

## **Identificación de peligros naturales a partir de la cartografía geológica y perfiles de georadar en la Unidad Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas**

Ma. Teresa Flores González<sup>1</sup>, Felipe de Jesús Escalona Alcázar<sup>1\*</sup>, Jorge Bluhm Gutiérrez<sup>1</sup>,  
Santiago Valle Rodríguez<sup>1</sup>, Josefina Huerta García<sup>2</sup>, Luis Felipe Pineda Martínez<sup>1, 3</sup>,  
Baudelio Rodríguez González<sup>1</sup>, Patricia de Lira Gómez<sup>1</sup>, Sayde María Teresa Reveles Flores<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas” (UAZ-“FGS”),  
Calzada de la Universidad 108, Fracc. Progreso, C.P. 98058, Zacatecas, Zac., México.

<sup>2</sup>Unidad Académica de Ciencias Biológicas, UAZ-“FGS”, Calzada Solidaridad esquina Paseo la Bufa s/n, C.P. 98060, Zacatecas,  
Zac., México

<sup>3</sup>Unidad Académica de Ciencias Sociales, UAZ-“FGS”, Planta Baja del Edificio de Posgrados II de la UAZ, Av. Preparatoria s/n,  
Campus Universitario II, Fracc. Progreso, C.P. 98066, Zacatecas, Zac., México

\*papiasca@yahoo.com

### **Resumen**

El edificio de la Unidad Académica de Ciencias Biológicas (UACB) de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) fue construido y puesto en funcionamiento en 2010. Sin embargo, en la elección del sitio de construcción no se consideraron los criterios de riesgo ante fenómenos geológicos y geomorfológicos definidos en la normatividad oficial. El edificio se ubica en el límite oriental de un paleodeslizamiento, sobre un derrame riolítico brechado del que cayó un bloque en junio de 2016, el cual rompió la pared de un laboratorio. En este trabajo se presentan los resultados de la cartografía geológica y la interpretación de perfiles de georadar, con antenas de 100 MHz y 500 MHz, hechas en el edificio de la UACB para evaluar el riesgo geológico por deslizamiento. La estratigrafía local está definida, de la base a la cima, por el Miembro de Tobas Pumicíticas del Conglomerado Zacatecas que se encuentra de moderado a bien consolidado. Lo cubre una Toba Cristalina moderadamente argilitizada de aproximadamente 1 m de espesor. La parte superior de la secuencia es el miembro Derrame Riolítico, el cual está brechado en bloques de hasta 0.50 m de diámetro. En la parte occidental de la UACB hay un paleodeslizamiento con gradación normal formado por clastos principalmente de riolita que en la base tienen en promedio 0.50 m de diámetro.

La ubicación del paleodeslizamiento debajo de la UACB es poco clara en los perfiles de georadar; sin embargo, se infiere la distribución de las unidades litológicas que subyacen al edificio. En la planta baja se interpretaron fracturas perpendiculares a la pendiente y paralelas a las fracturas observadas pendiente abajo, fuera del edificio. En el edificio no se observaron fracturas en pisos o muros ni deformación de pisos; sin embargo, debido a la construcción de un anexo en agosto de 2018 es recomendable monitorear el posible desarrollo de fracturas.

La estructura brechada y la pendiente subvertical en el Derrame Riolítico favorecen la caída de bloques. No se descarta la caída de bloques como el de 2016, principalmente durante la temporada de lluvias, por lo que se recomienda la colocación de tuberías que drenen el agua y anclas para reducir el riesgo de nuevas caídas de bloques.

Palabras clave: Riesgo, Zacatecas, Georadar.

## Introducción

La fundación y el desarrollo de la Ciudad de Zacatecas se debieron principalmente a la actividad minera en la época de la Colonia. Los asentamientos crecieron acorde a la disponibilidad de espacio y a la cercanía con las obras mineras, por lo que el trazo fue irregular y la planeación, deficiente. Urbanísticamente, las edificaciones de la ciudad están condicionadas por la topografía irregular, por lo que las calles y los edificios fueron construidos en desnivel. Actualmente, la normatividad que se aplica en el desarrollo urbano está definida por la Ley de Planeación para el Desarrollo del Estado de Zacatecas (Periódico Oficial del Estado de Zacatecas, 2013), así como por otros documentos oficiales (Gobierno del Estado de Zacatecas, 1989, 2011, 2017). En ellos se menciona que deben considerarse elementos como la geología o la geomorfología, aunque solo son un requisito más por cumplir sin que haya un verdadero análisis o aplicación (Gobierno del Estado de Zacatecas, 1997, 2007, 2016). En términos de riesgo se hace énfasis a los derivados de las actividades mineras, mientras que los de otro tipo, como los asociados con procesos de erosión, son vagamente considerados (Escalona-Alcázar et al., 2012). Por esta situación se han hecho estudios a nivel local y regional sobre los riesgos asociados con la erosión y la influencia de la geomorfología (Enciso-de la Vega, 1994; Escalona-Alcázar, 2010, Escalona-Alcázar et al., 2003, 2012, Beltrán-Zhizhko et al., 2014). Los elementos identificados proporcionan información que debería ser considerada en la planeación del desarrollo urbano para evitar daños o la pérdida de la infraestructura.

Uno de los efectos de no considerar la litología y geomorfología se observa en la Unidad Académica de Ciencias Biológicas (UACB) de la Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas” (UAZ) (Figura 1) en donde, en junio de 2016, debido a la lluvia, se desprendió

y cayó un fragmento de un derrame riolítico que rompió la pared del Laboratorio de Docencia de Química y Bioquímica (Figura 2). El edificio de la UACB tiene menos de 10 años de haber sido construido y, además de incumplir con los lineamientos indicados en la normatividad oficial estatal, tampoco se atendió lo establecido en la norma NMX-R-003-SCFI-2011 (Secretaría de Economía, 2011) que establece (artículos 6.1.1.1 y 6.1.1.2) las condiciones hidrometeorológicas, geológicas y geotécnicas bajo las que no se debe de construir una escuela, de cualquier nivel educativo. Las limitantes indicadas en el artículo 6.1.1.2 se refieren a que se deben evitar los sitios propensos a deslizamientos del suelo, cercanos a bloques rocosos, en laderas o partes altas de cerros con posibilidad de rodar o desprenderse, los que puedan ser afectados por una posible zona de deslizamientos, o ubicados en zonas donde se puedan manifestar el fenómeno de subsidencia, hundimiento regional o agrietamiento del terreno, ya sea por un proceso natural o antrópico.

Como se observa en la Figura 1b, la UACB está en el borde de un paleodeslizamiento donde la pendiente del cerro es mayor de 15° y adyacente a un sitio propenso a la caída de bloques rocosos (figuras 2 y 3b) con en donde también hay socavación (Figura 3a) y formación de fracturas perpendiculares a la pendiente (Figura 3b) con formación de cárcavas. Para evaluar el riesgo se realizó la cartografía de las unidades litológicas y estructuras en la superficie, y un georadar para interpretar su extensión en el subsuelo. El georadar es una técnica geofísica en la que una onda electromagnética se inyecta y propaga en el suelo y subsuelo. El detalle de las imágenes del subsuelo dependerá de los contrastes entre las propiedades eléctricas, conductividad y permitividad de los materiales que atraviesa. Mientras mayor sea el contraste, mejor será la definición.

