

Controles geológicos en el flujo de agua subterránea y distribución de volúmenes de extracción asociados a una estructura volcánica compleja

Geological controls upon groundwater flux and pumping rates distribution associated to a complex volcanic structure

Marcia Barrera-de-Calderón^{1,2,*}, Jaime Garfias¹, Richard Martel³, Javier Salas-García⁴

¹ Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA), Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, 50130, Edo. México, México.

² Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador. Final Avenida Mártires del 30 de julio, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador.

³ Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE), Québec, QC G1K 9A9, Canadá.

⁴ Facultad de ingeniería (FI-UAEM), Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, 50130, Edo. México, México.

* Autor para correspondencia: (M. Barrera-de-Calderón) marciadecalderon@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Barrera-de-Calderón, M., Garfias, J., Martel, R., Salas-García, J., 2021, Controles geológicos en el flujo de agua subterránea y distribución de volúmenes de extracción asociados a una estructura volcánica compleja: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73 (1), A170820. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a170820>

Manuscrito recibido: 29 de Septiembre de 2019

Manuscrito corregido: 24 de Marzo de 2020

Manuscrito aceptado: 14 de Agosto de 2020

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El conocimiento del flujo de agua subterránea es de suma importancia para la planificación sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones con demandas crecientes de agua. En el presente estudio, la distribución de los materiales geológicos y la geología estructural han sido integradas en un Modelo Hidroestratigráfico Tridimensional (THM) para evaluar el comportamiento del flujo de agua subterránea en el acuífero de San Salvador, localizado en la porción oriental del volcán de San Salvador. La información geológica fue analizada, clasificada, reinterpretada y correlacionada a partir de informes de perforación de pozos y del mapa geológico nacional para agrupar capas con características geológicas similares, las cuales fueron relacionadas con sus propiedades hidráulicas para definir las Unidades Hidroestratigráficas (UHE) que conforman el acuífero. En el dominio de las UHE, se evaluó la distribución de las fallas, conductividad hidráulica y rendimiento de los pozos existentes en el acuífero para evaluar su relación con el flujo de agua subterránea. El modelo evidenció la existencia de seis unidades hidroestratigráficas (UHE) intercaladas y formadas por piroclasto y toba con la conductividad hidráulica (K) más baja de 10^{-2} a 1 m/día, lava basáltica y andesítica fracturada con valores de K entre 1 y 10^1 m/d, y escoria con K más alta de 10^1 hasta aproximadamente 10^3 m/día. El modelo también mostró el desplazamiento de los bloques asociados al graben central en la Zona de Falla de El Salvador (ZFES) particularmente en el sur y este de la zona de estudio.

ABSTRACT

Groundwater flux knowledge is of supreme importance for sustainable water resources planning, mainly in highly rising water demand regions. Distribution of geologic material and structural geology have been incorporated in a Tridimensional Hydrostratigraphic Model (THM) in order to assess groundwater flow occurrence in San Salvador aquifer, located in the east portion of San Salvador volcano. Geologic data have been analyzed, classified, reinterpreted and correlated from bore drilling reports and geology map of the zone to define layers with similar geologic characteristics. These layers were related with their hydraulic properties in order to define Hydrostratigraphic Units (HSU) in the aquifer. Faults distribution, hydraulic conductivity and water rate production in wells were spatially analyzed and correlated for assessing the groundwater occurrence. The model showed the existence of six interbedded HSU formed by pyroclastic and tuff material with the lowest hydraulic conductivity (K) from 10^{-2} – 1 m/d, fractured andesitic and basaltic lava with K values between 1 – 10^1 m/d, and volcanic scoria with the highest K from 10^1 to around 10^3 m/d. The model also showed the displacement of blocks associated to Central Graben in the Zone Fault of El Salvador (ESFZ), specially at south and east of the study area. Results showed that the low production Cuscatlán pyroclastic and tuffs material HSU extends throughout the study area and it is exploited by most of productive water wells in the Metropolitan Area of San Salvador (AMSS). While Cuscatlán and San Salvador lavas HSU are less extensive, locally exploited, even though they are more productive and are classified as good aquifers, mainly near geologic faults. Meanwhile, Plan de La Laguna Escoria HSU is small, nevertheless, is the most productive of the area and densely fractured. Furthermore, there are four

Los resultados indican que la UHE de baja producción de material piroclástico y toba se extiende en toda la zona de estudio, y que es aprovechada por la mayoría de los pozos de explotación en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Mientras que las UHE de lavas de Cuscatlán y San Salvador son menos extensas y localmente aprovechadas; sin embargo, presentan mayores caudales, principalmente cerca de fallas geológicas. Por su parte, la Escoria del Plan de La Laguna es una UHE localizada, pero la más productiva de la zona y se encuentra densamente fracturada. Adicionalmente, hay cuatro fallas importantes que pueden ser consideradas como potenciales conductos de agua subterránea y una que se comporta como barrera de flujo horizontal. Las fallas reflejan influencia en el flujo de agua subterránea cuando intersectan a flujos de lava; por el contrario cuando intersectan a materiales porosos, esta influencia no fue evidenciada. Este estudio proporciona nuevos elementos al conocimiento de la distribución espacial y aprovechamiento de los materiales permeables en el acuífero de San Salvador y podría respaldar algunas decisiones para el manejo sostenible del agua subterránea, especialmente aquellas orientadas a las zonas de nuevos aprovechamientos. Esta metodología se podría aplicar en acuíferos con condiciones similares de datos escasos y múltiples fuentes de información.

Palabras clave: Acuífero de San Salvador, modelo hidroestratigráfico, acuífero volcánico fracturado, fallas en flujo de agua subterránea, Zona de Falla El Salvador.

important faults in the zone that function as conduits and other fault that function as a barrier. Faults exhibit influence on groundwater flux when they intersect lava flows, conversely, when porous materials are intersected by faults, groundwater flux remains the same. This model gives new insights about the spatial distribution and exploitation of the permeable materials in San Salvador aquifer area and could support some decisions for sustainable groundwater management, mainly those focus on new water development zones. This methodology could be applied in aquifers with similar conditions of poor and multisource data.

Keywords: San Salvador aquifer, tridimensional hydrostratigraphic model, aquifer in fractured volcanics, faulting on groundwater flux, El Salvador Fault Zone.

1. Introducción

El entendimiento de los sistemas de flujo es esencial para la gestión de los recursos de agua subterránea (Anderson y Woessner, 1992; Ochoa-González *et al.*, 2015). En Centroamérica, los depósitos volcánicos son predominantes (Williams y Meyer-Abich, 1955; Meyer-Abich, 1960; Weyl, 1961; Reynolds, 1980; Hernández, 2008) y conforman los acuíferos que suplen la demanda de agua de su población (Ballesteros *et al.*, 2007). Las principales ciudades de los países centroamericanos se encuentran asentadas en valles originados por la actividad volcánica de la zona. En El Salvador, los depósitos volcánicos que comprenden el acuífero de San Salvador, son de gran importancia para el abastecimiento de la población de la ciudad del mismo nombre (Barrera de Calderón, 2010). Este acuífero se localiza en una zona de fuerte actividad tectónica regional y local que causa rompimiento de la corteza en un complejo sistema de fallas y fracturas que podrían influenciar el flujo de agua subterránea del área.

La conceptualización del funcionamiento del sistema de flujo en un acuífero volcánico y fracturado requiere, por una parte, de un claro entendimiento de la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas (Ahmed, 2009). Por otra parte, el estudio detallado de las características hidráulicas asociadas a las zonas de falla, las cuales, según Bense *et al.* (2013) pueden realizarse a partir de estudios focalizados en la superficie (desde el punto de vista de los geólogos estructurales), o de estudios focalizados en la subsuperficie (realizados por hidrogeólogos). En regiones poco estudiadas desde el punto de vista hidrogeológico, estos estudios se vuelven retadores y complejos, ya que involucran un fuerte trabajo de recolección, análisis y clasificación de información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica que se encuentra dispersa en distintas formas y cantidades (Fulton *et al.*, 2005; Sanz *et al.*, 2009; Di Salvo *et al.*, 2012).

Varios autores, por ejemplo Carle *et al.* (1998); Weissmann *et al.* (1999); y He *et al.* (2014) consideran que la distinción de las unidades

hidroestratigráficas involucra dos limitantes: la primera, relacionada con la información, la escasez, dispersión y multiplicidad de fuentes de información; la segunda, relativa a la heterogeneidad del ambiente físico que se va a caracterizar. Esta heterogeneidad, generalmente está acompañada de anisotropía en sistemas fracturados (Berkowitz, 2002; Bense y Person, 2006; Bense *et al.*, 2013), situación que debe ser enfrentada para entender el comportamiento de estos acuíferos.

La información geológica en regiones donde el conocimiento de la subsuperficie aún se encuentra en etapa temprana, viene principalmente de fuentes como los informes de perforación de pozos con fines de abastecimiento de agua (Moya *et al.*, 2014; Høyer *et al.*, 2015; Pham y Tsai, 2017). Estos documentos pueden proveer importante información respecto de la variabilidad vertical del material geológico, pero solamente limitada de la variabilidad lateral (Weissmann *et al.*, 1999; Muldoon *et al.*, 2001; Ahmed, 2009). Además, se debe enfrentar la variabilidad de la calidad de información (Ahmed, 2009; Høyer *et al.*, 2015), la cual demanda procesos de control de calidad que proporcionen datos confiables para elaborar los modelos (Ross *et al.*, 2005; Friedel, 2016; Pham y Tsai, 2017).

Bense *et al.* (2013), considera que la información contenida en estos informes es de utilidad para evaluar fallas a escala regional. De acuerdo a de Marsily *et al.* (2005), la heterogeneidad puede ser enfrentada a través de la definición de características geológicas similares. Algunos métodos que han sido utilizados para modelar la heterogeneidad y la conectividad espacial de la hidroestratigrafía incluyen: estocásticos y geoestadísticos (Carle y Fogg, 1997; Sanz *et al.*, 2009; Ahmed, 2009; Travelletti y Malet, 2012), interpretaciones estratigráficas de los ciclos deposicionales (Muldoon *et al.*, 2001; Monreal *et al.*, 2011; Moya *et al.*, 2014; Taylor *et al.*, 2018); y aprendizaje automático (Friedel, 2016).

