

Análisis morfotectónico del territorio circundante a Tijuana, Baja California, México: aportes para la evaluación del peligro sísmico

Morphotectonic analysis of the territory surrounding Tijuana, Baja California, Mexico: contributions for the evaluation of seismic hazard

Juan Carlos Garatachia Ramírez ^{1*}, José Ramón Hernández Santana ², Carlos Isidro Huerta López ³

¹ Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra – Unidad Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec, S/N, Toluca, Estado de México. C. P. 50000, gcgaratachiar@uaemex.mx , <https://orcid.org/0000-0003-2603-4770>

² Unidad Académica de Estudios Territoriales de Yucatán, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México, santana@geografia.unam.mx, <https://orcid.org/0000-0002-1375-2776>

³ Universidad de Puerto Rico, Recinto, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Recinto Universitario de Mayagüez, 259 Blvd. Alfonso Valdés Cobián, carlos.huerta@upr.edu, <https://orcid.org/0000-0003-4265-8858>

*Autor de correspondencia

Recibido: 26/11/2024. Aceptado: 06/01/2025. Publicado: 21/01/2025.

Cómo citar: Garatachia Ramírez, J., Hernández Santana, J., & Huerta López, C. (2025). Análisis morfotectónico del territorio circundante a Tijuana, Baja California, México: aportes para la evaluación del peligro sísmico. *Geografía Aplicada*, 1(1), 79-106. Consultado de <https://geografiaaplicada.uaemex.mx/article/view/25621>

Resumen

La ciudad de Tijuana, Baja California, está enclavada en un ambiente tectónico activo que se refleja en la morfología del relieve; múltiples estructuras activas que atraviesan la zona urbana y la amenazan desde su entorno periférico. Dicha situación, aunado a factores, como las condiciones socioeconómicas y el incremento poblacional que prevalece en la ciudad, contribuye a que algunos sectores de la población se encuentren en condiciones de exposición y de vulnerabilidad ante peligros originados o asociados a sismos. Aprovechando las capacidades de las geotecnologías como los Sistemas de Información Geográfica y sus técnicas de análisis espacial y a través del análisis morfotectónico del territorio, se delimitaron 45 unidades, diferenciadas por los índices geomorfológicos de hipsometría, pendiente, densidad de disección, energía del relieve, densidad de morfoalineamientos, y la dirección preferencial de estos. El mapa morfotectónico resultante es una contribución desde la geografía, a los estudios de riesgo sísmico que se realizan en la ciudad, donde la visión que ha dominado es la geológica y geofísica.

Palabras clave: México, Morfotectónico, Riesgo sísmico, Tijuana.

Abstract

The city of Tijuana, Baja California, is located in a geological context of intense tectonic mobility, both regional and local, with a significant seismic activity, manifested in a complex seismotectonic pattern of its relief. Multiple active structures cross its urban area and threaten it from its peripheral surroundings. This situation, coupled with factors such as socioeconomic conditions and the population growth that prevails in the city, contributes to some sectors of the population being exposed and highly vulnerable to hazards originating or associated with earthquakes. Taking advantage of the contributions of geotechnologies, such as Geographic Information Systems and their spatial analysis

techniques, as well as through the morphotectonic analysis of the territory, 45 units were delimited, differentiated by the geomorphological indices of hypsometry, slope, dissection density, relief energy, morphoalignment density, and preferential direction of the disjunctive structures. The resulting morphotectonic map is a contribution from geography to the seismic risk studies carried out in the city, where the vision that has dominated is geological and geophysical.

Keywords: Mexico, Morphotectonic, Seismic risk, Tijuana.

Introducción

La ciudad de Tijuana, Baja California, está enclavada en un contexto geológico de intensa movilidad tectónica, tanto regional como local, y de actividad sísmica significativa, manifestada en un complejo diseño sismotectónico de su relieve. Múltiples estructuras activas atraviesan la zona urbana y la amenazan desde el entorno periférico. En las últimas tres décadas, se han realizado algunas investigaciones sobre la velocidad promedio de desplazamiento de las fallas y su potencial sismogénico, arrojando un mayor peligro sísmico en las fallas *Coronado Bank*, *Agua Blanca*, *Rose Canyon*, *SilverStrand*, San Miguel, Calabazas y Vallecitos (Lindvall *et al.*, 1989; Berger y Schug, 1991; Reichle, 1991; Raines *et al.*, 1991; Cruz, 2002; Ibarra *et al.*, 2009).

Por otra parte, de acuerdo con datos del último censo de población (INEGI, 2020), la ciudad es habitada por 1'922,523 personas y en comparación con el año 2010, la población en Tijuana creció un 23 % (Data México, 2020); dicha situación, en consonancia con otros factores, como las condiciones socioeconómicas, contribuye a que algunos sectores de la población se encuentren en condiciones de exposición y de alta vulnerabilidad ante peligros sísmicos, que repercuten también en la activación de procesos de remoción en masa.

Ante dicho contexto que sugiere escenarios de riesgo de desastre en la zona de estudio, los enfoques que han marcado la pauta de los trabajos cuyo objetivo está relacionado con el análisis de amenazas y riesgos, se pueden clasificar en tres grupos: 1) Análisis y modelación de escenarios de riesgo; 2) Peligros naturales, con énfasis en la sismicidad y sus efectos secundarios y 3) Dinámica socioeconómica y vulnerabilidad.

Destaca el Proyecto RADIUS, caso Tijuana, desarrollado entre 1998-1999 y cuyo objetivo fue evaluar y proponer un escenario de riesgo sísmico para la ciudad; para ello, se estimó la magnitud y la distribución de las intensidades de un sismo hipotético de $M=6.5$, generado a partir del rompimiento de la Falla La Nación (Rosquillas y Mendoza, 2002). También se desarrolló una propuesta de escenario sísmico en Tijuana, por parte del Colegio de la Frontera Norte, en el marco del desarrollo del Sistema de Información Geográfica y Estadística de la Frontera Norte (SIGEF) (Winckell *et al.*, 2000). Otro de los aportes que se han realizado para el análisis del peligro sísmico en la ciudad, son las microzonaciones sísmicas, enfocadas a la estimación de los períodos dominantes del suelo, las velocidades de propagación de ondas de cortes y la aceleración pico horizontal, por citar algunos parámetros. (Ibarra, 2004; Acosta *et al.*, 2009, 2009). Asimismo, estudios orientados a analizar los procesos geológico-geomorfológicos de escala local, por ejemplo, movimientos de ladera (Delgado-Argote *et al.*, 2017). Por su parte, Garatachia *et al.* (2016) realizaron una aproximación a la vulnerabilidad estructural antes sismos, la cual fue calculada a partir de la identificación de la región de respuesta máxima, misma que considera las frecuencias de vibración del terreno y de las edificaciones.

A partir de la perspectiva general de la zona de estudio y principalmente en términos de sus características físico-geográficas y su formación geológica es necesario contar con estudios que muestren el comportamiento espacial del proceso sísmico y sus repercusiones directas sobre el sistema social expuesto. Pero también, resulta fundamental el conocimiento y la caracterización de morfoestructuras y principales rasgos morfotectónicos presentes en el relieve, como expresión superficial de la geodinámica y como fuente de peligro.

El presente trabajo aprovecha las capacidades de las geotecnologías como los sistemas de información geográfica y técnicas de análisis espacial, para el procesamiento y representación de datos morfoestructurales y morfométricos, y persigue los objetivos siguientes: a) describir las principales características morfométricas y morfotectónicas del relieve, (b) identificar y delimitar los principales tipos de morfoestructuras y realizar una clasificación tipológica; y (c) proponer las principales morfoestructuras con actividad

geodinámica en el contexto de la ciudad de Tijuana, como aporte para trabajos relacionados con el riesgo sísmico.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La ciudad de Tijuana se localiza al noroeste del estado de Baja California; colinda al norte, con el condado de San Diego, Estados Unidos de América; al este, con el municipio de Tecate; al sur, con el municipio de Ensenada; y al oeste, con el municipio de Playas de Rosarito y el Océano Pacífico (Figura 1). El área de estudio representa un polígono comprendido entre los 32° 18' 51.5" y los 32° 40' 12.6", de latitud norte, y entre los 116° 32' 36.2" y 117° 22' 46.1", de longitud oeste, con un eje norte-sur de 14 km y de 25 km, en dirección este-oeste a la ciudad, al noroeste del estado de Baja California.