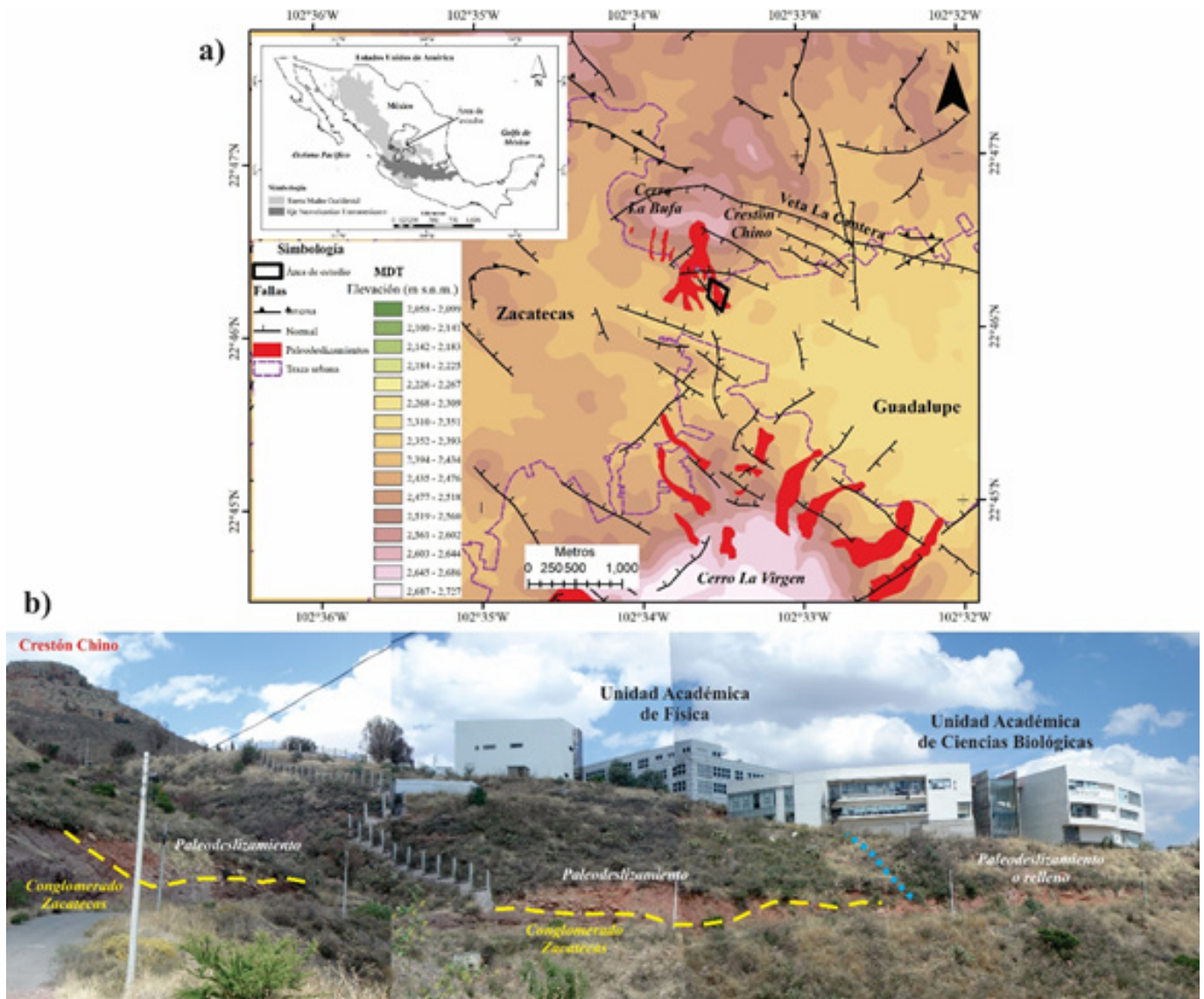


Figura 1. a) La figura insertada muestra la ubicación del estado de Zacatecas en el contexto de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico Transmexicano. La flecha muestra el área ampliada que es un modelo digital del terreno hecho a partir de las curvas de nivel del INEGI (2015) en el que se indica la ubicación del área de estudio y su relación con los paleodeslizamientos y los principales rasgos morfológicos y estructurales que la rodean (las fallas fueron tomadas de Escalona-Alcázar et al., 2003 y 2009). b) Panorámica, viendo al NW, del área de estudio, la línea azul de puntos indica el posible límite del paleodeslizamiento.

### 1.1 Deslizamientos de ladera

El término “deslizamiento” puede tener distintas acepciones dependiendo de si es utilizado por geólogos, ingenieros, constructores u otras áreas del conocimiento. En este trabajo se le agregó el prefijo “paleo” para indicar que fue un evento que ocurrió en el pasado y del que no se tienen datos de cuándo pudo haber ocurrido. El origen

de un deslizamiento incluye factores como el tipo y espesor del suelo, roca, cobertura, pendiente, vibraciones naturales y artificiales del terreno, precipitación, porosidad y permeabilidad, presión de poro, entre otros factores (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008). Un deslizamiento “es un movimiento de masa, pendiente abajo, de suelo, roca y materia orgánica debido al efecto de la gravedad, agua y también de la forma del



Figura 2. Fragmento de un derrame riolítico que en junio de 2016 rompió la pared del Laboratorio de Docencia de Química y Bioquímica de la UACB de la UAZ.



Figura 3. a) La socavación provocó el hundimiento de una parte de la entrada al edificio de la UACB; b) En el camino de la parte de abajo del edificio de la UACB (Fig. 1b) se observan la caída de bloques (posiblemente algunos son parte del relleno utilizado en la construcción) y fracturas de tensión perpendiculares a la pendiente.

terreno” (Highland y Bobrowsky, 2008). Hay al menos cinco tipos de deslizamientos, cada uno con varias subdivisiones, en el área de estudio hay de dos tipos: deslizamiento de traslación y caída de bloques.

El movimiento de traslación se caracteriza porque el movimiento ocurre a lo largo de una superficie relativamente horizontal (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008). La distancia de transporte depende de la pendiente y de la cantidad de material en movimiento. La velocidad de movimiento es lenta, de unos pocos centímetros o metros al mes o al año. Su mecanismo de disparo puede ser la estructura de la roca, la intensidad de la precipitación, el movimiento de fluidos o vibraciones. Está formado por fragmentos de rocas de todos tamaños de la parte alta del deslizamiento, así como fragmentos que arranca del sustrato por donde avanza.

El otro tipo de deslizamiento observado es la caída de bloques. Este proceso ocurre cuando hay un desprendimiento de roca, suelo o

ambos en una pendiente subvertical a lo largo de una superficie donde pudo haber ocurrido movimiento de cizalla. El material al descender lo hace por caída, rodando o brincando (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008). Las formas recomendadas para mitigar este proceso son a partir de la cobertura de los taludes con una lechada, malla ciclónica, anclas o modificación de la pendiente (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008).

### Metodología

Se realizaron seis perfiles con el georadar (Figura 4). Tres fueron en la parte externa de la UACB, con la antena de 100 MHz, y tres en la planta baja, con la antena de 500 MHz (Tabla I). En los perfiles realizados en la parte externa del edificio, debido a la forma de inmueble, hubo necesidad de cambiar de dirección para poder cubrir la parte externa del edificio; los cambios de azimut y la longitud de cada segmento se indican en la Tabla 1. Los perfiles de la parte externa fueron hechos con la antena de 100 MHz porque al tener mayor capacidad de penetración (aproximadamente

Tabla 1: Características de los perfiles de georadar realizados en la Unidad Académica de Ciencias Biológicas. En el perfil 3 la longitud es la acumulada de cada segmento (indicado con el subíndice) en el que hubo cambio de azimut.

Perfil	Latitud (°)	Longitud (°)	Antena (MHz)	Az (°)	Longitud (m)
1	22.77024	-102.55756	100	285	99
2	22.76973	-102.55862	100	270	78
3	22.76957	-102.55844	100	278 <sub>1</sub>	55.5
				307 <sub>2</sub>	93
				325 <sub>3</sub>	124
				321 <sub>4</sub>	145
				345 <sub>5</sub>	169
4	22.76997	-102.55886	500	255	12
5	22.76996	-102.55876	500	155	18.4
6	22.76991	-102.55865	500	165	16

20 m) permite tener una mejor imagen de la estructura del subsuelo. En cambio, en el interior del edificio se utilizó la antena de 500 MHz porque sus pequeñas dimensiones permitieron su uso en los pasillos y entre los muebles y así identificar estructuras en los dos primeros metros del suelo. Los parámetros de la antena de 100 MHz fueron los siguientes: velocidad de propagación de 90 m/ $\mu$ s, la cual se utiliza de forma estándar porque se desconoce cómo varía en cada capa; autostacking de 4 trazas; frecuencia de muestreo

de 1600 MHz; intervalo de trazas de 0.05 m; ventana de tiempo de 627 ns. En la antena de 500 MHz se utilizaron los mismos parámetros, excepto la frecuencia de muestreo que fue de 10,000 MHz y la ventana de tiempo de 51 ns.