Pese a que hoy en día existen softwares robustos como RockWorks, Geological Process Modelling (GPM), Georeka, los resultados que se obtienen

dependen fuertemente de la distribución de los datos de entrada y de la densidad de los mismos en el dominio del modelo. Cuando el análisis incluye las fallas, el problema se complica. En muchos casos, aunque se tenga una cantidad “suficiente” de datos de entrada, su distribución no es uniforme. Por lo tanto, quedan zonas con poca información, las cuales resultan menos confiables luego del proceso de interpolación (Moya *et al.*, 2014). En esos casos, se hace necesario un análisis adicional que ajuste los resultados del modelo mediante la evaluación de las condiciones de entrada y de las zonas vecinas, que provea una aproximación simplificada pero confiable de la distribución espacial de las UHE y de las fallas en el dominio del modelo. Esta es la base para la interpretación del modelo de flujo de agua subterránea.

Las zonas de fallas pueden comportarse como conductos o actuar como barreras hidráulicas, deteniendo y cambiando el sentido del flujo (Caine *et al.*, 1996; Rawling *et al.*, 2001; Bense *et al.*, 2013; Moya *et al.*, 2014). Algunos casos de fallas que actúan como conductos son presentados por Garven *et al.*, (1999); Lin *et al.* (2014) y Moya *et al.* (2014). Además, se han reportado fallas actuando como barreras por parte de Lin *et al.* (2014) en Table Mountain Group, Sur Africa; y Pham y Tsai (2017), en el sistema acuífero Baton Rouge, Louisiana, Estados Unidos. El gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica y las tasas de flujo, además de la estructura de las fallas, son parámetros y características de las zonas de fallas que han sido utilizadas para identificar el comportamiento hidráulico conductivo de las fallas (Berkowitz, 2002; Bense *et al.*, 2013).

Este artículo tiene como objetivo la evaluación de los controles geológicos que dominan el flujo de agua subterránea del acuífero de San Salvador, a partir de la integración de la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas en un modelo tridimensional, la geología estructural y los parámetros hidráulicos de dichas unidades. Con este trabajo se espera contribuir al mejor entendimiento del funcionamiento de este acuífero volcánico y proveer información relevante para su manejo sostenible.

2. Contexto del área de estudio

2.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL

La zona de estudio está delimitada por la subcuenca media del río Acelhuate, superficie que se extiende en aproximadamente 362 km². Dentro de esta zona se encuentra el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), que incluye a San Salvador, la capital de El Salvador y ciudad más importante del país. La subcuenca se localiza en el centro del país y, a su vez, en el centro-sur de Centro América; tal y como se muestra en la Figura 1. La topografía de la zona se caracteriza por fuertes pendientes al sur y suroeste con una elevación máxima de 1917 msnm en el volcán activo de San Salvador; mientras que al norte el terreno se vuelve cada vez más plano, descendiendo hasta una elevación de 359 msnm.

El clima de la zona es tropical, la precipitación media anual varía desde 1731 mm/año, en la

parte baja, hasta 2141 mm/año en la parte alta. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 16.3 °C y 23.4 °C. El área se encuentra bordeada por importantes accidentes geográficos (Schmidt-Thomé, 1975), entre los que sobresalen el volcán de San Salvador, caldera de Ilopango, conocida como lago de Ilopango (Figura 2), cono efusivo y domos extrusivos de San Jacinto, el cono de escoria de Antiguo Cuscatlán, y cordillera del Bálsamo (Schmidt-Thomé, 1975; Lexa *et al.*, 2012; Hernández y Jicha 2019).

Los principales usos del suelo que se distinguen en la región son zonas urbanas, comerciales e industriales, en donde se alberga alrededor de 1.6 millones de habitantes, equivalentes al 27.3% de la población de El Salvador. También hay sembradíos de café, principalmente en las laderas del volcán de San Salvador y cordillera del Bálsamo; caña de azúcar y granos básicos, desarrollados en la zona baja, al norte y este de la región. El área urbana representa el 32.3 % de

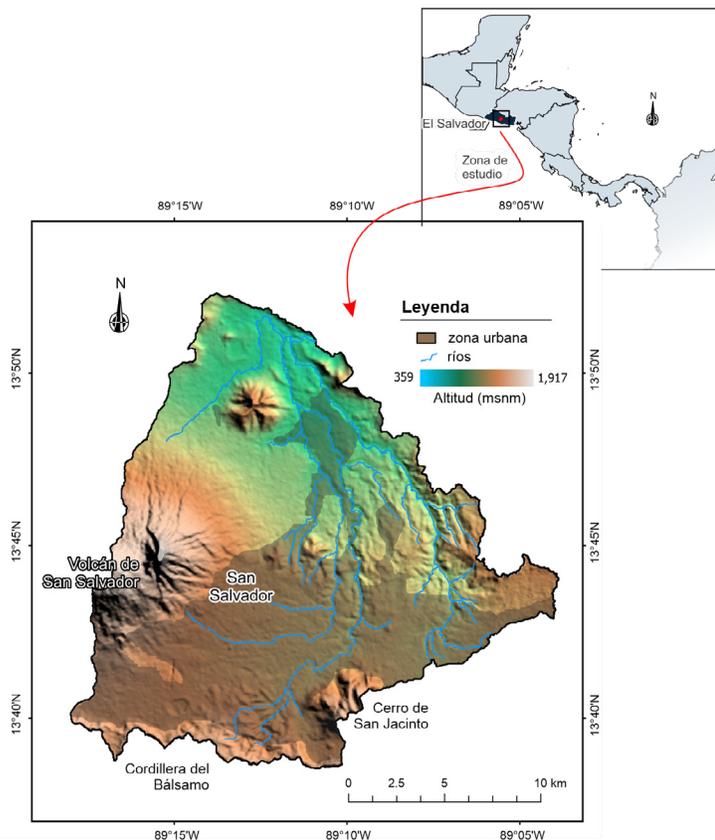


Figura 1 Ubicación de la zona de estudio en la región central de El Salvador y Centroamérica, mostrando accidentes geográficos que dan forma a la subcuenca del río Acelhuate.

la zona de estudio (MARN y OPAMSS, 2012), y según ANDA (2016), su abastecimiento público de agua en el año 2016 dependía en un 41.7% del acuífero de San Salvador (no se contabilizan las extracciones privadas), lo cual representa un volumen de 71.76 Mm³. Esta condición genera un alto interés de distintos actores para conocer el comportamiento del acuífero que brinde alternativas de manejo orientadas a la seguridad hídrica de la zona.

2.2. ENTORNO GEOLÓGICO

2.2.1. ORIGEN DE LOS MATERIALES QUE CONFORMAN EL ACUÍFERO DE SAN SALVADOR

Diversos autores (Williams y Meyer-Abich, 1955; Meyer-Abich, 1960; Weyl, 1961; Reynolds, 1980; Hernández, W., 2008), explican que los fenómenos que dieron forma a los materiales en los cuales se encuentra el acuífero de San Salvador fueron de carácter tectónico, volcánico y erosivo. Tres formaciones, en orden de antigüedad, se distinguen en la zona de estudio: Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador (Figura 2) (Williams y Meyer-Abich, 1955; Weber et al., 1974; Reynolds, 1980; Pedrazzi et al., 2019). Estas consisten en una secuencia de materiales volcánicos del Plioceno al Holoceno (Lexa et al. 2012; Canora et al. 2014; Hernández y Jicha 2019).

En el período posterior al Plioceno de la era Terciaria se produjeron actividades de índole tectónico; durante esta etapa los materiales volcánicos depositados en el Terciario fueron drásticamente dislocados por fallamientos verticales. Posteriormente, grandes bloques de la corteza que constituyen el basamento del acuífero sufrieron un ascenso y otros experimentaron asentamientos, formándose montañas y valles (Meyer-Abich, 1960; Schmidt-Thomé, 1975; Williams y Meyer-Abich, 1955).

En el Cuaternario, a través de las zonas de debilidad dejadas por los movimientos tectónicos, se produjo una intensa actividad volcánica, misma que dio origen a las estructuras volcánicas jóvenes del país, ahora conocidas como Arco Volcánico Centroamericano (CAVA) (Carr y Stoiber, 1977).

Los materiales eyectados llenaron las cuencas tectónicas en la zona de estudio, los cuales tienen su origen en erupciones altamente explosivas consistentes en piroclasto y toba pumítica; procedentes de la caldera de Ilopango (parteaguas noreste de la subcuenca), caldera de Coatepeque (aproximadamente 32 km al suroeste del volcán de San Salvador) y volcán de San Salvador (Lexa et al., 2012), parcialmente dentro de la zona de estudio (Figura 1).

Estos materiales se encuentran interestratificados con extrusiones de lava basáltica y andesítica procedentes del volcán de San Salvador (Hernández y Jicha, 2019), El Jabalí, cerro de Nejapa y Guazapa, y otros volcanes monogenéticos. Recientemente, se sumaron materiales resultantes de procesos erosivos que rellenaron terrazas aluviales en la parte más plana de la subcuenca (CEL, 1984). El acuífero de San Salvador se encuentra conformado por esta mezcla de materiales porosos y fracturados con distintas permeabilidades que determinan el flujo de agua subterránea en la zona.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ACELHUATE

La zona de estudio se localiza sobre la plataforma conocida como graben central (GC), localizada en la Zona de Falla de El Salvador (ZFES); la cual se extiende discontinuamente de este a oeste por todo el país, en aproximadamente 150 km de longitud y 20 km de ancho (Martínez-Díaz et al. 2004; Hernández y Jicha 2019). Dos fallas activas de la ZFES destacan en la región: al norte, la falla Guaycume, de unos 22 km de longitud, que coincide en algunos sectores con el parteaguas de la subcuenca (Martínez-Díaz, et al. 2017); al sur, la falla Panchimalco (Canora et al. 2014), que se encuentra al sur del parteaguas en la cordillera del Bálsamo, fuera del área de estudio (Figura 2). Ambas han sido identificadas como unas de las principales causantes de destructivos terremotos (Canora et al. 2014; Alonso-Henar et al. 2018).

De acuerdo a Schmidt-Thomé (1975), cuatro sistemas de fallas desarrollados en diferentes momentos se distinguen en la zona de estudio.