La evolución geológica de esta región ha estado determinada por los desplazamientos de apertura entre la placa tectónica Norteamericana y las placas oceánicas adyacentes (Michaud *et al.*, 2005). Gastil *et al.* (1975) plantean la ocurrencia de dos eventos principales: (a) evento del Mesozoico medio, con una duración desde el Jurásico hasta la mitad del Cretácico, representado por estratos volcánicos, arcos de islas, metamorfismo regional y emplazamiento de rocas graníticas y (b) evento del Cenozoico medio, compuesto por la acumulación de una amplia variedad de rocas volcánicas, disminución del metamorfismo, el emplazamiento de materiales graníticos y la creación del Golfo de California, considerado como un cinturón tectónico móvil. Este evento inició durante el Mioceno temprano y continúa en la actualidad. Las características litoestratigráficas que se muestran en la Figura 1, se obtuvieron mediante una compilación de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), del Servicio Geológico Mexicano (2003), y de Todd (2004), Kennedy y Tan (2008).

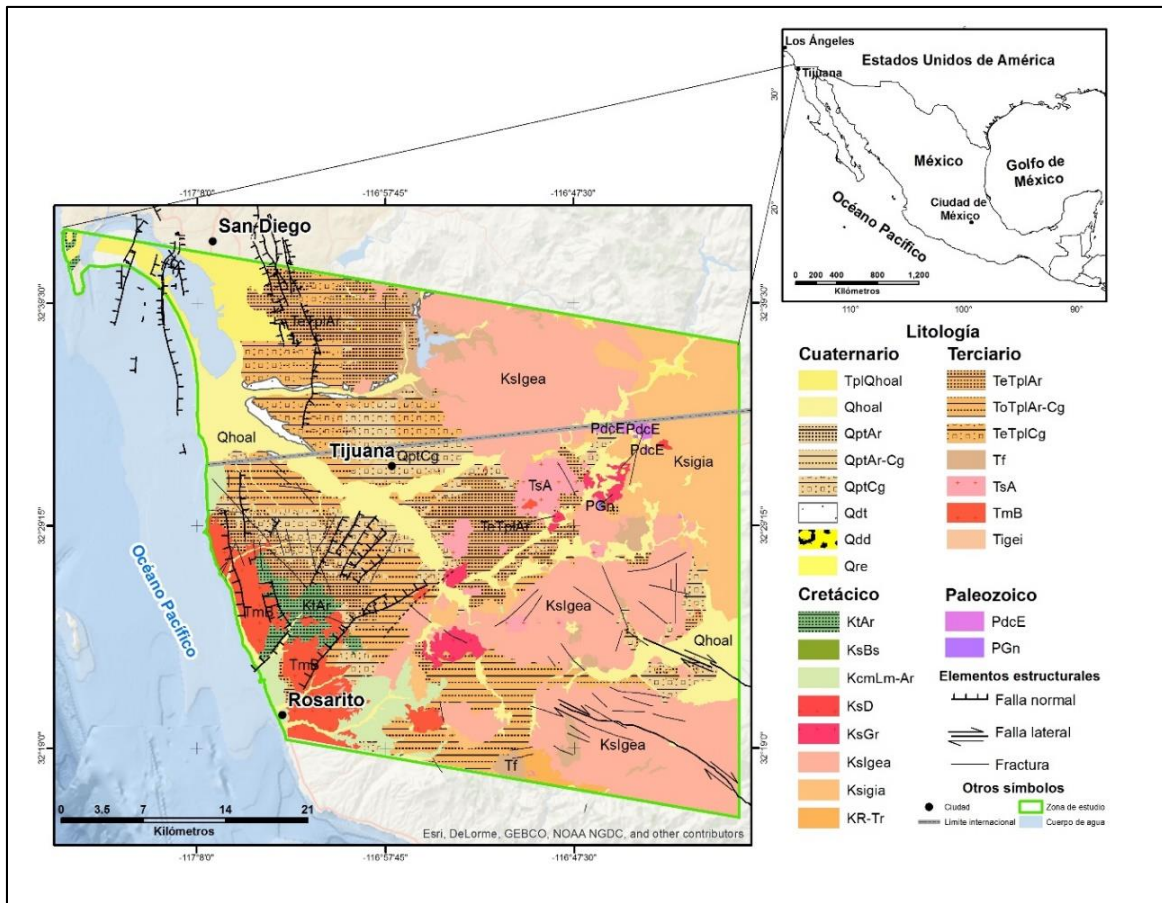


Figura 1. Área de estudio y constitución geológica. Cuaternario: Aluvial antiguo (TplQhoal), Aluvial reciente (Qhoal), Arenisca (QptAr), Arenisca-conglomerado (QptAr-Cg), Conglomerado (QptCg), Depósitos en terrazas (Qdt), Depósitos de deslizamiento (Qdd), Residual (Qre). Terciario: Arenisca (TeTplAr), Arenisca-conglomerado (ToTplAr-Cg), Conglomerado (TeTplCg), Fanglomerado (Tf), Andesita (TsA), Basalto (Tmb), Ígnea extrusiva intermedia (Tigei). Cretácico: Arenisca (KtAr), Brecha sedimentaria (KsBs), Limolita-arenisca (KcmLm-Ar), Diorita (KsD), Granito (KsGr), Ígnea extrusiva ácida (Ksigia), Ígnea intrusiva ácida (Ksigia), Riolita-Toba riolítica (KR-Tr). Paleozoico: Esquistos (PdcE), Gneis (PGn).

Fuente: elaboración propia, con base en las fuentes citadas en Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), del Servicio Geológico Mexicano (2003), y de Todd (2004), Kennedy y Tan (2008).

2.2. Materiales y métodos

Análisis estructuro-geomorfológico

Con la finalidad de contar con más elementos para el análisis morfoestructural del relieve, se desarrollaron los siguientes mapas morfométricos: hipsométrico, inclinación de las superficies y laderas del terreno, energía del relieve y densidad de disección; se considera que dichos productos brindan información fundamental para comprender la relación entre las geoformas y las características litológicas con los procesos, principalmente endógenos, que actúan sobre las mismas.

El mapa hipsométrico, o también llamado altimétrico, representa el inicio del análisis morfométrico. El objetivo de dicho mapa es expresar, de forma clara, los diferentes niveles o pisos altitudinales del relieve, mediante la agrupación de los valores de altitud en intervalos discretos. Esto permite identificar unidades mayores y posteriormente definir categorías (montañas, lomeríos y llanuras) y subcategorías del relieve (montañas altas, media, bajas, premontañas; lomeríos altos, medianos, bajos; llanuras muy altas, altas, medianas, bajas y muy bajas), mientras que en el plano morfotectónico facilita la delimitación de morfoestructuras regionales y ejes estructurales.

La expresión cartográfica fue desarrollada con un Modelo Digital del Terreno (MDT) del sensor ALOS-PALSAR con resolución espacial de 12.5 m. A partir del método de clasificación cortes naturales se realizaron cinco pruebas de clasificación de los valores de altitud, es decir, 5, 7, 10, 12 y 14 rangos; con base en esto y bajo un criterio geomorfológico se seleccionó la agrupación en 12 clases, ya que proporciona mayor nivel de detalle y diferenciación de los rasgos topográficos, en especial en zonas de llanura, donde las diferencias de altitud son sutiles.

Otro procesamiento permitió obtener el mapa de pendientes, como variable sobre la inclinación del terreno. Con ello es posible identificar y analizar los procesos modeladores del relieve, las morfologías resultantes y su relación con la constitución geológica, en términos de las características litológicas y estructurales.

Desde un punto de vista analógico, el cálculo de esta variable consiste en transformar las distancias entre curvas de nivel en valores de pendiente; lo anterior resulta de dividir la diferencia altitudinal de dos puntos entre la distancia horizontal, obteniendo como resultado la tangente del ángulo, misma que se puede transformar a grados al calcular su inversa o a porcentaje al multiplicarla por cien (Lugo, 2015). La expresión matemática del cálculo de la pendiente es la siguiente:

$$\tan\alpha = dy/dx$$

Donde:

$\tan\alpha$ = inclinación del terreno

dy = Diferencia en la vertical

dx = Distancia horizontal

Dicho cálculo se realizó en ambiente de Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante la manipulación del (MDT), al cual se le aplicó el algoritmo denominado *Slope*, cuyo funcionamiento es el siguiente: para cada celda de procesamiento, la herramienta calcula el máximo cambio en elevación sobre la distancia entre esta y sus ocho vecinas, con ello identifica el descenso cuesta abajo más inclinado desde la celda central.