El procesamiento de los radargramas se realizó con el programa RAMAC GroundVision Ver. 1.4.5. Los filtros utilizados permitieron mejorar la calidad de la señal y resaltar los cambios en las propiedades eléctricas de los materiales

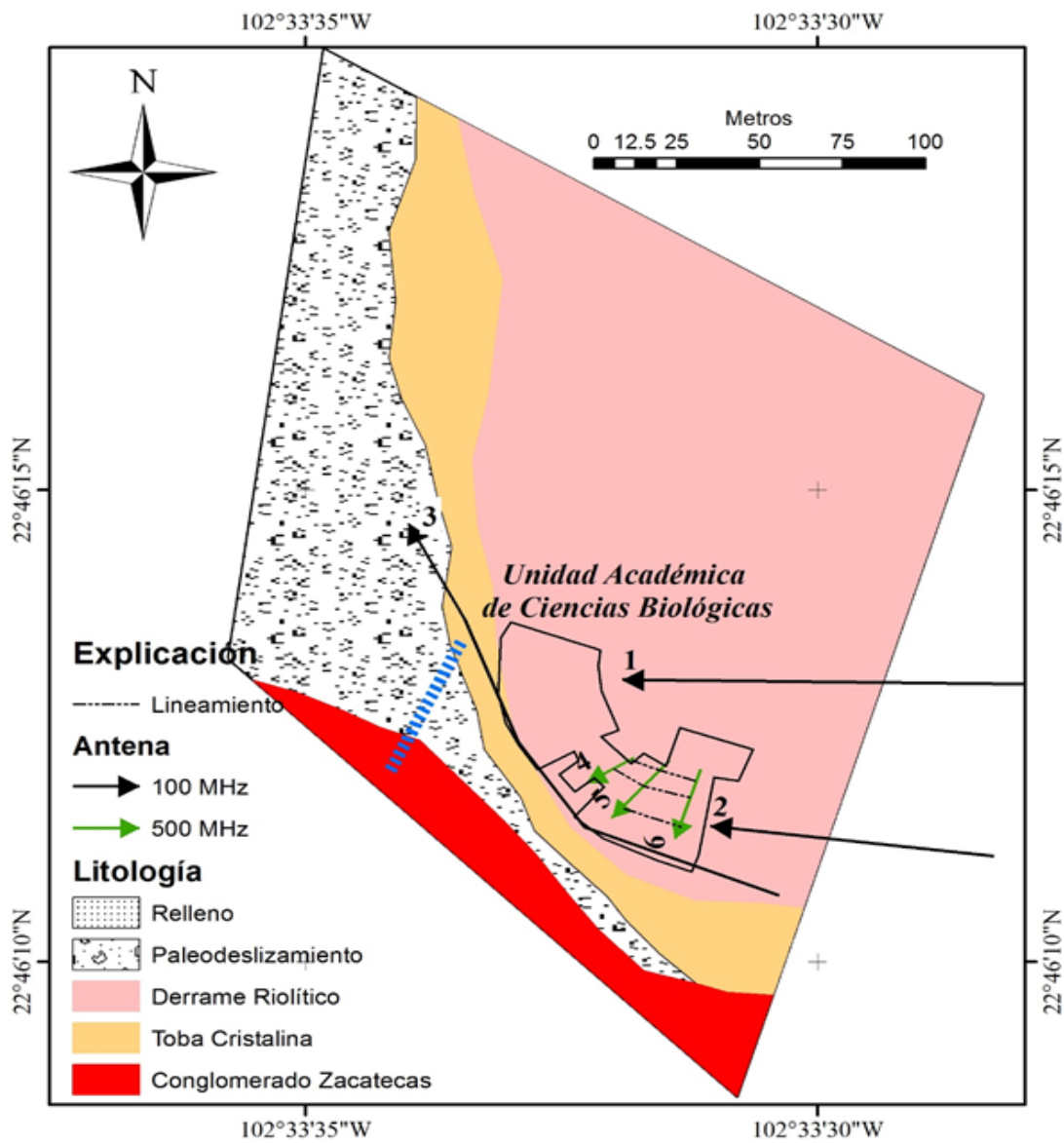


Figura 4. Mapa geológico del área de estudio. Las flechas indican la ubicación de los perfiles y el sentido en que fueron realizados; en la punta de la flecha se muestra el número del perfil. La línea negra es el perímetro de la UACB. La línea azul discontinua es la probable ubicación del límite entre el paleodeslizamiento y el material de relleno (Figura 1b).

del subsuelo. En el procesamiento de los datos del georadar se utilizaron los siguientes filtros: pasa bandas, promedio de 3x3, remoción del promedio, control automático de ganancia y ganancia variable. Todos estos filtros se utilizaron en el procesamiento de los datos de las dos antenas, variando únicamente los valores de los parámetros usados en cada filtro.

La cartografía geológica se realizó a lo largo de los caminos y aledaños al edificio de la UACB. Debido a que la mayor parte del área está cubierta por vegetación de tipo arbustivo o con materiales de relleno, sólo se pudieron analizar unos pocos afloramientos y no fue posible tomar datos estructurales.

### Marco geológico

La geología del Mesozoico de la Sierra de Zacatecas es compleja (Figura 5), en especial en los alrededores de la ciudad de Zacatecas, donde se ha reconocido una secuencia estratigráfica que incluye rocas marinas deformadas del Triásico Tardío, cubiertas en discordancia por una secuencia vulcano-sedimentaria asociada a un arco volcánico de islas del Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Centeno-García y Silva-Romo, 1997; Yta et al., 2003; Escalona-Alcázar et al., 2009; Tristán-González et al., 2009; Ortega-Flores et al., 2016). Las secuencias del Mesozoico están cubiertas en discordancia por el Conglomerado Zacatecas que tiene tobos interestratificadas y está cubierto por la Secuencia Volcánica del Terciario (Ponce y Clark, 1988; Escalona-Alcázar et al., 2003 y 2016).