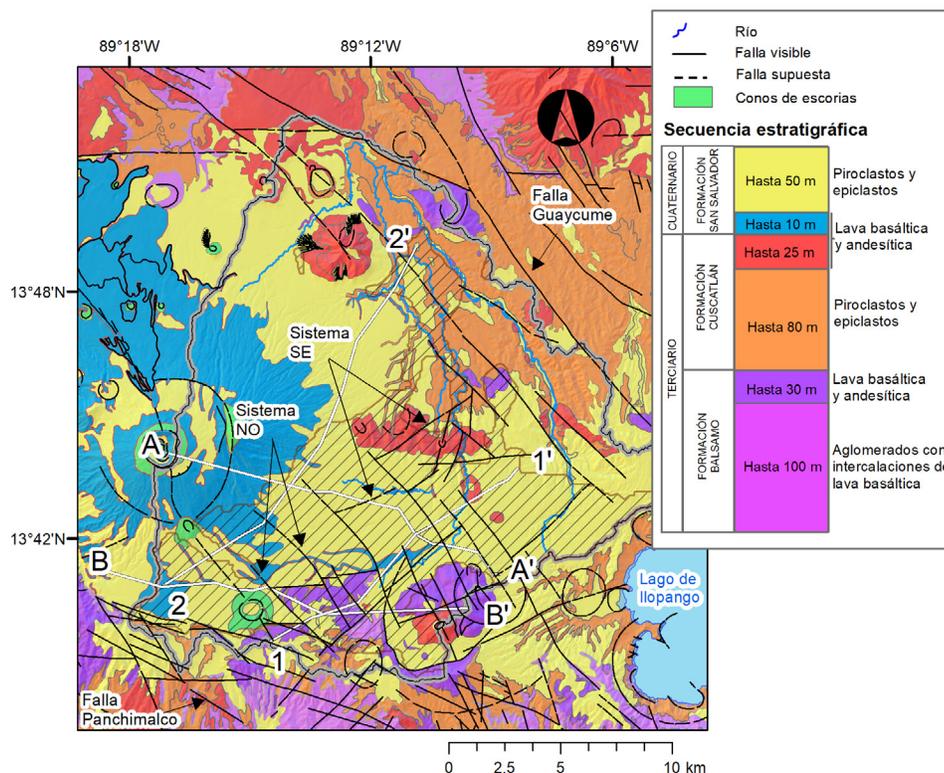


Figura 2 Mapa geológico simplificado de la zona de estudio a partir de Bosse *et al.* (1978). La secuencia estratigráfica de los materiales se muestra arriba a la derecha (Schmidt-Thomé, 1975). El alineamiento de las secciones litológicas se muestra con líneas blancas. El mapa también presenta la distribución espacial de las principales fallas de la zona de estudio.

El sistema más antiguo corresponde a las fallas alineadas este – oeste, localizadas al sur, que corresponden con el escarpe norte de la cordillera del Bálsamo y pueden asociarse al GC (Hernández y Jicha, 2019). El sistema norte-sur aparece solo localmente, mientras que los sistemas noroeste y subordinado noreste, derivados del primero, son considerablemente importantes dentro de la configuración tectónica del lugar (Figura 2).

Schmidt-Thomé (1975) destacó la presencia de los más recientes centros de erupción: el cráter La Laguna, el volcán Boquerón y la depresión de Ilopango, en la intersección entre fallas de orientación este con otras de orientación noroeste. Por su parte, Hernández y Jicha (2019) notaron que en fallas paralelas a la dirección noroeste, se presenta el apareamiento de conos de escorias, cráteres de explosión y erupciones de flancos. El cráter de explosión La Laguna conforma una serie caótica de materiales que dificulta la identificación de la correlación litológica de los materiales

registrados en columnas litológicas de pozos del sector, dando indicio de la presencia de varias fracturas o fallas en la zona (Figuras 1 y 2).

2.3. ENTORNO HIDROGEOLÓGICO

Diversos estudios hidrogeológicos con fines de extracción de agua se han desarrollado en la zona de estudio (Delgado, 1981; Acosta, 1991; Delgado, 2001; EYCO S.A. de C.V., 2005; Guevara Retana, 2013, entre otros). Sus alcances son específicos y limitados a la zona de interés y a la evaluación con fines de explotación del acuífero. Otros estudios del comportamiento hidrogeológico de la zona fueron realizados en el ámbito académico (Duarte Saldaña, 1988; Gil, 2007; Barrera de Calderón, 2010). En estas investigaciones, aunque se identificaron estratos permeables, no se clasificaron las unidades hidroestratigráficas sobre la base de un modelo tridimensional.

Adicionalmente, se han desarrollado estudios con fines de planificación hídrica a nivel nacional, los cuales incluyen al acuífero de San Salvador. Según ANDA (2008), en los alrededores del volcán de San Salvador se encuentra un acuífero fracturado de gran extensión y posiblemente de alta producción: el cual está constituido principalmente por roca volcánica andesítica y basáltica intercalada con material piroclástico. La delimitación de las unidades acuíferas se basa en la geología superficial, en tanto que los límites entre la unidad fracturada y la unidad porosa coinciden con los límites de las rocas efusivas andesíticas y basálticas de San Salvador; así como con los piroclastos y epiclastos de las formaciones San Salvador y Cuscatlán (Figura 2).

El PNUD (1972) determinó que la transmisividad de los materiales fracturados podría variar entre 1000 m²/día en el suroeste a 15000 m²/día al sureste de la zona de estudio. Valores de 50 m²/día a 100 m²/día han sido registrados en materiales piroclásticos al noroeste de la zona de estudio, mientras que en los materiales retrabajados se ha llegado a registrar valores hasta de 1000 m²/día (PNUD, 1972). Los materiales del Bálsamo son clasificados como roca no acuífera y, por lo tanto, se ha considerado que el flujo de agua subterránea no ocurre en ese material.

Hasta la fecha, las evaluaciones del flujo de agua subterránea más relevantes corresponden a la ANDA (2008); Barrera de Calderón (2010); MARN (2016). Todos coinciden en la existencia de dos flujos principales; el primero, radial, proveniente del volcán de San Salvador; el segundo, proveniente de la cordillera del Bálsamo (Figura 1). Sin embargo, existen diferencias en la interpretación del recorrido de dicho flujo y de los controles geológicos dominantes, principalmente en los materiales fracturados. Estas interpretaciones pueden tener impacto en la planificación del desarrollo de los recursos hídricos de la zona y, por supuesto, en la evolución de los niveles del agua subterránea y la productividad de los pozos de la zona.

3. Materiales y métodos

3.1. ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS

3.1.1. ADQUISICIÓN DE DATOS

La información sobre las características subsuperficiales de la zona de estudio fue recopilada a partir de estudios e investigaciones previas y de la recolección de datos de campo, que incluyó la verificación de la ubicación de los pozos y manantiales, informes de perforación de pozos, descripción de columnas litológicas, registros eléctricos verticales, informes de aflors, medición de niveles en el acuífero, reportes de análisis de hidrogeoquímica de agua, (Bajc *et al.*, 2014). Además, se utilizó el Mapa Geológico de la República de El Salvador a escala 1:100000 (Bosse *et al.*, 1978). El dominio del modelo fue determinado en base a los datos disponibles (Moya *et al.*, 2014), considerando que la zona de estudio estuviese comprendida dentro del mismo (Bajc *et al.*, 2014).

El análisis e interpretación de los datos geológicos y su relación con sus características hidrogeológicas permitió la identificación de las principales unidades hidroestratigráficas (Benoit *et al.*, 2015) presentes en la zona que, en conjunto con la distribución de niveles piezométricos, proporcionaron información sobre las posibles zonas permeables que dominan el sistema de flujo.

3.1.2. CONTROL DE CALIDAD Y HOMOGENEIZACIÓN DE LOS DATOS

Un total de 361 pozos perforados, 58 manantiales y 12 pozos excavados, fueron identificados y sometidos a un proceso de depuración. Partiendo de los criterios de validación de calidad de información de pozos propuesta por Ross *et al.* (2005) para datos geológicos (G), se adicionaron criterios de confiabilidad para información hidrogeológica (H) y de la química del agua. La información fue clasificada en cinco niveles (comprendidos entre el nivel G5 o H5 de confiabilidad alta, y el nivel G1 o H1 de confiabilidad mala). La información geológica e hidrogeológica con niveles 3 y 4 fueron seleccionadas para el análisis (el nivel 5 no fue alcanzado).

3.1.3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO LITOLÓGICO TRIDIMENSIONAL

Un total de 89 columnas litológicas clasificadas como G3 y G4 procesadas para elaborar el modelo litológico (Figura 3). Para cada elemento se definió el material geológico representado y se reinterpretó cada informe con el fin de uniformizar los materiales geológicos en grupos representativos (Moya *et al.*, 2014); posteriormente, se procedió a la construcción del modelo litológico. Adicionalmente, se incorporó la información correspondiente a los detalles constructivos y geométricos de los pozos (diámetro de perforación y entubamiento, distribución de la tubería lisa y ranurada); los datos del nivel piezométrico y fecha de su medición. Estos fueron utilizados en la asociación del estrato con las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos.

El modelo litológico fue construido utilizando el método de interpolación de la distancia inversa disponible en RockWorks 16 (Ecuación 1). La interpolación fue realizada permitiendo que las unidades se intercalaran entre sí, representando de esta forma la geología de zonas volcánicas recientes.

$$Z_{nodo} = \frac{\sum \left(\frac{Z_{punto}}{d^n} \right)}{\sum \left(\frac{1}{d^n} \right)} \quad 1)$$

donde, el exponente n de peso 2, indica una influencia moderada de la distancia de los puntos cercanos a la distancia d , entre el nodo de análisis y los pozos cercanos. Z es valor del nodo en análisis o los nodos cercanos a interpolar, dicho valor representa un tipo de litología. En el proceso de interpolación, fueron utilizados un máximo de 8 puntos para calcular el valor del nodo Z .

3.1.4. PERFILES LITOLÓGICOS

Para la identificación de las unidades hidroestratigráficas, Ross *et al.* (2005) consideran que es más fácil y natural, una concepción estratégica en 2D. En concordancia con ellos, para enfrentar la heterogeneidad de las formaciones

geológicas resultantes en el modelo litológico tridimensional inicial, así como el fracturamiento de la zona, se elaboraron perfiles litológicos trazados en zonas de especial interés para el entendimiento de la distribución de los materiales en el acuífero.

Estos perfiles fueron mejorados a partir de la interpretación de la litología, estandarizada (Bajc *et al.*, 2014) tomando en cuenta los informes de perforación de pozos, el mapa geológico de la zona (Bosse *et al.*, 1978) así como con la investigación sobre la evolución geológica descrita en los apartados precedentes, cuya síntesis permitió la obtención de los perfiles litológicos de los materiales predominantes en la zona de estudio. El proceso metodológico se muestra en la Figura 3.

