

FACTORES GEOLÓGICOS Y ANTRÓPICOS DE RIESGO EN TIJUANA, BAJA CALIFORNIA: EL CASO DEL FRACCIONAMIENTO JARDINES DE AGUA CALIENTE

Luis A. Delgado Argote*, Juan Carlos Hurtado Brito, Porfirio Avilez Serrano y Gemma Gómez Castillo

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California

*ldelgado@cicese.mx

RESUMEN

Aunque el registro instrumental de la sismicidad en Tijuana y sus alrededores es pobre, la existencia de fallas regionales activas hace ineludible que ciertas zonas con taludes deban ser evaluadas bajo escenarios sísmicos. El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente es una de dichas zonas. Se localiza entre fallas normales en un graben regional con fallas normales secundarias con componente de movimiento lateral que afectan a secuencias estratigráficas Plio-pleistocénicas pobremente consolidadas. La deformación se caracteriza por pliegues anticlinales amplios y fallas normales con componente de desplazamiento lateral; no se observan evidencias de reactivación. El patrón geométrico del drenaje de 1999, antes del desarrollo inmobiliario, es rectilíneo y sigue el patrón de las fallas y fracturas. La topografía actual muestra que el drenaje original fue rellenado casi en su totalidad y la diferencia entre la topografía de 2002 y de 1999 muestra valores de corte y relleno de +23.35 m y -23.62 m, respectivamente. Existe correlación entre la distribución de los daños en inmuebles con respecto a las zonas de corte y relleno: en el intervalo entre -12 m y +12 m se observa el 88% de los movimientos horizontales, el 74% de los hundimientos y el 73% de los movimientos direccionados. En la Zona Este del fraccionamiento el movimiento dominante es en dirección del echado de las capas y de la pendiente, por lo que, en este caso particular, puede interpretarse que ocurre deslizamiento traslacional.

Esta zona representa un ejemplo en el que el entendimiento incompleto de los procesos geomorfológicos de terrenos, cuya geología estructural determina su desarrollo, influye en el diseño y ejecución de obras civiles y que ante la eventualidad de disparadores de deslizamientos, como sismos o lluvias extraordinarias, pueden convertirse en zonas de riesgo.

Palabras clave: Riesgo geológico, Tijuana, sismicidad, deslizamiento.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la información presentada por un grupo de colonos del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente, Delegación La Mesa, Tijuana, B.C., en la que se muestran edificaciones y otras obras civiles afectadas por movimientos del terreno, así como por la cercanía de la zona a otros sitios donde se observan rasgos geológicos que promueven la inestabilidad del terreno (Delgado-Argote et al., 2011), se efectuó un estudio geológico para determinar las causas de

los movimientos. Con ese fin, los objetivos fueron los siguientes: a) identificar las condiciones geomorfológicas y estructurales del terreno en el que se encuentra asentado el fraccionamiento, a través de la interpretación de imágenes de satélite y datos vectoriales de la topografía anteriores al desarrollo inmobiliario; b) definir las condiciones litológicas y estructurales del terreno a través de la cartografía geológica en los afloramientos alrededor del fraccionamiento;

c) realizar un mapeo de daños en las obras civiles para identificar la dirección y magnitud de desplazamientos y la descripción de grietas en los inmuebles para graficar el movimiento relativo de los bloques desplazados; d) buscar la correlación entre los movimientos relativos con respecto a los rasgos geomorfológicos y geológicos del terreno.

Materiales y métodos

En el transcurso de la adquisición de los datos estructurales en el área de estudio se aplicó el criterio de la mano derecha y, durante el reconocimiento de daños en las casas afectadas, el criterio usado para la medición de las grietas incluidas en este estudio, fue: a) que tuvieran una geometría clara e identificable; b) que fueran penetrativas y claramente distintas a las debidas a defectos de construcción; c) que su longitud fuera mayor a los 50 cm; y d) que su orientación y estilo se repitiera en el mismo inmueble, o en las casas vecinas inmediatas. La edición de las imágenes se realizó por medio de la paquetería AutoCAD y Adobe Illustrator; las mediciones de campo se compilaron en la paquetería Microsoft Excel; los mapas se generaron en ArcMap 9.3 y la visualización 3D de los mapas se realizó en el módulo Arc Scene de ArcGis 9.3.

La topografía del año 1999 para el área del fraccionamiento se obtuvo de los datos vectoriales de la carta I11D71 La Presa, elaborados por el INEGI (1999) y la de 2002 fue proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana. Estos datos fueron procesados en el programa ArcMap 9.3 para obtener curvas de nivel con equidistancia de 5 m para los datos de 1999 y de 1 m para los datos de 2002. A partir de estas curvas de nivel, con ayuda de la herramienta Spatial Analyst de ArcMap, se elaboraron los modelos digitales de elevación y se trazó la hidrología superficial del área de estudio.

Localización

La zona de estudio se encuentra en la parte centro-sur de la ciudad de Tijuana, B.C. (Figura 1a). El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente

tiene una geometría alargada con orientación NE-SW, paralela a la vialidad Aeropuerto (Figura 1b). Su longitud es de 1,250 m y su anchura máxima es de 280 m. Está asentado en tres terraplenes construidos para el desarrollo inmobiliario cuyas pendientes, menores a 6° están cortadas hacia el SE por escarpes de entre 25° y 50° (Figura 2). Las alturas promedio de los terraplenes oeste, centro y este son de 190, 150 y 130 msnm, respectivamente.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Ambiente tectónico

La península de Baja California es un fragmento de corteza desprendida del macizo continental de México que se desplaza hacia el NW junto con la placa Pacífico. La región del norte de la península y el sur de California forman un bloque que se caracteriza por la presencia de fallas regionales activas orientadas NW-SE; Legg et al. (1991) lo denominan Zona de Cizalla del Sur de California (Southern California Shear Zone). Sus límites están marcados por el sistema de fallas de San Andrés en el oriente (no indicada en el mapa), el sistema de fallas Descanso en el occidente (en ambiente marino), las Sierras Transversas en el norte, cerca de Los Ángeles, California (fuera del mapa), y el sistema de fallas Agua Blanca, al sur de Ensenada, que se conecta con la Falla Salsipuedes en ambiente marino (Figura 3a).

Dentro de este marco tectónico, en el norte de la península se desarrolla un complejo arreglo de fallas sísmicamente activas orientadas al NW y una sismicidad cuyos epicentros se alinean al NE, perpendicularmente a las fallas regionales (figuras 3 y 4).

Entre Tijuana hasta aproximadamente 75 km al sur de la ciudad de Ensenada, el borde de la península muestra evidencias de importantes levantamientos (Rockwell et al., 1989). Además, se ha documentado por medio de Sísmica de reflexión que las fallas cercanas a la costa afectan a sedimentos cuaternarios (Legg, 1991; Legg et al., 1991).

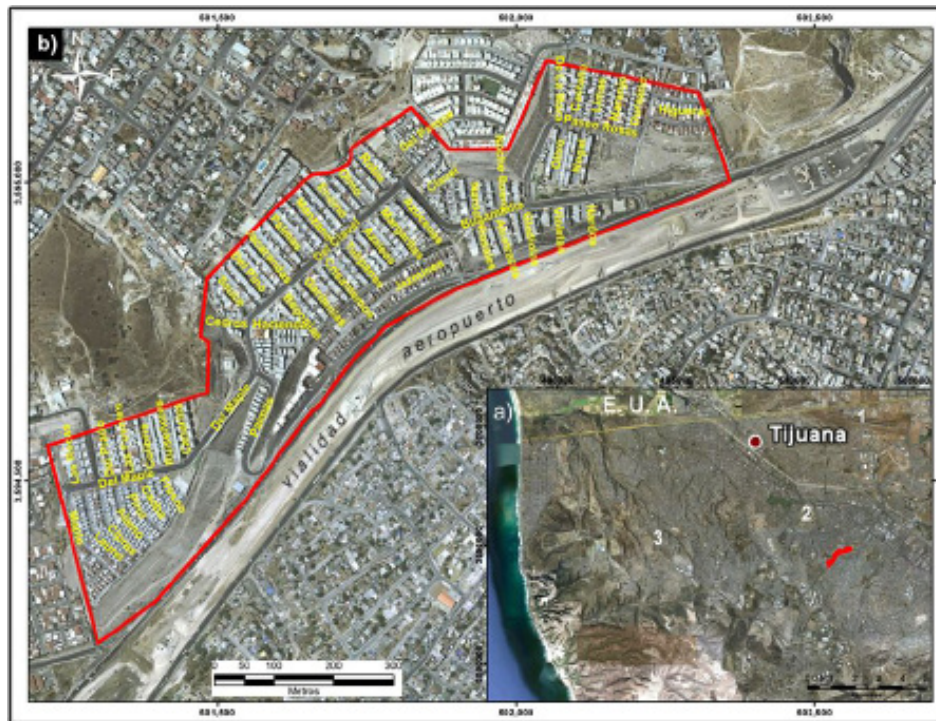


Figura 1. Localización del área de estudio. a) Imagen satelital de la ciudad de Tijuana tomada de Google Earth (2008) donde se muestra el Aeropuerto (1), Hipódromo (2), Periférico Sur (3) y, la mancha roja indica el área de estudio. b) Imagen satelital tomada de Google Earth (2008) indicando el polígono del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente con líneas rojas y, en amarillo, los nombres de las privadas.

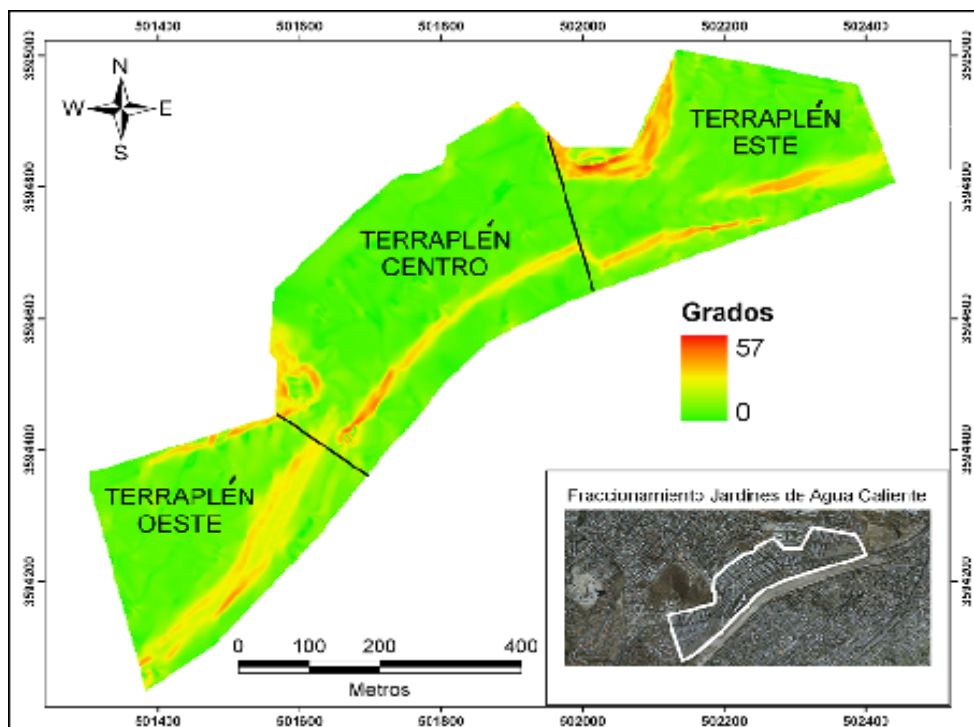


Figura 2. Modelo digital de pendientes en grados, obtenido de la topografía proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana, del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente, indicando los tres terraplenes y los taludes que los limitan.