Al considerar que la zona se caracteriza por un relieve complejo, es decir, se alternan superficies niveladas y elevaciones montañosas (Lugo-Hubp, 1988), se realizaron diversas pruebas de clasificación de los valores de pendiente con la finalidad de diferenciar la morfología del terreno de la forma más detallada posible, en especial en las zonas de llanura. Los intervalos seleccionados fueron 0°-4°, 4.1°-6°, 6.1°-8°, 8.1°-10°, 10.1°-14°, 14.1°-20°, 20.1°-25°, 25.1°-35° y mayor de 35°.

Por otra parte, la disección causada por agentes exógenos forma parte de los denominados procesos morfogenéticos del relieve (Lugo-Hubp, 1988) por lo cual, en términos de su tipo y magnitud refleja la evolución del mismo; se trata de un proceso que depende de factores como la estructura geológica, relieve, clima, cubierta de suelo y vegetación, entre otros (Lugo, 2015); desde el enfoque estructuro-geomorfológico, el análisis de la densidad de

disección y las características geológicas del territorio es fundamental, ya que esto permite identificar las relaciones existentes entre la resistencia de los materiales, la presencia de estructuras de debilidad, y la distribución espacial y frecuencia de las corrientes fluviales.

Desde el punto de vista metodológico, un mapa de densidad de disección del relieve se obtiene mediante la medición de la longitud total de todos los *talwegs* (km) dividida entre la superficie analizada (km²) (Lugo-Hubp, 1988). En este tenor, la zona se subdividió en dos mapas topográficos a escala 1: 60 000, con equidistancia entre curvas de nivel de 20 m; sobre dicha base se infirieron y trazaron las corrientes fluviales, las cuales además fueron jerarquizadas mediante el método de Strahler (1957). Posteriormente, se procedió a digitalizar las cartas y se manipularon en ambiente de SIG, donde fueron georrefenciadas y vectorizadas para obtener la longitud de cada cauce; cada uno de dichos valores fueron vinculados a celdas de 1 km², de las cuales se obtuvo el centroide geométrico para su interpolación, mediante el método IDW (*Inverse Distance Weighting*). Con ello, se obtuvieron isolíneas y para efectos de una representación continua de la densidad de disección fue aplicado el método de remuestreo *Bilinear Interpolation*, obteniéndose un mapa que agrupa los valores de densidad de disección en las siguientes clases (km/km²): < 1, 1.1-2, 2.1-3, 3.1-4, 4.1-6 y 6.1-8.0.

Para la interpretación del mapa los valores de densidad de disección se agruparon de la siguiente forma: valores altos (4.1-8.0 km/km²), valores medios (2.1-4.0 km/km²) y valores bajos (<1-2.0km/km²).

El siguiente indicador morfométrico calculado fue la energía del relieve, parámetro que muestra la diferencia máxima de altura en un determinado espacio; algunos conceptos equivalentes son los de disección vertical o profundidad de disección (Hernández *et al.*, 2017). En sentido formal, hace referencia a la amplitud de las variaciones altimétricas en metros por unidad de área, entre las cimas y el fondo diseccionado (Spiridonov, 1974, 1982, en Hernández *et al.*, 2017).

De acuerdo con Lugo-Hubp (1988), la energía del relieve expresa la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena, en este sentido, los valores altos de este

parámetro se pueden interpretar como mayor actividad tectónica y viceversa. Con base en lo anterior, en la actualidad el uso de los métodos morfométricos se ha extendido a diversas aplicaciones entre las que destacan, el estudio de deformaciones tectónicas y la búsqueda de desplazamientos activos en estructuras, como fallas (Hernández *et al.*, 2017).

El método tradicional para la elaboración de un mapa de energía del relieve consiste en la división de la zona en celdas geométricas del mismo tamaño, en cada una de ellas se resta la altitud mínima de la máxima para obtener la diferencia en metros y dicho valor es asignado a la celda, el cual posteriormente es interpolado. Bajo este principio, se generó una matriz de celdas de 1 km² y en cada una fue calculada la diferencia altimétrica mediante curvas de nivel con equidistancia de 20 m. El valor resultante fue asignado a la celda correspondiente, de la cual se obtuvo el centro de gravedad, con el fin de realizar operaciones de interpolación; después de probar distintos algoritmos de predicción de valores (*Krigging*, *Nearest Neighbour* e *IDW*), se optó por el método *Inverse Distance Weighting* (*IDW*) y los datos resultantes se agruparon en siete intervalos (0-20 m, 20.1-60 m, 60.1-100 m, 100.1-200 m, 200.1-300 m, 300.1-400 m, 400.1-500 m y 500.1-600 m), ya que de esta forma se reflejan, con mayor detalle las diferencias altitudinales.

Análisis morfotectónico del relieve

Para este análisis, se aplicaron los métodos siguientes: a) interpretación hipsométrica, a escala 1: 50 000; b) análisis de los morfoelementos lineales del relieve, con el fin de complementar los sistemas de fallas, compilados de otros autores, como Gastil *et al.* (1975), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (1976), Cruz (2002), *United States Geological Survey* (2006) y Moro Ingeniería, S.C. (2009); c) evaluación morfométrica del relieve, a escala 1:50 000; d) análisis del espectro de niveles geomorfológicos para establecer las categorías y subcategorías del relieve; e) interpretación de los patrones orográficos regionales (orientaciones, diseños, correlaciones vecinas); f) comparación de los datos geomorfológicos con la estructura geológica, y g) investigaciones de campo por transectos longitudinales y transversales a la expresión estructural y geomorfológica del relieve.

Para la delimitación del diseño morfotectónico, se detalló y jerarquizó la red hidrográfica; se interpretaron las evidencias geomorfológicas de elementos lineales en el relieve, complementando la información geólogo-sismológica de otros autores, según el método de Orlova (1975); y se delimitaron los bloques morfotectónicos bajo tres principios: consideración de las estructuras de mayor extensión e identificación de superficies máximas de planación con respecto a unidades vecinas. Este análisis delimitó 45 unidades morfotectónicas con desarrollo hipsométrico entre los 50 y los 1 220 m. Además, una vez delimitadas las unidades morfotectónicas, se elaboraron rosas direccionales de morfolineamientos para identificar los patrones disyuntivos preferenciales. Para ello, se calcularon el azimut y la longitud de las estructuras.

3. Resultados

3.1. Diferenciación geomorfométrica

Mediante el mapa hipsométrico, se identificaron y delimitaron las principales categorías del relieve, mismas que se agruparon en los escalones hipsométricos siguientes: V. Montañas medias (> 1300 m), IV. Montañas bajas (800 a < 1300 m), III. Premontañas (400 a < 800 m), II. Lomeríos (200 a < 400 m) y I. Llanuras (< 200 m); esta última se subdividió en I.1 Llanura costera (< 40 m), I.2 Terrazas aluviales (40 a < 200 m) y I.3 Valles aluviales (0 a < 100 m), así mismo, se derivó la subcategoría I.4 Valles aluviales intermontanos (100 a < 500 m), la cual tiene la particularidad de ubicarse en otro nivel hipsométrico, aunque desde el punto de vista morfológico pertenece a la categoría de llanuras.

El perfil topográfico (Figura 3) permite observar la distribución espacial de las categorías del relieve a lo largo de una sección dispuesta en sentido NE-SW, así como las diferencias morfológicas que caracterizan a cada una de éstas. En este sentido, se observa que dichas características están relacionadas directamente con el nivel altitudinal y se puede inferir que las rupturas de pendiente que marcan el límite entre categorías podrían estar asociadas a la presencia de estructuras como fallas y cambios en las características litológicas, lo cual se analiza más adelante.