3.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DE LOS MATERIALES LITOLÓGICOS

La información de los parámetros hidráulicos en la litología que conforma el acuífero, fue retomada de los informes de perforación de pozos y reportes, cuyo nivel de confiabilidad hidrogeológica varió entre media y alta (H3-H5). Los datos de transmisividad, capacidad específica, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica, fueron asociados a cada una de las categorías litológicas antes mencionadas, verificándose para cada caso los estratos aprovechados (Figura 3). A partir del análisis de la información constructiva de los pozos como profundidad y distribución de la rejilla, y asumiendo que los parámetros medidos para pozos que aprovechan un solo material geológico, son representativos de sus características hidráulicas, se asignó valores de los parámetros hidráulicos a las litologías simplificadas en los perfiles litológicos.

3.3. UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS

Una vez asociados los parámetros hidráulicos de los materiales geológicos con los materiales aprovechados mediante el modelo litológico bidimensional (Benoit *et al.*, 2015), se evaluó la distribución espacial de dichos parámetros, se

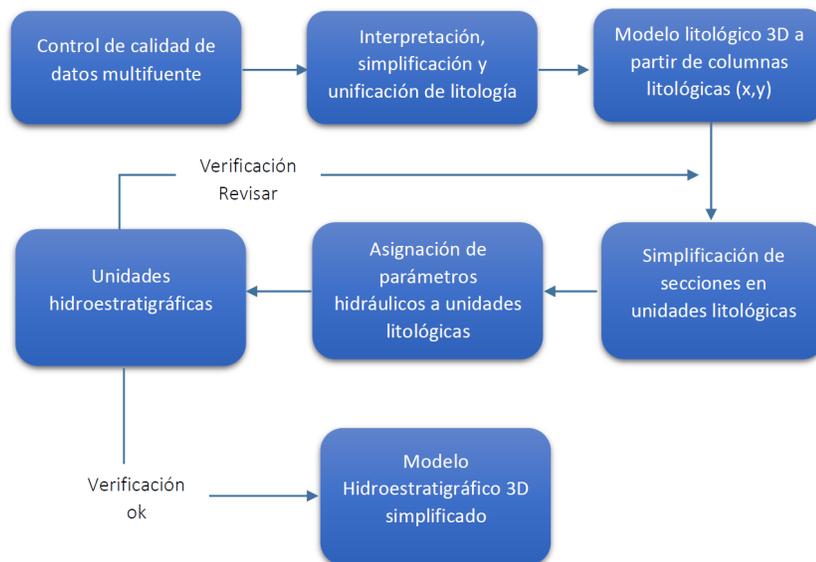


Figura 3 Secuencia metodológica para la definición de las Unidades Hidroestratigráficas (UHE) del acuífero de San Salvador.

verificó la consistencia de las asunciones del modelo bidimensional, se ajustó a aquellas que fueran necesarias y se procedió a clasificar las categorías litológicas en unidades hidroestratigráficas (Figura 3). Cada unidad hidroestratigráfica fue considerada como “única” por lo que no se repite en profundidad. A su vez, se puso especial énfasis en distinguir los materiales porosos y los fracturados.

3.4. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS FALLAS EN EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

La influencia de las fallas/fracturas en el flujo de agua subterránea fue determinada a partir del análisis de las propiedades hidráulicas de las UHE, así como de la distribución de pozos y sus tasas de bombeo, la ubicación de los manantiales de alta productividad y su cercanía a fallas (Moya *et al.*, 2014). El valor de conductividad hidráulica y el estrato aprovechado, fue evaluado en cada caso. En adición, se consideró que la falla actúa como conductos en la dirección gradiente abajo (Figura 5), cuando en pozos adyacentes a éstas, la conductividad hidráulica superase por un orden de magnitud el valor promedio registrado para un estrato determinado.

Debido a que esta investigación ha sido focalizada en la subsuperficie (Bense, *et al.*, 2013), los datos disponibles y analizados únicamente

permiten indicar si la falla actúa como barrera o como conducto, sin llegar a un análisis de detalle de la profundidad de la zona de falla. En este nivel, puede considerarse únicamente que la zona de falla ejerce influencia sobre los estratos saturados fracturados, los cuales se muestran en las figuras 4 y 5.

Adicionalmente se construyó el mapa de isopiezas a partir de niveles piezométricos en 44 puntos dentro del acuífero: 18 corresponden a manantiales de alto caudal que afloran en zonas de cambio de contacto geológico: el resto fue medido en este estudio durante el período 2016 – 2017. Así, la carga hidráulica fue utilizada para definir la tendencia del flujo de agua subterránea durante el período de estudio. La dirección del flujo de agua subterránea fue analizada en conjunto con las fallas más conductivas, los parámetros hidráulicos y los caudales de bombeo, definiéndose así, aquellas que actúan como conductos o barrera influenciado por los sistemas de fracturas.

4. Resultados y discusión

4.1. MATERIALES DE LAS FORMACIONES ACUÍFERAS

El modelo hidroestratigráfico tridimensional fue elaborado para entender la distribución espacial y características hidráulicas de los principales

materiales que conforman el acuífero de San Salvador. Un total de seis perfiles litológicos fueron construidos; de los cuales se eligieron cuatro perfiles (1-1', 2-2', A-A' y B-B') para destacar los aspectos más relevantes de los resultados en el dominio del modelo (Figura 4). En este análisis destacan los espesores de los estratos saturados, sus relaciones geométricas y el desplazamiento de estos materiales debido a la presencia de los sistemas de fallas.

Los resultados indican la existencia de una secuencia piroclástica saturada, de gran espesor en toda la zona de estudio en concordancia con Fairbrothers *et al.* (1978) y Hernández y Jicha (2019). En el sur y suroeste, desde el volcán de San Salvador y la cordillera del Bálsamo, estos materiales se intercalan con flujos de lavas fracturadas de distintos espesores y origen, teniendo como barrera de la colada de lavas, el cauce del río Acelhuate en el este y el río Tomayate (afluente del primero) en el norte (Figura 4). La sección 1-1' y A-A' indican que, en particular, en la cordillera del Bálsamo, las lavas andesítica y basálticas del Bálsamo pueden tener espesores hasta de 140 m, margen superior a lo reportado por Schmidt-Thomé (1975), reduciéndose su espesor a medida avanzan hacia el norte y oriente (Figura 4).

A su vez, la sección A-A' muestra la diversidad de materiales presentes en la UHE denominada Escorias Plan de La Laguna y nuevamente el hundimiento de las lavas del Bálsamo hacia el oeste en una profundidad que supera los 200 m, ya que no se ha intersectado por los pozos de la zona. En ese sector, los materiales predominantes son porosos, con intercalaciones locales de lavas. Asimismo, se distingue un parteaguas de flujo desplazado unos 3 km al este del parteaguas de la subcuenca en ese sector; la cual no fue identificada por ANDA (2008) ni MARN (2016) (Figura 5), pero que reafirma el planteamiento de Barrera de Calderón (2010) en un estudio de menor extensión que éste.

La extensión de lavas andesíticas y basálticas de San Salvador se ilustra en las secciones 1-1', 2-2' y B-B'. El espesor de estas lavas es mayor en las cercanías del volcán de San Salvador, donde se

encuentran completamente saturadas; mientras que a medida se alejan de éste, su espesor y saturación se reducen, encontrándose lavas parcialmente saturadas. Las lavas de Cuscatlán en el sector norte y este de la subcuenca se encuentran saturadas parcialmente (Sección B-B' en la Figura 4).

En el sector norte y noreste, el acuífero es predominantemente poroso, corresponde a la secuencia piroclástica de Cuscatlán y su espesor puede llegar a superar los 300 m (Figura 4). A excepción del sector sur, donde afloran los materiales del Bálsamo, el basamento del acuífero ha sido asociado con los aglomerados del Bálsamo, identificados únicamente en el bloque que corresponde a la cordillera del mismo nombre. En el resto de la zona estudiada, las perforaciones de pozos no han logrado alcanzarla. Expertos en la geología del país consideran que puede estar a unos 800 m de profundidad (Hernández, 2019, a través de comunicación verbal).

4.2. UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS

Los valores de conductividad hidráulica en el acuífero varían desde 10^{-1} hasta cerca de 10^3 m/día (Figura 5 y Tabla 1). La asociación de los materiales definidos en el modelo litológico bidimensional y la conductividad hidráulica permitió la definición de las unidades hidroestratigráficas. Los rangos de conductividad hidráulica en las distintas UHE muestran la heterogeneidad del acuífero (Tabla 1). Por una parte, los materiales piroclásticos presentan valores entre 10^{-2} y 1 m/día, típico en materiales volcánicos (Davis y DeWiest, 1991) y son considerados acuíferos pobres (Custodio y Llamas, 1996). Por otra parte, las lavas, presentan valores de conductividad hidráulica mayores que van del orden de 1 a 10^1 m/día, lo cual se asocia con el fracturamiento del material (Gellasch *et al.*, 2013). Valores cercanos a 10^3 m/día, se registran en la zona donde se presenta la secuencia caótica de materiales escoriáceos, intercalados con lavas y piroclastos, que han sido definidos como Plan de la Laguna y son considerados como acuíferos excelentes (Custodio y Llamas, 1996). En esa zona se asientan importantes industrias y comercios del país.

4.2.1. TENDENCIA DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Debido a la limitante de datos por la escasez de puntos con acceso a medición de niveles estáticos en el acuífero, ya que en su mayoría los pozos se utilizan para explotación, se dificultó la determinación de los gradientes hidráulicos entre pozos localizados en ambos lados del núcleo de fallas geológicas (Caine *et al.*, 1996; Bense *et al.*, 2013). Por lo tanto, en este primer aporte para entender los controles geológicos en el flujo de agua subterránea, se elaboró el mapa de isopiezas sin considerar la influencia de tales estructuras; y, posteriormente, se analizó tal influencia tomando en consideración las características hidráulicas de las zonas de fallas.

En tal sentido, un análisis de umbrales de carga hidráulica para clasificar hidráulicamente a las fallas, estudiándolas más a detalle, puede ser objeto de una futura investigación, utilizando un mapeo de gradientes de carga hidráulica. Por ejemplo, Bense *et al.* (2013) indica que este tipo de estudio provee evidencia directa del impacto de la falla en la carga hidráulica; sin embargo, también aclara que los pozos deben estar lo suficientemente cerca de la zona de falla para delinear el gradiente con un buen nivel detalle. Lamentablemente la localización y objetivo de los pozos en la zona es distinta.