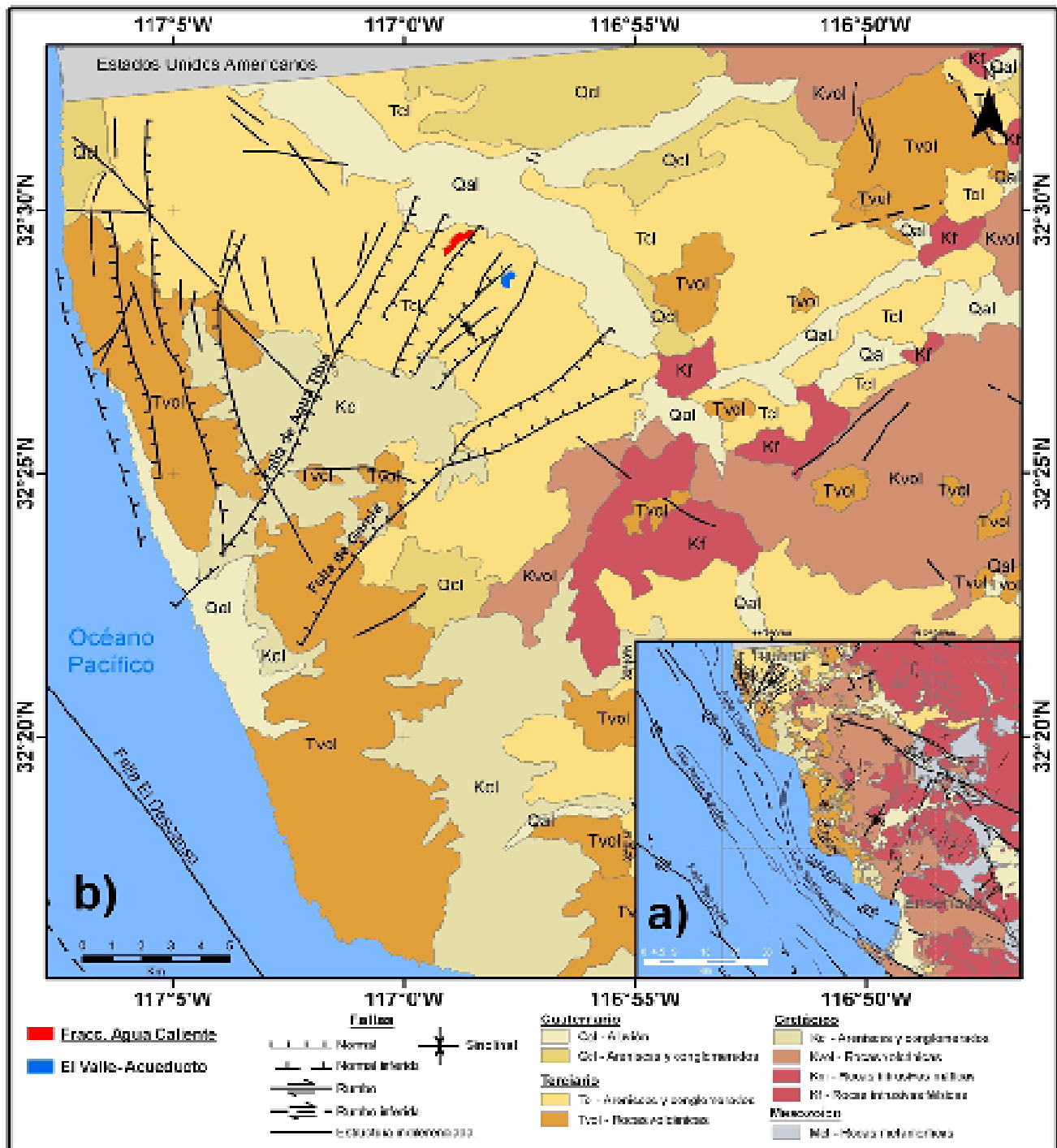


Figura 3.a) Mapa geológico del NW de Baja California donde se muestran las principales unidades litológicas (datos vectoriales geológicos de INEGI, 2000, escala 1:250,000) y rasgos estructurales (tomados de Gastil et al., 1975 y Legg et al., 1991). b) Acercamiento del mismo mapa a la región de Tijuana mostrando en el polígono rojo la ubicación de la zona de estudio. Litológicamente la zona se encuentra en rocas del Plioceno de origen marino y fluvial. Los principales rasgos estructurales son las fallas normales orientadas hacia el NE que indican el origen estructural de algunas cuencas de depósito y la presencia de pliegues con la misma orientación. Las fallas con orientación NW (San Miguel-Vallecitos; SMV) son regionales de desplazamiento lateral derecho y las orientadas NNW cercanas a la costa son, en buena medida, producidas por levantamiento regional. El polígono azul corresponde a la ubicación de los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto (Delgado-Argote et al., 2011)

Litología Regional

El basamento de la parte noroccidental de la península está formado por rocas graníticas y una secuencia metamorfozada de rocas intrusivas, volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Alisitos del Cretácico (Kf, Km, Kvol en la Figura 3), la cual aflora ampliamente en el extremo oriental de Tijuana. El basamento está cubierto discordantemente por los depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico Superior (Kcl en la Figura 3; las unidades de posible edad jurásica están indicadas en la Figura 3 como Met).

A las unidades cretácicas del basamento les sobreyace la Fm. Rosarito Beach del Mioceno, la cual está bien expuesta entre las ciudades de Tijuana y Ensenada. La Fm. Rosarito Beach está formada por derrames basálticos y brechas que tienen interestratificadas arenas con matriz de lodo, tobas, arenas tobáceas, calizas y conglomerados. Con base en su distribución, trama y contenido faunístico el ambiente de depósito de los sedimentos fue interpretado como fluvial, lacustre y de plataforma marina (Ashby, 1989). Durante el Plio-Pleistoceno, en los alrededores de Tijuana, se depositó la Fm. San Diego sobre las tobas de la Fm. Rosarito Beach. Está constituida por arenas finas en la base, arenas y conglomerados en la cima, que fueron depositados en cuencas estructurales de tipo transtensional (Minch et al., 1984). La sobreyace discordantemente la Fm. Lindavista del Pleistoceno-Reciente (Gastil et al., 1975) formada por areniscas y conglomerados que, en el sur de Tijuana, coronan los cerros y las mesetas. La ciudad de Tijuana está edificada principalmente sobre estas dos últimas formaciones.

Rasgos estructurales mayores y sismicidad

La deformación general del NW de Baja California está gobernada por el Sistema San Andrés-Golfo de California. En el Borde Continental, los sismos son escasos pero los epicentros se alinean con las fallas (Legg et al., 1991). Todas las fallas en esta

región son de tipo lateral derecho (Figura 3a) de las que se estiman velocidades de desplazamiento desde 1 mm hasta 6 cm por año (Rockwell et al., 1987; Legg et al., 1991; Legg, 1991; Suárez et al., 1991; Suárez, 1993). Los mecanismos focales son consistentes con el sentido de desplazamiento y los epicentros son paralelos a las trazas de las fallas (Legg et al., 1991), por lo que el peligro por sismicidad es alto en la región, toda vez que existen numerosos lugares donde existen condiciones de estabilidad precaria. En ese sentido, se considera que sismos de magnitud del orden de 3, con epicentro en o dentro de radio de pocos kilómetros, puede disparar un deslizamiento. El sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Figura 3a) es activo y su traza termina pocos kilómetros al SE de Tijuana, por lo que su monitoreo y cartografía son recomendables. La cartografía reciente y los estudios paleomagnéticos en el basamento (Böhnel et al., 2002) no indican actividad reciente en el sector de esta falla cercano a Tijuana. Desde el punto de vista sísmico, los mapas de distribución de energía sísmica en la región indican notables alineamientos de epicentros en dirección NE (Frez y Frías-Camacho, 1998), que pueden correlacionarse con las fallas cartografiadas por Gastil et al. (1975) en la región de Tijuana (figuras 3 y 4). De acuerdo con Gastil et al. (1975), la zona de estudio se encuentra aproximadamente a 7 km al NW de la falla Agua Tibia que es normal y se orienta hacia el NNE-SSW, con echado hacia el oeste y a 10 kilómetros al noroeste del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Figura 3a). Aunque este sistema de fallas es relativamente lejano, es importante por su carácter regional y potencial sísmico. Dicho sistema está conformado por una serie de fallas de transcurrancia derecha, escalonadas y orientadas NW-SE. Además, no obstante que la actividad sísmica en el área de estudio es de baja magnitud, no deja de ser importante debido a la inestabilidad propia del terreno por las pendientes altas en algunas zonas y por la poca competencia de la litología. En la Figura 4 se muestran los epicentros de los sismos de magnitud mayor de 2.5 reportados por la Red Sismológica del Noroeste de México del CICESE (RESNOM) durante las tres últimas

décadas. Debe destacarse: a) la correlación entre el alineamiento de los epicentros con respecto a la traza de algunas fallas del mapa geológico de la Figura 3a, principalmente, en el sistema San Miguel-Vallecitos; b) la alineación de epicentros en segmentos más pequeños, aunque menos evidentes, con orientación NE-SW; y c) la cercanía a la zona de estudio de sismos de magnitud 2.7 y 2.8 en 1989 y hasta de 3.9 en 2003 y 2005 en otras partes de la zona urbana de Tijuana. Además, existen propuestas para escenarios sísmicos en la región de Tijuana que consideran rompimiento en la falla La Nación ($M_w = 6.5$), en la parte oriental del condado de San Diego, California (Acosta-Chang y Montalvo-Arrieta, 1997) que deben tomarse en cuenta en zonas aparentemente estables.

Antecedentes de deslizamientos en Tijuana

De acuerdo con Delgado-Argote et al. (1996),

el riesgo geológico en Tijuana se debe a la conjunción de tres factores principales: presencia de fallas o fracturas, pendiente del terreno mayor o igual a 18% (10°) y una litología incompetente. Bocco et al. (1993) agregan el crecimiento urbano desordenado como un factor adicional. De la evaluación regional de zonas de peligro efectuada por los autores mencionados, se observa que éstas se localizan en los taludes o están cercanas a los rompimientos de pendiente en sitios donde la litología está dominada por las formaciones San Diego y Lindavista. La geometría dominante es de deslizamientos rotacionales (Delgado-Argote et al., 2011). Un factor disparador importante de los deslizamientos que se debe considerar también es el grado de saturación de agua en los sedimentos, además de la respuesta sísmica del terreno y otros factores inducidos por la actividad del hombre, principalmente los cortes en el terreno.

