

LA MAGNETOMETRÍA COMO ALTERNATIVA PARA IDENTIFICAR ÁREAS CON POTENCIAL ACUÍFERO. EL CASO DE LA CUENCA BAJA DEL RÍO GRIJALVA

Rubén de Jesús Escudero-Durán¹, Marco Rogelio Bustamante-Orozco¹, Edgar Ángeles-Cordero², Iris Neri-Flores³ y Ojilve Ramón Medrano-Pérez^{4*}

Recibido: agosto 29, 2019; aceptado: marzo 18, 2021; publicado en línea: abril 1, 2021

RESUMEN

El objetivo principal de esta investigación es identificar las áreas de unidades de rocas con potencial acuífero en las subcuencas de la porción oeste de la cuenca baja del río Grijalva, mediante la interpretación de las respuestas magnéticas obtenidas aplicando diversos algoritmos matemáticos para la detección de bordes estructurales (*i.e.*, Gradiente Horizontal, Señal Analítica y Derivada TILT) y la elaboración de modelos 3D de la zona estudiada a base de *voxels*. Para ello, se realizó el procesamiento de datos aeromagnéticos, con el propósito de resaltar e identificar las características geológicas sobresalientes en el área de estudio. Los resultados obtenidos permitieron identificar zonas asociadas a espesores sedimentarios que, cuando se correlacionan con los datos altimétricos, permiten inferir que la zona centro-norte alberga el área con mayor potencial acuífero en la porción oeste de la cuenca baja del río Grijalva. De esta manera, se busca contribuir al conocimiento local y propiciar la toma de decisiones en los temas geohidrológicos, ordenamiento territorial y políticas públicas relacionadas.

PALABRAS CLAVE: métodos potenciales, hidrogeofísica, potencial acuífero, gestión del agua subterránea, cuenca Grijalva.

ABSTRACT

The main objective of this research is to identify aquifer potential areas of rock units within the sub-basins of the western portion of the lower basin of the Grijalva River by interpreting the magnetic responses obtained by applying various edge detection algorithms (*i.e.*, Horizontal Gradient, Analytical Signal and TILT Derivative) and developing 3D models of the studied area based on voxels. For this, the processing of aeromagnetic data was carried out with the purpose of highlighting and identifying the outstanding geological characteristics. The results obtained allowed the identification of zones associated with sedimentary thicknesses which, when correlated with the altimetry data, allow us to infer that the north-central zone harbor the area

*Autor de correspondencia: ojilve.medrano@ccgs.mx

³ Escuela Nacional de Estudios Superiores Mérida. Tablaje Catastral N°6998, Carretera Mérida-Tetiz Km. 4.5, Municipio de Ucú, Yucatán, México, C. P. 97357

¹ División Académica de Ciencias Básicas (DACB), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Tabasco, México

⁴ Cátedra CONACYT-Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS), Villahermosa, Tabasco, México

² Profesor Investigador, Ingeniería Petrolera, Universidad Politécnica de Chiapas (UPChiapas), Sanchiapa, Chiapas, México

with the greatest aquifer potential in the western portion of the lower basin of the Grijalva River. Thus, it seeks to contribute local knowledge and promote decision-making in geohydrological issues, territorial planning and related public policies.

KEY WORDS: potential methods, hydrogeophysics, aquifer potential, groundwater management, Grijalva basin.

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos en México se caracterizan por asimetrías territoriales y temporales en la disponibilidad natural del agua, con el agravante de que la concentración espacial de la población y la economía se encuentran en las regiones con menor disponibilidad. A diferencia de las regiones norte y centro, el sureste presenta el mayor escurrimiento, dotando así a esta región de una riqueza hídrica privilegiada. Sin embargo, en contraste con el norte y centro, esta región posee menor población y una alta marginalidad (CONAGUA, 2018).

En México, de acuerdo con CONAGUA (2018) la disponibilidad natural media anual de agua, o agua renovable, al 2017 alcanza los 451,585 hm³/año (incluye las importaciones y exportaciones con países vecinos) que, al dividirse por la población del 2017, se tiene una disponibilidad per cápita de 3,656 m³/hab./año. Asimismo, del total de agua disponible se extraen 87.84 miles hm³ para uso consuntivo (19.5%), donde el 61% es de fuentes superficiales y el 39% de subterráneas, y los usos agrícolas y abastecimiento público son los principales usuarios. Sin embargo, estas cifras no muestran la dependencia de agua subterránea en diversos territorios que, por sus condiciones climáticas y geomorfológicas o por las presiones demográficas y económicas, ven limitados sus recursos superficiales (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2013). Así, Spring & Cohen (2012) indican que, como consecuencia de la concentración espacial del crecimiento de la población, la producción agrícola e industrial, y la distribución natural del recurso (espacial y temporal), la disponibilidad de agua per cápita es cada vez más limitada. Lo que, en efecto, se manifiesta en las distintas regiones donde estos factores convergen, principalmente, centro y norte del país.

No obstante, de ambos recursos, superficial y subterráneo, el agua subterránea es el de menor comprensión y entendimiento en el país (Hatch-Kuri, 2017; López-Morales, 2017). De hecho, Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera (2013) consideran que el agua subterránea no solo es uno de los elementos que mayor impacto negativo ha sufrido desde la última mitad del siglo XIX, sino también que hasta ahora existe poco interés estatal en el estudio y análisis de su dinámica y funcionamiento. En este contexto, México enfrenta una serie de desafíos hídricos como la contaminación, el impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico (Ojeda-Olivares *et al.*, 2019), la escasez de agua, el fortalecimiento de la gestión del agua con la participación de los usuarios, promover una buena planificación ambiental, así como impulsar la investigación y la tecnología (Cortés *et al.*, 2012). En particular, en esto último, el uso de técnicas geofísicas puede contribuir al conocimiento y comprensión de las aguas subterráneas del país (CONAGUA, 2007).

Los métodos geofísicos de exploración son esenciales para inferir y estimar la distribución de las propiedades físicas de los materiales del subsuelo. En particular, para este propósito existen los métodos gravimétricos y magnéticos, conocidos como métodos potenciales. Estos se aplican tanto en áreas urbanas como rurales (Henderson, 1992; Campos-Enríquez *et al.*, 1997; Huizar-Álvarez *et al.*, 1997; Campos-Enríquez *et al.*, 1997; Flores-Márquez *et al.*, 1998; López-Loera,

2014), o en sectores como la industria petrolera (Ndougsa-Mbarga *et al.*, 2007), la explotación de recursos minerales, la agricultura, geotermia, geología, arqueología, forense y la hidrología (Silva, 1974; Allred *et al.*, 2008; Robinson *et al.* 2008; Reynolds, 2011; Alatorre-Zamora *et al.*, 2015; Tinivella *et al.*, 2013; Binley *et al.*, 2015; Romero-Ruiz *et al.* 2018; Florsch *et al.*, 2019). De tal modo, la magnetometría es considerada un método versátil y de fácil operación que puede ser aplicado a distintos problemas de exploración del subsuelo (Ernstson, 2006). En particular, entre otras cosas, puede ayudar a determinar regiones con potencial acuífero por medio de la identificación de estructuras geológicas que podrían estar asociadas con la permeabilidad (fracturamiento), como ha sido reportado por López-Loera (2014).

La aplicación de los métodos geofísicos a la hidrología no es reciente, la hidrogeofísica, como disciplina de la geofísica para investigar procesos hidrológicos, se ha fortalecido en los últimos años debido a los avances y la disminución de costos en la tecnología e instrumentación (Hubbard & Rubin, 2005; Robinson *et al.*, 2008). En los últimos años, desde la hidrogeofísica, el uso de métodos geofísicos ha estado enfocado en investigaciones hidrogeológicas, en el conocimiento de problemas ambientales e infiltración de contaminantes en el suelo, en el mapeo de las características del subsuelo, en la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo, en el funcionamiento biogeoquímico del sistema agua-suelo, en el estudio de procesos hidrológicos, y en las interacciones de las aguas subterráneas con las superficiales y costeras (Hubbard & Rubin, 2005; Vereecken *et al.*, 2006; Robinson *et al.*, 2008; Kirsch, 2009; Binley *et al.*, 2015; Brocca *et al.*, 2017; Romero-Ruiz *et al.*, 2018; Florsch *et al.*, 2019).

No obstante, si bien el uso de métodos eléctricos y electromagnéticos en la exploración del agua subterránea (*i.e.*, Belmonte-Jiménez *et al.*, 2012; Belmonte-Jiménez *et al.*, 2014) está más extendido en relación a los sísmicos, gravimétricos y magnéticos, el costo, área de estudio y la facilidad tecnológica y operativa, son factores a evaluar para la selección del método a usar (Silva, 1974; Randall-Roberts, 2000; Ernstson, 2006; López-Loera & Tristán-González, 2013; Guevara-Mansilla *et al.*, 2017).