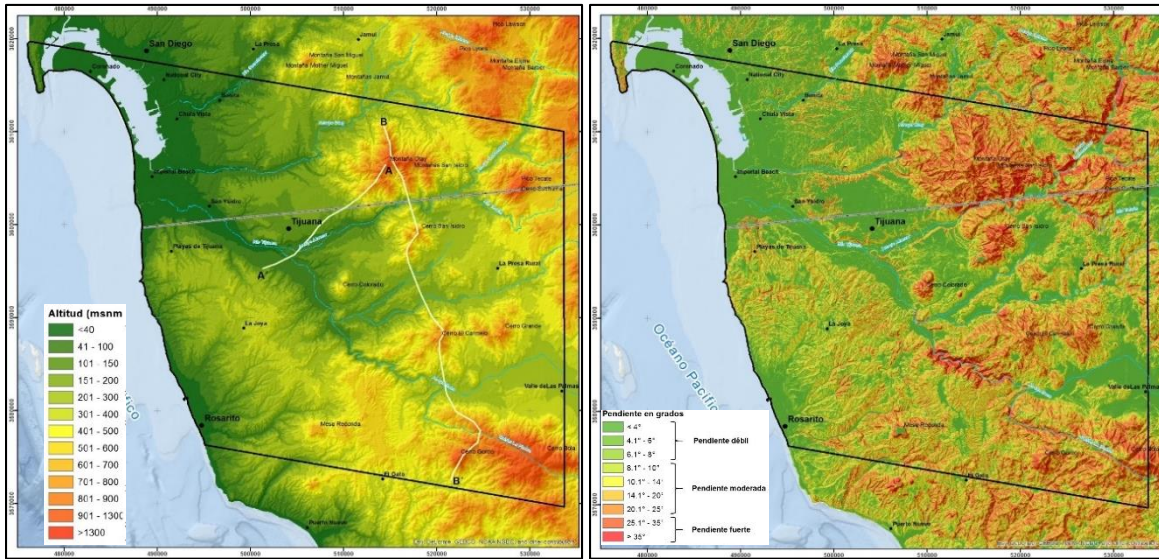


Figura 2. Hipsometría (izquierda) e inclinación del terreno (derecha).

Fuente: elaboración propia.

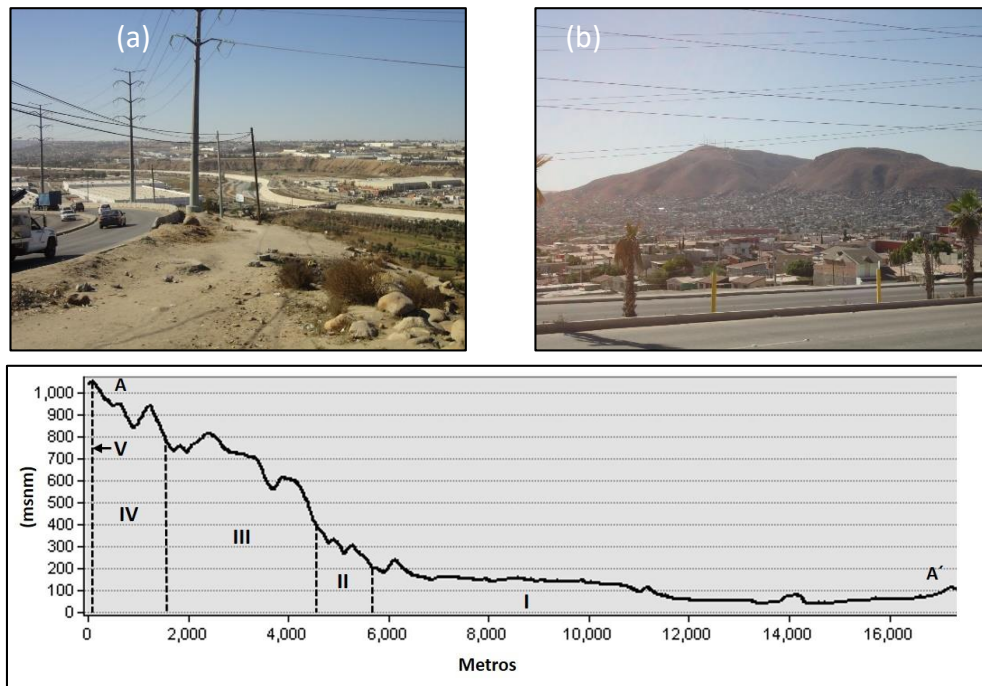


Figura 3. Perfil topográfico en dirección NE-SW, donde se muestra la delimitación de las categorías del relieve: I. Llanuras; II. Lomeríos; III. Premontañas; IV. Montañas bajas y V. Montañas medias.

Las fotografías ilustran las categorías I (a) y II (b), y corresponden al margen izquierdo del arroyo Alamar y al flanco este del Cerro Colorado, respectivamente.

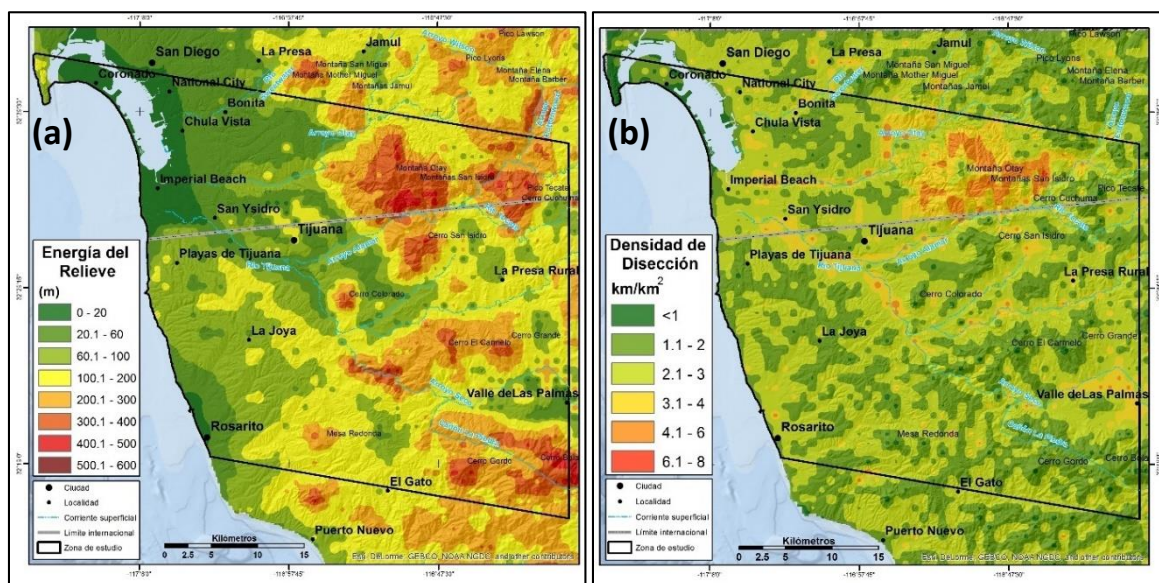
Fuente: cartografía de elaboración propia y trabajo de campo.

En cuanto a la inclinación del terreno, se definieron tres grupos, el primero, denominado débiles, agrupa las pendientes con inclinación menor a 4° , de 4.1° - 6° y 6.1° - 8° ; morfológicamente el primer intervalo se caracteriza por terrenos bajos subhorizontales poco inclinados y con pendiente constante y continua, que corresponden a las llanuras costeras donde se asientan Puerto Nuevo, Rosarito, Playas de Tijuana, Imperial Beach y Coronado; valles aluviales del arroyo Alamar y el río Tijuana, así como terrenos altos con las mismas características como la llanura plana alta de la zona de Otay y los valles intermontanos correspondientes a la sección de mayor altitud de las principales corrientes fluviales; en estos últimos destaca el asentamiento de la localidad Valle de Las Palmas, ubicada al sureste de la zona. El segundo y tercer intervalo se presenta en las cimas alargadas de los lomeríos de origen sedimentario, que se ubican al centro y oeste, así como en aquellos que circundan las bases de las premontañas de origen ígneo del sector oriental.

Las pendientes moderadas, con inclinación de 8.1° - 25° conforman el segundo grupo; su distribución y arreglo espacial corresponde a la trayectoria de corrientes fluviales de primero, segundo y tercer orden que diseccionan los substratos de areniscas y conglomerados, que conforman a los lomeríos que se ubican al centro y oeste de la zona, así como a los substratos de origen ígneo del sector occidental. En este grupo destacan también los cañones con inclinación de 10.1° - 25° dispuestos de forma transversal al borde de la llanura plana alta, mismos que su vez marcan el límite de la llanura aluvial del arroyo Alamar y el río Tijuana, en México, así como el arroyo Otay y el río *Sweetwater*, en territorio estadounidense.

El tercer grupo está definido por las mayores pendientes (mayor a 35°) y se presentan en los interfluvios de los valles intermontanos diseccionados por el Arroyo Seco y el Cañón la Piedra, al sureste, y por el Arroyo Cottonwood, al noreste de la zona; también se presentan en las montañas bajas de origen ígneo, de manera particular en los flancos S y SW de la Montaña Otay y de las Montañas San Isidro, N y NE del Cerro San Isidro, NW del Cerro El Carmelo, SE del Cerro Gordo, y N y S del Cerro Bola. Las laderas de las premontañas Cerro Colorado y Mesa Redonda también alcanzan estas inclinaciones sobre substratos andesíticos y basálticos respectivamente. Por su parte, las pendientes con valores entre

Por su parte, la energía del relieve refleja la diferencia altimétrica máxima de la zona; los cálculos quedaron agrupados en siete intervalos: 0-20 m, 20.1-60 m, 60.1-100 m, 200.1-300 m, 300.1-400 m, 400.1-500 m y 500.1-600 m) (Figura 4). Los valores máximos, con valores entre 300 y 500 m, se presentan en las zonas montañosas septentrionales (montañas de Otay, Pico Tecate, Cuchumá y San Isidro); en la porción central (cerros Colorado, El Carmelo y Grande); y en la porción meridional (cerros Mesa Redonda, Gordo y La Bola), este último alcanza valores entre 500 y 600 m.