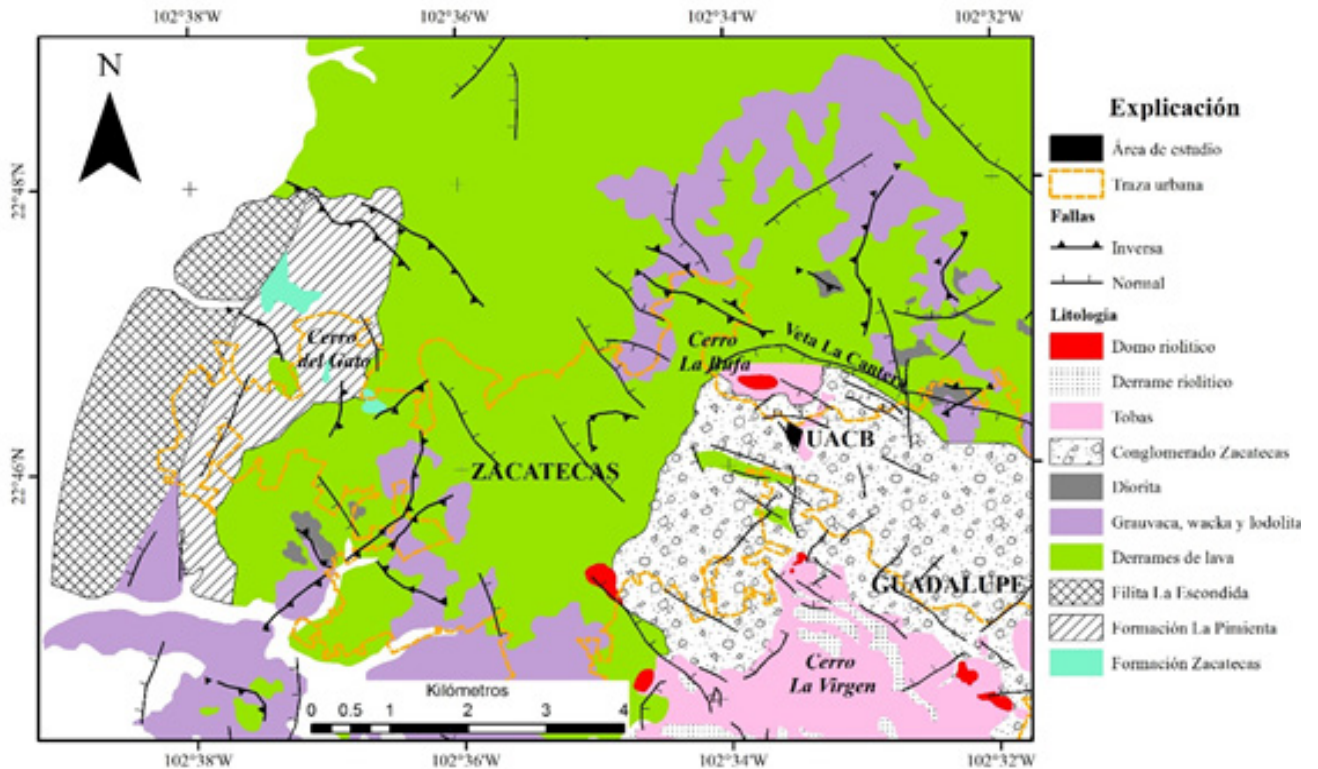


Figura 5. Mapa geológico simplificado de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe (modificado de Escalona-Alcázar et al., 2003, 2009; Ortega-Flores et al., 2016).

## Estratigrafía

En esta sección se hace una descripción sucinta de la secuencia estratigráfica en orden ascendente. La unidad litológica más antigua es la Formación Zacatecas cuya composición, ambiente de depósito y edad han sido materia de debate en el presente siglo. Burckhardt (1906) fue el primero en describirla y establecer una edad del Triásico Tardío a partir de fragmentos de fósiles de bivalvos. La edad triásica de la Formación Zacatecas fue ampliamente aceptada durante todo el siglo XX. Actualmente se cuenta con edades isotópicas en circones detríticos por el método U-Pb (Escalona-Alcázar et al., 2009; Ortega-Flores et al., 2016). A partir de las edades U-Pb y de un reconocimiento geológico general, la Formación Zacatecas fue dividida en tres unidades estratigráficas (Ortega-Flores et al., 2016): 1) una secuencia siliciclástica del Triásico Inferior, nombrada Formación Zacatecas (edad máxima de depósito ca.  $222.6 \pm 2.4$  Ma en circones detríticos); 2) una secuencia predominantemente volcánoclastica del Jurásico Medio, que define a la Formación La Pimienta (edad máxima de depósito ca.  $166 \pm 1.5$  Ma en circones detríticos); 3) una unidad siliciclástica del Cretácico Inferior correspondiente a la Filita La Escondida (edad máxima de depósito ca.  $109 \pm 2.5$  Ma en circones detríticos) (Ortega-Flores et al., 2016). El contacto entre estas unidades posiblemente es tectónico, aunque los detalles de su composición y deformación aún son poco claros. La Filita La Escondida está en contacto transicional con el Complejo Las Pilas, ambos del Cretácico Inferior (Escalona-Alcázar et al., 2009). El Complejo Las Pilas está formado por derrames de lava que tienen estructuras que varían de masiva a deformada y almohadillada. Las lavas están interestratificadas con secuencias turbidíticas e intrudidas por lacolitos dioríticos (Escalona-Alcázar et al., 2009). El complejo está cubierto en disconformidad por el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno-Oligoceno Inferior (Escalona-Alcázar et al., 2016). El conglomerado

es de tipo continental y está formado por cinco miembros que se diferencian por el tipo de clastos, estructura, relaciones de contacto y composición. Su parte inferior está formada por el miembro de conglomerado masivo y arenisca que está en discordancia con el de tobas pumicíticas que a su vez está cubierto por el de clastos de granitoide; la parte superior la forman los miembros ricos en arenisca y de clastos de basalto y riolita (Escalona-Alcázar et al., 2016). Cubre al conglomerado la Secuencia Volcánica Terciaria post-Oligoceno Tardío formada por tobas, ignimbritas y derrames riolíticos. El conjunto está cortado por diques y domos de composición riolítica/dacítica (Ponce y Clark, 1988; Escalona-Alcázar et al., 2003 y 2016).

En el área de estudio sólo aflora el miembro de tobas pumicíticas ( $35.77 \pm 0.54$  Ma, U-Pb en circones magmáticos; Escalona-Alcázar et al., 2016) del Conglomerado Zacatecas, el cual está cubierto en disconformidad por un Derrame Riolítico brechado de la Secuencia Volcánica del Terciario. Este derrame está formado por fragmentos cuyo tamaño varía de unos pocos centímetros hasta más de 1 m de diámetro. El derrame posiblemente derivó del Crestón Chino, ubicado 0.5 km al norte de la UACB (Figura 1) y se emplazó a lo largo de un paleocauce orientado aproximadamente N-S.

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la cartografía geológica, así como los obtenidos de la interpretación de los radargramas.

### Geología local

La secuencia estratigráfica del área de estudio está formada de la base a la cima por las siguientes unidades litológicas (figuras 5 y 6).

- Conglomerado Zacatecas (Figura 6a): es un conglomerado polimíctico de color rojo,