En el caso de México, destacan los estudios para el levantamiento magnético del lago Chapala, Guadalajara (Alatorre-Zamora *et al.*, 2015); en la caracterización geoelectrica de un sitio contaminado por hidrocarburos en Tabasco (Shevnin *et al.*, 2012); el método electromagnético para caracterizar el acuífero de la Cuenca de México (Arango-Galván *et al.*, 2016) y el acuífero del altiplano de Tula, Tamaulipas (Guevara-Mansilla *et al.*, 2017); la aplicación de métodos magnetométricos y eléctricos para la localización de agua subterránea en ambientes volcánicos áridos de San Luis Potosí (López-Loera, 2014); la potencialidad acuífera del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí (López-Loera & Tristán-González, 2013); el estudio hidrogeológico de la cuenca de Villa Hidalgo, San Luis Potosí (Pérez-Corona *et al.*, 2017); y el uso de sondeos eléctricos en la identificación de pozos de infiltración para la mitigación de inundaciones en El Barreal, Chihuahua (Dena *et al.*, 2013). Asimismo, destaca el estudio de CONAGUA (2007) sobre el uso de los métodos potenciales en la prospección hidrogeológica e ingeniería de construcción de obras hidráulicas en México. De tal manera, existen distintos trabajos que han utilizado los métodos geofísicos para la exploración y entendimiento de la dinámica y funcionamiento de las aguas subterráneas y problemáticas asociadas en el país.

Desde esta perspectiva, el objetivo principal de este manuscrito es la identificación de zonas con potencial acuífero en la cuenca baja del río Grijalva mediante el análisis magnetométrico. En tal sentido, para responder a este objetivo, el presente trabajo está organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se muestra una descripción de la zona de estudio. En segundo, se explica la metodología usada para identificar las áreas con potencial acuífero. En tercer lugar, se presentan los resultados y la discusión. Y finalmente, la conclusión. Sobre esta base se concluye que el estudio

realizado puede favorecer no sólo la investigación en estos temas, sino también la reflexión y la toma de decisión de los distintos actores en torno a la protección, gestión, aprovechamiento y planificación de las aguas subterráneas en el país.

ÁREA DE ESTUDIO

El área estudiada se encuentra dentro de la Región Hidrológica Grijalva-Usumacinta Núm. 30 (RH-30), la cual se ubica en la latitud norte 18° 0.106' y 17° 18.122' y longitud oeste 92° 52.205' y 93° 34.427'. El río principal es el Río Grijalva, o Mezcalapa, como es conocido en esta porción de la cuenca Grijalva (Álvarez-Soberano & Medrano-Pérez, 2020). Administrativamente, se localiza en el sector norte del estado de Chiapas cubriendo pequeñas porciones de Tabasco en su parte norte (Figura 1a). Está delimitada por las subcuencas Río Viejo Mezcalapa, Río Mezcalapa, Río Tzimbac, Río Zayula, Río Platanar, Río Paredón, Río Pichucalco (Figura 1b). Posee una superficie de 381.97 km², y alberga una población de 340,160 habitantes, según datos del año 2015 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Asimismo, el área de estudio cubre en su totalidad a la delimitación administrativa del acuífero Reforma, y parcialmente, a los acuíferos Samaria-Cunduacán, La Sierra, Huimanguillo, Ocozocoautla (Figura 1c).

El área de estudio se caracteriza por valores de elevación de entre 1 y 2,425 m s. n. m., aunque gran parte de la zona puede considerarse de baja elevación (Figura 1d). En cuanto la geomorfología de la zona de estudio comprende una porción de la Planicie Costera del Golfo en su parte norte, encontrado relieves suaves con lomeríos en cadena orientados preferencialmente en dirección noreste-suroeste y elevaciones que alcanzan poco más de los 300 m s. n. m. La porción sur del área de estudio se caracteriza por una serie de sierras y valles. Esta zona está constituida por las denominadas Montañas del Norte, formando una franja con orientación este-oeste y altitudes que rebasan los 1,500 m s. n. m. (DOF, 20/04/2015). Dentro de esta porción, a unos 20 km al suroeste de Pichucalco, se encuentra el volcán Chichonal y sus rocas volcánicas asociadas (Figura 1e) (Plascencia *et al.*, 2014).

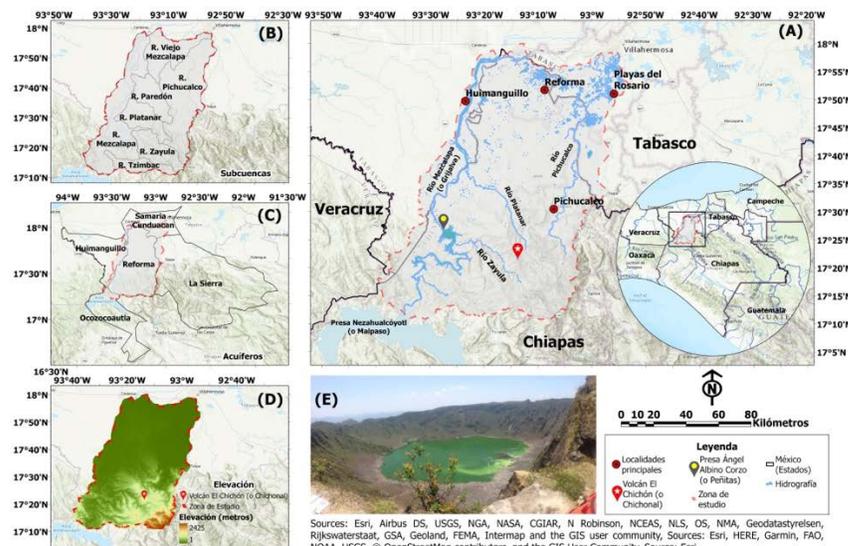


Figura 1. Área de estudio: a) Ubicación; b) Subcuencas; c) Acuíferos; d) Elevación, y e) Panorámica del volcán El Chichón (o Chichonal).

En tanto que la geología de la zona, al cubrir el acuífero Reforma prácticamente la totalidad del área estudiada, las características geológicas de este acuífero pueden ser representativas para el área estudiada. En la porción sur del área, correspondiente al límite norte de la Sierra de Chiapas, se encuentran aflorando rocas del Cretácico Inferior y Superior surcadas por una serie de fallas y plegamientos, así como sedimentos Terciarios y rocas ígneas extrusivas. Tienen amplia distribución las rocas calizas y les siguen lutitas y areniscas muy intemperizadas, como consecuencia del clima cálido y las altas precipitaciones de esta zona. El resto del área corresponde a depósitos Cuaternarios y a sedimentos miocénicos. La parte principal del acuífero se localiza en la Planicie Costera constituida por depósitos granulares finos con espesores de alrededor de 30 m, cubriendo los sedimentos del Terciario (lutitas y areniscas) que constituyen la Planicie Costera del Golfo. Esta zona se encuentra configurada por una terraza aluvial del Pleistoceno, actualmente fragmentada y muy desgastada, que se eleva sólo pocos metros arriba de la llanura aluvial del Reciente (el Holoceno) e integrada por una composición de canales de ríos activos e inactivos, diques naturales y pantanos secundarios (Plascencia *et al.*, 2014; DOF, 20/04/2015). En general, se muestra la Figura 2 una caracterización geolitológica de mayor detalle sobre el área estudiada.