Fuente: elaboración propia.

92

En cuanto a la densidad de disección, los valores altos (4.1-8.0 km/km²), se concentran hacia las elevaciones del noreste, en lo que corresponde a la región de montañas bajas, donde sobresalen la de Otay y la de San Isidro; en dicha zona, el substrato está conformado por rocas ígneas extrusivas de composición ácida, las cuales debido a sus características mineralógicas, no constituyen propiamente un material susceptible de ser diseccionado, sin embargo, la concentración de estructuras disyuntivas como fallas y fracturas contribuye a densificar la red de drenaje.

Los valores medios (2.1-4.0 km/km²) se encuentran enmarcados en una franja que, en términos de altitud, corresponden a las regiones de llanura plana alta, lomeríos y premontañas; se presentan en localidades como Bonita, Chula Vista y San Ysidro para el caso de Estados Unidos, así como El Gato, La Presa Rural y Valle de Las Palmas, en México. En dichos emplazamientos predominan los substratos de areniscas, conglomerados, asociaciones de ambas, así como de limolitas y areniscas, materiales que favorecen la ramificación de las corrientes fluviales; lo anterior se ve reforzado por la presencia de estructuras de debilidad como fallas y fracturas, además de las zonas de contacto litológico, mismas que en conjunto controlan la configuración espacial de la red de drenaje. Así mismo, estos valores se presentan en algunas planicies bajas, como los valles aluviales de los ríos Tijuana, Alamar y Otay, donde se trata de un relieve conformado por substratos terrígenos, principalmente depósitos aluviales recientes.

Los valores de densidad de disección bajos (< 2 km/km²) predominan en las regiones de llanuras bajas, como las llanuras costeras, así mismo, se encuentran dispersos por la zona investigada, principalmente en las cimas de elevaciones como lomeríos, y montañas bajas y medias.

3.2 Diferenciación morfotectónica

En total, se delimitaron 297 morfoalineamientos, a los cuales se sumaron 684 fallas y fracturas delimitadas bajo criterios geológicos para obtener un total de 981 estructuras disyuntivas. Bajo el principio que sostiene que la corteza terrestre está dividida en bloques de diversos tamaños (Lugo, 1988), se delimitaron 45 unidades morfotectónicas cuyas

altitudes varían de 50 a 1,220 msnm, las cuales fueron representadas en un mapa conjuntamente con las formas disyuntivas y los datos epicentrales sobre la sismicidad regional.

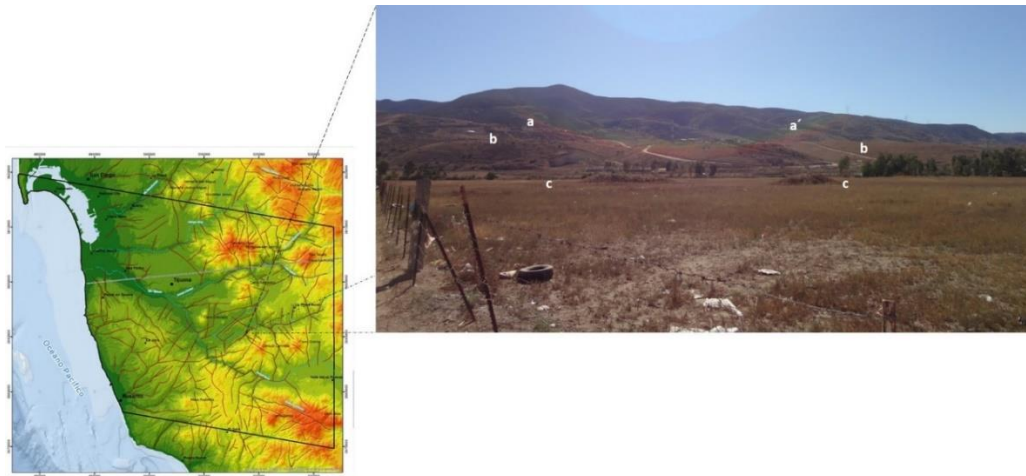


Figura 5. Rasgos morfoestructurales de un morfoalineamiento ubicado al oeste de la ciudad de Tijuana, en la Delegación La Presa: a) Escarpe tectónico; a') Facetas trapezoidales en el escarpe; b) Lomeríos tectónico-erosivos; c) Llanuras erosivas.

Fuente: fotografías adquiridas durante trabajo de campo.



Figura 6. Morfoalineamiento en el Cañón de García, ubicado al sur de la Presa Abelardo L. Rodríguez.

Fuente: fotografías adquiridas durante trabajo de campo.

El análisis de fallas por evidencias geológicas, y por evidencias geomorfológicas y de morfolineamientos revela tres patrones básicos: N-S, NE-SW y NW-SE. El patrón N-S predomina en los bloques del sector oeste y noroeste, a excepción de los bloques Río Tijuana (No. 10) y Rosarito (No. 21), donde predominan las direcciones NW-SE y NE-SW respectivamente (Figura 7). Este patrón refleja la dirección de los principales sistemas de fallas de la región, como La Nación y *Silver Strand*, en California, así como las fallas Los Buenos y Mira al Mar, para el caso de Tijuana. El patrón NE-SW se delinea en los bloques centrales, así como en los del suroeste (bloque Rosarito, No. 21), donde sobresalen las fallas Agua Tibia y García. Este patrón de fallas difiere de las direcciones preferenciales del contexto regional (NW y NS), lo que sugiere que las disyunciones NE-SW podrían conformar un sistema conjugado.

En el sector oriental, las orientaciones del fracturamiento son múltiples y no permiten definir claramente un patrón dominante, aunque predomina la dirección NW-SE, bloques morfotectónicos San Miguel 3 (No. 35) y San Miguel 1 (No. 44), donde las direcciones preferenciales concuerdan con el sistema de fallas San Miguel-Vallecitos, uno de los más activos y cuya orientación guarda correspondencia con los principales sistemas rotacionales entre la falla San Andrés y las fallas marinas de *Coronado Bank*, cuyas velocidades son diferentes. El trazado de perfiles longitudinales en el sector norte, este y sur, son representativos y permitió observar los contrastes altitudinales y morfológicos, que caracterizan a las unidades morfotectónicas que conforman el relieve de la región.

La Tabla 1 muestra las principales características morfométricas y direcciones preferenciales en cada bloque morfotectónico. El análisis muestra que el patrón de fracturamiento más frecuente es NE-SW, presente en 18 unidades morfotectónicas (40 %); el patrón NW-SE ocupa 16 bloques (36 %); el de dirección N-S, se presenta solo en 4 unidades (9 %), mientras que en el 15 % restante no se detectaron fracturas, según el método empleado. Los valores máximos de las variables geomorfométricas, en especial aquellas que están más relacionadas con la actividad neotectónica, como la densidad de disección, energía del relieve y densidad de morfolineamientos, se presentan en las

unidades morfotectónicas, donde las direcciones preferenciales de las formas disyuntivas tienen un patrón NE-SW.