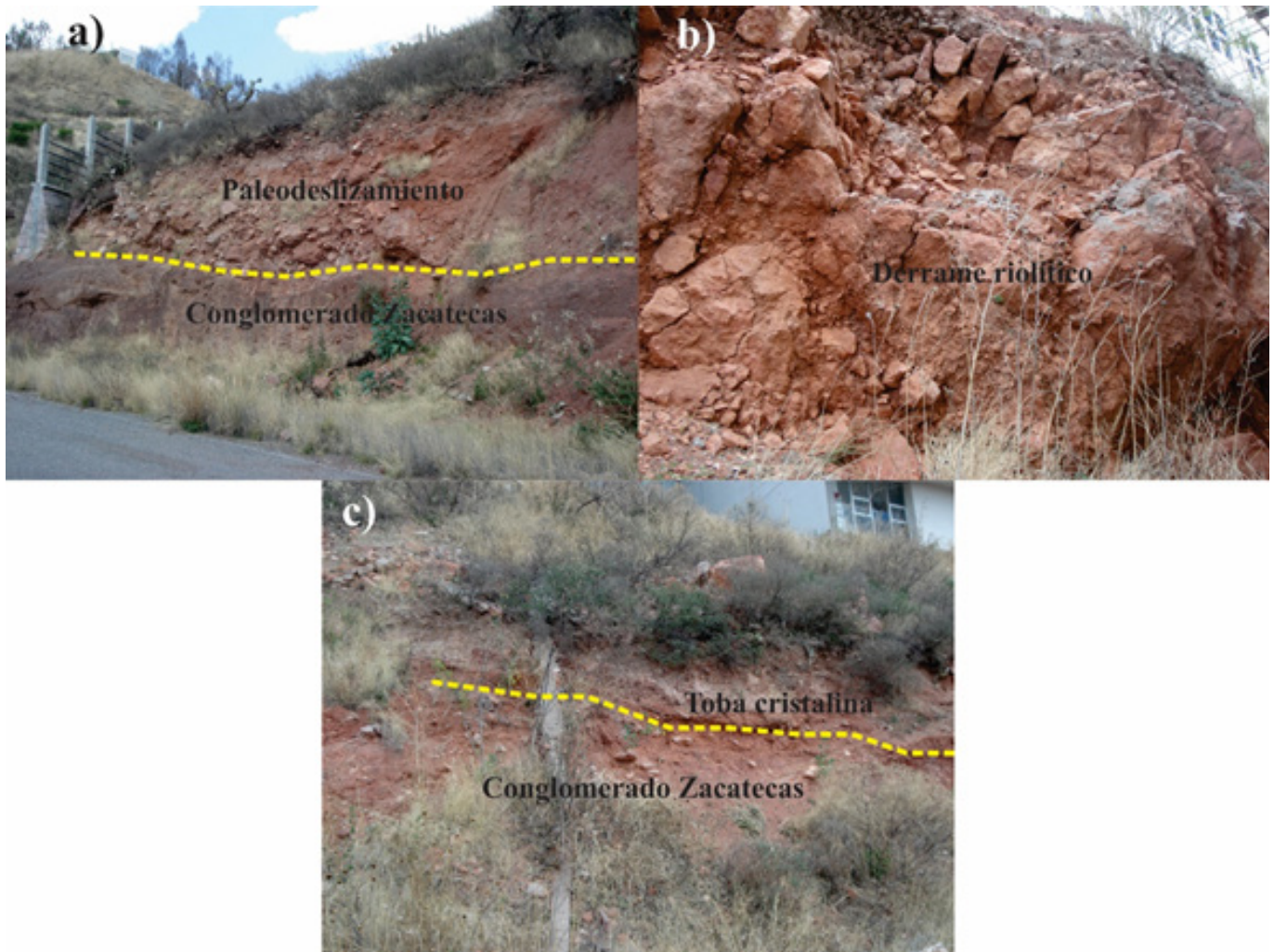


Figura 6. Imágenes de las unidades litológicas del área de estudio: a) En la parte occidental del área de estudio el Conglomerado Zacatecas está cubierto parcialmente por un paleodeslizamiento; b) aspecto brechado del derrame riolítico, en el que también hay desarrollo de fracturas verticales; y c) Conglomerado Zacatecas parcialmente cubierto por una toba cristalina.

soportado por clastos. Los clastos tienen formas subangulares a subredondeadas, la mayoría con un tamaño de 3 cm y son de andesita, diorita, esquisto y cuarcita, en este orden de abundancia. Tiene interestratificados estratos de arenisca conglomerática, cuyos clastos son de la misma composición que en el conglomerado; la diferencia es sólo su tamaño menor e incremento en el contenido de matriz. Los estratos de conglomerado están bien consolidados, mientras que los de arenisca varían de moderados a bien consolidados.

- Toba cristalina (Figura 6c): Sobreyace al CZ e infrayace al derrame riolítico. Sus colores varían de rosa a gris claro, con una textura porfídica y estructura masiva y vesicular. La roca es compacta pero ocasionalmente está fragmentada. Los fenocristales son de plagioclasas, cuarzo y biotita, en una matriz microcristalina y vítrea, moderadamente argilizada. Los fragmentos líticos son de composición riolítica y están oxidados. El espesor del depósito varía de unos pocos centímetros hasta cerca de un metro. Presenta vetillas de cuarzo.

- Derrame riolítico (Figura 6b): Este derrame varía de rosa a rojo. Tiene textura porfídica y su estructura es de autobrechamiento que forma bloques de hasta 50 cm de diámetro o incluso de más de 1 m. El espesor observado en el área de estudio es de poco más de 7 m. Tiene fenocristales de plagioclasas y escaso cuarzo; la estructura de la roca es bandeada. Debido al brechamiento, cuando esta unidad está en taludes con inclinación alta, los bloques pueden desprenderse y caer debido a factores como la lluvia o vibraciones. En la parte NW del edificio de la UACB la pendiente vertical en el Derrame Riolítico pudo ser parte del origen del desprendimiento del bloque (Figura 2).

- Estructura de paleodeslizamiento: El depósito del Conglomerado Zacatecas de la Figura 6a forma un talud en el oeste del edificio de la UACB (Figura 1b). Su espesor máximo es de aproximadamente 3 m y posiblemente se acuña hacia la parte oriental del área de estudio, en donde está cubierto por vegetación y se confunde con materiales de relleno (escombro). El depósito de talud está formado por clastos de tobas líticas y cristalinas, así como por fragmentos de derrames riolíticos bandeados. El tamaño de los clastos es de hasta 50 cm de diámetro, de forma angular y subangular. La matriz es de arena gruesa que contiene fragmentos de rocas volcánicas y algunas del Conglomerado Zacatecas. La gradación de los clastos es de tipo normal. En cambio, el relleno con escombro está formado por clastos de rocas volcánicas ácidas y fragmentos escasos del Complejo Las Pilas (formada por lutitas, derrames de lava y poca diorita, así como cantidades variables de escombro usados en la construcción) por lo que, aunado con la vegetación, dificultan observar el límite entre el paleodeslizamiento y el relleno con escombro. Tanto en el paleodeslizamiento como en el relleno, cuando están soportados por matriz y la pendiente es subvertical, se forman cárcavas que pueden tener hasta 1 m de profundidad y longitud de 2 a 4 m. En la parte

inferior del edificio de la UACB hay bloques de rocas volcánicas de 1 hasta 3 m de diámetro que son similares a los clastos del paleodeslizamiento y del Derrame Riolítico (Figura 3b). Se desconoce si estos clastos se desprendieron por causas naturales o por acción humana.

## Perfiles de georadar

La interpretación de los radargramas se basó en los cambios en la amplitud y la forma de los reflectores, así como su relación con las unidades litológicas y los rasgos observados en la superficie. En las figuras 7 a 9 se muestra la interpretación de los perfiles de georadar hechos con la antena de 100 MHz. En aproximadamente los primeros 2 m de profundidad se observan reflectores subhorizontales que probablemente sean parte del material de relleno para la nivelación de la zona aunque, debido a la longitud de onda, también es probable que no sean reflectores reales sino parte de las reflexiones y refracciones superficiales. En las figuras 8 y 9 la flecha amarilla indica la profundidad en donde, a partir de una zanja para cimentación se observó el contacto entre el relleno y la superficie del derrame riolítico. Esta observación sirvió como referencia para interpretar el relleno en los perfiles. Debajo del primer reflector y hasta un máximo de aproximadamente 10 m se observa el derrame riolítico, el cual desarrolla reflectores que tienen una distribución irregular, probablemente debida al brechamiento. La distribución del derrame riolítico tiene correspondencia con lo que se observa en la superficie (Figura 5), y es probable que la parte superior esté a menos de 1.5 m de profundidad. El fracturamiento que se observa en las figuras 7 y 8 corta al derrame riolítico y al Conglomerado Zacatecas, mientras que en la Figura 9, entre 80 y 90 m, parece que también afecta al material de relleno, quizás debido a que son fracturas por acomodo (p. ejem. Carreón-Freyre y Cerca, 2006). La forma irregular de la base del Derrame Riolítico sugiere que se emplazó a lo largo de paleocauces. La

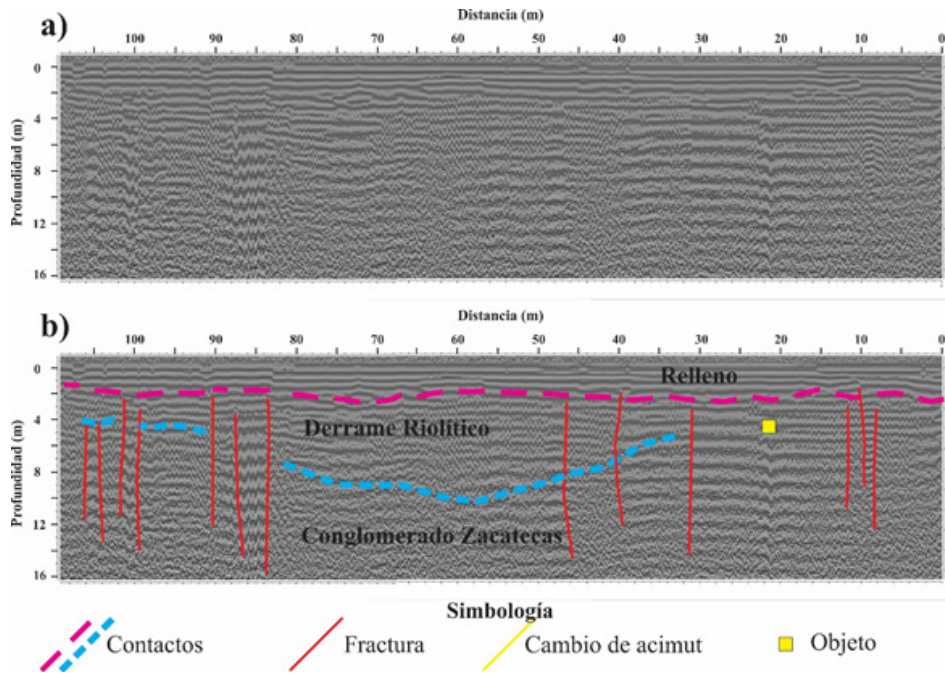


Figura 7. Perfil 1 hecho con la antena de 100 MHz; la ubicación y sentido de obtención de los perfiles de las figuras 7 a 10 se muestran en la Figura 5. a) radargrama sin interpretar, y b) radargrama interpretado.