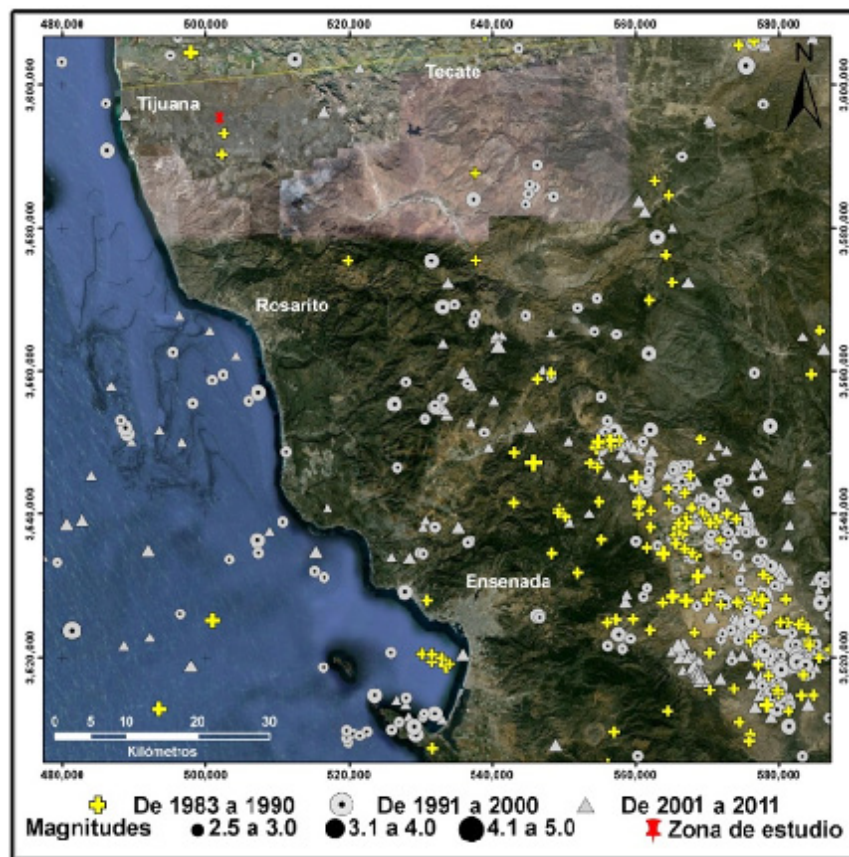


Figura 4. Epicentros de sismos de magnitud mayor a 2.5 reportados por el CICESE (RESNOM) para las décadas 1980-1991, 1991-2000 y 2001-2011. El tamaño del símbolo indica la magnitud del sismo.

ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Litología

La litología de la zona de estudio consiste en arenas masivas con horizontes ricos en material tobáceo de grano fino a medio cuya estructura puede ser masiva o estratificada en capas de 4 a 20 cm de espesor (Figura 5a). Los estratos de aproximadamente 20 cm de espesor son escasos y están constituidos por arenas cementadas (Figura 5b). En algunos afloramientos se observan lentes limo-arcillosos dentro de las arenas (Figura 5c). Las arenas están cubiertas, en contacto discontinuo, por depósitos de conglomerados polimícticos con clastos subangulosos y subredondeados que varían de 1 a 25 cm de diámetro, mal clasificados, en una matriz arenosa (Figura 5d). En algunos afloramientos los conglomerados tienen una geometría de relleno de canal (Figura 5e). Ocasionalmente los lentes de conglomerado están cementados y tienen matriz limo-arenosa de color rojizo. En la coordenada 501473/3594584 (NAD27_UTM_Zona 11N) las arenas con material tobáceo están cubiertas por areniscas de grano grueso que a su vez están sobreyacidas en discordancia por los conglomerados antes descritos. Puesto que sólo en este sitio se observan las arenas gruesas cubriendo a las arenas tobáceas de grano fino a medio, suponemos que las arenas gruesas tienen una geometría lenticular.

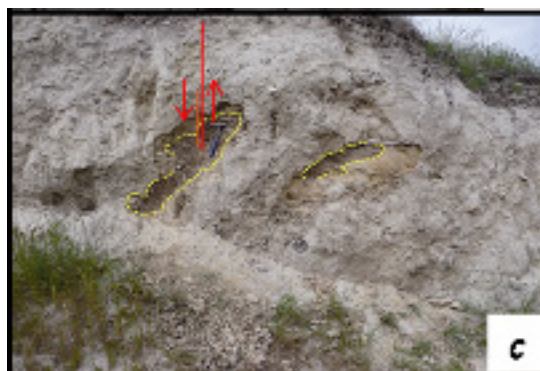


Figura 5. Fotografías de la litología en los alrededores del área de estudio. a) Arenas masivas de grano medio a fino. Se observan algunos estratos con espesor menor a 6 cm. b) Horizonte de arena cementada de 20 cm. de espesor. c) Lentes limo-arcillosos (delimitados por líneas punteadas amarillas) dentro de arenas de grano medio. La línea roja indica el plano de una falla normal que corta al lente limo-arcilloso. d) Conglomerado polimíctico con clastos subangulosos y subredondeados que varían de 1 a 25 cm con matriz arenosa. e) Contacto discontinuo entre las areniscas de grano medio y el conglomerado (línea punteada amarilla). Se distingue una geometría canalizada.

Geología estructural

El estudio estructural se enfocó hacia la búsqueda y medición de estructuras geológicas tales como estratificación, fallas y fracturas en los terrenos con obras civiles. En la Figura 6 se muestran los sitios de donde se obtuvieron los datos con los que se elaboró el mapa geológico, los cuales se distribuyen en la periferia del fraccionamiento, predominantemente en las partes norte de los terraplenes Oeste y Centro. En las partes sur y este del fraccionamiento los estratos no están afectados por fallas o zonas de fracturas. Con fines descriptivos, el área de estudio se dividió en tres zonas, que casi comprenden las dimensiones de los terraplenes, pero reflejan mejor la distribución de los datos estructurales (Figura 6).

En la Zona Oeste, la estratificación tiene rumbos que son hacia el NE-SW y NW-SE, en ese orden de abundancia. La estratificación con rumbo NE-SW buza hacia el SE y NW con inclinaciones máximas de 25° y 20°, respectivamente. La estratificación con rumbo NW-SE tiene echados hacia el SW con una inclinación máxima de 30° (Figura 6). La tendencia general de las capas en la Zona Oeste se muestra en el estereograma de la Figura 7a, el cual indica que la estratificación buza hacia el NE y SW y que su rumbo promedio se orienta 52°/9°. Debido a la dispersión en la orientación de esos datos de estratificación, dicho promedio de los rumbos tiene un valor de confianza bajo (0.5725; Figura 7a). El bajo ángulo de los echados de las capas evidencia pliegues suaves y se cartografiaron dos fallas normales y dos laterales. Las fallas normales se desarrollan en arenas, son verticales y están orientadas NW-SE y NE-SW; una de ellas corta claramente un lente limo-arcilloso (Figura 5c). Las fallas laterales tienen rumbo NE-SW. La falla lateral derecha que se midió en arenas de la Zona Oeste tiene una inclinación de 60° con componente normal. La falla lateral izquierda que se midió en conglomerados de la Zona Centro tiene una inclinación de 86°. Los datos de buzamiento de los estratos en la Zona Centro son más homogéneos; la mayoría de ellos tienen rumbo NW-SE con echados hacia

el NW, cuya inclinación máxima es de 40°. La estratificación promedio es de 234°/20° (Figura 7b). En la parte norte de esta zona se midió una falla lateral derecha vertical con rumbo NE-SW con componente normal (Figura 8a) y se observan fracturas orientadas E-W, como en la Zona Oeste.

En la Zona Este sólo se pudo obtener un dato de estratificación cuyo rumbo es 308°/ 20°. Se construyeron cuatro secciones estructurales con la finalidad de observar la ubicación y orientación de las estructuras (Figs. 6 y 9). La topografía que se usó para la construcción de las secciones es del año 1999, anterior a la construcción del fraccionamiento. Sobre las secciones se trazaron franjas de color negro que indican las zonas ocupadas por construcciones habitacionales y la ubicación de las secciones se muestra en la Figura 6.

La sección A-A' tiene una dirección SW-NE, una altura máxima de 200 msnm, tiene 1,350 m de longitud y es casi paralela a las estructuras geológicas regionales; la sección B-B' es perpendicular a la anterior, mide 400 m y tiene una altura máxima de 225 m; la sección C-C' es W-E, tiene 450 m de largo y su cota máxima es de 170 m; la sección D-D' se orienta NW-SE, tiene una longitud de 450 m y alcanza una altura máxima de 165 m.

En la sección A-A' la estratificación muestra un anticlinal abierto con echados muy suaves en casi todo el perfil, con excepción de la parte NE donde el valor máximo de inclinación es de 25°. En la sección B-B' se observa que la inclinación en dos sitios presenta una estratificación que evidencia pliegues o basculamiento muy suave, con echados menores de 14° en el extremo NW y 5° para la parte SE del perfil. Por tener menos construcciones, la sección C-C' muestra el mayor número de estructuras, particularmente en el E, donde la estratificación tiene inclinaciones más pronunciadas. Se observaron fallas normales, laterales derechas e izquierdas. No se pudo estimar la longitud de los desplazamientos.

En la sección D-D' las inclinaciones del terreno varían desde 10° hasta 14° , se observa una falla lateral derecha con una componente normal, así como una serie de fracturas. El cambio de actitud en las capas del bloque de la derecha puede deberse a un efecto de arrastre por la falla lateral derecha con componente normal, o incluso, a un deslizamiento gravitacional antiguo.

Los datos en los perfiles pueden asociarse a estructuras basculadas por procesos de compactación o de plegamiento suave debido a esfuerzos orientados con la dirección de los echados, aunque también pueden deberse a las fallas que provocan el movimiento relativo de los bloques y las discontinuidades entre las capas.

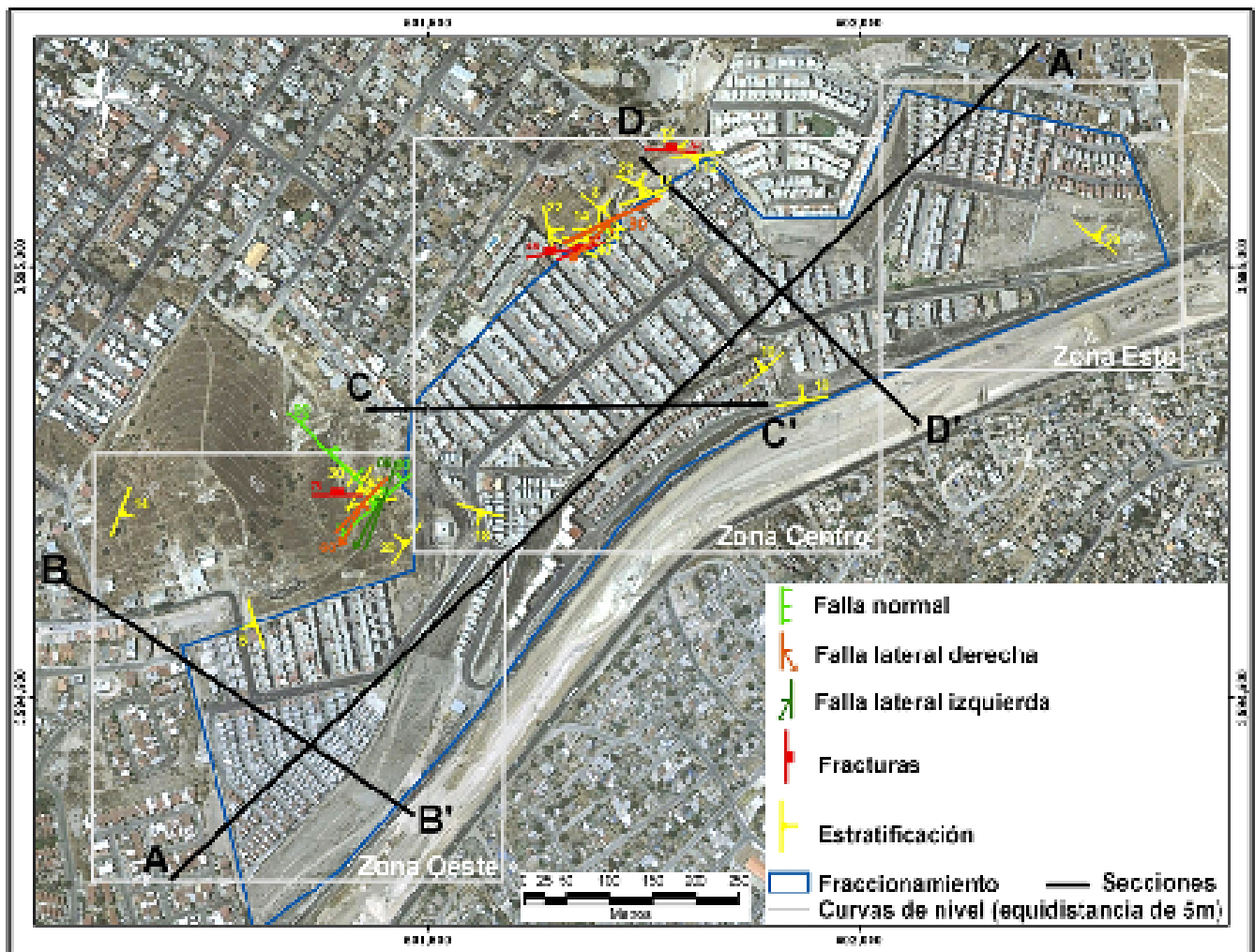


Figura 6. Datos estructurales medidos en el área de estudio. Los recuadros blancos son las zonas utilizadas para la descripción de estructuras. Las líneas A-A' a D-D' marcan las secciones geológico-estructurales.