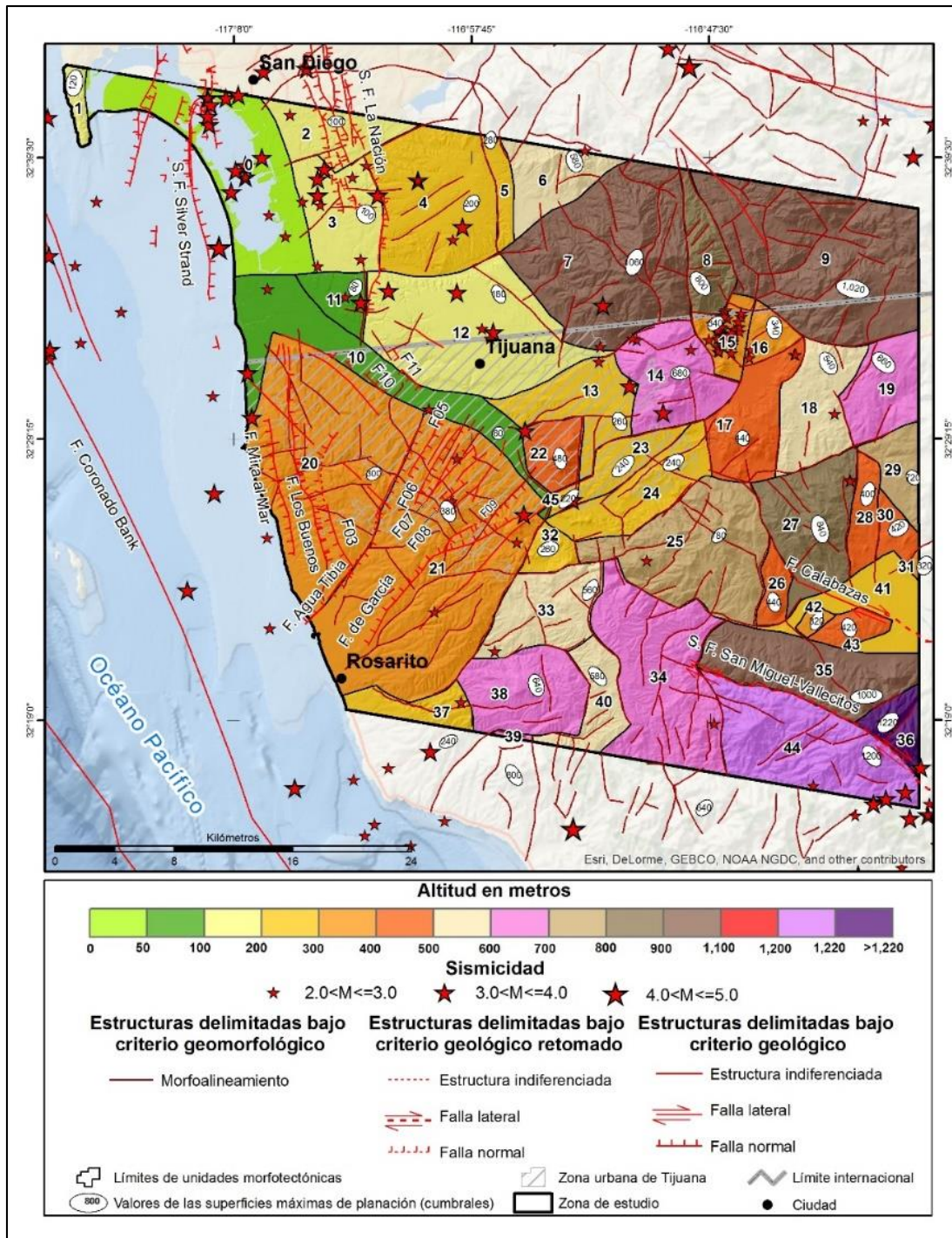


Figura 7. Bloques morfotectónicos, morfolineamientos y sismotectónica regional.

Fuente: elaboración propia.

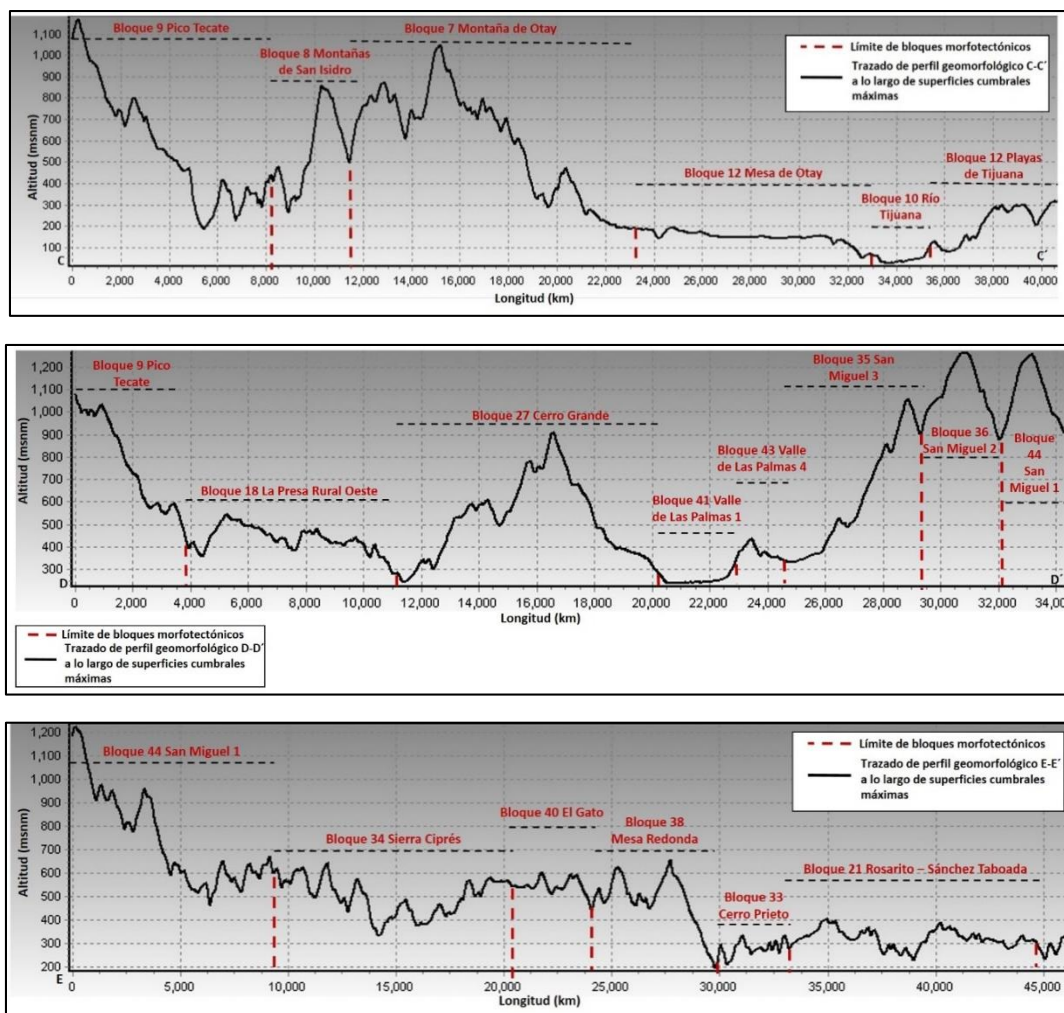


Figura 8. Perfiles longitudinales correspondientes a los sectores norte, este y sur de la zona de estudio; el trazado se realizó a lo largo de las superficies máximas de planación (cumbrales).

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Principales características geomorfométricas, y direcciones de fallas y lineamientos en los bloques morfotectónicos.

