge. Subsequently, researchers in these critical regions are focusing on studies aimed at understanding recharge processes and determining effective ways in which recharge

can be enhanced naturally (Carrillo-Rivera, 2000, Carrera- Hernández *et al.*, 2016, Manna *et al.*, 2017, Müller *et al.*, 2016; Scanlon, *et al.*, 2010; Sharda, *et al.*, 2006). Groundwater recharge (GWR) refers to the entry of meteoric water across the water table after first entering the soil zone. Recharge crossing the water table potentially enhances aquifer storage. GWR can occur in two ways, by a downward movement due to the gravity forces in the form of runoff and infiltration or by horizontal movement, which generally occurs as lateral contributions of groundwater flow from adjacent aquifers. Factors such as rate and direction of GWR depend on the hydraulic parameters of the geologic layers that make up the soil profile and aquifer systems in question (Balek, 1988). Groundwater recharge is one of the most important parameters in quantifying sustainability of aquifer systems. Several different methods have been employed to evaluate the quantity of recharge entering aquifer systems. These include physical and hydrogeochemical methods and numerical models (Scanlon *et al.* 2006, Simmers 1998, Scanlon *et al.* 2002). Other study factors such as: slope, depth to groundwater, infiltration rate, are used to determine the areas most suitable for groundwater recharge (Ghayoumian *et al.* 2007) or in the application of geographic information systems (SIG) and numerical modeling (Chenini *et al.* 2010). These factors are also used in the study of the temporal and spatial variation of recharge, along with the application of natural or artificial tracers (Hernández-Marín *et al.* 2018, Allison *et al.* 1994, Sophocleous 1991, Wang *et al.* 2008, Qin *et al.* 2011). It is worth mentioning that some techniques do not attempt to quantify an actual GWR rate, but rather estimate potential GWR, a term that refers to the water that infiltrates but does not instantaneously contribute to the aquifer storage, but rather where subsurface drainage actively participates so that the net storage change is not easily quantifiable. For example, in areas with a thick unsaturated zone, the direct influence of the rainfall on the water table and then on GWR varies both temporally and spatially depending on the hydrogeological conditions of the subsoil, precipitation pattern (*e.g.* intensity and duration) and evapotranspiration, as well as the geomorphological characteristics of the surface (Rushton, 1988, Scanlon *et al.*, 2002). Taking these aspects into consideration, it becomes important to quantify the drainage in a rigorous manner to minimize the error in the quantification of an actual recharge rate that affects overall aquifer storage (Cuthbert, 2010).

In recent years, analytical techniques have been proposed for the evaluation of GWR. Many of these approaches assume that temporary changes in the groundwater level are controlled by two main factors: the balance of recharge and net drainage of groundwater (Crosbie, *et al.*, 2005; Cuthbert, 2010; Jie, *et al.*, 2011). These two factors can be applied to GWR when the aquifer systems are separated from the surface by a thick vadose zone. In this way, the potential recharge of aquifers under known climatic conditions depends mainly on the infiltration from surface water bodies and the lateral contributions.

The aim of this research is to evaluate the potential GWR by applying an analytical adjustment of the Water Table Fluctuation (WTF) technique, in combination with the Boussinesq equation for the quantification of drainage. This methodology is applied to the aquifer of the Aguascalientes Valley, where the territory is classified as semi-arid (POEA, 2013) and 94% of water use originates from underground sources (CONAGUA and SEMARNAT, 2016). The WTF method is based on two intrinsic factors of the aquifer: (1) variations of the static water levels and (2) specific yield. The Boussinesq equation is related to hydraulic conductivity and aquifer thickness (or transmissivity). A further goal is to create a recharge map containing isovalues over the study area and the variations in the recharge isovalues will be discussed in the context of the overall hydrogeology of the region. This analysis will raise awareness about the sustainable management of the local aquifer, as well as to help in decision-making of actions

such as the establishment of waste disposal areas, or the delimiting of areas vulnerable to groundwater pollution and to better understand their possible occurrence.

CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA

The study area corresponds to the valley of Aguascalientes in the state with the same name, occupying a strip having a North-South orientation and extending a length of approximately 80 km and a width of 25 km as shown in Figure 1. This zone is in a tectonic graben as described by Aranda-Gómez (1989).

The San Pedro River represents the main hydrographic feature of the Valley and flows from north to south almost through the center of the valley. The main land uses in the study region include agriculture with intensive irrigation and livestock (63%), natural pasture (16%), shrubs (15%), oak forest (3.9%), mesquites (0.2%), with the remaining 1.9% corresponding to urban areas, where more than 85% of the population of the state resides (CONABIO *et al.*, 2008, INEGI, 2018). It is important to mention that of the 50 thousand hectares dedicated to the agricultural activities within the valley, almost the entire area is irrigated with groundwater, although there is an important potential for the reuse of groundwater from irrigation, (CONAGUA, 2005; Pacheco-Martínez *et al.*, 2013). In terms of climate, 68% of the territory of Aguascalientes is semi-arid with an average maximum temperature of 25 °C, and an annual average rainfall of 526 mm and annual average potential evaporation of 2,200 mm. The rainy season occurs mainly during summer, with only occasional rainfall during the other seasons of the year (INEGI, 1993).

Geomorphologically, the study area is relatively flat with small hills distributed within the area and increasing slopes toward the mountains. The valley is located between the Tepezalá mountains of the east and the Sierra Fría mountains in the west. The average altitude of the Aguascalientes Valley is 1,900 m. The valley includes two important physiographic provinces. The Mesa Central is in the east, while the Sierra Madre Occidental is to the west and consists of valleys and elongated mountain ranges oriented mainly NW-SE and NE-SW (CONAGUA, 2018). According to UNAM-UAQ (unpublished data, 2002) a predominance of alluvial and fluvial deposits occurs within the valley with the topmost sedimentary sequence composed primarily of detrital rocks derived from unconsolidated alluvial materials and classified as clays, silts, sands and gravels according to their grain size. The general stratigraphic sequence was determined through vertical electric soundings (SEVs) that were performed throughout the study area (Zermeño-Villalobos, 2016). Beneath the detrital rocks it was determined that the unconsolidated deposits exhibit a variable thickness from a few meters in the periphery of the valley, to up to 380 meters in the center (Hernández-Marín *et al.* 2018). Approximately 200–300 meters of compacted lithified sediments (conglomerates and sandstones) and fractured igneous rocks (rhyolites and ignimbrites) occur below the fluvio-alluvial refill that occupies the center of the valley. The compacted conglomerates outcrop mostly in the west, while igneous rocks can be observed in the east, conforming to the orientation of the mountain ranges. An analysis of the lithology of the unconsolidated central sediments was evaluated based on the SEV results and the lithological records of deep well logs, which suggests a stratigraphic configuration of coarse sediments such as gravel and sand, with smaller portions of clay and silt. Groundwater is determined to flow from north to south according to water level observations from measured wells. The chief aquifer of the Aguascalientes valley is considered unconfined (DOF, 2012), but with a thick vadose zone. As expressed by some local drilling engineers (Fuentes-López, expert in geophysics and geology,

Anexo II

Proc. IAHS, 97, 1–6, 2020
https://doi.org/10.5194/piahs-97-1-2020
© Author(s) 2020. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Hydraulic behavior of subsidence-induced surface discontinuities in the hydrogeology of the Aguascalientes valley

Lilia Guerrero-Martínez¹, Martín Hernández-Marín², and Ángel Eduardo Muñoz-Zavala³

¹Departamento de Geotecnia e hidráulica, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, México

²Departamento de Geotecnia e hidráulica, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, México

³Departamento de Estadística, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20131, México

Correspondence: Lilia Guerrero-Martínez (lilia.guerrero@edu.uaa.mx)

Published:

Abstract. The impact of faults and fissures (discontinuities) on the groundwater flow has become important in several parts of the world because the heterogeneous and anisotropic distribution of permeability in fault zones is difficult to characterize. Based on this, we propose an analysis of patterns of parameters measured in groundwater, under the premise that the observed anomalies can be indicators of the hydraulic behavior of the flow in the direction perpendicular to the fault plane. In this context, if the discontinuities are sealed, they behave as hydraulic barriers, causing variation in the continuity of the parameters across the fault plane. Conversely, when faults are a conduit, they appear to have a small or null variation in the distribution of the parameter measurements. The impact of discontinuities in groundwater flow in a zone with a large number of faults and fissures such as that of the Aguascalientes valley is being studied using a graphical-correlation analysis with the revision of 230 wells, through the measurement of parameters such as temperature and static levels across discontinuities, in order to determine the hydraulic behavior of the faults. This investigation considered values over 4 °C for geothermal variations and 10 m for hydraulic-head changes to define fault behavior. Results show three zones through mapping analysis, where the fault presents barrier behavior and where the hanging block represents high values; these anomalies are much higher than the average across the valley and indicate the propensity for the fault to restrict horizontal flow. In conclusion, the Oriente fault presents complex behavior of a barrier–conduit system along the fault. This analysis gives a robust way to describe fault behavior without referring to elaborate and invasive hydrological investigations.

1 Background

In general, in areas with the presence of active surface discontinuities, the permeability of the fault zone (the zone mechanically affected by the discontinuity) is usually different to that of the host rock. For instance, studies of hydrocarbon reservoirs have shown that individual fault zones can act as a seal for underground flow in some areas, delaying movement of the fluid, but in other zones they can behave as a conduit to fluid flow across the fault plane. In general, this vari-

able behavior is the result of a complex function of host rock lithology, fault dynamics and weathering processes; therefore, fault zones are heterogeneous structures that cannot simply be defined as barriers or conduits for fluid flow in space or time (Haneberg, 1995; Yielding et al., 1999).

In particular, the hydraulic behavior of a fault zone will depend on different factors, such as the percentage of clay within the fault core (Apaydin, 2010), the structures of the damage zone which is defined as an area with densely frac-

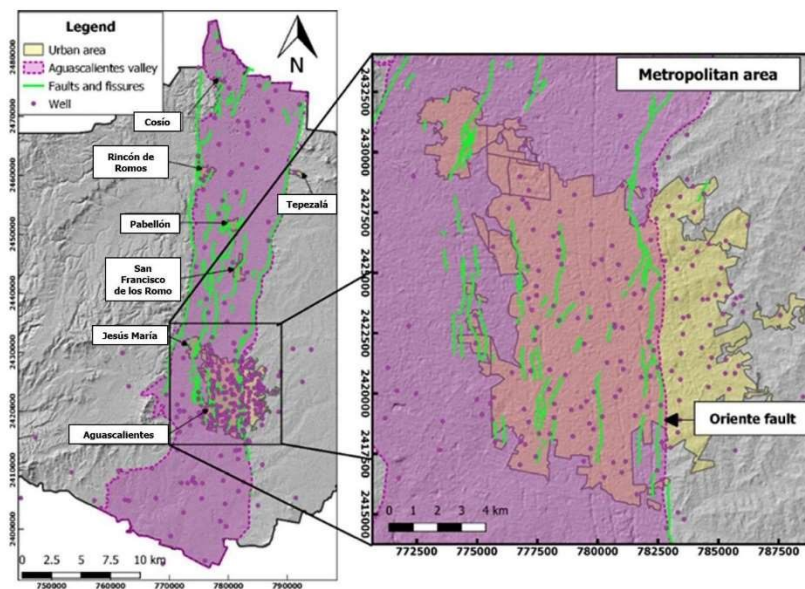


Figure 1. System of faults and fissures and the location of production wells for the Aguascalientes valley (SIFAGG, 2017; Conagua, 2017).