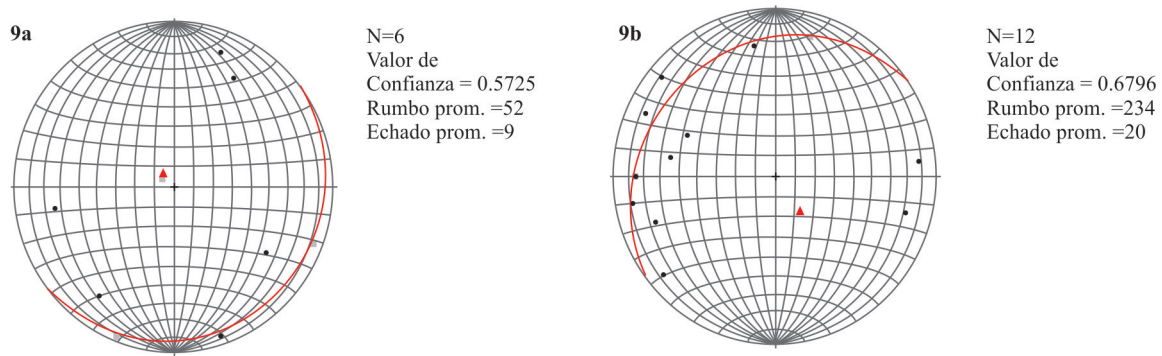


Figura 7. Estereogramas de la dirección del echado de las capas que muestran la tendencia general de la estratificación. a) En la Zona Oeste se midieron 6 datos discordantes que muestran una tendencia promedio hacia 52°/9°; esta zona se caracteriza por tener capas casi horizontales, según se ve en el perfil B-B' de la Fig. 9. b) En la Zona Centro se midieron 12 datos de estratificación cuya tendencia es 234°/20°.

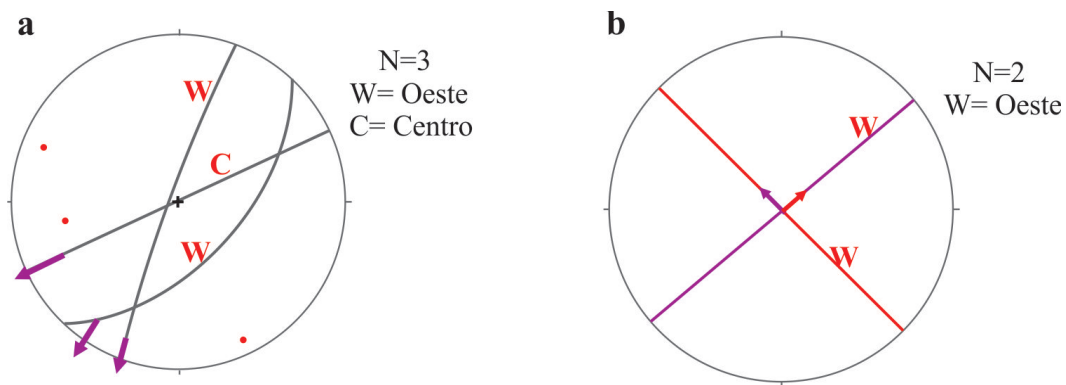


Figura 8. a) Fallas laterales izquierda y derecha en la Zona Oeste (W); 43°/60° con movimiento derecho y 200°/86° con movimiento izquierdo. El plano de la tercera falla, que se ubica en la Zona Centro (C), en la periferia del fraccionamiento, es 65°/90° y tiene un movimiento lateral derecho. b) Fallas normales verticales orientadas 315° y 230° con bloques de caída hacia el NE y NW, respectivamente.

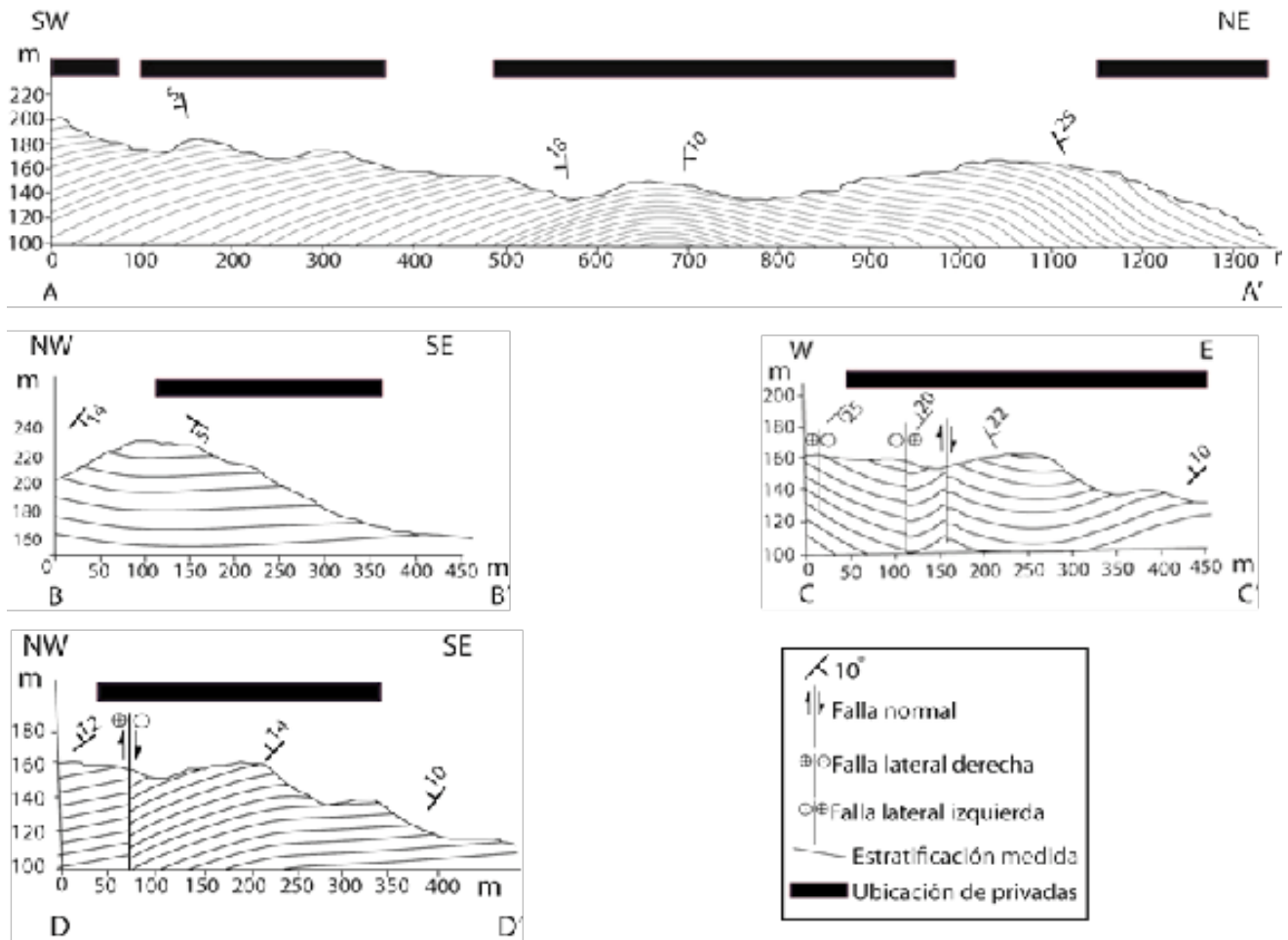


Figura 9. Secciones estructurales esquemáticas (topografía de 1999) en donde se aprecia el rumbo e inclinación de las capas que, en el perfil A-A', tiene 25° como valor máximo en la inclinación, mientras que los perfiles B-B' y D-D' no superan los 18°; en el perfil C-C' la inclinación máxima es de 25°. Es importante resaltar que las barras negras corresponden a la zona con viviendas.

DAÑO ESTRUCTURAL EN LAS VIVIENDAS

De acuerdo con los criterios establecidos en el apartado de “Materiales y métodos”, se hicieron 136 mediciones de grietas a partir de las cuales se infirió el movimiento del terreno sobre el que se asientan las viviendas a las que se tuvo acceso. Los datos se agruparon en tres tipos de acuerdo con su naturaleza: a) grietas con movimientos horizontales similares a los de las fallas de desplazamiento lateral; b) grietas con

movimiento vertical (hundimientos); y c) grietas en donde la dirección de movimiento se deduce a partir de series de fracturas y que, en lo sucesivo, son mencionadas como dirección de movimiento pues se refiere al sentido del movimiento de bloque donde hay obras civiles. Para facilitar la ubicación y descripción de estructuras, éstas se agruparon en las zonas: Oeste, Centro y Este, que son las mismas descritas en el apartado de “Geología estructural” (Figura 6).

Movimientos horizontales

Se identificaron 18 estructuras que indican movimientos laterales en el fraccionamiento, 10 de ellas izquierdas y ocho derechos (Figura 10). En la Zona Oeste se encontraron cuatro grietas que indican movimiento lateral izquierdo y una con movimiento lateral derecho. El movimiento lateral derecho se midió en la privada Ruiseñores (figuras 1 y 11a). Los movimientos izquierdos se encontraron en las privadas Ruiseñores, Canarios, Las Fuentes y Caoba. En la Zona Centro se observaron cinco grietas con movimiento lateral lateral derecho y cinco con movimiento lateral

izquierdo. Los movimientos laterales derechos se midieron en las privadas Azucenas, Begonias, Del Parque, Hacienda y Jacarandas (Figura 11b). Los movimientos laterales izquierdos se concentran en la parte suroeste de esta zona, en las privadas Crisantemos, Del Parque, Hacienda, Jacarandas y Pino (Figura 11c y d). En la Zona Este se identificaron tres grietas debidas a movimiento lateral, donde uno es izquierdo y dos son derechos. El movimiento lateral izquierdo se encuentra en la privada Las Moras, mientras que los movimientos laterales derechos se midieron en la privada Higueras y en la barda perimetral que se ubica al sur de esta zona.