No	Nombre del bloque	Hp			Pe			D.D.			E.R.			D.M.			D.P.
		Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Mi	Ma	Me	Min	Max	Me	
0	<i>San Diego Bay</i>	0	33	4	0	32	0.9	0	4	1.2	0	89	5	0	4	0.3	S/D
1	<i>Point Loma</i>	0	131	70	0	64	13	0	2	0.4	69	120	94	0	0	0	NW-SE
2	<i>National City</i>	0	138	46	0	42	5	0.5	4	2	13	79	34	0	3	1	NW-SE
3	Chula Vista Oeste	0	124	48	0	44	4	0.7	5	2	16	79	33	0	2	0.6	NW-SE
4	Chula Vista Este	19	300	133	0	51	7	0.7	5	2	20	166	54	0	2	0.4	NW-SE
5	<i>Montaña Mother Miguel</i>	72	294	175	0	33	8	1	6	3	20	113	52	0	1	0.6	S/D
6	<i>Montañas Jamul</i>	143	595	247	0	51	13	0.3	8	3	21	312	146	0	2	0.4	NE-SW
7	Montaña Otay	71	1087	448	0	61	21	0.4	4	2	57	479	262	0	2	0.5	NE-SW
8	Montañas San Isidro	155	969	494	0	53	18	0.6	3	2	86	459	280	0	3	1	NW-SE
9	Pico Tecate	173	1184	516	0	68	18	0.3	5	2	29	490	232	0	3	0.7	NE-SW
10	Río Tijuana	0	169	28	0	45	2	0.3	5	3	0	146	30	0	2	0.4	NW-SE
11	<i>Imperial Beach</i>	4	93	42	0	39	4	1	5	3	12	96	35	0	2	0.3	N-S
12	Mesa de Otay	15	217	128	0	40	5	0.4	5	2	0	175	68	0	2	0.2	NE-SW
13	La Presa Norte	42	286	157	0	38	6	0.5	4	2	21	214	70	0	2	0.4	NE-SW
14	Cerro San Isidro	78	839	356	0	53	18	0.4	4	2	54	447	249	0	2	0.7	NW-SE
15	Cerro El Pilón	137	472	228	0	50	12	0.5	5	3	48	293	162	0	2	0.7	NW-SE
16	El Remolino	173	387	255	0	43	9	0.5	3	2	48	234	119	0	2	0.7	NE-SW
17	Cerro El Macho	169	559	284	0	40	9	0.9	4	2	21	258	136	0	3	0.8	NW-SE
18	La Presa Rural Oeste	205	640	371	0	44	11	0.3	4	2	42	348	128	0	2	0.6	NE-SW
19	La Presa Rural Este	268	743	500	0	37	12	0.7	4	2	47	259	142	0	2	0.3	NE-SW
20	Playas de Tijuana	0	356	160	0	55	9	0.2	4	2	0.4	196	79	0	4	1	N-S
21	Rosarito-Sánchez Taboada	0	413	199	0	44	10	0.1	4	2	0.2	178	84	0	5	1	NE-SW
22	Cerro Colorado	55	551	190	0	46	12	0.6	5	2	30	392	173	0	2	0.8	N-S
23	Cerro Las Abejas 1	105	343	174	0	40	6	0.4	4	2	22	196	74	0	2	1	NE-SW
24	La Presa Sur	93	289	169	0	43	8	0.3	4	3	40	259	98	0	6	1	NE-SW
25	Cerro El Carmelo	98	886	413	0	57	18	0.2	5	2	81	429	233	0	7	2	NE-SW
26	Valle de Las Palmas 2	217	473	313	0	35	10	0.9	4	2	48	222	143	0	3	0.8	NW-SE
27	Cerro Grande	196	908	436	0	40	15	0.2	4	2	62	354	206	0	5	2	NW-SE
28	Loma El Pilón	248	458	346	0	33	7	1	4	2	40	175	102	0	3	0.7	N-S
29	Cerro El Dieciséis	267	761	473	0	38	11	0.8	4	2	48	255	165	0	2	0.1	S/D
30	<i>Wilberth</i>	257	483	354	0	31	7	0.7	4	2	45	218	112	0	1	0.3	S/D
31	Ramos	277	384	302	0	28	7	1	3	2	53	136	94	0	0.2	0.1	S/D

32	Cerro Redondo	99	496	222	0	49	13	1	3	2	68	378	178	0	3	1	NE-SW
33	Cerro Prieto	98	589	354	0	65	13	0.2	4	2	61	370	140	0	4	1	NE-SW
34	Sierra Ciprés	132	692	457	0	51	15	0.4	4	2	32	378	154	0	6	1	NE-SW
35	San Miguel 3	205	1132	552	0	43	17	0.5	5	2	76	431	237	0	4	1	NW-SE
36	San Miguel 2	372	1263	900	0	42	23	0.5	3	2	191	500	351	0	3	1	NE-SW
37	Bahía El Descanso	0	328	157	0	40	11	0.3	3	3	35	156	92	0	1	0.2	NW-SE
38	Mesa Redonda	102	697	366	0	45	16	0.3	5	2	89	376	175	0	2	0.6	NE-SW
39	Cerro El Coronel	111	294	173	0	45	12	2	3	3	126	181	164	0	1	0.9	NW-SE
40	El Gato	189	662	483	0	41	13	0.4	5	2	22	203	122	0	2	1	NE-SW
41	Valle de Las Palmas 1	217	347	266	0	27	2	2	5	3	0.3	270	97	0	1	0.3	NW-SE
42	Valle de Las Palmas 3	233	353	278	0	36	7	0.8	3	2	42	107	76	0	1	0.2	S/D
43	Valle de Las Palmas 4	258	440	333	0	30	9	1	4	2	41	156	84	0	1	0.1	S/D
44	San Miguel 1	303	1283	740	0	47	19	0.3	4	2	108	469	261	0	5	1	NW-SE
45	Cerro Las Abejas 2	86	274	162	0	46	13	1	3	2	103	177	132	1	2	1	S/D

Donde:

H_p: Hipsometría (msnm); **P_e**: Pendiente (grados); **D.D.**: Densidad de Disección (km/km²); **E.R.**: Energía del Relieve (m); **D.M.**: Densidad de lineamientos (km/km²); **D.P.**: Dirección Preferencial de las Formas Disyuntivas; **Mi**: Valor Mínimo; **Ma**: Valor Máximo; **Me**: Valor de la Media; N-S: Dirección Norte-Sur; NW-SE: Dirección Noroeste-Sureste; NE-SW: Dirección Noreste-Suroeste; S/D: Sin datos de las formas disyuntivas.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Sismotectónica regional

De acuerdo con los registros del *Southern California Earthquake Data Center* y de la Red Sísmica del Noroeste de México del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CISESE), la sismicidad regional analizada varía desde $M=2.0$ hasta $M=5.0$. Los sismos con $M=3.0$ son los más frecuentes y se encuentran distribuidos de manera dispersa. Para el análisis y la representación cartográfica, la lista de epicentros fue clasificada en tres intervalos: $2.0 < M \leq 3.0$; $3.1 < M \leq 4.0$ y $4.1 < M \leq 5.0$. Como se puede observar en la Figura 7, los epicentros entre $2.0 < M \leq 3.0$, se distribuyen aisladamente y se ubican en las acuatorias y en los bloques morfotectónicos del extremo noroccidental. Hasta 2016, se cuenta con un registro de 78 eventos con estas magnitudes. La única concentración de estos sismos se presenta al noroeste del bloque morfotectónico Cerro El Pilón (No. 15), con 37 registros de $M=2.0$, con magnitud máxima de $M=2.5$ y promedio de $M=2.1$.

Los sismos de magnitud $3.1 < M \leq 4.0$ reflejan la actividad reciente de los sistemas de fallas, fundamentalmente en la región noroccidental. En el bloque Chula Vista Oeste (No. 3), limitado por el sistema de fallas La Nación, se tiene registro de sismos entre los años de 1954 y 1973; mientras en el sistema *Silver Strand*, se han registrado siete eventos entre los años 1964 a 2007.

En la ciudad de Tijuana, se cuenta con 12 registros en los bloques Cerro San Isidro (No. 14), La Presa Norte (No. 13), Cerro Colorado (No. 22), Cerro Las Abejas (No. 45), Río Tijuana (No. 10), Montaña Otay (No. 7), Mesa de Otay (No. 12), Imperial Beach (No. 11) y Rosarito-Sánchez Taboada (21); en este último, sobre la falla de García; todos con magnitud entre 3.1 y 4.0, durante el período de 1988 a 2005. Al sureste, también se registran epicentros de eventos similares en el sistema San Miguel-Vallecitos (Figura 5). Los sismos de $4.1 < M \leq 5.0$ son menos frecuentes y hasta el año 2016 no se cuenta con registros dentro de la región, aunque en la periferia ocurrieron tres eventos $M=4.2$, ocurridos entre 1978 y 2005. El más peligroso para Tijuana ocurrió en las proximidades del sistema *Silver Strand*.

4. Discusión

Con respecto de las variables morfométricas, para el caso de la hipsometría, el valor máximo se presenta en el Bloque San Miguel 1, donde se alcanza una altitud de 1,283 msnm, mientras que la media más alta se presenta en el Bloque San Miguel 2, con 900 msnm. Por su parte, el valor máximo de pendiente se encuentra en el Bloque Pico Tecate, donde el terreno alcanza inclinaciones de hasta 69°, mientras que el valor promedio más alto corresponde al Bloque San Miguel 2 con 23°.

La densidad de disección más alta se presenta en el Bloque Montañas *Jamul*, donde se alcanzan valores de 8 km/km², mientras que el valor promedio más alto es de 3 km/km² y se encuentra en diversos bloques (No. 5, 6, 10, 11, 15, 24, 37, 39 y 41). La energía del relieve alcanza un valor máximo de 500 m en el Bloque San Miguel 2, el cual también presenta la media más alta con 351 m. En lo que respecta a la densidad de morfolineamientos, el valor máximo está en el Bloque Cerro El Carmelo con 7 km/km², así como también la media de mayor valor, que es de 2 km/km², al igual que en el Bloque Cerro Grande.