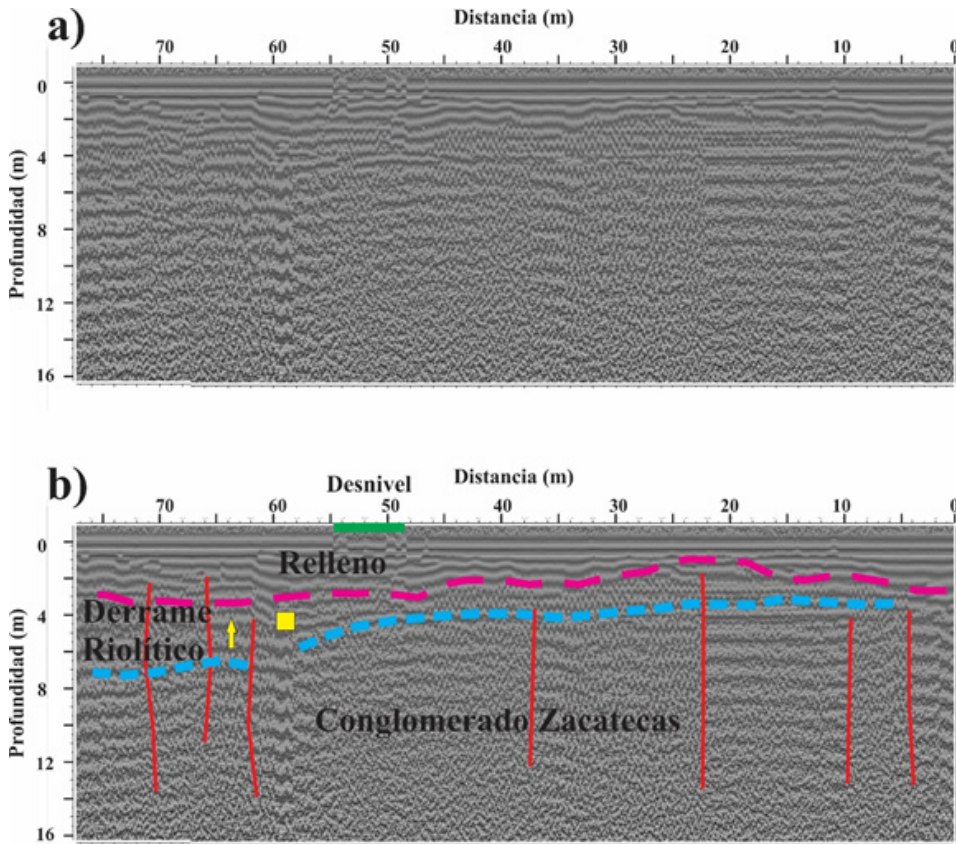


Figura 8. Perfil 2 hecho con la antena de 100 MHz. a) radargrama sin interpretar, y b) radargrama interpretado. La simbología es la misma que en la Fig. 7. La línea verde horizontal es un desnivel y la flecha amarilla indica el sitio donde se observó, en una zanja excavada, el contacto del relleno con el Derrame Riolitico a aproximadamente 4 m de profundidad.

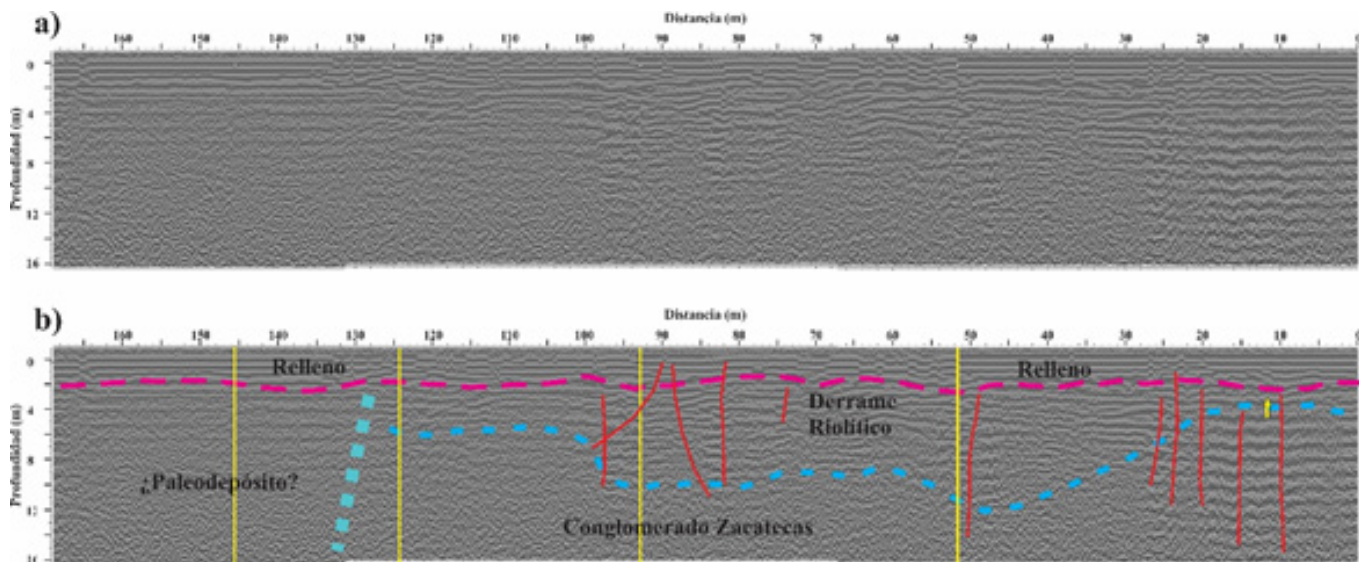


Figura 9. Perfil 3 hecho con la antena de 100 MHz. a) radargrama sin interpretar, y b) radargrama interpretado. La simbología es la misma que en la Fig. 7. La flecha amarilla es el contacto observado del relleno con el Derrame Riolítico.

toba cristalina no se observa, posiblemente porque su espesor es de menos de 1 m y se confunde con el Conglomerado Zacatecas. En la Figura 9 la pérdida en la continuidad lateral de la señal y de los reflectores posiblemente se deba al paleodeslizamiento que tiene gradación normal y a que hacia la cima predominan los materiales de grano fino, desde arenas hasta arcillas, lo que posiblemente provoque la pérdida de la señal y de la definición de los reflectores.

En la Figura 10 se muestran los perfiles hechos en la planta baja del edificio de la UACB. Estos perfiles se realizaron para tratar de identificar fracturas u oquedades como las que se observan en el exterior (Figura 3). Se puede observar que el espesor del relleno y emparejamiento de esta área es de alrededor de 1 m y debajo está el Derrame Riolítico. Las fracturas del Derrame Riolítico se prolongan hasta el material de relleno, aunque aparentemente no llegan a la parte superior. Además, las fracturas son continuas en los tres perfiles (indicado como “Lineamiento” en la Figura 5) y, además, si se unieran, formarían estructuras perpendiculares a la pendiente del terreno y paralelas a las observadas fuera del edificio (Figura 3b). Es importante mencionar

que en la planta baja no se observaron fracturas en las paredes ni en el piso, lo que sugiere que aún no hay movimiento o es casi nulo.