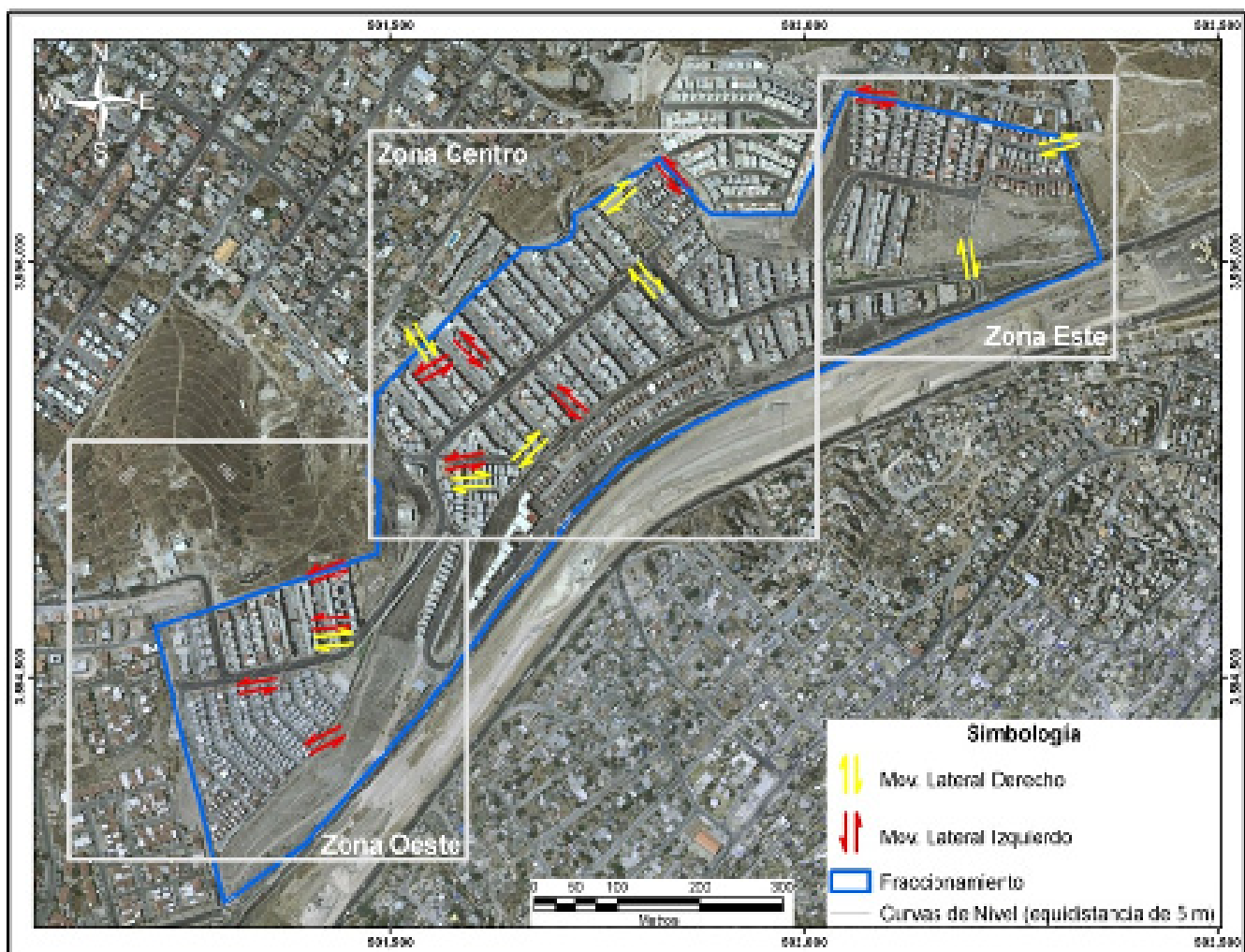


Figura 10. Cartografía de movimientos horizontales indicando el sentido de desplazamiento lateral izquierdo o derecho.



Figura 11. Fotos de movimientos laterales. a) Movimiento lateral derecho ubicado en la privada Ruiseñores. b) Grieta localizada en la privada Begonias, en la cual se observa movimiento lateral derecho. c) Fractura que muestra movimiento lateral izquierdo, que se encuentra en la privada Del Parque. d) Grieta con movimiento lateral izquierdo ubicada en una de las paredes que se localiza junto a la caseta de vigilancia de la privada Hacienda.

Movimientos verticales o hundimientos

En el fraccionamiento se identificaron 35 hundimientos: 10 en la Zona Oeste, 22 en la Zona Centro y tres en la Zona Este (Figura 12).

En la Zona Oeste, los hundimientos son notables al inicio de las privadas Ruiseñores y las Fuentes y al final de las privadas Laurel, Ciprés, Álamo, Pirul y Fresno (Figura 13a). También se observó asentamiento en la privada Las Rocas. De manera general, la mayoría de los hundimientos se encuentran cerca de la barda perimetral al sur de este terraplén. En la Zona Centro la mayoría de los movimientos verticales están en las privadas Clavel, Del Parque, Hacienda, Alcatraces y Noche Buena (Figura 13b). En las privadas Gardenias, Crisantemos, Tulipanes, Jacarandas,

Sauce y Azucenas se observó un hundimiento en cada una. En la Zona Este sólo se identificaron tres grietas debidas a hundimiento, aunque es probable que existan más pero no se pudo medir en dos privadas. Los asentamientos identificados están en las privadas Castaño, Naranja y De las Higueras.

Es importante señalar que a partir de una prospección geoelectrica efectuada después del trabajo geológico (Gutiérrez Zamudio et al., 2012), se interpreta que existe correlación entre las zonas de hundimiento diferencial y deformación con la paleotopografía, esta última, de origen estructural.

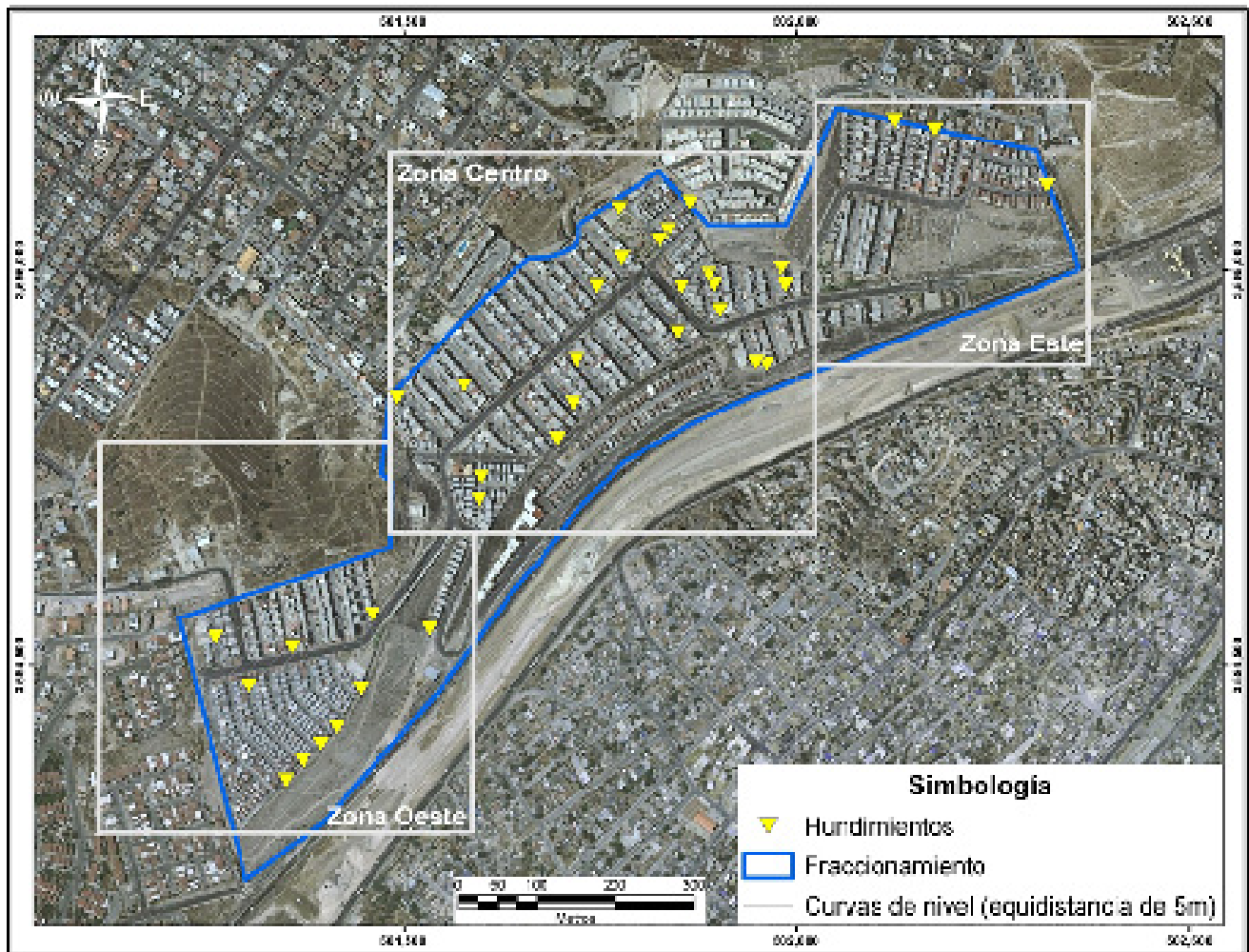


Figura 12. Ubicación de los hundimientos identificados en el fraccionamiento Jardines de Agua Caliente.



Figura 13. Ejemplos de hundimientos. a) privada Pirul y b) privada Alcatraces.

Direcciones de movimiento inferidas de fracturas en los inmuebles

Se registraron 91 grietas que sugieren movimiento horizontal en las privadas y viviendas a las que se tuvo acceso (Figura 14). En estos casos sólo existe un plano de referencia y no se puede identificar el sentido izquierdo o derecho del movimiento. Se identificaron 24 fracturas que indican dirección de movimiento en la Zona Oeste. La mayoría de ellos se midieron en la barda que se localiza al sur del fraccionamiento, en las privadas Canarias y Álamo, así como en

el parque que se ubica al centro de esta zona. En la Zona Centro se identificaron 50 rasgos que indican la dirección de movimiento (Figura 15a), las cuales se encuentran en las privadas Hacienda, Clavel, Azucenas, Del Parque y Noche Buena, así como en la barda perimetral sur. En la Zona Este se cartografiaron 17 grietas donde se puede interpretar la dirección de movimiento; la mayoría se encuentra en la privada De La Higuera, De La Mora y Castaño, así como en el parque que se encuentra en la entrada del fraccionamiento (Figura 15b).