La Figura 5 ilustra el mapa de isopiezas para los años 2008 (Figura 5a), año 2016 (Figura 5b) y este estudio (Figura 5c). Los primeros dos fueron elaborados con base a registros de niveles de

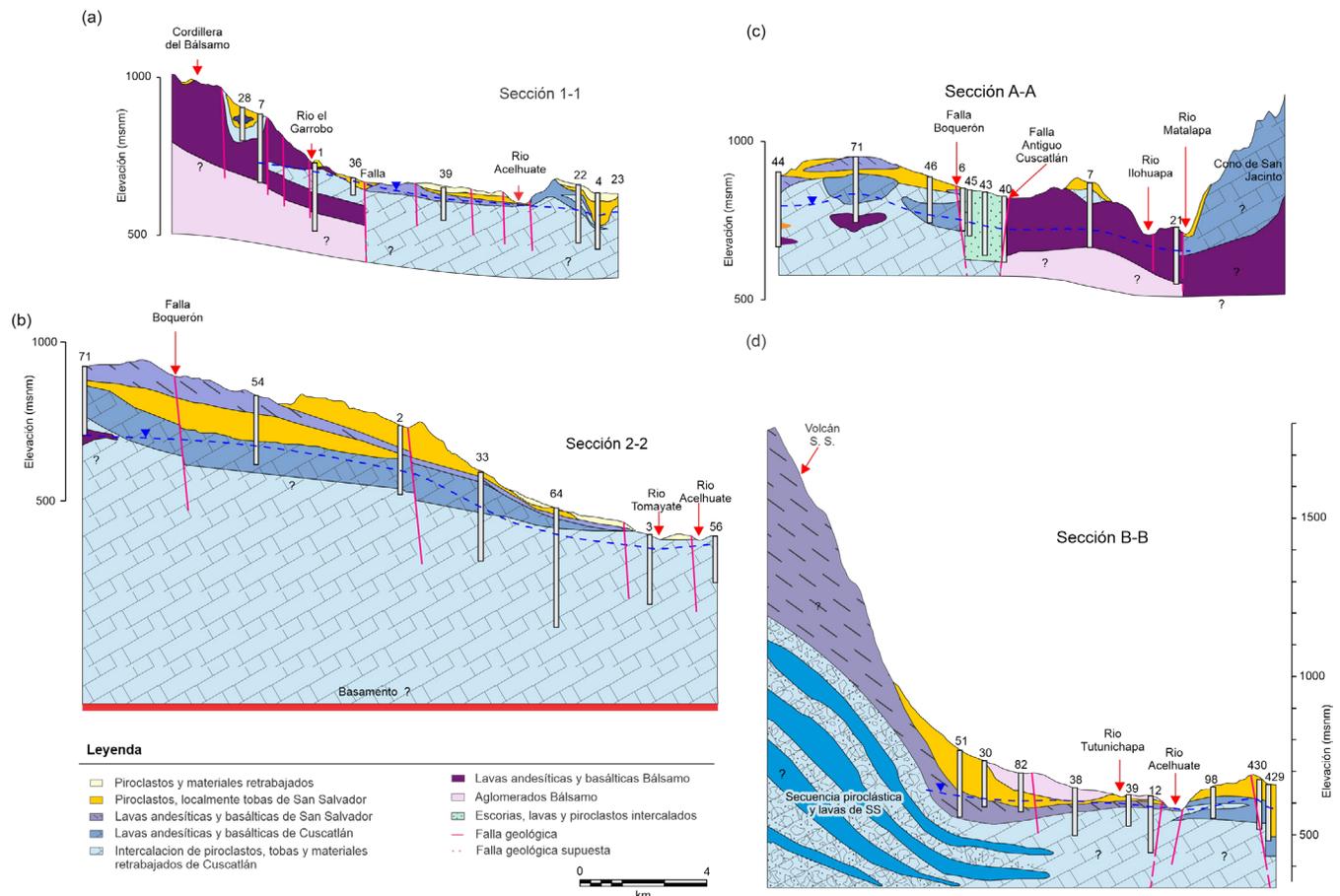


Figura 4 Secciones seleccionadas del modelo hidroestratigráfico tridimensional (THM) mostrando la distribución de las UHE, el nivel del agua subterránea y las principales fallas. a) Sección 1-1' (SO - NE) b) Sección 2-2' (SO - NE) c) Sección A-A' (O - E) d) Sección B-B' (NO -SE). Exageración vertical 10x.

períodos de más de 15 años; mientras que el último corresponde al período 2016-2017. La tendencia de los niveles potenciométricos indica la presencia de dos flujos principales de agua subterránea (Figura 5c): el primero que circula desde el volcán de San Salvador y corre rumbo al norte de la subcuenca, descargando en manantiales importantes que dan lugar al inicio del río El Ángel y abastecen a importantes industrias del país.

Este flujo se mueve principalmente a través de las UHE de roca basáltica y andesítica de San Salvador, roca basáltica y andesítica de Cuscatlán y piroclasto del Cuscatlán. Una clara divisoria de flujo se presenta en el parteaguas suroeste de la subcuenca (Figura 5c). Un flujo más localizado al noroeste, proveniente de la ladera norte del volcán de San Salvador, descarga en el río San Antonio (ver Figuras 5c y 6).

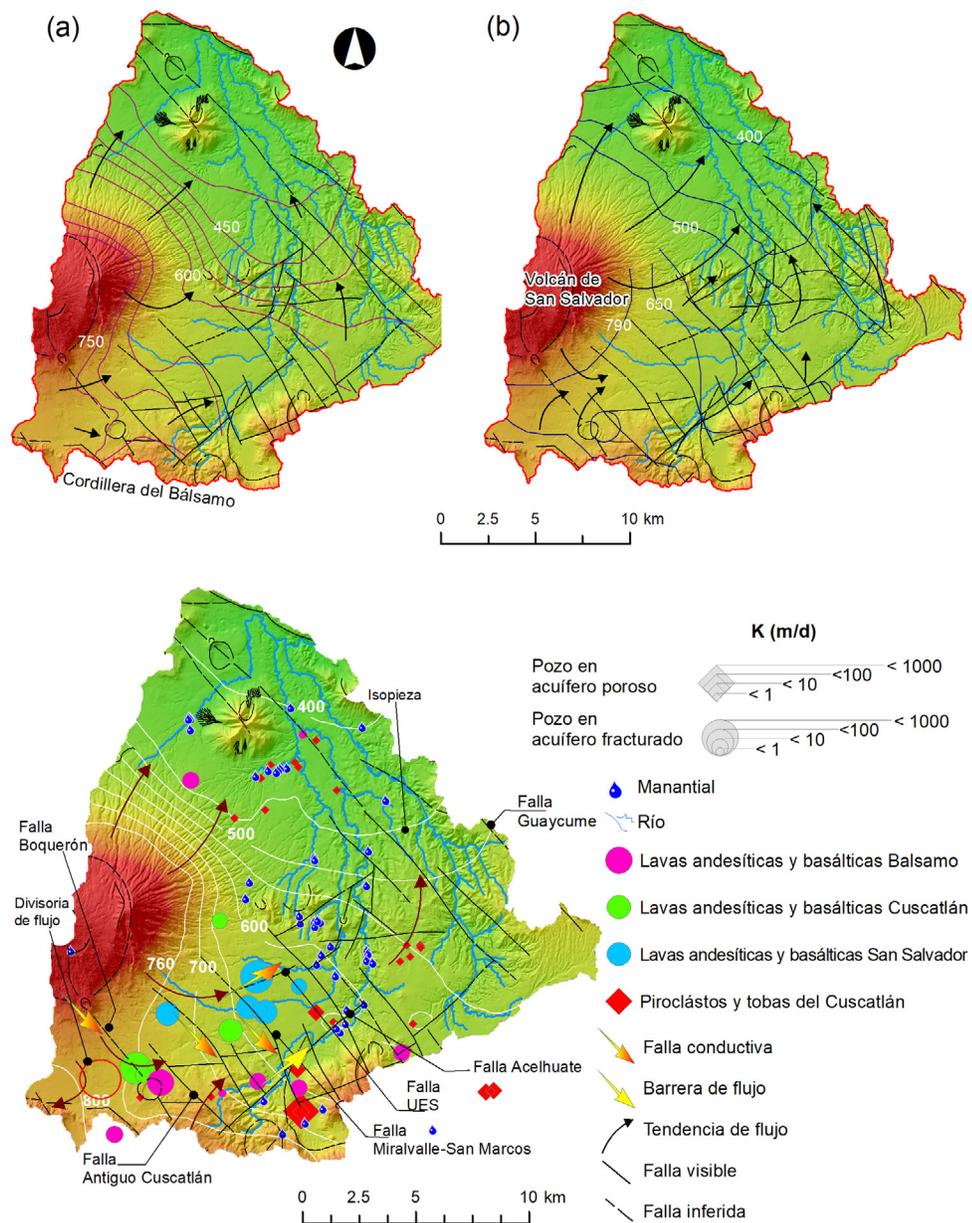


Figura 5 Tendencia del flujo de agua subterránea en el acuífero de San Salvador propuesto por distintos autores: *a)* ANDA (2008); *b)* MARN (2016); *c)* Este estudio, indicando además el flujo potencialmente influenciado por fallas geológicas. Las líneas equipotenciales se muestran en blanco. Los círculos y rombos representan pozos de explotación utilizado en la construcción del THM, el tamaño es relativo al valor de la conductividad hidráulica y su color se asocia a una UHE en la cual se localiza la rejilla. Las flechas en naranja y amarillo indican el tipo de influencia que tienen las fallas en el flujo de agua subterránea de esa zona.

El otro flujo proviene de la cordillera del Bálsamo y cerro de San Jacinto, y se encuentra con el flujo proveniente del sector sur del volcán de San Salvador; fluye hacia el este y luego hacia el norte. Importantes descargas de este flujo se presentan en la zona donde se encuentra el cambio de permeabilidad de los materiales jóvenes de San Salvador (UHE de rocas basáltica y andesítica de San Salvador) e inician los materiales predominantemente porosos correspondientes a la UHE de Piroclasto del Cuscatlán. En esa zona, manantiales con caudales que oscilan alrededor de 150 L/s son aprovechados por la ANDA para el abastecimiento de la ciudad (Figuras 5 y 6).