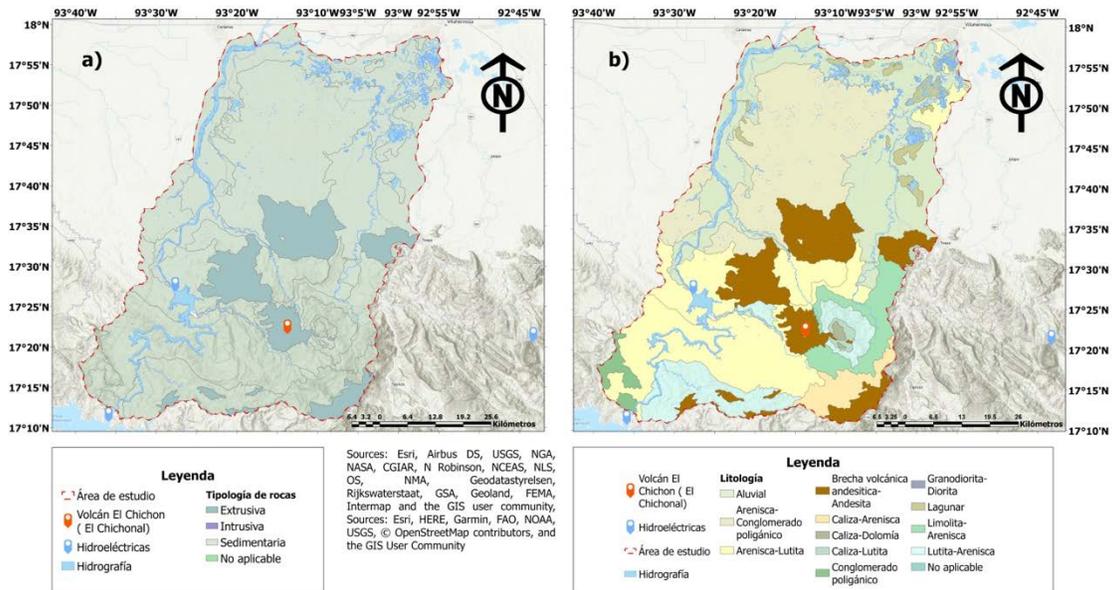


Figura 2. Características geolitológicas del área de estudio: a) tipología de rocas y b) litología.

METODOLOGÍA

Para cumplir con el objetivo propuesto para esta investigación, se llevaron a cabo varias etapas fundamentales (Figura 3). En primer lugar, se realizó una recopilación de información relacionada con la geología de la zona de estudio. Posteriormente, se obtuvo la información aeromagnética de las 9 cartas magnéticas a escala 1:50,000 en el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en formato PDF (Pichucalco E15-C29, Reforma E15-C19, Raudales Malpaso E15-C48, Villahermosa E15-D11, Huimanguillo E15-C18, Rómulo Calzada E15-C38, Estación Chontalpa E15-C28, Ixhuatán E15-C39, Tecpatán E15-C49), a las cuales se les aplicaron tratamientos para mejorar la calidad de las imágenes para su posterior digitalización y la delimitación del área de estudio en el sistema de información geográfica *ArcMap*.

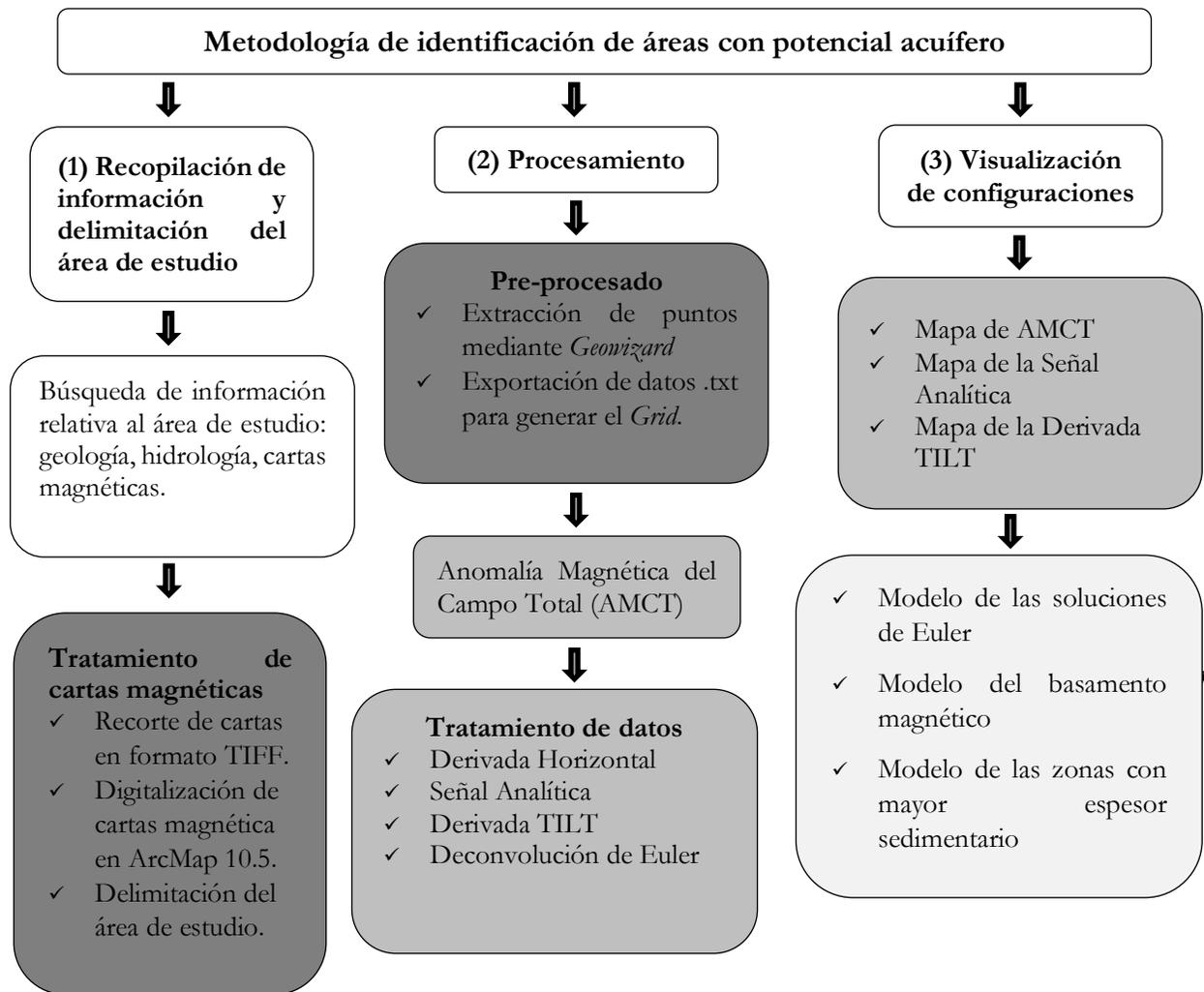


Figura 3. Metodología de identificación de áreas con potencial acuífero. Nota: Servicio Geológico Mexicano (SGM); Anomalia Magnética de Campo Total (AMCT) y TILT (Derivada TILT).

Una vez concluido el proceso de digitalización, se continuó con el preprocesado, el cual consistió en la agrupación de los datos correspondientes a las nueve cartas magnéticas. A continuación, se generó una matriz de datos inicial o *grid* (archivo GRD) que posteriormente se cargó al *software Oasis Montaj*, generando así el mapa de Anomalia Magnética de Campo Total (AMCT). Consecuentemente, se aplicaron diversos filtros o algoritmos matemáticos considerados en la metodología para el procesamiento de los datos, tal como se muestra en la Tabla 1. Derivado de ello, se obtuvieron los distintos mapas correspondientes a los filtros aplicados, los cuales fueron Anomalia Magnética del Campo Total (AMCT), Señal Analítica y Derivada TILT.

Tabla 1. Algoritmos matemáticos para el tratamiento de datos

Algoritmo matemático	Descripción
Gradiente Horizontal	Técnica principalmente usada para la detección y delimitación de contactos magnéticos, permitiendo aproximar localizaciones horizontales de los bordes de la fuente que produce la anomalía magnética (Roest & Pilkington, 1993; Phillips, 2000).
Señal Analítica	Técnica propuesta por Nabighian (1972) y mejorada por Roest & Pilkington (1992) que es utilizada para delinear los límites o bordes de las fuentes magnéticas, similar al gradiente horizontal, con la diferencia que la SA considera las variaciones verticales del campo magnético, de esta manera siendo útil para inferir la profundidad, localización y geometría de las fuentes.
Derivada TILT	Técnica utilizada para el reconocimiento de la localización horizontal y la extensión de las fuentes, mediante la detección de los bordes de estas. En comparación a otros algoritmos de detección de bordes, esta técnica tiene la ventaja de detectar no solo los bordes de las fuentes someras sino también los bordes de las fuentes profundas (Miller & Singh, 1994).
Deconvolución de Euler	Técnica aplicada por Thompson (1982) para obtener estimaciones de profundidad y localización de fuentes causantes de anomalías magnéticas, así como inferir las tendencias estructurales de dichas fuentes mediante la implementación de un índice estructural correspondiente a un tipo de estructura en particular.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el mapa de la anomalía magnética de campo Total (AMCT) mostrado en la Figura 4a, se observa una anomalía con comportamiento dipolar de gran longitud de onda (dimensiones mayores) que se extiende sobre el área de estudio. La parte con valores de tendencia positiva se ubica al norte, y la parte de valores negativos al sur. La dirección principal de las anomalías presentes en esta configuración es NE-SW. Según la distribución de subcuencas hidrográficas en la zona, los bajos magnéticos están enmarcados en ciertas porciones de las subcuencas R. Zayula, R. Pichucalco, R. Tzimbac y R. Platanar, al sureste de la zona de estudio. Cabe señalar que esta zona está asociada al vulcanismo reciente producido por el volcán Chichonal, por lo que las respuestas magnéticas presentes se ven fuertemente afectadas, debido a que las anomalías termales en profundidad afectan la magnetización de las rocas y, por lo tanto, a las anomalías magnéticas observadas en superficie (Carrillo-de la Cruz *et al.*, 2020).