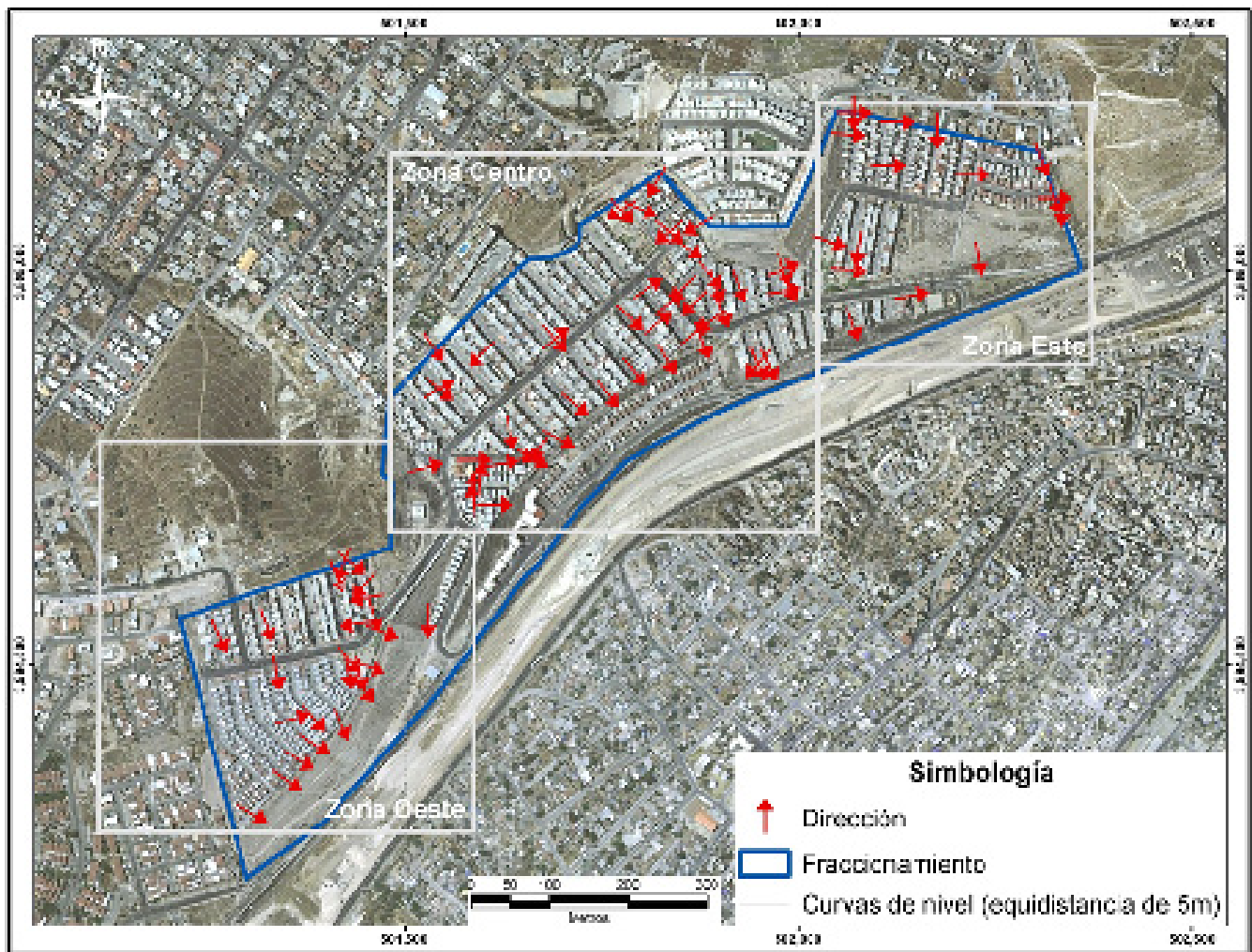


Figura 14. Cartografía de tendencias observadas en los inmuebles del área de estudio indicando la orientación preferente de movimiento.



Figura 15. Ejemplos de movimientos. a) Barda perimetral en la privada Azucenas, Zona Oeste, con movimiento del piso hacia la derecha y hacia arriba. b) Grieta de separación localizada en el patio trasero de una vivienda en la privada De la Higuera, al NW de la Zona Este.

DISCUSIÓN

Los datos estratigráficos y estructurales obtenidos en la periferia del área donde se asientan las viviendas del fraccionamiento sólo pueden correlacionarse utilizando los perfiles estructurales de la Figura 9. La sección A-A' está orientada SW-NE, es paralela a la vialidad Aeropuerto indicada en la Figura 1 y atraviesa las tres zonas en las que se dividió el fraccionamiento. La B-B', localizada en la Zona Oeste, se orienta hacia NW-SE; en la sección A-A' se observa un anticlinal amplio, mientras que en B-B' las capas se ven suavemente plegadas en el extremo NW debido posiblemente a un efecto de arrastre del bloque de techo de la falla normal regional que se encuentra al W de la zona de estudio (Figura 3b). En ambos casos, los pliegues no son responsables de los daños en las construcciones salvo, en el extremo oriental de la Zona Este en donde, tanto el movimiento lateral derecho (Figura 10), como las direcciones de movimiento interpretadas en la Figura 14, posiblemente están influenciadas por la estratificación con echado de 25° hacia el NE. Las secciones C-C' y D-D', en sus partes W y

NW, respectivamente, intersectan fallas normales con componente de movimiento lateral a las que se les atribuyen los cambios en la actitud de los estratos. No hay evidencias en el campo que indiquen actividad reciente de esas estructuras de falla, sin embargo, la forma del drenaje natural antes del desarrollo del fraccionamiento puede correlacionarse con la distribución de las fallas y las fracturas (Figura 16).

Se considera que el nivel base de erosión local, responsable del relieve de la zona de estudio, está controlado por el drenaje principal ocupado actualmente por la vialidad Aeropuerto, o Arroyo Aeropuerto, que es paralelo a las fallas regionales normales NE-SW (Figura 3). El drenaje de las colinas donde se desarrolló el fraccionamiento fluía hacia el Arroyo Aeropuerto y se fue excavando siguiendo el patrón de fallas y fracturas del terreno, lo que explica el arreglo de enrejado del drenaje en la zona de estudio anterior al desarrollo del fraccionamiento y, como se muestra en seguida, la correlación entre las zonas afectadas y la paleotopografía.

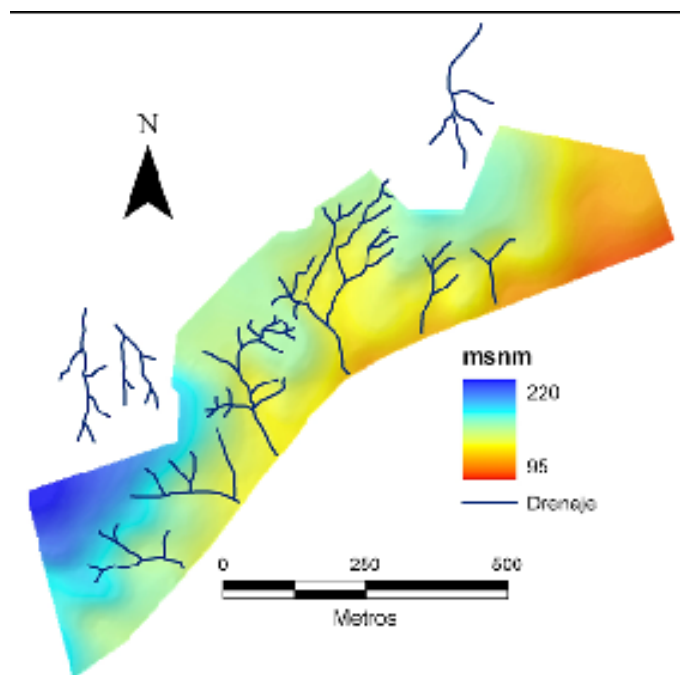


Fig. 16. Paleotopografía obtenida a partir de la base digital de alturas de 1999 del INEGI. El drenaje natural de esa época muestra una tendencia marcadamente rectilínea, de donde se infiere que está estrechamente relacionada con rasgos estructurales, principalmente fallas y fracturas.

Análisis de la paleotopografía y su relación con los daños en las viviendas

La explicación a los movimientos cartografiados puede plantearse a partir del análisis comparativo entre la paleotopografía y el relieve actual. Se construyó un mapa en el que se muestran las zonas de corte y relleno con los datos del relieve del año 1999 y los de 2002, correspondientes a los momentos antes y después de la preparación del terreno para urbanizarse (Figura 17). Son notables en la Zona Oeste los rellenos de hasta 23 m, mientras que los cortes más pronunciados, del orden de los 23 m, se efectuaron en la Zona Este. Comparativamente, la Zona Centro tiene valores intermedios de corte y relleno. En estas imágenes también son notables los contornos de aspecto rectilíneo de las zonas de corte y relleno. Cabe destacar que el límite topográficamente más bajo del fraccionamiento, en su Zona Oeste, es paralelo a la vialidad Aeropuerto y corresponde básicamente a una zona de relleno que, a su vez, coincide con las pendientes más fuertes que se ven en la Figura 2.

En la Figura 18 se presentan los mapas indicando los daños en construcciones, el paleodrenaje y las zonas de corte y relleno. La relación entre ellos se discute enseguida.

Movimientos horizontales (laterales derechos e izquierdos)

Los movimientos laterales identificados en el fraccionamiento guardan una buena correlación con la dirección del drenaje. En particular, en la Zona Oeste y esquina inferior izquierda de la Zona Centro, estos movimientos son notablemente paralelos al drenaje orientado E-W. En la parte central de la Zona Centro los movimientos principales son NW-SE, paralelos al drenaje principal de la cuenca más grande la que, a su vez, drenaba en el sentido de la paleopendiente hacia la vialidad Aeropuerto (Figura 19). En la Zona Este sólo hay tres datos de esa naturaleza, los cuales coinciden con los márgenes de una zona de relleno profunda (casi 23 m), aunque los movimientos son paralelos a la pendiente actual (SSE) y al echado de los estratos (NE).

Movimientos verticales o hundimientos

El 70% de los hundimientos en la Zona Oeste se ubica en la franja de relleno de más de 250 m de longitud que se orienta paralela a las pendientes, tanto actual como anterior a 1999 (Figura 18c). En la Zona Centro, sólo el 27% de los asentamientos está relacionado con áreas de relleno; sin embargo, el 60% de los hundimientos que ocurren en esta zona coinciden con paleodrenajes, lo que demuestra la importancia de identificar el drenaje natural original. En la Zona Este sólo se observaron tres hundimientos, de los cuales, dos están prácticamente en el límite de corte y relleno. Visto en su conjunto, el 68% de los hundimientos coinciden con las zonas de relleno y/o paleodrenaje (Figura 18c). Esta interpretación fue posteriormente verificada a partir de información geoeléctrica proporcionada por Gutiérrez Zamudio et al. (2012) con penetración hasta de 20 m. Se interpreta que el terreno original es más competente que el de relleno y que los alineamientos de contraste de resistividad son producto de fracturas que incrementan la permeabilidad y le imprimen una geometría definida por alineamientos inclinados aproximadamente 45° que, lo más probable es que se hayan desarrollado por carga litostática y variaciones en los contenidos de humedad durante los periodos alternados de lluvias y estiaje. Los pliegues formados, ya sea por compresión lateral o por carga litostática, desarrollarán un patrón de fracturas de abertura en la parte convexa o cima de pliegue de aspecto anticlinal, y de fracturas cruzadas en la parte cóncava o parte baja de un pliegue de aspecto sinclinal.

Direcciones de movimiento inferidas de fracturas en las viviendas

Las direcciones de movimiento inferidas a partir de un conjunto de datos de fracturas en los inmuebles indican que, en la Zona Oeste, el 79% de los movimientos identificados se encuentra en áreas de relleno (Figura 18d). Además, los movimientos se concentran cerca del límite sur del fraccionamiento donde siguen

preferentemente la dirección de la pendiente. En la Zonas Centro y Este el 43% y 20% de los movimientos están relacionados con zonas de relleno, respectivamente. Se observa también que las direcciones preferentes cerca del límite sur son paralelas a las pendientes. Este tipo de movimientos no guarda una buena correlación con las áreas de relleno en las Zonas Centro y Este.

Puede establecerse una correlación entre la distribución de los daños con respecto a su posición en las zonas de corte y relleno. En las columnas del lado derecho en los mapas “c” a “d” de corte y relleno de la Figura 18 se indica el porcentaje de las afectaciones a partir de un valor cero de referencia, donde los números positivos indican relleno y los negativos corte. En el caso de los movimientos horizontales (Figura 18b), el 61% ocurre en el intervalo de -6 m y +6 m, mientras que el 43% de los hundimientos (Figura 18c) y el 44% de los movimientos direccionados (Figura 18d) ocurren en el intervalo de 12m. Al abrir el intervalo a 24m, entre -12 m y +12 m, encontramos la siguiente distribución: 88% de los movimientos horizontales, 74% de los hundimientos y 73% de los movimientos direccionados. Dichas distribuciones indican que la zona de “interfase” entre los materiales del medio natural recortado y el de relleno, tiene correspondencia con las zonas donde el terreno es más susceptible de moverse debido al contraste entre las características físicas tales como porosidad, resistencia a la deformación y superficie de reposo, entre otras. En ese sentido, dicha “interfase” se comporta como una superficie de ruptura o de despegue de deslizamientos gravitacionales de traslación.