La tendencia de los niveles también indica que la clasificación de los domos intrusivos y conos de San Jacinto como una zona no acuífera, posiblemente requiera un abordaje posterior más profundo ya que, pese a que se tienen varios pozos perforados en la zona de ladera de este cerro, no se distingue una clara predominancia de la dirección del flujo radial desde estas estructuras, esto podría estar indicando el flujo a través de los piroclastos de Cuscatlán subyacentes (Lexa *et al.*, 2012) y materiales fracturados conductivos en esa zona. Además, dicha condición es consistente con los resultados del modelo hidroestratigráfico bidimensional y la definición de las UHE, donde

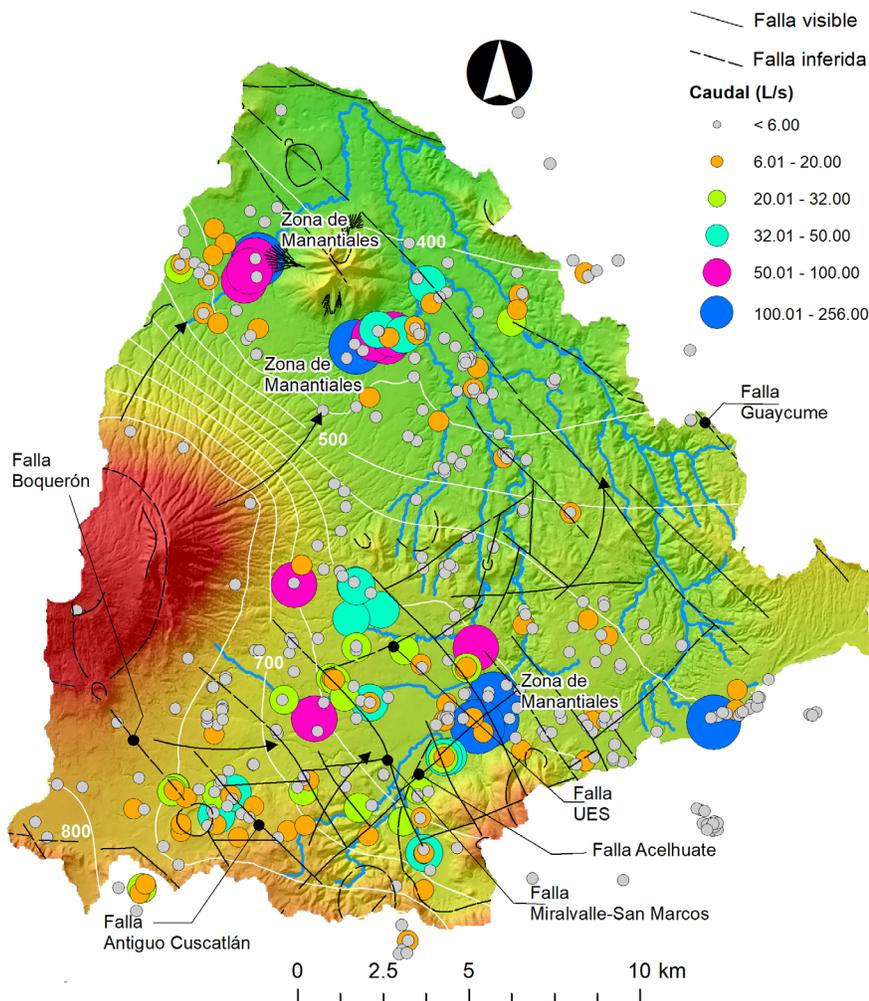


Figura 6 Distribución de caudales de explotación en pozos y manantiales en el acuífero de San Salvador. El tamaño del círculo es proporcional al valor de caudal en los rangos indicados. Las líneas equipotenciales se muestran en blanco. Se indica, asimismo, la localización de las principales fallas que influyen el flujo de agua subterránea.

Tabla 1. Conductividad hidráulica de las unidades hidroestratigráficas del acuífero de San Salvador.

Unidad hidroestratigráfica	K (m/día)	Región donde se presenta
Piroclastos de San Salvador	0.3 – 1.1	Zona central y cercanías del lago de Ilopango
Roca basáltica y andesítica de San Salvador	3.3 – 29.3	Suroeste y sector central este – oeste, en el centro de la ciudad
Roca basáltica y andesítica de Cuscatlán	1.3 – 2.3	Cordillera del Bálsamo y cerro de San Jacinto
Piroclastos de Cuscatlán	0.04 – 1.2	Toda la zona de estudio
Roca basáltica y andesítica de Bálsamo	2.0	Cordillera del Bálsamo, sector este.
Aglomerados del Bálsamo	Sin datos	Toda la zona de estudio (Basamento)?

se ha evidenciado la capacidad conductiva de la roca basáltica y andesítica de Cuscatlán (Figura 4 y Tabla 1).

4.2.2. INFLUENCIA DE LAS FALLAS EN LA PRODUCTIVIDAD DEL ACUÍFERO Y EL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Cinco fallas parecen influenciar la productividad del acuífero y, por consiguiente, su flujo (Figuras 5 y 6). Las dos fallas conductivas más significativas probablemente sean Boquerón y Antiguo Cuscatlán. La primera cruza el cráter del volcán Boquerón de noroeste a sureste; mientras que la segunda, paralela a la primera, parece estar relacionada con el hundimiento de los materiales del Bálsamo (graven) y, por lo tanto, al encontrar materiales menos permeables al otro lado de la falla, podría favorecerse el flujo en ese alineamiento (Anderson y Bakker, 2008; Lin *et al.*, 2014; Moya *et al.*, 2014). Probablemente el cráter del Boquerón se encuentre conectado hidráulicamente con

los pozos alineados a la falla del mismo nombre (Figura 5), y funcione como un conducto que aporta recarga directa; sin embargo, se requiere un análisis más detallado de esta posible conexión hidráulica para evaluarla.

A una distancia máxima de 500 m desde el alineamiento de estas fallas, la conductividad hidráulica varía entre 10^2 y 10^3 m/día (Figura 5c). En esta área, los pozos tienen sus rejillas aprovechando lavas en espesores que pueden llegar a superar los 100 m o encontrarse intercaladas con materiales porosos (Figuras 4 y 5). El efecto de aumento de la conductividad hidráulica en las fallas Boquerón y Antiguo Cuscatlán es evidente, varios de los pozos productivos y activos desde hace más de 30 años en la zona, se encuentran prácticamente alineados a lo largo de la zona de falla (Figura 6). Desafortunadamente, la falta de un registro ordenado de pozos y sus informes de perforación, no permiten respaldar con más datos de características hidráulicas el planteamiento anterior.

Otra falla importante es la que se ha denominado, Miralvalle-San Marcos (Figura 6). En esta estructura con alineamiento noroeste - sureste, los pozos aprovechan los estratos total o parcialmente saturados de la lava de San Salvador, en las cercanías de dicho volcán; mientras que, en la zona del cerro de San Jacinto, los materiales aprovechados corresponden a las lavas del Bálsamo; ambos sobreyacen a los piroclastos de Cuscatlán. En este estudio, se ha considerado a estos materiales del Bálsamo como materiales no acuíferos. Sin embargo, se ha evidenciado que, en zonas fracturadas, la conductividad hidráulica reportada para los pozos contiguos a esta falla se encuentra en el orden de 10^2 m/día; lo cual ameritaría un análisis específico de este comportamiento hidráulico (Figura 5).

Asociado a las lavas de San Salvador, los pozos influenciados por esta falla pueden superar los 60 L/s; mientras que los materiales fracturados del Bálsamo (al sureste), al ser más antiguos, probablemente tengan fracturas rellenas con materiales más consolidados (Bense *et al.*,

2013), produciendo caudales de entre 20 y 30 L/s (Figura 6), considerándose como un buen rendimiento para pozos de explotación en la zona. Adicionalmente, en este sector se presenta la falla circular correspondiente a la presencia del domo de San Jacinto (Figura 2), que podría aumentar la conductividad hidráulica de la zona de influencia, quedando limitadas las tasas de bombeo de los pozos, debido a su profundidad, el espesor de los estratos aprovechados (Freeze y Cherry, 1979; Davis y DeWiest, 1991) y la densidad e interconexión de las fracturas (Lin *et al.*, 2014).

Con alineamiento suroeste – noreste, destacan las fallas denominadas UES y Acelhuate. La falla UES cruza material de lava andesítica y basáltica de San Salvador que sobreyace a los piroclastos de Cuscatlán. En este alineamiento, los pozos son muy antiguos, lo cual limita la cantidad y calidad de información disponible acerca de sus características constructivas e hidráulicas. Sus profundidades generalmente no superan los 120 m, lo cual reduce el espesor aprovechado y, por lo tanto, su productividad; principalmente porque que las lavas en ese sector ya poseen menos espesor y se encuentran parcialmente saturadas.

En cuanto a la falla Acelhuate, parece tener una alta relevancia en el afloramiento de manantiales de alta productividad, que son aprovechados por la ANDA (Figura 5 y 6). Los datos indican que esta falla puede constituir una barrera de flujo debido al cambio de permeabilidad en los materiales al otro lado de la falla, que pasan de ser una combinación de lava fracturada y flujo piroclástico a material únicamente piroclástico; tal y como lo exponen Bense *et al.* (2003) en el análisis del Sistema Roer Balley Rift.

Además, se caracteriza por interceptar a otras fallas hidráulicamente importantes de alineamiento noroeste – sureste, que fueron comentadas anteriormente; tales como la falla Antiguo Cuscatlán, Miralvalle-San Marcos y la falla circular del domo de San Jacinto. La falla Acelhuate tiene la particularidad de que los pozos alineados con ella son poco productivos, presentando caudales incluso inferiores a 5 L/s, lo cual ha sido asociado a la falta en materiales

fracturados o su poco espesor en parte de su extensión. En el alineamiento de dicha falla, el flujo de lavas de San Salvador, de acuerdo a los datos analizados, tiene una extensión de contacto limitada, predominando por tanto los materiales porosos en ambos lados de la falla (Figuras 4, 5 y 6).

Por último, tanto los valores de conductividad hidráulica, como la tasa de bombeo de los pozos (Figura 5 y 6), indican que en los materiales porosos no hay influencia significativa de las fallas en el flujo de agua subterránea. En el norte y noreste del acuífero, donde la presencia de coladas piroclásticas saturadas es predominante, la conductividad hidráulica de los pozos varía entre 10^{-2} y 1 m/día, indistintamente si los pozos se encuentran circundando la zona de fallas o no. Esta variación de conductividades hidráulicas podría estar asociada con la heterogeneidad de los materiales. Por su parte, la reducción de la conductividad hidráulica de los Piroclastos de Cuscatlán se evidencia con el apareamiento de manantiales en las zonas donde finalizan las Lavas de San Salvador y/o Cuscatlán, en las zonas de manantiales localizadas al norte de la zona de estudio que dan lugar al nacimiento de los ríos San Antonio y El Ángel (Figura 6), con caudales superiores a 50 L/s, y en algunos casos, mayores a 100 L/s.