### Discusión

El paleodeslizamiento del área de estudio (Figura 6a) es un movimiento de traslación que está formado por las rocas de la parte superior (Crestón Chino, Figura 1) y ocasionalmente tiene fragmentos del Conglomerado Zacatecas. En los alrededores de la ciudad de Zacatecas (Figura 1a) son comunes los movimientos de traslación de longitud menor que 700 m (Escalona-Alcázar et al., 2012). La gradación normal del paleodeslizamiento sugiere que el movimiento pudo haber sido lento.

La parte del edificio de la UACB que está sobre el paleodeslizamiento y el relleno representa una carga sobre esos materiales que no están consolidados (Figura 11a). La presión que ejerce esta construcción hace que los materiales se compacten y que pierdan porosidad y permeabilidad. Sin embargo, la presencia de superficies libres, como las que están en la parte sur del edificio de la UACB, aunada a la

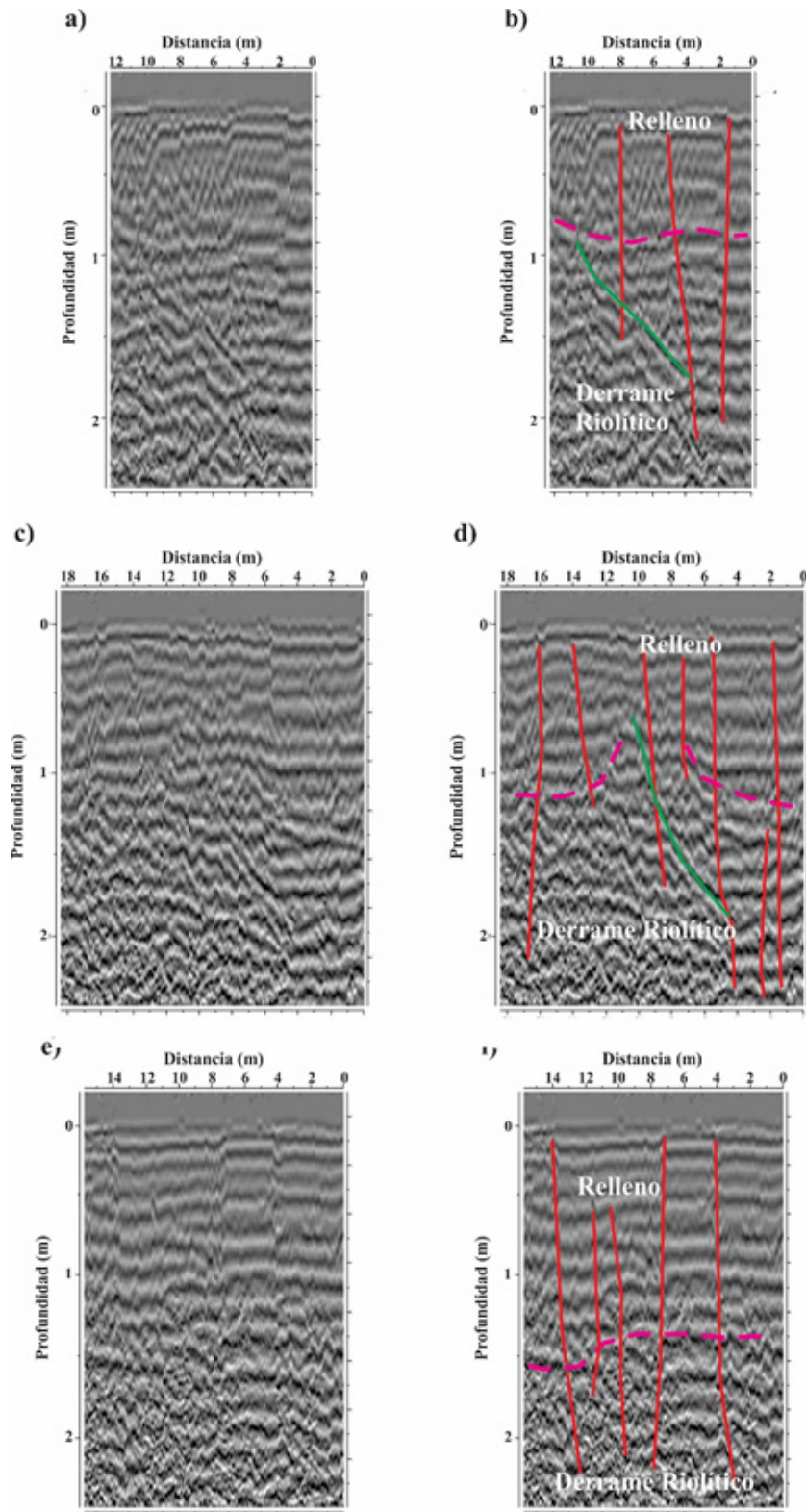


Figura 10. Perfiles 4, 5 y 6 hechos en la planta baja del edificio de la UACB hechos con la antena de 500 MHz. Los radargramas del lado derecho son los perfiles sin interpretar, mientras que del lado izquierdo están interpretados: “a” y “b” son el perfil 4; “c” y “d” son el perfil 5 y “e” y “f” son el perfil 6. La simbología es la misma que en la Fig. 7. La línea verde en “b” y “d” posiblemente sea una falla.



Figura 11. a) Imagen del edificio de la Unidad Académica de Ciencias Biológicas (UACB) viendo hacia el oeste y el nuevo anexo. Los perfiles de georadar hechos con la antena de 500 MHz fueron en la planta baja del edificio que empezó a utilizarse en 2010. b) En la parte sur del edificio de la UACB se observa el material de relleno y la formación de cárcavas (flechas azules); la línea negra discontinua muestra una fractura perpendicular a la pendiente. De la cabecera de la cárcava de la parte izquierda de la figura hacia el edificio hay una distancia aproximada de 4 m.

pendiente subvertical provocan que los agentes geomórficos, principalmente el agua y la gravedad, formen un frente de erosión (Figura 11b). Este frente se manifiesta como cárcavas y fracturas perpendiculares a la pendiente, así como filtración de agua. Las fracturas perpendiculares a la pendiente incrementan la porosidad y permeabilidad que, junto con las cárcavas forman sitios en donde se facilita la remoción de materiales y el avance del frente de erosión pendiente arriba (Figura 11b). En la Figura 11b se observa la parte sur del edificio de la UACB en donde hay formación de cárcavas. La forma como se puede mitigar el avance del frente de erosión y sus efectos en el edificio es colocando vegetación, tubos para drenar los fluidos y anclas (Sidle y Ochiai, 2006; Highland y Bobrowsky, 2008). Uno de los elementos que no se consideran en la mitigación es el efecto que la distribución de las distintas facies y la distribución de la granulometría del relleno (especialmente los bloques) generan cuando se aplica una carga (Carreón-Freyre y Cerca, 2006). En los radargramas realizados en la parte externa (figuras 7 a 9) se delimitó un contacto irregular y algunas fracturas que posiblemente son parte del acomodo natural del edificio. Las fracturas definidas con la antena de 500 MHz (figuras 5 y 10) son abundantes y

perpendiculares a la pendiente; sin embargo, son someras pero es necesario monitorearlas porque con la construcción de la nueva área en la entrada del edificio de la UACB pueden desarrollarse y afectar el inmueble (Figura 11a). El límite oriental del paleodeslizamiento es poco claro en los radargramas, por lo que no es clara su ubicación debajo del edificio de la UACB.

La caída de los bloques del derrame riolítico que ocurrió en junio de 2016 se debió a la precipitación de entre 50 y 75 mm en dicho mes (datos de la CONAGUA). Aunque no se tiene la distribución de la precipitación diaria en ese periodo, el evento en el que ocurrió el colapso fue durante una lluvia torrencial. En la Figura 6b se observa el fracturamiento intenso de esta unidad litológica, por lo que no se descarta la caída de más bloques en el futuro. El tamaño de los bloques que están en la parte superior de la Figura 6b varía de 30 a 40 cm, por lo que, si se hace una simplificación a una forma cúbica, el volumen sería de 0.064 m<sup>3</sup> que considerando la densidad de la roca (2,350 a 2,700 kg/m<sup>3</sup>), implica que la masa mínima de uno de estos bloques puede ser de alrededor de 150 kg.