En la zona norte, predomina una anomalía positiva de gran longitud de onda. Esta zona coincide con la porción correspondiente a la Planicie Costera del Golfo, donde encontramos los valores altimétricos más bajos. Superpuestas a estas dos anomalías mayores tenemos una serie de anomalías de dimensiones menores. En la porción central, entre los valores positivos mencionados anteriormente, tenemos una zona caracterizada por un fuerte gradiente con contrastes de valores magnéticos de menor extensión que guardan una dirección preferencial noroeste-sureste (NE-SW). Este comportamiento magnético coincide con una zona de

transición entre materiales de cobertura sedimentaria y productos volcánicos. Es en esta región en donde la altimetría del relieve comienza a descender.

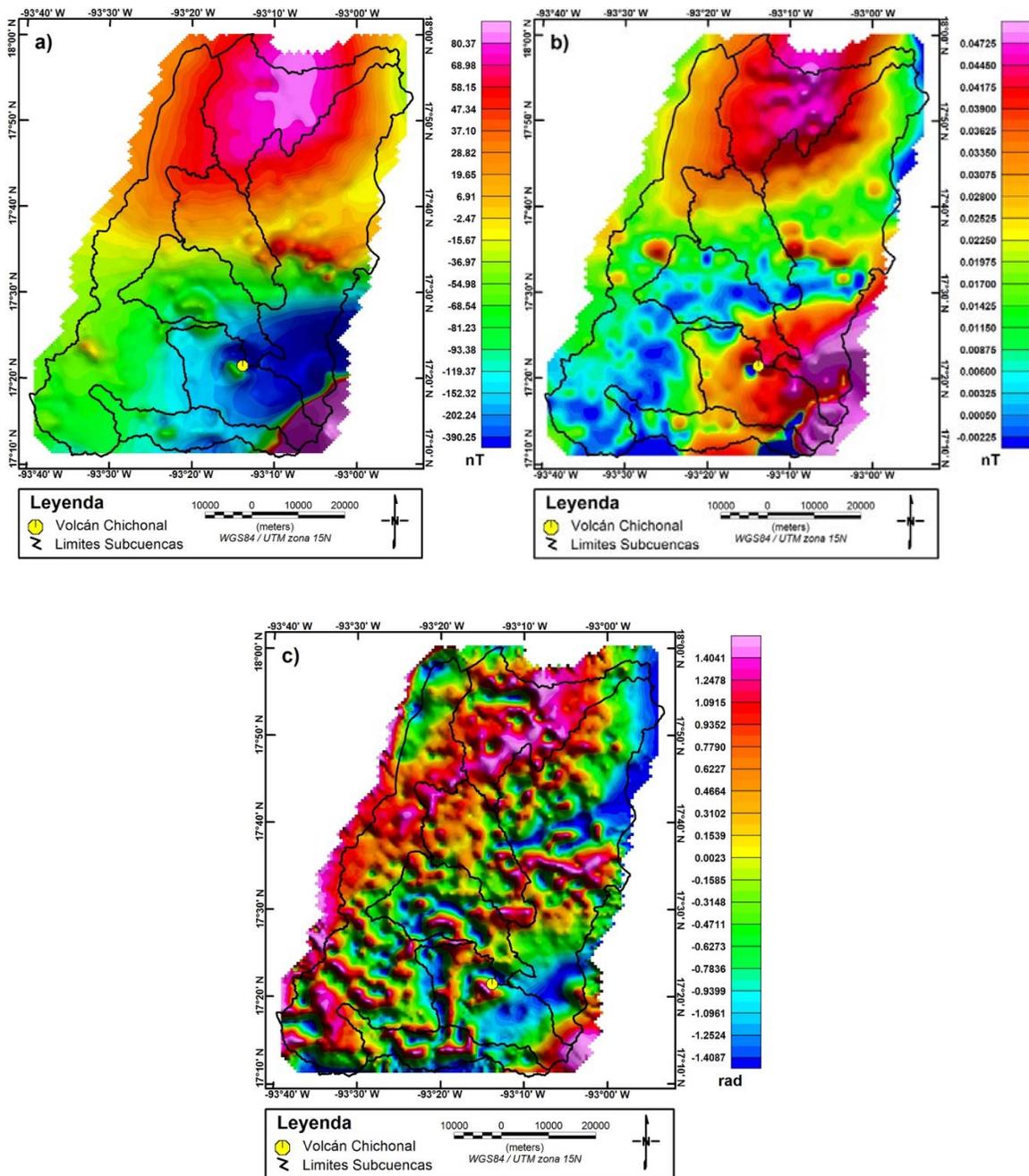


Figura 4. a) Configuración de anomalía magnética del campo total (AMCT). b) Configuración de Señal Analítica de la AMCT. c) Configuración de derivada TILT de la AMCT.

Asimismo, la configuración de la señal analítica de la AMCT (Figura 4b), al igual que la derivada TILT, es una herramienta que delimita gradientes, ayudando a establecer los límites de los cuerpos que originan las anomalías (i.e., Pérez-Corona *et al.*, 2017). De misma forma como en la

AMCT, la dirección principal de las anomalías presentes en esta configuración es NE-SW. El primer alto magnético está ubicado al norte de la zona de estudio, manteniendo el comportamiento suave como se ha mencionado anteriormente. El bajo magnético presente al sureste en la AMCT está ahora representado por valores positivos intermedios. Estas dos anomalías mayores son separadas por un *trend* de bajos magnéticos alienados con dirección suroeste-noreste (NE-SW). Respecto al bajo y alto magnético de la gran anomalía dipolar asociada al volcán Chichonal, estos se encuentran claramente definidos por la señal analítica.

La configuración de la derivada TILT de la AMCT, mostrada en la Figura 4c, indica una serie de lineamientos distribuidos en toda la zona de interés, asociados con fuentes superficiales que en un principio estaban superpuestas a las anomalías de carácter regional, por tal razón es posible observar una mayor cantidad de fuentes magnéticas de menor tamaño. Al igual que en las configuraciones anteriores, la dirección principal de las anomalías presentes en esta configuración es NE-SW. Nótese que las repuestas magnéticas muestran tendencias lineales, por lo que pueden representar características estructurales de interés hídrico (zonas de fallas y/o fracturas), puesto que se trata de un algoritmo matemático útil para la detección de contactos entre cuerpos magnéticos, debido a su naturaleza. Respecto a la zona sur, se observan una serie de altos magnéticos con dirección preferencial NE-SW distribuidos por toda la región, los cuales no presentan un interés hídrico debido a que estas respuestas coinciden con la zona con relieves más altos que corresponden a las denominadas Montañas del Norte. Estos rasgos se mantienen presentes hasta la parte central de la zona estudiada, punto a partir del cual la altimetría del relieve comienza a descender. Asimismo, se muestra un alto magnético de dimensiones considerables en la zona norte con dirección NE-SW, sobre la cual se encuentran superpuestas una serie de anomalías de dimensiones menores. Esta zona corresponde al área de mayor interés o potencial acuífero debido a que se encuentra en la porción de menores valores altimétricos, estando influenciada por los escurrimientos de agua provenientes de las partes altas en la zona estudiada. Como se observa en la Figura 4c, la derivada TILT también enfatiza los límites del alto magnético de la anomalía dipolar asociada con el volcán Chichonal.

Según Padilla y Sánchez (2007), las rocas de la zona de estudio se encuentran afectada por una serie de rasgos estructurarles (pliegues y fallas) producto de los procesos geológicos que configuraron la geología de la zona de estudio y sus alrededores. Estos rasgos estructurales distribuidos tienen una dirección preferencial NE-SW. Como ya me menciono, las anomalías presentes en las 3 configuraciones mostradas en la Figura 4 presentan principalmente direcciones NE-SW, mostrando una fuerte relación con los rasgos estructurales propuestos por Padilla y Sánchez (2007). En concreto, los valores de tendencia positiva distribuidos particularmente al norte de la zona de estudio se encuentran presentes en las tres configuraciones obtenidas (Figura 4). En este sentido, el alto magnético sobresaliente en todas las configuraciones podría estar asociado con un anticlinal.