tured rocks in the vicinity of the fault, which can greatly improve permeability and consequently the flow of fluid through the area's (Caine et al., 1996) activity or inactivity, the age, the potential dissolution or precipitation of chemical substances transported by the flowing water, and the stress regime to which the structure is subjected (Hernández-Marín and Burbey, 2009; Hernández-Marín et al., 2017). However, these factors that define a particular hydraulic fault's response are difficult to quantify. One of the techniques that provide qualitative elements for defining the hydraulic behavior is the mapping of parameters measured in the groundwater, which can reveal anomalous variations across a fault zone. For instance, recent investigations in predicting the hydraulic properties of the fault zone are employed by different investigators (i.e., Bense et al., 2003, 2008; Anderson and Fairley, 2008), in which the authors based their research on the elaboration of detailed profiles. These profiles show anomalies of the hydraulic heads and geothermal variations. These investigations employ critical values of 4 °C for geothermal variations and 10 m for hydraulic heads; the changes define the faults as a barrier or conduct. The analysis of hydraulic-fault response based on graphical representations can give an overview of the hydrological conditions around several faults, where the parameters measured in the groundwater, combined with the available geological information on the area, can better explain the observed variation in the hydraulic properties of failures. The objec-

tive of this work was to perform a two-parameter graphical-correlation analysis that characterizes the hydraulic behavior of the faults regarding temperature and hydraulic heads. This analysis provides a better understanding of the aquifer system of the Aguascalientes valley.

2 Description of the study area

The study area corresponds to the metropolitan area of the state of Aguascalientes, within the valley of Aguascalientes. At present, enormous pressure is on the resources and groundwater, in part due to the semi-arid condition of the valley (Hernández-Marín et al., 2018), the low volume of surface water which is used mostly for agriculture, and the increasing need for municipal and industrial services. This generates problems directly associated with overexploitation including, for instance, the increase of heavy metals in the water due to the extraction of deep-rooted water and the surface deformation observed as subsidence and fracturing (Pacheco-Martínez et al., 2013). The intensive pumping has caused a decrease in water levels, especially under the city of Aguascalientes, favoring the appearance of surface discontinuities. As observed on the maps of fissures and faults periodically published by the local government (SIFAGG, 2017), the discontinuities within the valley are parallel to the western and eastern regional faults (Fig. 1), which are believed

Anexo III

Detailed Status Information

Manuscript #	EEG-2358R
Current Revision #	1
Other Version	EEG-2358
Submission Date	2020-03-26 13:19:00
Current Stage	Under Review
Title	A STATISTICAL APPROACH TO DETERMINE THE IMPACT OF A FAULT ON GROUNDWATER FLOW
Running Title	USING WATER TEMPERATURE AND GROUNDWATER
Manuscript Type	Article
Corresponding Author	Dr. Marin Hernandez Marin (Universidad Autónoma de Aguascalientes)
Contributing Authors	Ms. Lilia Guerrero Martinez , Dr. Ángel Muñoz Zavala , Thomas Burbey
Abstract	<p>Previous investigations have shown that geologic faults can have direct and profound influence on groundwater flow. Faults have been shown to act as hydraulic barriers to lateral groundwater flow. Understanding and quantifying the local hydrologic parameters that can be used to accurately identify fault behavior is an important step in characterizing aquifer systems. The high hydraulic gradients induced by pumping groundwater across faults, and the analyses of highly variable groundwater temperatures vicinity of a fault, are shown here to be important indicators of fault behavior and identify whether faults behave as barriers to transverse or even vertical flow. Variable magnitude of hydraulic parameters in both blocks along a fault trace denotes in various zones barrier or conduit behavior. In this investigation, large temperature and hydraulic gradients are mapped across the Oriente Fault in the Aguascalientes Valley, central Mexico, from information provided from 268 pumping wells. Graphical analysis is used to first establish 8 zones along the length of the Oriente fault and then a second analysis invokes a student's t-test to compare the means of water temperature and groundwater levels. The results of this analysis suggest that the hydraulic behavior of the Oriente fault is variable, as three of the eight zones indicate that the fault behaves as a barrier to lateral groundwater flow, four zones indicate that the fault behaves as a conduit, and one zone it is undetermined. This analysis provides a powerful way to characterize fault behavior without invoking invasive hydrological investigations.</p>
Editor	Abdul Shakoor
Keywords	Groundwater flow impact from faults, student's t-test, geothermal anomalies, hydraulic gradient, Aguascalientes Valley, Oriente fault
Manuscript Topics	Ground Water Hydrology, Hydrogeology, Modeling/Statistics
Conflict of Interest	NO , there is no conflict of interest that I should disclose, having read the above statement.