Relación del movimiento del terreno con las pendientes

Debido a que la gravedad es la fuerza promotora principal de los movimientos, también se sobrepusieron los movimientos cartografiados al mapa de pendientes de la Figura 2. Se presentan en la Figura 19 las direcciones de movimiento en una roseta con los datos para

cada zona y se observa que en la Zona Oeste la mayoría de los movimientos registrados tienen direcciones SSE y SE, paralelos a las direcciones de las pendientes. Según se muestra en la fotografía de la Figura 15a, existe la posibilidad de que esta zona sea una de deslizamiento de traslación, diferente a los rotacionales que son más rápidos. En la Zona Centro los movimientos tienen direcciones en arreglo ortogonal hacia el SW, SE y NE; las familias de datos de movimiento hacia el SE y NE son notablemente paralelas a las pendientes, principalmente las orientadas

hacia la vialidad Aeropuerto. En la Zona Este la dirección dominante de movimiento es hacia el E, en la dirección del echado de las capas y de la pendiente por lo que, en este caso en particular, puede interpretarse que hay deslizamiento traslacional, como los documentados por Highland y Bobrowsky (2008), lo cual también fue documentado fotográficamente (Figura 15b). De acuerdo con la Figura 19, puede interpretarse que las direcciones de movimiento en el fraccionamiento también están fuertemente influenciadas por las pendientes.

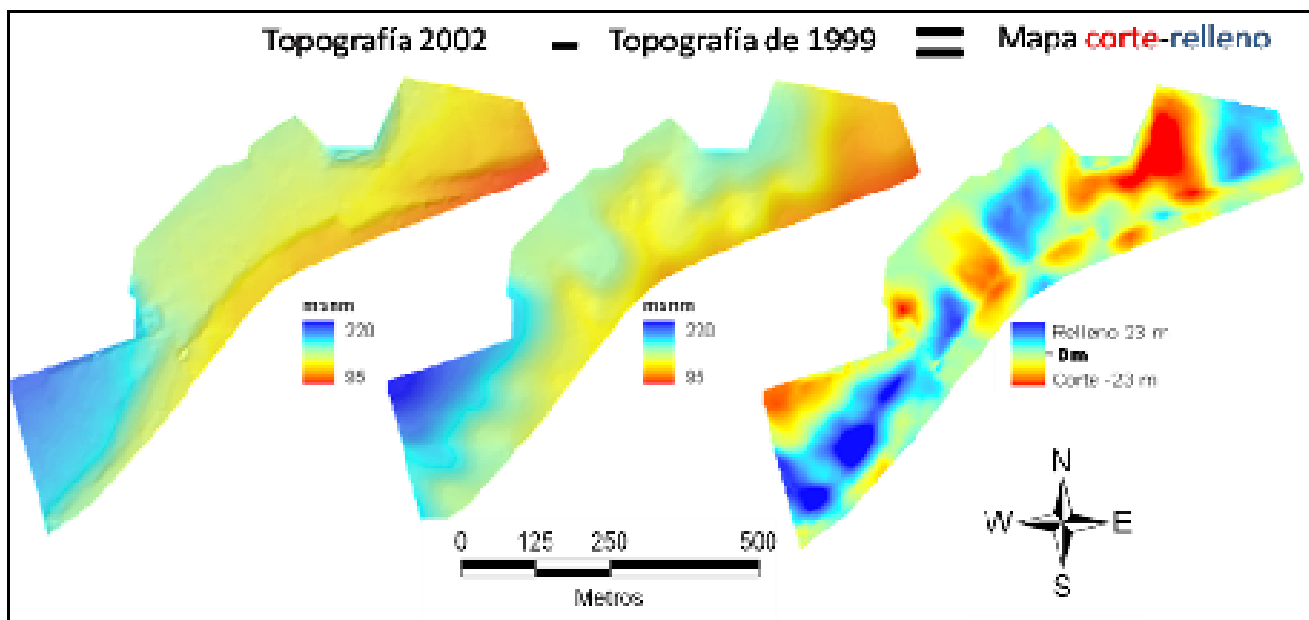


Figura 17. Mapa de corte-relleno obtenido al restar las elevaciones de 1999 a la topografía de 2002; se obtienen valores positivos en las zonas con relleno y negativos en aquellas áreas donde se cortó el terreno. La resolución en todas las imágenes es de 2m.

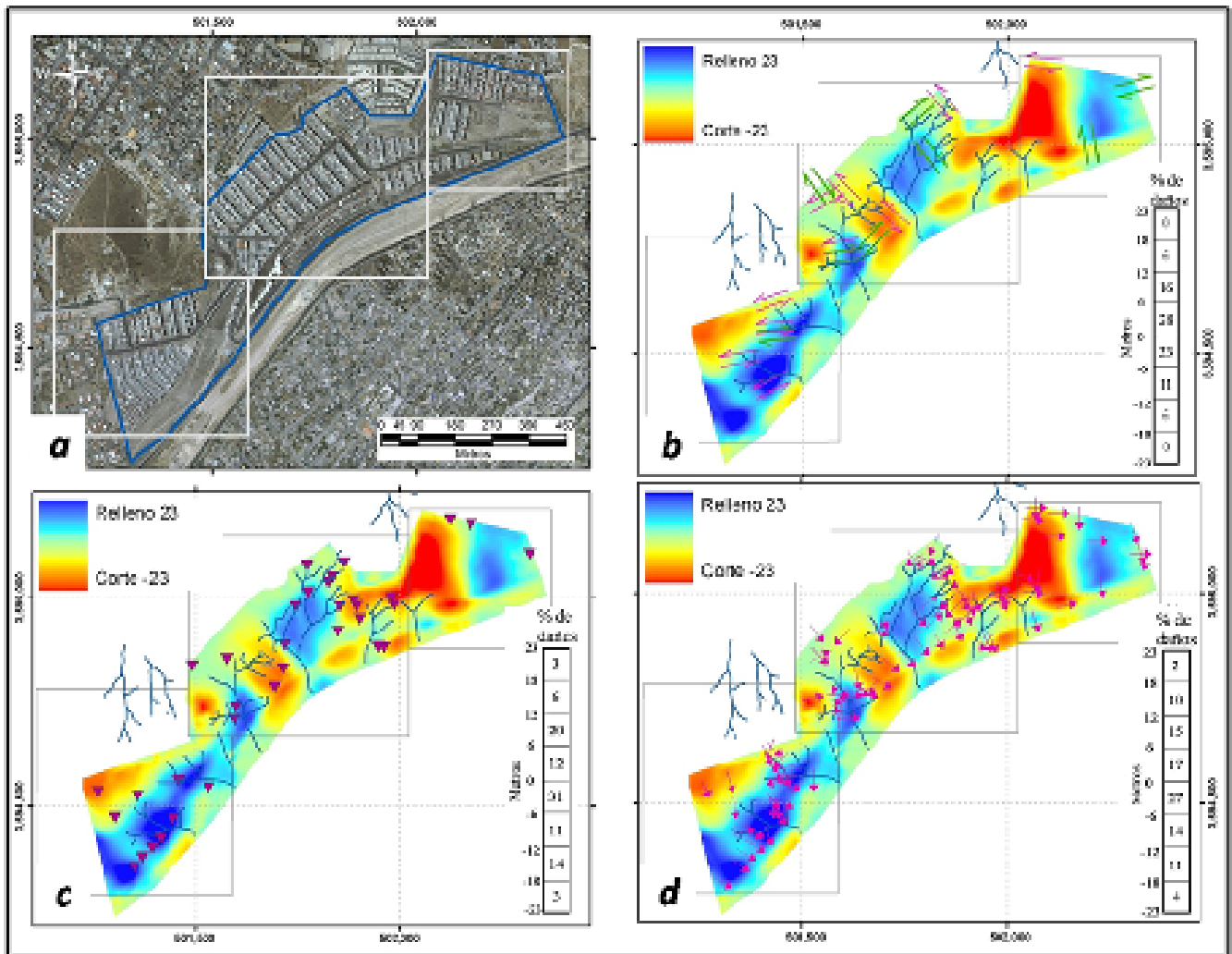


Figura 18. a) Fraccionamiento Jardines de Agua Caliente delimitado por el polígono azul. b) Mapa de corte-relleno con movimientos horizontales. c) Mapa de corte-relleno con hundimientos. d) Mapa de corte-relleno con direcciones de movimiento. En cada mapa se muestra el porcentaje de daños por intervalo de metros

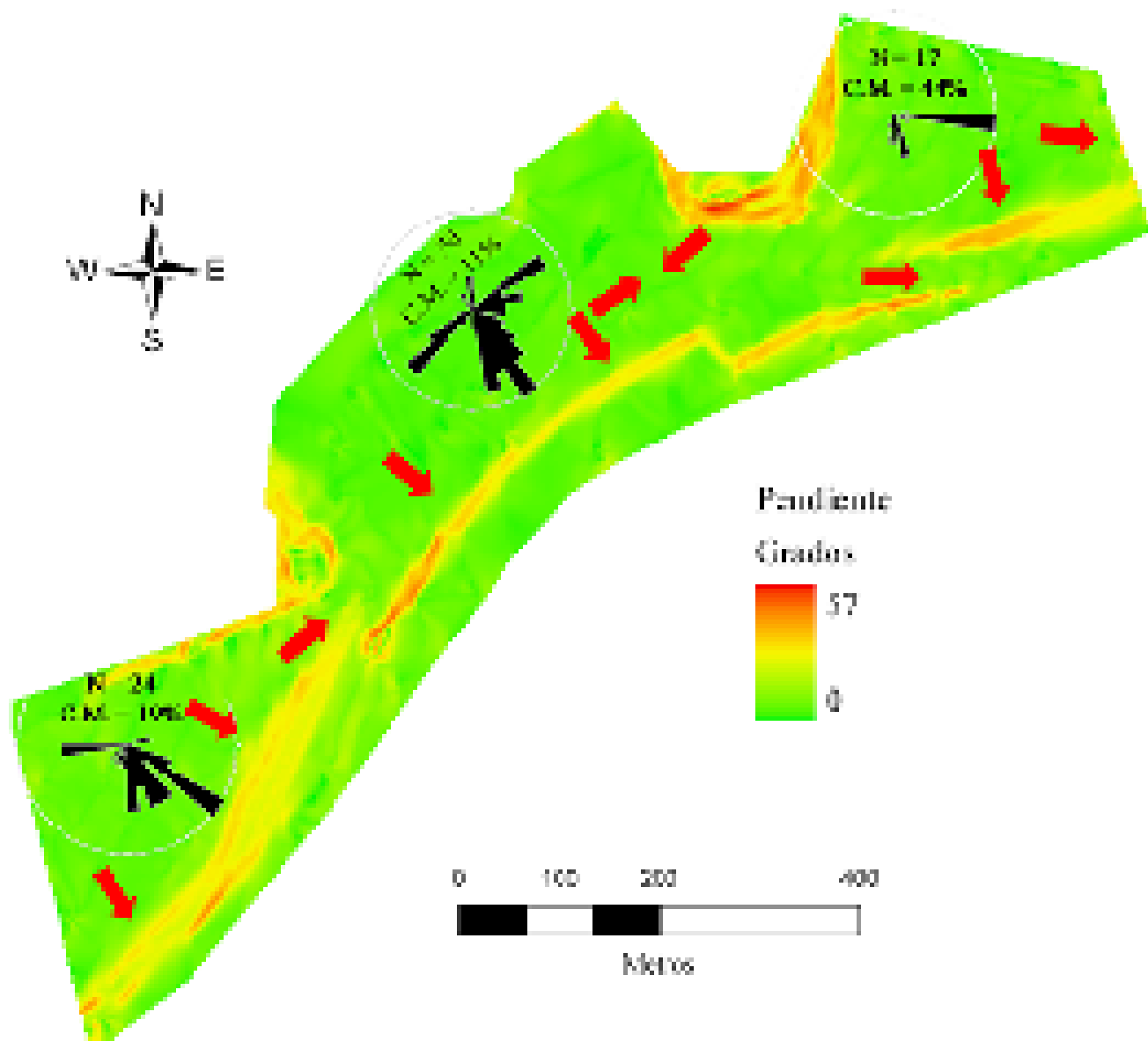


Figura 19. Mapa de pendientes del fraccionamiento indicando su dirección en cada zona con flechas rojas. Se muestran los diagramas de rosa de las direcciones de movimiento así como el número de datos y valor porcentual del círculo máximo para cada zona.