En relación con la construcción del modelo magnético en la zona estudiada, se aplicó la Deconvolución de Euler (DE) para los índices estructurales 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 utilizado una ventana de 9x9 datos, y así obtener los rasgos de profundidad asociados a cambios en la geometría de la distribución de los materiales magnéticos que constituyen la base para la construcción del modelo magnético (Figura 5). Todas las soluciones obtenidas con la DE fueron integradas a una misma base de datos. Posteriormente se interpolaron estos valores utilizando el método de vecinos cercanos en el software *Voxler 4.1*, esto con el objetivo de integrar la respuesta de una fuente magnética equivalente asociada a la capa de roca magnética, que constituye el basamento cristalino impermeable. El uso de un solo índice estructural solo

proyecta una parte de la estructura, así que al interpolar las soluciones se genera una imagen que muestra la distribución de estas fuentes magnéticas (Figura 5).

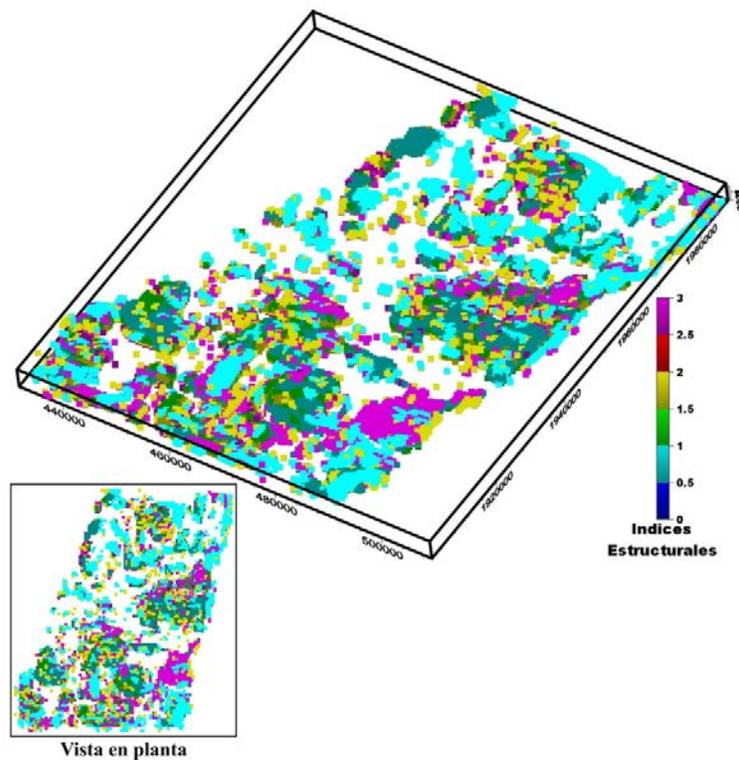


Figura 5. Visualización 3D de las soluciones de la Deconvolución de Euler para los índices estructurales. Nota: 0.5 (Azul marino), 1.0 (Azul celeste), 1.5 (Verde), 2.0 (Amarillo), 2.5 (Rojo) y 3.0 (Morado). Las zonas en blanco en el área estudiada corresponden a las porciones en donde no tienen soluciones de Euler. En la porción inferior izquierda se muestra la vista en planta de los resultados.

Una vez interpoladas las soluciones, se realizó un proceso de asociación o conexión de fuentes para ayudar visualmente a resaltar la presencia de materiales magnéticos asociados al basamento, contrayendo así un modelo tridimensional (Figura 6, 7a). En las Figuras 7b y 8a, las áreas iluminadas en color azul corresponden a zonas en donde no se encontró una fuente magnética equivalente dentro de la dispersión en la interpolación. Estas zonas son asociadas a espesores de paquetes sedimentarios presentes en la zona de estudio y representan las posibles zonas con mayor potencial para el almacenamiento de fluidos. Los colores oscuros se asocian a la delimitación de lo que suponemos es el basamento magnético. Cabe señalar que estos espesores alcanzan profundidades mayores a los 3,000 metros en esta zona. Asimismo, la Figura 8b corresponde a la superposición de las zonas constituidas por espesores sedimentarios junto con los escurrimientos de las regiones topográficamente más altas, pudiéndose apreciar una buena correlación entre estos dos. En este sentido, se puede observar cómo los escurrimientos provenientes de las partes más altas (sur de la zona estudiada) desembocan en las zonas de espesor sedimentario más profundo (centro y norte de la zona estudiada). Por tanto, se puede inferir, con fundamento en la altimetría y la magnetometría, que la parte central-norte del área estudiada alberga zonas de potencial acuífero.

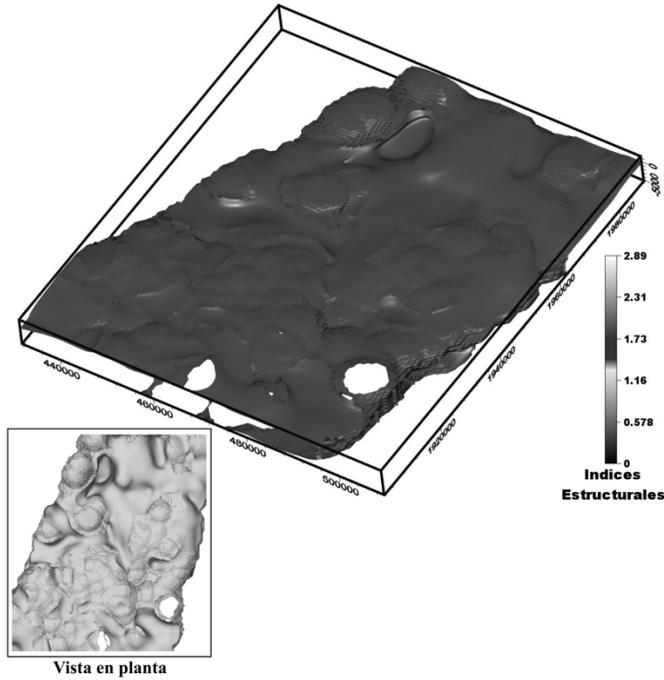


Figura 6. Visualización 3D del modelo del basamento obtenido a través de la interpolación de las soluciones de Euler. Nota: En la porción inferior izquierda se muestra la vista en planta de los resultados.

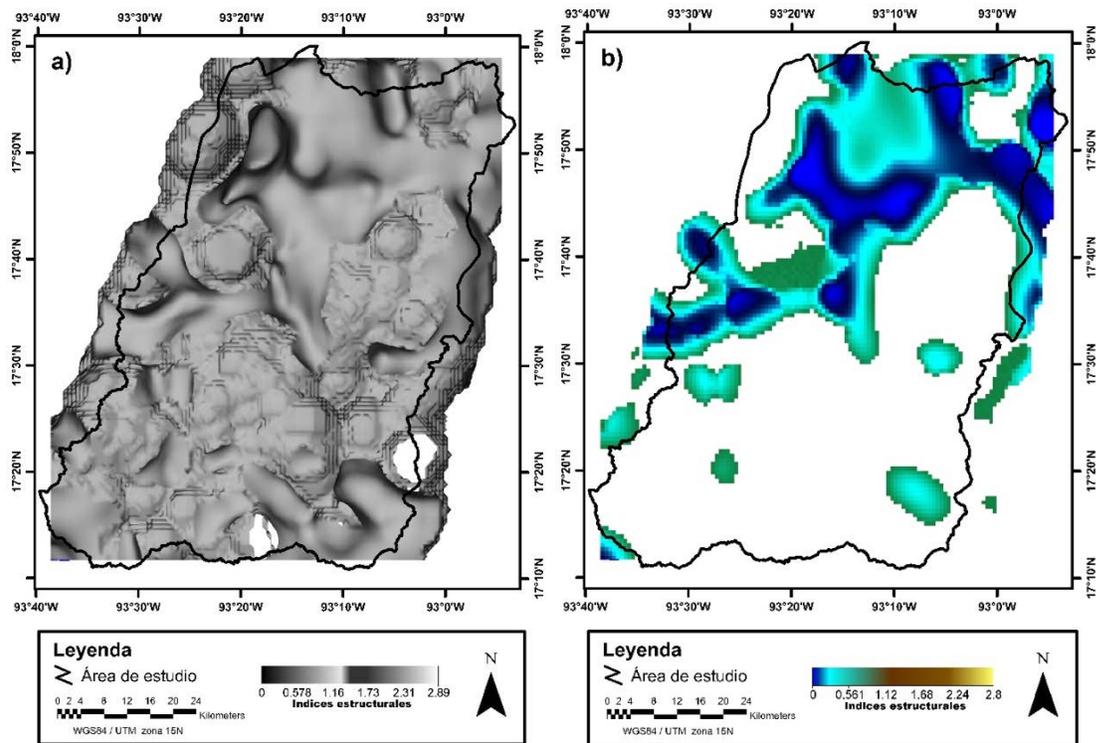


Figura 7. a) Modelo de basamento correspondiente a la zona de estudio (obtenido al interpolar los índices estructurales); b) Zonas de mayor espesor sedimentario (obtenido al interpolar los índices estructurales). Nota: Las barras de colores para a) y b) representan los valores de los índices estructurales interpolados.