## Conclusiones

A partir del análisis geológico y de los datos de georadar se concluye que:

- 1) En el área de estudio hay tres unidades litológicas que de la base a la cima son: Conglomerado Zacatecas, Toba Cristalina y Derrame Riolítico. Este último fue emplazado a lo largo de un paleocauce.
- 2) Hay un paleodeslizamiento cuyo límite oriental, es decir, debajo del edificio de la UACB, no está bien definido y se enmascara por el relleno, por lo que no se pueden diferenciar sus efectos en el edificio de la UACB.
- 3) El brechamiento del Derrame Riolítico es intenso, por lo que no se descarta que puedan caerse más bloques. Para mitigar o retardar su caída se pueden colocar drenes que canalicen el agua de lluvia, así como poner anclas y malla o lechada.
- 4) En los radargramas realizados en la planta baja se observó la aparente continuidad de las fracturas (lineamientos) perpendiculares a la pendiente del terreno y paralelas a las observadas en la parte inferior, fuera del edificio. Con la construcción de la nueva parte del edificio de la UACB es necesario monitorear si hay la formación de fracturas en paredes y pisos o la ruptura de tubería, principalmente en la planta baja.
- 5) Los movimientos por acomodo o caída de bloques tienen mayor probabilidad de ocurrencia durante la temporada de lluvias. En 2016 la caída de bloques ocurrió cuando la lluvia mensual fue de entre 50 y 75 mm, por lo que este pudiera ser un umbral de precipitación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de Víctor Hugo Puente en la realización de los perfiles de georadar; así como a la Dra. Marisa Mercado, Directora de la Unidad Académica de Ciencias Biológicas, por las facilidades para realizar este trabajo. Este trabajo es parte del proyecto

UAZ-2018-37580 "Identificación y análisis de zonas de riesgo geológico y geomorfológico en la zona urbana de Zacatecas" bajo la responsabilidad de Felipe Escalona. Los autores agradecen los comentarios hechos por Manuel Contreras, Luis Delgado y un revisor anónimo cuyas observaciones permitieron mejorar este documento

## Bibliografía

- Beltrán-Zhizhko, G. A., Escalona-Alcázar, F. J., Núñez-Peña, E. P., Bluhm-Gutiérrez, J. Valle-Rodríguez, S. y Esparza-Martínez, A., 2014. Exploración del suelo y subsuelo con un georadar en sitios selectos de la periferia de la zona urbana de Zacatecas y Guadalupe, Zacatecas, México. *GEOS*, 34 (2), 1-14.
- Burckhardt, C., 1906. Sobre el descubrimiento del Trias marino en Zacatecas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, II, p. 43-46.
- Carreón-Freyre, D. y Cerca, M., 2006. Delineating the near-surface geometry of the fracture system affecting the Valley of Querétaro, Mexico: Correlation of GPR signatures and physical properties of sediments. *Near Surface Geophysics*, 4, p. 49-55.
- Centeno-García, E. y Silva-Romo, G., 1997. Petrogénesis and tectonic evolution of central Mexico during Triassic-Jurassic time. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14 (4), p. 244-260.
- Enciso-de la Vega, S., 1994. Crecimiento urbano de la ciudad de Zacatecas y sus asentamientos humanos en zonas mineralizadas polimetálicas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11 (1), 106-112.
- Escalona-Alcázar, F.J., 2010. Evaluación preliminar de los riesgos debidos a la geomorfología de la zona urbana Zacatecas Guadalupe y sus alrededores. *GEOS* 29(2), p. 252-256.

- Escalona-Alcázar, F.J., Suárez-Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003. La secuencia volcánica Terciaria del Cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. *GEOS*, 23 (1), 2-16.
- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., Valencia, V.A y Ortiz-Acevedo, O., 2009. Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (1), p. 48-64.
- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A. y Rivera-Salinas, A.F., 2010. Assesment of land subsidence associated with intense erosion zones in the Zacatecas and Guadalupe quadrangles, Mexico. In, Carreón-Freyre D., Cerca M. y Galloway D. (eds), *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. October 17-22, Queretaro, Mexico. IAHS Publication 339, p. 210-212.
- Escalona-Alcázar, F. J., Escobedo-Arellano, B., Castillo-Félix, B., García-Sandoval, P., Gurrola-Menchaca, L. L., Carrillo-Castillo, C., Núñez-Peña, E.P., Bluhm-Gutiérrez, J. y Esparza-Martínez, A., 2012. A geologic and geomorphologic analysis of the Zacatecas and Guadalupe quadrangles in order to define hazardous zones associated with the erosion processes. In, Curkovic S. (ed.) *Sustainable Development - Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*. 18: 411-434.
- Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Bluhm-Gutiérrez, J., García-Sandoval, P. Nieto-Samaniego, A.F. y Núñez-Peña, E.P., 2016. The Palaeocene-early Oligocene Zacatecas conglomerate, Mexico: sedimentology, detrital zircon U-Pb ages, and sandstone provenance. *International Geology Review*, 58 (7), p. 826-848.
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 1989. Código Urbano del Estado de Zacatecas. Oficialía Mayor de Gobierno, Administración del Periódico Oficial, 21, 94 pp.
- Gobierno del Estado de Zacatecas (1992-1998), 1997. Atlas Estatal de Riesgos, 80 pp.
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 2007. Atlas de Riesgos de la ciudad de Zacatecas, 119 pp.
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 2011, Decreto No. 189 Ley de Protección Civil para el Estado de Zacatecas. Periódico Oficial 67, 63 pp.
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 2016. Programa de Desarrollo Urbano de Zacatecas-Guadalupe 2016-2040, 443 pp.
- Gobierno del Estado de Zacatecas, 2017. Reglamento Interno de la Secretaría de Desarrollo Urbano, Vivienda y Ordenamiento Territorial. Periódico Oficial 61, 45 pp.
- Highland, L. y Bobrowsky, P., 2008. The landslide handbook- A guide to understanding landslides. United States Geological Survey, Circular 1325, 129 pp.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2015. Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50,000 serie III. F13B58 (Zacatecas).
- Ortega-Flores, B., Solari, L. y Escalona-Alcázar, F.J., 2016. The Mesozoic successions of western Sierra de Zacatecas, central Mexico: provenance and tectonic implications. *Geological Magazine*, 153 (4), p. 696-717.

Periódico Oficial del Estado de Zacatecas, 2013. Ley de Planeación para el Desarrollo del Estado de Zacatecas. Reforma del 17 de julio de 2013, 21 pp.

Ponce, B.F. y Clark, K.F., 1988. The Zacatecas Mining District: A Tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization. *Economic Geology*, 83, p. 1668-1682.

Secretaría de Economía, 2011. Norma Mexicana NMX-R-003-SCFI-2001. Escuelas-selección del terreno para construcción-requisitos, 32 pp.

Sidle, R.C. y Ochiai, H., 2006. Landslides: processes, prediction, and land use. American Geophysical Union, Water Resources Monograph 18, 312 pp.

Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G.J., Labarthe-Hernández, G., Torres-Hernández, J.R. y Bellon, H., 2009. Post-Laramide and pre-Basin and Range deformation and implications for Paleogene (55-25 Ma) volcanism in central Mexico: A geological basis for a volcano-tectonic stress model. *Tectonophysics*, 471, p. 136-152.

Yta, M., Moreno-Tovar, R., Cardona-Patiño, F. y Córdova-Méndez, D.A., 2003. Contribución a la definición de superposición de eventos metalogénicos en el yacimiento de Francisco I. Madero. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20 (2), p. 124-132.

Recibido: 2 de mayo de 2018

Corregido por el autor: 21 de febrero de 2019

Aceptación: 28 de febrero de 2019