CONCLUSIONES

1. Aunque existe un registro instrumental pobre de la sismicidad en Tijuana y sus alrededores, la existencia de fallas regionales activas en la península y en el borde continental, hacen ineludible el análisis de la respuesta sísmica del terreno sobre el que se hacen desarrollos urbanos. Ciertos taludes de la zona ameritan, dada su precaria estabilidad, una evaluación que contemple un escenario sísmico tal y como se hizo ante la eventualidad del rompimiento de la falla La Nación en el condado de San Diego, California (Acosta-Chang y Montalvo-Arrieta, 1997).
2. El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente se localiza entre fallas normales orientadas NE-SW en el interior de un amplio graben caracterizado por el desarrollo paralelo de fallas normales secundarias con componente de movimiento lateral que afectan a secuencias estratigráficas Plio-pleistocénicas de arenas y conglomerados.
3. Las secuencias estratigráficas están expuestas en algunos lugares de la parte superior de las zonas Oeste y Centro en que se dividió el fraccionamiento para su estudio, en donde se pueden hacer las mejores observaciones litológicas, como de fallas y fracturas. Las unidades estratigráficas están, en general, pobremente consolidadas, aunque existen algunas cementadas con carbonatos que definen horizontes competentes. En algunas unidades se observaron cortes de canales fluviales que incluyen fragmentos de material limo-arcilloso. En otras unidades arenosas es común encontrar matriz de ceniza volcánica.
4. La actitud de las unidades estratigráficas muestran pliegues anticlinales y sinclinales amplios con echados suaves, salvo en aquellos lugares donde fallas normales con componente de desplazamiento lateral aumentan la inclinación de las capas. No se observaron evidencias de reactivación de fallas.
5. El patrón geométrico del drenaje principal obtenido a partir de la topografía de 1999, que drena hacia el arroyo de la actual vialidad Aeropuerto, es predominantemente rectilíneo y sigue el patrón de las fallas y fracturas.
6. La topografía actual muestra que el drenaje original fue prácticamente rellenado en su totalidad. De la diferencia de alturas entre la topografía de 2002 y de 1999 resulta un mapa de corte y relleno con valores extremos de +23.35 m y -23.62 m, respectivamente.
7. Se identificaron tres tipos de daños a los inmuebles caracterizados por grietas o fracturas que indican movimiento relativo: a) movimientos horizontales mapeados como fallas de rumbo, b) hundimientos de pisos y paredes, y c) agrietamiento relacionado con movimiento horizontal del subsuelo.
8. Existe una buena correlación entre la distribución de los daños con respecto a la ubicación de las zonas de corte y relleno. Con respecto a los valores de corte y relleno, en el intervalo entre -12 m y +12 m, se observa el 88% de los movimientos horizontales, el 74% de los hundimientos y el 73% de los movimientos direccionados. Se interpreta que la zona de "interfase" entre los materiales del medio natural recortado y el de relleno corresponde a las zonas donde el terreno es más susceptible de moverse debido al contraste entre las características físicas y, que dicha "interfase", se comporta como una superficie de ruptura o de despegue de deslizamientos gravitacionales lentos de traslación.
9. En vista de que la gravedad es la principal fuerza promotora de los movimientos, en la Zona Oeste la mayoría de los movimientos registrados son SSE y SE, paralelos a las direcciones de las pendientes; en la Zona Centro, los movimientos hacia el SE y NE son notablemente paralelos a las pendientes, principalmente aquellas orientadas hacia la vialidad Aeropuerto; en la Zona Este la

dirección dominante de movimiento es hacia el E, en la dirección del echado de las capas y de la pendiente por lo que, en este caso particular, puede interpretarse que ocurre deslizamiento traslacional.

10. Finalmente, durante diciembre de 2011 y enero de 2012, los sondeos eléctricos y sísmicos efectuados por Gutiérrez Zamudio et al. (2012) en las zonas donde los daños en las construcciones y vialidades son más evidentes. Existe una buena correlación entre los cuerpos conductores y la distribución del paleodrenaje de la Figura 16, desarrollado a lo largo de zonas de falla o fractura. En los perfiles geoeléctricos los cuerpos resistivos correlacionan con el material sedimentario natural, mientras que la conductividad se incrementa por la existencia de fracturas, tanto en material natural como de relleno. Los resultados de los perfiles sísmicos manifiestan una correlación menos clara debido, principalmente, a que el contraste entre los cuerpos de relleno hechos durante la preparación del terreno tienen un contraste bajo de velocidades de onda con respecto al terreno sedimentario natural. Sin embargo, los perfiles sísmicos definen claramente los planos de estratificación mostrados en los perfiles estructurales.

RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones de este estudio de caso y otras experiencias en esta ciudad (Delgado-Argote et al., 1996 y 2011), es pertinente hacer las siguientes recomendaciones:

1. Bajo la premisa de que los movimientos principales ocurren en las zonas donde las pendientes del terreno natural cambian drásticamente, así como en las zonas correspondientes a los intervalos de -12 m y +12 m del mapa de corte-relleno (Figura 18), debe mantenerse un monitoreo permanente de movimientos en donde las viviendas muestren grietas .
2. En vista de que los inmuebles que han sufrido daños se encuentran en zonas que son susceptibles de seguir moviéndose, particularmente en los linderos de rellenos, es recomendable contar con la opinión de expertos en obras civiles que evalúen la estabilidad de las construcciones ubicadas en terrenos inestables o de estabilidad precaria ante escenarios que contemplen la sismicidad de la región. Un sismo es un factor disparador de deslizamientos y hay que tomar en cuenta que ya durante la década de los ochenta ocurrieron dos sismos de magnitud entre 2.5 y 3 dentro de un radio de 5 km de la zona de estudio.
3. Evitar las ampliaciones o modificaciones que impliquen mayor peso a los inmuebles para no aumentar la carga al terreno, o bien, construir bajo códigos sísmicos, considerando profundidades de cimentación por debajo de la zona de interfase.
4. El agua es un factor adicional, por lo que es indispensable mantener en estado óptimo el sistema de drenaje pluvial durante la época de lluvia. Además, debe revisarse periódicamente que no existan fugas de agua potable y drenaje, tanto en instalaciones domiciliarias como en las redes públicas. Los asentamientos diferenciales generan rupturas en las tuberías y, en consecuencia, fugas de agua, que incrementa la humedad y presión de poro, y disminuye la resistencia al cortante, principalmente en materiales granulares como los de la zona.
5. Monitorear la evolución de las fracturas en las casas midiéndolas en periodos mensuales o trimestrales, dependiendo de los antecedentes de la zona y evitar cubrirlas, para poder observar su desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades otorgadas por los colonos del fraccionamiento para efectuar las observaciones y mediciones en sus Privadas y, en particular, a la Sra. Silvia Mora y al grupo de colonos que nos acompañó durante diferentes fases de este trabajo y nos facilitó los resultados preliminares de los sondeos eléctricos y sísmicos efectuados por GEOLAB. El alcance de este estudio no hubiera sido el mismo sin la ayuda documental proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana, en particular, el material digital facilitado por el Oc. Ramón Moldrano. La versión final de este manuscrito se benefició enormemente gracias al arbitraje estricto de Víctor Manuel Hernández Madrigal, Felipe Escalona A. y un revisor anónimo.

REFERENCIAS

- Acosta-Chang, J.G. y Montalvo-Arrieta, J.C., 1997. Intensidades sísmicas para la región de Tijuana, Baja California, a partir del posible rompimiento de la falla La Nación ($M_w = 6.5$). GEOS, 17-3, p.128-138.
- Ashby, J. R., 1989. A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, northwestern Baja California, Mexico. En: Patrick L. Abbott, editor, Geologic studies in Baja California, Book 63, p. 37-45.
- Bocco, G., Sánchez R., Riemann, H., 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. Frontera Norte, Vol. 5, No.10, COLEF, p. 54-58.
- Böhnell, H., Delgado-Argote, L.A. and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for Middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? Tectonics, V. 21-5. p. 1029-1043.
- Delgado-Argote, L.A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., y Frías-Camacho, V., 1996. Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California, con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno, GEOS, 16-2, 57-89.
- Delgado-Argote, L. A., G. Gómez Castillo, T. A. Peña Alonso, X. G. Torres Carrillo y P. Avilez Serrano, 2011. Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, Tijuana, Baja California. GEOS, vol. 30-2, 1-15.
- Frez, J. y Frías-Camacho, V.M., 1998. Distribución de energía sísmica en la región fronteriza de ambas Californias, GEOS, 18-3, p. 189-196.
- Gastil, R. G., Phillips, R. and Allison, E., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, Geological Society of America Memoir 140, 170 pp.
- Gutiérrez Zamudio, A., Murillo Zapién, J. y Gómez Corzo, D., 2012. Exploración geofísica y geotécnica; Reporte de estudios geofísicos. Informe digital.
- Highland, L.M., and Bobrowsky, P., 2008. The landslide handbook –A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- INEGI, 1999. Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica I11D71 La Presa, escala 1:50,000.
- Legg, M. R., 1991. Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 179-196.

- Legg, M. R., Wong, V. and Suárez, F., 1991. Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-177.
- Minch, A. J., Ashby, J., Deméré, T. and Kuper, T., 1984. Correlation and depositional environments of the Middle Miocene Rosarito Beach Formation of northwestern Baja California, Mexico. En: J.A. Minch and J.R. Ashby, Editors, Miocene and Cretaceous depositional environments, northwestern Baja California, Mexico: Pacific Section, American Association of Petroleum Geologists, V. 54, p. 33-46.
- RESNOM, 2011, Catálogo de eventos sísmicos, División de Ciencias de la Tierra, CICESE.
- Rockwell, K. T., Hatch, E. M. and Shug, L.D., 1987. Late Quaternary rates Agua Blanca and borderland faults: Final Technical Report USGS, contract No. 14-08-0001-22012, 122 pp.
- Rockwell, K. T., Muhs, D., Kennedy, G., Hatch, M., Wilson, S. and Klinger, R., 1989. Uranium series ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, México. En: Patrick Abbott, editor, Geologic Studies in Baja California, The Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Los Angeles, California U.S.A., p. 1-16.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. and Gastil, G., 1991. Framework of recent and active faulting in northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The Gulf and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 285-300.
- Suárez-Vidal, F., 1993. Marco estructural de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. En: Delgado-Argote, L. A. y Martín-Barajas, A., Editores, Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 1, p. 24-39.

Manuscrito recibido: 15 de mayo de 2012

Recepción del manuscrito corregido: 25 de agosto de 2012

Manuscrito aceptado: 6 de septiembre de 2012