Esta zona presenta una compleja evolución sedimentológica y tectónica, pasando de facies carbonatadas del Jurásico-Cretácico a secuencias siliclásticas del Terciario con una gran aportación de sedimentos arenosos con espesores que alcanzan hasta los 6,000 metros hacia la zona costera y que son derivados de la erosión de las zonas continentales altas (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1993; Padilla y Sánchez, 2007). El promedio de la elevación del nivel estático, con base en la red piezométrica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es de 12 m s. n. m. y corresponde a flujos intermedios. Interactuando con la superficie se identifican flujos subterráneos locales en zonas focalizadas de altos topográficos que funcionan como zonas locales de infiltración. Se considera un acuífero libre de buena permeabilidad. En un registro geofísico de un pozo en Cunduacán, Tabasco se interpreta que el acuífero presenta buenas propiedades en una secuencia alternante de arenas, arcillas y limos, donde a partir de los 150-250 metros de profundidad registrados existen capas de arena gruesa, arcillas, y arena media con diferentes espesores (Aurora Geofísica, 2016).

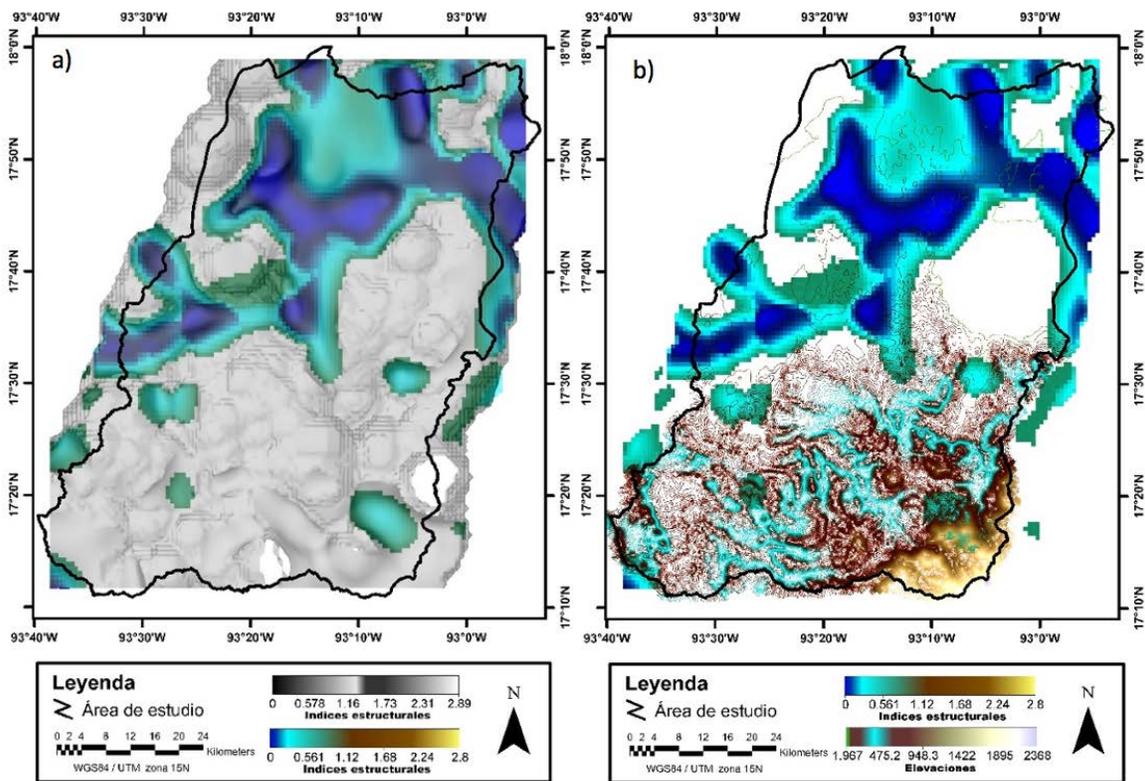


Figura 8. a) Superposición del modelo de basamento y las soluciones correspondientes a las zonas de mayor espesor sedimentario; b) Superposición de las zonas de mayor espesor sedimentario y los escurrimientos potenciales provenientes de las partes más altas [m].

En este contexto, la zona de estudio se encuentra ubicada principalmente en la provincia hidrogeológica Sierras y Valles del Sureste, donde predominan altos niveles de precipitación y riqueza hídrica superficial de abundantes caudales (Grijalva y Usumacinta), siendo las zonas bajas las receptoras de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento subterráneo proveniente de las zonas altas (Velázquez-Aguirre & Ordaz-Ayala, 1993). A todo ello, respecto a la litología mostrada previamente, el área de estudio se caracteriza por materiales permeables y de alta

infiltración, destacando la arenisca-lutita en la parte alta de la zona chiapaneca y una llanura de materiales aluviales en la parte baja del estado de Tabasco.

Con base en los resultados mostrados se evidencia que el método magnetométrico identifica las zonas potenciales acuíferas regionales, por lo que para una mejor caracterización de los acuíferos se recomienda se realicen otros estudios geofísicos como gravimetría y el método transitorio electromagnético para poder corroborar los espesores sedimentarios y el potencial hídrico en la zona, así como una testificación de las zonas con notables características de almacenamiento para un control estratigráfico y para fines de explotación sostenible del agua subterránea de los acuíferos regionales de la zona.

Adicionalmente, cabe señalar que, según datos a febrero 2019 del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la CONAGUA, en la zona de estudio se tienen otorgadas 273 concesiones de agua con un volumen total de 62.2 hectómetros cúbicos/año, concentradas fundamentalmente en la agricultura (34%), industria (41%), y tan solo un 15.4% en abastecimiento doméstico. Asimismo, estas concesiones se encuentran ubicadas en el área media-baja de la zona de estudio (Figura 9), por lo que los resultados de la presente investigación confirman la idoneidad de la metodología usada para el análisis de las aguas subterráneas, así como para la identificación preliminar de áreas y estructuras geológicas que podrían albergar un potencial acuífero a nivel cuenca.

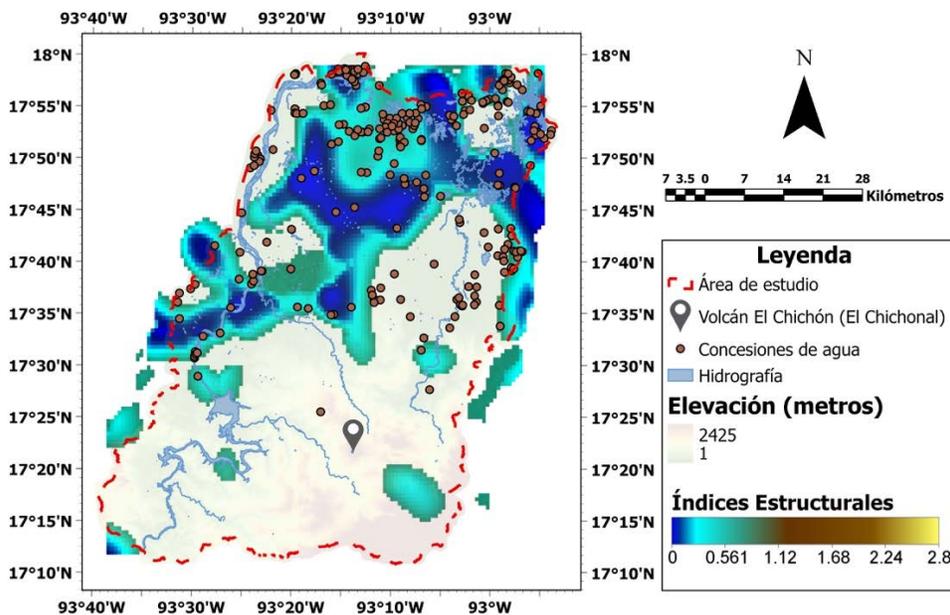


Figura 9. Concesiones de agua en el área de estudio (REPGA-CONAGUA) y las zonas de mayor espesor sedimentario.