5. Conclusiones

El acuífero volcánico de San Salvador está conformado por seis principales unidades hidroestratigráficas: tres fracturadas de roca basáltica y andesítica, dos porosas de piroclasto, toba y piroclasto retrabajado intercalado, y una muy focalizada de escoria, lava y material piroclástico caóticamente distribuido en profundidad. La UHE más extensa corresponde a la que se ha denominado Piroclasto del Cuscatlán, la cual prácticamente está presente en toda la zona de estudio, a excepción de zonas muy puntuales en la cordillera del Bálsamo. Su conductividad hidráulica varía de 10^{-2} a 1 m/día y corresponde

con la clasificación de un acuífero pobre (Custodio y Llamas, 1996). Sin embargo de esta condición, es de suma importancia para el abastecimiento de agua de la ciudad, sobre todo para núcleos poblacionales que cuentan con un sistema individual y para algunas industrias importantes del país.

Las UHE de material fracturado de roca basáltica y andesítica de San Salvador y Cuscatlán se extienden más allá de los límites previamente definidos por ANDA (2008) y Barrera de Calderón (2010). En este sector, el flujo se encuentra fuertemente influenciado por la geología estructural. Cinco fallas de mayor influencia en el flujo de agua subterránea fueron identificadas, tres de alineamiento noroeste – sureste: Boquerón, Antiguo Cuscatlán y Miralvalle – San Marcos, donde existe la mayor densidad de pozos productivos de la zona; así como dos de alineamiento suroeste-noreste: Universidad y Acelhuate. De las cinco fallas, la Falla Acelhuate constituye una barrera de flujo, mientras que el resto han dado indicios de funcionar como conductos.

Es probable que la falla Boquerón (Figura 5), alineada entre el volcán Boquerón y el antiguo volcán de San Salvador de noroeste a sureste, sea un conducto que adicione una recarga procedente del cráter del Boquerón a la zona de pozos localizado en las Escorias Plan de La Laguna, Este cráter consiste en una cuenca endorréica de aproximadamente 1,500 m de diámetro, cuya agua recogida se infiltra completamente, lo cual podría representar un aporte de $1.32 \text{ Hm}^3/\text{año}$, si se estima el área de recogimiento y la infiltración media anual de la zona (MARN, 2016). Esta conexión amerita un estudio posterior más focalizado.

La UHE Roca basáltica y andesítica de San Salvador, se extiende en las faldas del volcán de San Salvador, donde presenta una saturación completa. Puede asociarse con un acuífero de producción buena (Custodio y Llamas, 1996), cuya conductividad hidráulica varía entre 1 y 10^1 m/día . Sin embargo, debido a que a su espesor se reduce al alejarse del volcán, tiende a reducir

su espesor saturado o incluso quedar seca. Esta condición amerita atención en el manejo del acuífero, ya que se ha identificado una fuerte influencia de las fallas en la productividad de los pozos de la zona. Además se ha detectado que y si el descenso de los niveles piezométricos se reduce, también se reduce el espesor saturado y por consiguiente el rendimiento de los pozos podría caer drásticamente y presentarse reducción en los caudales de los manantiales asociados a estas lavas.

La UHE de Roca basáltica y andesítica de Cuscatlán es considerada un acuífero pobre por su baja conductividad hidráulica, de aproximadamente 1 m/día . Se encuentra localizado únicamente en la cordillera del Bálsamo, cerro de San Jacinto y faldas del volcán de San Salvador y su productividad obedece principalmente a la permeabilidad secundaria (Freeze y Cherry, 1979; Berkowitz, 2002) producto del fracturamiento de la roca. La pequeña UHE, que se denominó Escorias Plan de La Laguna, únicamente se identifica en la zona del mismo nombre y los pozos tienen valores que van de 10^2 m/día hasta cerca de 10^3 m/día , clasificándose como acuíferos excelentes (Custodio y Llamas, 1996). En ese sector se asienta una importante cantidad de industrias del país, pozos para el abastecimiento del AMSS y algunos de los más grandes comercios de la zona.

La planificación del desarrollo de los recursos hídricos subterráneos es de suma importancia para el manejo sostenible del acuífero. Este estudio proporciona señales de alerta sobre una densificación de pozos en las zonas más productivas de la ciudad, que puede ocasionar descensos significativos en los niveles del acuífero y en su rendimiento. Además, deja aportes para un desarrollo de otras zonas que podrían ser productivas y que aún no se han desarrollado fuertemente; entre ellas puede considerarse las zonas aledañas a la Falla Miralvalle – San Marcos y la Falla UES. Además, en el sector noreste, los resultados indican que el acuífero puede rendir caudales para abastecimiento de pequeñas poblaciones, debiendo considerarse un aumento

en la profundidad de los pozos para aumentar su espesor saturado y por ende sus tasas de bombeo.

La influencia de las fallas en el flujo de agua subterránea se ha presentado como un análisis inicial de dicho fenómeno en el acuífero de San Salvador. El estudio ha dejado indicios de fallas que funcionan como conductos y barreras, cuyo comportamiento particular amerita un análisis más detallado, destacando entre ellas la falla de Boquerón y la falla Acelhuate. Otro aspecto relevante aportado con este estudio es un posible flujo a través de los piroclastos de Cuscatlán en la zona del Cerro de San Jacinto, que podría estar aportando a la recarga del campo de pozos de Guluchapa, localizado en las orillas del lago de Ilopango.

Es de importancia, poner atención a las fallas conductivas, sobre todo en la planificación territorial de la zona, ya que favorecen la productividad del acuífero, y, a la vez, pueden ser medios de ingreso de contaminantes que faciliten su movilidad de la superficie a la zona saturada (Berkowitz, 2002; Anderson y Bakker, 2008; DesRoches *et al.*, 2014), agregando mayor vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Esta situación amerita acciones de gestión orientadas a un monitoreo constante, tanto de las actividades que se realizan en las zonas circundantes a las fallas, aguas arriba, como en los alrededores de los pozos de explotación.

Agradecimientos

Este proyecto se llevó a cabo con el apoyo de la Organización de Estados Americanos (OEA), a través de las gestiones realizadas por el Ministerio de Relaciones Exteriores de El Salvador, quienes otorgaron la beca a la autora principal para realizar sus estudios de Doctorado. Muchas gracias a la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) y el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, así como a la Universidad Autónoma del Estado de México, Universidad de El Salvador, CONACYT y COMECYT de México y el Institut national

de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) de Canadá por todo el apoyo proporcionado en el desarrollo de este estudio.

Referencias

- Acosta, J., 1991, Estudio Hidrogeológico del Área Metropolitana de San Salvador, San Salvador, El Salvador, Reporte Técnico, 17 p.
- Ahmed, A.A., 2009, Using lithologic modeling techniques for aquifer characterization and groundwater flow modeling of the Sohag area, Egypt: *Hydrogeology Journal*, 17, 1189–1201. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0461-z>
- Alonso-Henar, J., Benito, B., Staller, A., Álvarez-Gómez, J.A., Martínez-Díaz, J.J., Canora, C., 2018, Large-magnitude crustal seismic sources in El Salvador and deterministic hazard scenarios: *Engineering Geology*, 243, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.015>
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), 2016, Memoria de Labores 2015: San Salvador, El Salvador, Memoria anual, 68 p.
- Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), 2008, Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador, 1:100,000.
- Anderson, E.I., Bakker, M., 2008, Groundwater flow through anisotropic fault zones in multiaquifer systems: *Flow through faults: Water Resources Research*, 44(11), W11433. <https://doi.org/10.1029/2008wr006925>
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992, *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*: Academic Press, San Diego, 381p.
- Bajc, A. F., Russell, H. A. J., Sharpe, D. R., 2014, A three-dimensional hydrostratigraphic model of the Waterloo Moraine area, southern Ontario, Canada: *Canadian Water Resources*

- Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques, 39(2), 95-119. <https://doi.org/10.1080/07011784.2014.914794>
- Ballesteros, M., Reyes, V., Astorga, Y., 2007, Groundwater in Central America: Its Importance, Development and Use, with Particular Reference to Its Role in Irrigated Agriculture, en: Giordano, M., Villholth, K.G. (Eds.), *The Agricultural Groundwater Revolution: Opportunities and Threats to Development. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series*: CABI, Wallingford, UK ; Cambridge, MA, 100–128 p. <https://doi.org/10.1079/9781845931728.0100>
- Barrera de Calderón, M., 2010, Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador: El Salvador, Universidad de El Salvador, Tesis de Maestría, 165 p.
- Benoit, N., Paradis, D., Bednarski, J. M., Hamblin, T., Russell, H. A. J., 2015, Three dimensional hydrostratigraphic model of the Nanoose—Deep Bay area, Nanaimo Lowland, British Columbia, (Open File 7796): Geological Survey of Canada, 26 p. <https://doi.org/10.4095/296302>
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., 2013, Fault zone hydrogeology: *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
- Bense, V.F., Person, M.A., 2006, Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers: *Faults as Conduit-Barrier Systems: Water Resources Research*, 42(5), W05421. <https://doi.org/10.1029/2005wr004480>
- Bense, V.F., Van Balen, R.T., De Vries, J.J., 2003, The impact of faults on the hydrogeological conditions in the Roer Valley Rift System: an overview: *Netherlands Journal of Geosciences* 82, 41–54. <https://doi.org/10.1017/s0016774600022782>
- Berkowitz, B., 2002, Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review: *Advances in Water Resources* 25, 861–884. [https://doi.org/10.1016/s0309-1708\(02\)00042-8](https://doi.org/10.1016/s0309-1708(02)00042-8)
- Bosse, H.R., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt-Thomé, M., Wiesmann, G., Weber, H.S., 1978, *Geologische Karte der Republik El Salvador, Mittelamerika*.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure: *Geology* 24, 1025. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<1025:fz aaps>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<1025:fz aaps>2.3.co;2)
- Canora, C., Martínez-Díaz, J.J., Villamor, P., Staller, A., Berryman, K., Álvarez-Gómez, J.A., Capote, R., Diaz, M., 2014, Structural evolution of the El Salvador Fault Zone: an evolving fault system within a volcanic arc: *Journal of Iberian Geology*, 40(3), 471-488. https://doi.org/10.5209/rev_jige.2014.v40.n3.43559
- Carle, S.F., Fogg, G.E., 1997, Modelling Spatial Variability with One and Multidimensional Continuous-Lag Markov Chains: *Mathematical Geosciences* 9, 891–918.
- Carle, S.F., Labolle, E.M., Weissmann, G.S., Brocklin, D.V., Fogg, G.E., 1998, Conditional Simulation of Hydrofacies Architecture: A Transition Probability/Markov Approach, in: Fraser, G.S., Davis, J.M. (Eds.), *Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers: SEPM Society for Sedimentary Geology*, Tulsa, Oklahoma, U.S.A, 147–170. <https://doi.org/10.2110/sepmcheg.01.147>
- Carr, M.J., Stoiber, R.E., 1977, Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America: *Geological Society of America Bulletin*, 88(1), 151-156. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<151:gsos de>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<151:gsos de>2.0.co;2)
- Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL), 1984, *Léxico Estratigráfico de El Salvador*, Reporte Técnico, 108 p.
- Custodio, E., Llamas, M.R., 1996, *Hidrología subterránea* (2 Tomos), 2. ed. corr. Ed. Omega, Barcelona, 2350 p.
- Davis, S.N., DeWiest, R.J., 1991, *Hydrogeology*:

- Krieger, Malabar, Florida, 463 p.
- de Marsily, Gh., Delay, F., Gonçalves, J., Renard, Ph., Teles, V., Violette, S., 2005, Dealing with spatial heterogeneity: *Hydrogeology Journal*, 13, 161–183. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0432-3>
- Delgado, J., 2001, Informe de Evaluación Pozo Asevilla No. 2. Puerta La Laguna, Departamento de La Libertad. Antiguo Cuscatlán, La Libertad, Reporte Técnico, 26 p.
- Delgado, J., 1981, Recomendación sobre profundidad de perforación del pozo No. 3 El Socorro en San Salvador, departamento de San Salvador, ANDA, San Salvador, Reporte Técnico, 52 p.
- DesRoches, A., Danielescu, S., Butler, K., 2014, Structural controls on groundwater flow in a fractured bedrock aquifer underlying an agricultural region of northwestern New Brunswick, Canada: *Hydrogeology Journal* 22, 1067-1086. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1134-0>
- Di Salvo, C., Di Luzio, E., Mancini, M., Moscatelli, M., Capelli, G., Cavinato, G.P., Mazza, R., 2012, GIS-based hydrostratigraphic modeling of the city of Rome (Italy): analysis of the geometric relationships between a buried aquifer in the Tiber Valley and the confining hydrostratigraphic complexes: *Hydrogeology Journal*, 20, 1549–1567. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0899-2>
- Duarte Saldaña, J.R., 1988, Estudio Hidrogeológico del acuífero de Guluchapa, San Salvador, El Salvador. Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Tesis de Maestría, 131 p.
- EYCO S.A. de C.V., 2005, La Nueva Apopa. Estudio Hidrogeológico de la Zona: Apopa, San Salvador. Reporte Técnico, 41 p.
- Fairbrothers, G.E., Carr, M.J., Mayfield, D.G., 1978, Temporal Magmatic Variation at Boqueron Volcano, El Salvador: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 67, 1–9. <https://doi.org/10.1007/bf00371627>
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 604 p.
- Friedel, M.J., 2016, Estimation and scaling of hydrostratigraphic units: application of unsupervised machine learning and multivariate statistical techniques to hydrogeophysical data: *Hydrogeology Journal*, 24, 2103–2122. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1452-5>
- Fulton, J.W., Koerkle, E.H., McAuley, S.D., Hoffman, S.A., Zarr, L.F., 2005, Hydrogeologic setting and conceptual hydrologic model of the Spring Creek Basin, Centre County, Pennsylvania (Investigation Report No. 2005–5091): U.S. Geological Survey Scientific. USGS, Pennsylvania, 83 p. <https://doi.org/10.3133/sir20055091>
- Garven, G., Appold, M.S., Toptygina, V.I., Hazlett, T.J., 1999, Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores: *Hydrogeology Journal*, 7, 108–126. <https://doi.org/10.1007/s100400050183>
- Gellasch, C.A., Bradbury, K.R., Hart, D.J., Bahr, J.M., 2013, Characterization of fracture connectivity in a siliciclastic bedrock aquifer near a public supply well (Wisconsin, USA): *Hydrogeology Journal*, 21, 383–399. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0914-7>
- Gil, L.B., 2007, Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del municipio de Nejapa: San Salvador, El Salvador, Universidad de Costa Rica, Costa Rica, Tesis de Maestría.
- Guevara Retana, J.M., 2013, Estudio Hidrogeológico Área del Ingenio Azucarero El Angel, Jurisdicción de Apopa, departamento de San Salvador: San Salvador, Reporte Técnico, 72 p.
- He, X., Koch, J., Sonnenborg, T.O., Jørgensen, E., Schamper, C., Christian Refsgaard, J., 2014, Transition probability-based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data: *Water Resources Research*, 50, 3147–3169. <https://doi.org/10.1002/2013wr014593>
- Hernández, W., 2008, Aspectos geológicos que influyen en las aguas subterráneas y en la

- respuesta sísmica del Área Metropolitana de San Salvador: *Revista de la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA)*, 162, 29–41.
- Hernández, W., Jicha, B., 2019, Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador, El Salvador, *América Central: Revista de la Universidad Tecnológica de El Salvador*, 86, 74.
- Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Sandersen, P.B.E., Viezzoli, A., Møller, I., 2015, 3D geological modelling of a complex buried-valley network delineated from borehole and AEM data: *Journal of Applied Geophysics*. 122, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.004>
- Lexa, J., Šebesta, J., Chavez, J.A., Hernández, W., Pécskay, Z., 2012, Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area: *Journal of Geosciences*, 106–140. <https://doi.org/10.3190/jgeosci.088>
- Lin, L., Lin, H., Xu, Y., 2014, Characterisation of fracture network and groundwater preferential flow path in the Table Mountain Group (TMG) sandstones, South Africa: *Water South Africa*, 40, 263. <https://doi.org/10.4314/wsa.v40i2.8>
- Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., Benito, B., Hernández, D., 2004, Triggering of destructive earthquakes in El Salvador: *Geology*, 32(1), 65-68. <https://doi.org/10.1130/g20089.1>
- Martínez-Díaz, J.J., Plaza, M., Canora, C., Alonso-Henar, J., Álvarez Gómez, J.A., Herrero Barbero, P., Insua Arévalo, M., Staller, A., Villamor, P., 2017, Evidencias de actividad reciente de la Falla de Guaycume, posible fuente generadora del terremoto destructivo de 1917. Presentado en el XIII Congreso Geológico de América Central, San Salvador, El Salvador.
- Meyer-Abich, H., 1960, El Salvador, mit eine Karte und einem Profil. In: HOFFSTETTER R (ed) *Lexique Stratigraphique International* 5 Amérique Latine, fas 2a Amérique Centrale. Paris, 99-128.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2016, Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias, San Salvador, El Salvador, 258 p.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS), 2012, Mapa de Uso de Suelos de la Subregión Metropolitana de San Salvador, 1:40,000.
- Monreal, R., Rangel-Medina, M., Grijalva-Montolla, A., Minjarez-Sosa, I., Morales-Montaño, M., 2011, Metodología para la definición de unidades hiroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui. Sonora. México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63, 119–135. <https://doi.org/10.18268/bsgm2011v63n1a10>
- Moya, C.E., Raiber, M., Cox, M.E., 2014, Three-dimensional geological modelling of the Galilee and central Eromanga basins, Australia: New insights into aquifer/aquitard geometry and potential influence of faults on inter-connectivity: *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.007>
- Muldoon, M., Simo, J. (Toni), Bradbury, K., 2001, Correlation of hydraulic conductivity with stratigraphy in a fractured-dolomite aquifer, northeastern Wisconsin, USA: *Hydrogeology Journal*, 9, 570–583. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0165-5>
- Ochoa-González, G.H., Carreón-Freyre, D., Cerca, M., López-Martínez, M., 2015, Assessment of groundwater flow in volcanic faulted areas. A study case in Queretaro, Mexico: *Geofísica Internacional*, 54, 199–220. <https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.016>
- Pedrazzi, D., Sunye-Puchol, I., Aguirre-Díaz, G., Costa, A., Smith, V.C., Poret, M., Dávila-Harris, P., Miggins, D.P., Hernández,

- W., Gutiérrez, E., 2019, The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 377, 81–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.03.006>
- Pham, H.V., Tsai, F.T.-C., 2017, Modeling complex aquifer systems: a case study in Baton Rouge, Louisiana (USA): *Hydrogeology Journal*, 25, 601–615. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1532-6>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 1972, Estudio sobre las aguas subterráneas en la zona metropolitana de San Salvador: San Salvador, Reporte Técnico, 85 p.
- Rawling, G.C., Goodwin, L.B., Wilson, J.L., 2001, Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types: *Geology*, 29, 43–46. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0043:iapsah>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0043:iapsah>2.0.co;2)
- Reynolds, J.H., 1980, Late Tertiary Volcanic Stratigraphy of Northern Central America: *Bulletin of Volcanology*, 43, 601–607. <https://doi.org/10.1007/bf02597696>
- Ross, M., Parent, M., Lefebvre, R., 2005, 3D geologic framework models for regional hydrogeology and land-use management: a case study from a Quaternary basin of southwestern Quebec, Canada: *Hydrogeology Journal*, 13, 690–707. <https://doi.org/10.4095/299506>
- Sanz, D., Gómez-Alday, J.J., Castaño, S., Moratalla, A., De las Heras, J., Martínez-Alfaro, P.E., 2009, Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain): *Hydrogeology Journal*, 17, 1375–1391. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0446-y>
- Schmidt-Thomé, M., 1975, The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America), a basis for city development and planning: *Geology Jb*, 13, 207–228.
- Taylor, A.R., Harrington, G.A., Clohessy, S., Dawes, W.R., Crosbie, R.C., Doble, R.C., Wohling, D.L., Batle-Aguilar, J., Davis, P.J., Thomas, M., Suckow, A., 2018, Hydrogeological assessment of the Grant Group and Poole Sandstone – Fitzroy catchment, Western Australia: Australia, A Technical Report to the Australian Government, 197 p.
- Travelletti, J., Malet, J.-P., 2012, Characterization of the 3D geometry of flow-like landslides: A methodology based on the integration of heterogeneous multi-source data: *Engineering Geology*, 128, 30–48. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.05.003>
- Weber, H.S., Wisemann, G., Wittekindt, H., 1974, Geologische Übersichtskarte der Republik El Salvador. 1:100,000.
- Weissmann, G.S., Carle, S.F., Fogg, G.E., 1999, Three-dimensional hydrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics: *Water Resources Research*, 35, 1761–1770. <https://doi.org/10.1029/1999wr900048>
- Weyl, R., 1961, Die Geologie Mittelamerikas, Gebrüder Bornträger: Berlin, 226 p.
- Williams, H., Meyer-Abich, H., 1955, Volcanism in the southern part of El Salvador with particular reference to the collapse basins of Coatepeque and Ilopango: University of California publications in geological sciences, 32, 1–64.