Desde esa perspectiva, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, el uso de la magnetometría puede ser clave en la delimitación de los rasgos estructurales de las rocas (fallas, intrusiones o la morfología) que configuran a los acuíferos. No obstante, la aplicación geohidrológica de las técnicas magnetométricas no se encuentran muy extendidas en México, fundamentalmente por dos razones: 1) Se trata de un método auxiliar o complementario a otros más determinativos para la detección de rocas que albergan agua y 2) Por el mayor grado de difusión que poseen otros métodos geofísicos, como los eléctricos, en los estudios geohidrológicos (CONAGUA, 2007). Por tanto, más allá de las diferencias entre los métodos geofísicos, la fortaleza de los

métodos magnetométricos radica en que permiten analizar grandes superficies, y, por ende, reducir el costo para el uso de sondeos eléctricos verticales (SEV's) en áreas específicas, teniendo así un conocimiento previo sobre las unidades de rocas que contienen acuífero en la zona estudiada. De tal manera, podrían utilizarse como método complementario en el análisis y conocimiento de las aguas subterráneas.

En tal sentido, los resultados obtenidos en la presente investigación puede representar una herramienta preliminar y de bajo coste para el análisis y conocimiento de las aguas subterráneas, así como para la toma de decisión en torno al ordenamiento, protección y manejo territorial de áreas específicas de las cuencas hidrológicas, con la finalidad, entre otras cosas, de garantizar eventuales o futuras fuentes para el abastecimiento de agua ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos y contaminación de las actuales, respectivamente. Por tanto, los resultados de este trabajo se enmarcan como una contribución en esa dirección.

CONCLUSIÓN

Los resultados muestran las características y rasgos sobresalientes de las principales fuentes magnéticas que fueron interpretados de las diferentes configuraciones obtenidas al aplicar a los datos los algoritmos matemáticos propuestos. Aunado a lo anterior, el análisis del modelo 3D del basamento magnético construido, confirman que el método magnetométrico representa una herramienta factible para la identificación preliminar de zonas constituidas por unidades rocosas con posible potencial acuífero, siendo este el caso para la zona considerada en esta investigación. En la zona de estudio cabe destacar dos puntos importantes:

- 1) Los resultados obtenidos por la derivada TILD muestran una serie de altos magnéticos de distinta naturaleza, siendo los de mayor importancia aquellos distribuidos en la región norte. Estos muestran una dirección preferencial NE-SW y rasgos estructurales de interés hídrico observados en las anomalías positivas de menores dimensiones, los cuales pueden representar contactos entre cuerpos magnéticos traducidos como zonas de fallamiento y/o fracturas; y
- 2) Los escurrimientos provenientes de las partes más altas, al sur de la zona estudiada, descargan en las zonas de espesor sedimentario más profundo, al centro y norte de la zona estudiada, sugiriendo la presencia de zonas con potencial acuífero.

No obstante, para un mayor detalle y conocimiento de la profundidad de la zona de estudio se requiere la aplicación complementaria de métodos más resolutivos que indiquen la presencia del recurso hídrico, como los sondeos eléctricos verticales (SEV's). Por tanto, la metodología aplicada podría reducir los costos asociados a la planeación de campañas de exploración por métodos directos e indirectos. En tal sentido, la presente investigación es un aporte al conocimiento y comprensión de las aguas subterráneas, y a su vez, una contribución para la toma de decisiones en los temas geohidrológicos, ordenamiento territorial, protección y conservación del recurso agua, y las políticas públicas asociadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro del Cambio Global y la Sustentabilidad, A.C. (CCGS) por las facilidades durante la realización de esta investigación. Además de expresar su agradecimiento a los revisores anónimos por sus comentarios y recomendaciones en la mejora de esta

investigación. ORMP también desea agradecer al programa Cátedra-CONACYT y al proyecto Cátedras-CCGS no. 963 “Hacia un manejo sustentable del agua en el sureste de México y áreas adyacentes de Centroamérica”.

REFERENCIAS

- Alatorre-Zamora, M., Campos-Enríquez, J., Rosas-Elguera, J., Peña-García, L., Maciel-Flores, R., & Fregoso-Becerra, E. (2015). Chapala half-graben structure inferred. A magnetometric study. *Geofísica Internacional*, 54(4). doi: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2015.54.4.1699>
- Alatorre-Zamora, M., Rosas-Elguera, J., Pérez-Rodríguez, G., Campos-Enríquez, J., & Maciel-Flores, R. (2012). Contribución de la deconvolución de Euler y la señal analítica en 3D al análisis de riesgos por fallas en el graben de valle de banderas. *e-Gnosis*, 10, 1-31. Recuperado el 12 de julio de 2019, en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73026905001>
- Allred, B., Daniels, J. J., & Ehsani, M. R. (2008). *Handbook of Agricultural Geophysics*, 432 pp., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Álvarez-Soberano, A., & Medrano-Pérez, O. R. (2020). Caracterización geomorfológica de la subcuenca río Mezcalapa, región hidrológica Grijalva-Usumacinta (RH-30) en sureste de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 28(80), 32-44. doi: <https://doi.org/10.33064/iycuaa2020803002>
- Arango-Galván, C., Flores-Márquez, E., Hernández-Espriú, A., Arias-Paz, A., & Sagahón-López, E. (2016). Shallow geoelectrical characterization of a small portion of the Basin of Mexico aquifer: Towards a better resource management. *Geofísica Internacional*, 55(3). doi: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2016.55.3.1723>
- Aurora Geofísica. (2016). Registro geofísico de pozos. (Reporte técnico consultoría).
- Belmonte-Jiménez, S.I., Bortolotti-Villalobos, A., Campos-Enríquez, J.O., Pérez-Flores, M.A., Delgado-Rodríguez, O., & M. d. L. A. Ladrón de Guevara-Torres. (2014). Electromagnetic methods for characterizing a site contaminated by leachates. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(2), 317-329.
- Belmonte-Jiménez, S.I., Jiménez-Castañeda, M.E., Pérez-Flores, M.A., Campos-Enríquez, J.O., López-Reyes, J.A., & L. Salazar-Peña. (2012). Characterizing of a leachate contaminated site integrating geophysical and hydrogeological information. *Geofísica Internacional*, 51(4), 309-321. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2012.51.4.1228>
- Binley, A., Hubbard, S. S., Huisman, J. A., Revil, A., Robinson, D. A., Singha, K., & Slater, L. D. (2015). The emergence of hydrogeophysics for improved understanding of subsurface processes over multiple scales. *Water Resources Research*, 51, 3837–3866. doi:10.1002/2015WR017016.
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water*, 9(2), 140. doi: <https://doi.org/10.3390/w9020140>
- Campos-Enríquez, J.O., Delgado-Rodríguez, O., Chávez-Segura, R., Gómez-Contreras, P., Flores-Márquez, E.L., and F.S. Birch. (1997). The subsurface structure of the Chalco sub-basin (Mexico City) inferred from geophysical data. *Geophysics*, 62, 23-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444123>
- Campos-Enríquez, J.O., Flores-Márquez, E.L., and R. Chávez. (1997). Geophysical characterization of hydrogeologic systems. *The Leading Edge*, 16(12), 1,769-1,773. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1437576>
- Carrillo-de la Cruz, J. L., Prol-Ledesma, R. M., Gómez-Rodríguez, D., & Rodríguez-Díaz, A. A. (2020). Analysis of the relation between bottom hole temperature data and Curie temperature depth to calculate geothermal gradient and heat flow in Coahuila, Mexico. *Tectonophysics*, 228397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228397>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2018). Atlas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, México. Recuperado el 04 de julio de 2019. Disponible en: https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/04/AAM_2018.pdf
- _____. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Exploración gravimétrica y magnetométrica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Editor). México.

- Cortés F.I.A., Pérez M.L., & Mogollón H.M. (2012). Mexico's Water Challenges for the 21st Century. In: Oswald Spring Ú. (Eds.), *Water Resources in Mexico* (pp. 21-38). Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 7. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dena O., O., C., G., Leyva, J., Domínguez A., M., Rascon., E., Gómez, F., & Doser., D. (2013). Uso de métodos geofísicos subsuperficiales en el control de inundaciones: un estudio de resistividad para definir la capacidad de almacenamiento subterráneo de un cuerpo de arena en Ciudad Juárez, México. *Geofísica Internacional*, 51 (3). doi: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2012.51.3.1194>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (20/04/2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Reforma (0702), Estado de Chiapas. Publicado en el Diario Oficial de la Federación en fecha 20 de abril de 2015. Recuperado el 17 de julio de 2019, en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102903/DR_0702.pdf
- Ernstson, K. (2006). Magnetic, geothermal, and radioactivity methods. In: Kirsch R. (eds.), *Groundwater Geophysics* (pp. 275-294). Springer, Berlin, Heidelberg. doi: https://doi.org/10.1007/3-540-29387-6_9
- ESRI. (2019). ArcGIS and ArcMap (*ArcMap 10.5*). Software Esri. Disponible en: www.esri.com
- ESRI. (2020). ArcGIS Pro. Software Esri. Disponible en: <https://www.esri.com/es-es/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Flores-Márquez, E.L., Campos-Enríquez, J.O., Chávez-Segura, R. and J.A. Castro-García. (1998). Saltwater intrusion of the Costa de Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico: A numerical simulation. *Geofísica Internacional*, 37(3). DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1998.37.3.392>
- Florsch, N., Muhlach, F., & Kammenthaler, M. (Eds.). (2019). *Everyday Applied Geophysics 2: Electromagnetics and Magnetics*. ISTE Press - Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01434-9>
- GEOSOFT. (2019). Oasis Montaj (software: versión 8.4). Visit: www.geosoft.com
- Golden Software. (2019). Voxler (software: versión 4.1). Visit: www.goldensoftware.com
- Guevara-Mansilla, Ó., Ventura-Houle, R., & Andrade-Limas, E. (2017). Uso de sondeos electromagnéticos en la caracterización hidrológica del acuífero del altiplano de Tula, Tamaulipas. *Investigación y Ciencia*, 25 (70), 23-30. Recuperado en 11 de julio de 2019, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67451351003>
- Hatch-Kuri, G. (2017). El agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En Christian Denzin, Federico Taboada y Raúl Pacheco-Vega (Eds.), *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 149-170). Friedrich-Ebert-Stiftung, Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica. Consultado el 1 de julio de 2019. <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/14377.pdf>
- Henderson, R. J. (1992). Urban Geophysics — A Review. *Exploration Geophysics*, 23:4, 531-542. doi: 10.1071/EG992531
- Hubbard, S. & Rubin, Y. (2005). Chap. 1. Introduction to hydrogeophysics. In Y. Rubin and S. Hubbard (eds.), *Hydrogeophysics* (pp. 3 – 23). Springer, New York.
- Huizar-Álvarez, R., Campos-Enríquez, J.O., Lermo-Samaniego, J.F., Delgado-Rodríguez, O. and A. Huidobro-González. (1977). Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basins of Apan and Tochac (Mexico Basin). *Geofísica Internacional*, 36(4), 217-233.
- JAXA/METI ALOS PALSAR L 2011. Accessed through ASF DAAC 11 July 2019.
- Kirsch, R. (Ed.). (2009). *Groundwater geophysics a tool for hydrogeology*. 2nd Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- López-Morales, C. A. (2017). El estado del agua en México: retos, oportunidades y perspectivas. En Christian Denzin, Federico Taboada y Raúl Pacheco-Vega (Eds.), *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (pp. 13-42). Friedrich-Ebert-Stiftung, Proyecto Regional Transformación Social-Ecológica. Consultado el 1 de julio de 2019. <http://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/14377.pdf>
- López-Loera, H., & Tristán-González, M. (2013). Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), pp. 137-156. Recuperado en 11 de julio de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222013000100012&lng=es&tlng=es.

López-Loera, H. (2014). Geofísica para la localización de Agua Subterránea en Ambientes Volcánicos Áridos de la Mesa Central. Caso La Dulcita, Villa de Ramos, San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66 (1), pp. 165-181.

Miller, H. G. & Singh, V. (1994). Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2-3): 213-217. doi: [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(94)90022-1)

Nabighian, M. N. (1972). The analytic signal of two- dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37 (3), 507-517. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1440276>

Ndougsa-Mbarga, T., Manguelle-Dicoum, E., & Campos-Enríquez, J. (2010). Gravity anomalies, sub-surface structure and oil and gas migration in the Mamfe, Cameroon-Nigeria, sedimentary basin. *Geofísica Internacional*, 46(2). doi: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2007.46.2.22>

Ojeda-Olivares, E. A., Sandoval-Torres, S., Belmonte-Jiménez, S., Campos-Enríquez, J.O., Zignol, F., Reygadas, Y., & J. Tiefenbacher. (2019). Climate Change, land use/land cover change, and population growth as drivers of groundwater depletion in the central valleys, Oaxaca, Mexico. *Remote Sensing*, 11(11),1290. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111290>

Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 19-42. doi: <https://doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a3>

Peñuela-Arévalo, L., & Carrillo Rivera, J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-Sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, 0(81), pp. 11-32. doi: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.30518>

Pérez-Corona, F., López-Loera, H., Fregoso-Becerra, E., Yutis, V., Martínez-Ruiz, V., & Dávila-Harris, P. (2017). Caracterización de lineamientos estructurales y sus implicaciones hidrogeológicas en la cuenca de Villa Hidalgo (San Luis Potosí) integrando métodos geofísicos potenciales. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69 (3), 555-576. Recuperado en 11 de julio de 2019, de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94353719003>

Phillips, J. D. (2000). Locating magnetic contacts: a comparison of the horizontal gradient, analytic signal, and local wavenumber methods. *Proceedings 70th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysics*, Expanded Abstracts, 402-405. Calgary. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1816078>

Plascencia, H., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Álvarez-Solís, D., & Musalem, K. (2014). Características físico-bióticas de la cuenca del río Grijalva. En: González-Espinosa M., Brunel-Manse M. C. (Eds.), *Montañas, pueblos y agua: dimensiones y realidades de la cuenca Grijalva* (pp: 29-79). Editorial Juan Pablos. México.

Randall-Roberts, J. A. (2000). Métodos alternos de geofísica en la búsqueda de agua subterránea In: 1st Joint World Congress On Groundwater, 2000, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater. *Revista Águas Subterráneas*, v.1. Recuperado en 12 de julio de 2019, de <https://aguassubterranas.abas.org/asubterranas/article/view/24307>

Reynolds, J.M. (2011). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd edition. John Wiley & Sons, England.

Registro Público de Derecho de Agua (REPDA). 2019. Consulta la base de datos del REPDA. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. Disponible en: <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

Robinson, D. A., Binley, A., Crook, N., Day-Lewis, F. D., Ferré, T. P. A., Grauch, V. J. S., Knight, R., Knoll, M., Lakshmi, V., Miller, R. Nyquist, J., Pellerin, L., & Singha, K. (2008). Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: a vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods. *Hydrological Processes*, 22/18, pp. 3604 - 3635. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.6963>

Roest, W.E., Verhoef, J., & Pilkington, M. (1992). Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1443174>

Roest, W. R. & Pilkington, M., (1993). Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58 (5): 653-659. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1443449>

Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T., & Or., D. (2018). A review of geophysical methods for soil structure characterization. *Reviews of Geophysics*, 56. doi: <https://doi.org/10.1029/2018RG000611>

Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Fernández-Linares, L., Zegarra-Martínez, H., Mousatov, A., & Ryjov, A. (2012). Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, Mexico. *Geofísica Internacional*, 44(3). doi: <http://dx.doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2005.44.3.197>

Silva, L. I. (1974). Criterios usados en la selección de los métodos geofísicos de prospección. *Revista geológica de Chile: An international journal on andean geology*. ISSN-e 0717-618X, ISSN 0716-0208, N°. 1, 1974, págs. 37-63.

Spring, Ú.O. & Cohen, I.S. (2012). Water Resources in Mexico: A Conceptual Introduction. In: Oswald Spring Ú. (Eds.), *Water Resources in Mexico* (pp. 5-17). Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 7. Springer, Berlin, Heidelberg.

Thompson, D. T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47(1), 31–37. doi:10.1190/1.1441278

Tinivella, U., Giustiniani, M., & Cassiani, G. (2013). Geophysical Methods for Environmental Studies. *International Journal of Geophysics*, vol. 2013, Article ID 950353, 2 pages, 2013. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/950353>.

Velázquez-Aguirre, L. & Ordaz-Ayala, A. (1993). Provincias Hidrogeológicas de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 52(1-2), pp. 15-33. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1993v52n1a3>

Vereecken, H., Binley, A., Cassiani, G., Revil, A., & Titov, K. (Eds.). (2006). *Applied Hydrogeophysics*. First edition, Springer Netherlands.