Este análisis demuestra que los valores máximos de las variables morfométricas, relacionadas con actividad neotectónica, como la densidad de disección, energía del relieve y densidad de morfolineamientos, se presentan en bloques morfotectónicos, donde las direcciones preferenciales de las formas disyuntivas tienen un patrón NE-SW. Considerando que esto difiere del patrón de fracturamiento dominante en la región norte de Baja California, el cual es NW-SE, dicha situación sugiere que el relieve y sus características morfotectónicas son controladas por los sistemas de fallas locales o secundarios, que a su vez son la expresión de los esfuerzos regionales motivados por el movimiento de los grandes bloques de carácter planetario.

5. Conclusiones

La investigación sobre el marco geólogo-tectónico del noroeste de Baja California para comprender la dinámica y las características morfoestructurales imperantes en la región y que tienen expresiones particulares en sus zonas de influencia, como en la ciudad de Tijuana

y su periferia, reveló que su relieve está controlado por los esfuerzos generados en los sistemas locales de fallas.

Un aporte se expresa en la información relativa a las fallas que afectan a la ciudad de Tijuana, caracterizadas en su localización, sus tasas de desplazamiento y su potencial sísmico, por citar algunos parámetros. La aplicación de métodos geomorfológicos para la identificación y representación cartográfica de formas disyuntivas, no reportadas anteriormente en la literatura, logró identificar alrededor de 300 morfolineamientos, como base para los análisis morfotectónico y morfoestructural, con la delimitación de 45 bloques morfotectónicos, en los cuales predominan patrones de fracturamiento NE-SW y NW-SE.

El análisis morfométrico del relieve con la finalidad de conocer sus principales características cuantitativas demostró que el relieve moderno se desarrolla en un rango altitudinal de 0 a 1,300 msnm; con pendientes que superan los 35° de inclinación en las zonas montañosas; con valores de energía del relieve que alcanzan el orden de 600 m y de la densidad de disección, con valores entre 0 y 8.8 km/km², mientras la densidad de morfolineamientos presenta hasta 7.5 km/km². Dichas variables también representan una fuente de información útil para los análisis de las actividades neo y sismotectónica.

La identificación de sismos en los límites de los bloques morfotectónicos y cercanos a formas disyuntivas, refuerzan la hipótesis sobre la movilidad de diversas zonas de la ciudad de Tijuana, como quedó demostrado en la Zona Río, que desde el punto de vista morfoestructural corresponde a una llanura de tipo graben, situada en la articulación entre bloques, indicando que su génesis está asociada a la dinámica de los sistemas locales de fallas y morfolineamientos, lo que determina una condición de peligro sísmico para este sector urbano y de deformaciones del terreno que impactan a la infraestructura civil y productiva.

Otros trabajos muestran que los niveles de riesgo sísmico en la ciudad de Tijuana pueden ser altos, debido al contexto sismotectónico de su localización geográfica, pero la cartografía y el análisis morfotectónico representan una aportación novedosa y útil desde una perspectiva espacial, que puede coadyuvar al análisis del peligro sísmico. A su vez,

muestra una diferenciación de la expresión de la geodinámica territorial con la integración de distintas variables, que contribuyen a las tareas de planeación urbana y territorial.

Desde un ángulo aplicado, el mapa morfotectónico podría orientar estudios más detallados de la amenaza sísmica en los sitios con los mayores niveles de actividad geodinámica. En este sentido, orienta el análisis espacial de corte geofísico y geotécnico para caracterizar la respuesta sísmica del terreno, o emprender estudios de corte geólogo-estructural para caracterizar las formas disyuntivas identificadas y que representan una variable de peso en la conformación de los escenarios de peligro y de riesgo sísmico. Así mismo, las investigaciones geodésicas representan otra posibilidad de uso de la cartografía morfotectónica presentada, ya que permite emplazar estaciones para el monitoreo *in situ*, tanto de la deformación del terreno como el monitoreo de actividad microsísmica, posible de obtener con acelerómetros de alta sensibilidad.

Agradecimientos.

Se agradece a Carlos Isidro Huerta López, quien, estando adscrito al Instituto Tecnológico de Tijuana durante el desarrollo de la investigación, brindó su apoyo y orientación para realizar trabajo de campo en la ciudad de Tijuana y su área circundante. Asimismo, se agradece al Posgrado en Geografía de la UNAM, el apoyo presupuestario para los levantamientos de campo.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

6. Referencias

- Acosta, J., Arellano, G. y Ruíz, E. (2009). *Microzonación sísmica en la zona urbana de Tijuana, B.C.* (Informe Final). Mexicali: Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California.
- Berger, V. y Schug, L. (1991). Probabilistic evaluation of seismic hazard in the San Diego-Tijuana Metropolitan region. En P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds.) *Enviromentalperils, San Diego Region*. California: San Diego Association of Geologist, pp. 89-100.

Cruz, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS Unión Geofísica Mexicana*, A. C. Recuperado el 15 de abril de 2015 de: <http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos02-1/Cruz-Castillo02-1.pdf>.

Data México (2020). Acerca de Tijuana. Secretaría de Economía, Gobierno de México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/tijuana-99203>

Delgado-Argote, L. A., Pérez-Flores, M. A., Herrera-Barrientos, F., Sarychikhina, O., Contreras-López, M., Ochoa-Tinajero, L., Avilés-Esquivel, T. A. (2017). Interpretación geológica y geoeléctrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleodrenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California. *GEOS*, 37(2):1-17.

Garatachia, J. C, Baró, J. E. y Huerta, C. (2016). Aproximación a la vulnerabilidad estructural y socioeconómica en el marco de un estudio de riesgo sísmico en la zona urbana de Tijuana, Baja California. En M. V. Santana Juárez, G., Hoyos Castillo, F. Zepeda Mondragón, J. R. Calderón Maya, G. Santana Castañeda (coords.) *Vulnerabilidad Territorial ante la Expansión Urbana*. Toluca: Red Internacional de Territorios, Sustentabilidad y Gobernanza en México y Polonia (RETESYG), pp. 125-144.

Gastil, R., Phillips, R. y Allison, E. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *The Geological Society of America*, Memoir 140, 170 p.

Hernández-Santana, J. R., Pérez, J., Rosete, F., Villalobos, M., Méndez, A. P. y Navarro, S. (2017). Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de curvas de nivel y energía del relieve. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía*, 94, 1-15.

Ibarra, G. (2004). Microzonación de períodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California (Tesis de Maestría). Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México.

Ibarra, G., Oliver, O., F. y Acosta, C., J., 2009. Microzonación de períodos dominantes del suelo de la ciudad de Tijuana, Baja California. *Epistemos. Ciencia, Tecnología y Salud*. Recuperado el 15 de abril de 2015 de: <http://www.epistemos.uson.mx/revistas/pdf/numero7.pdf>.

INEGI (1976). Cartas geológicas, a escala 1:50 000, hojas I11C69 (Tijuana), I11D61 (Valle Redondo), I11D62 (Tecate), I11C79 (Rosarito), I11D71 (San Luis), e I11D72 (Valle de Las Palmas). México, D. F.

INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda, CDMX.

Kennedy, M., P. y Tan, S., S. 2008. Geologic map of the San Diego 30' x 60' quadrangle, California. California Geological Survey, United States Geological Survey, California, 21 pp.

Lindvall, S.C., Rockwell, T. y Lindvall, C. E. (1989). *The seismic hazard of San Diego revised: New evidence for magnitude 6+ Holocene earthquakes on the Rose Canyon fault zone*. Workshop on The Seismic Risk in the San Diego Region: Special Focus on the Rose Canyon Fault System San Diego. University of California. Recuperado el 10 de abril de 2015 de: <https://books.google.com.mx/books>.

Lugo-Hubp, J. I. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada: Métodos cartográficos*. México, D. F., Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, 128 pp.

Lugo, H., J. 2015. Diccionario Geomorfológico. 2a ed. Serie Textos Universitarios. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Michaud, F., Calmus, T., Sosson, M., Roger, J., Burgois, J., Chabert, A., Bigot-Cornier, F., Bandy, B., Montera-Gutierrez, C. y Dymont, J. (2005). La zona de falla Tosco-Abreojo: un sistema lateral derecho activo entre la placa Pacífico y la península de Baja California. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo de Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México. LVII(1), 53-63.

Moro Ingenieria, S.C. (2009). Actualización del estudio hidrogeológico del Acuífero Tijuana, B.C. Comisión Nacional del Agua, México, D. F.

Orlova, A., V. (1975). *La estructura en bloques y el relieve*. Ed. Niedra, Moscú, 232 pp. (en ruso).

Raines, L., Hatch, M., y Haley, C. (1991). Liquefaction potential in the San Diego-Tijuana metropolitan region. En P.L. Abbot y J. W. Elliot (eds.) *Enviromental perils, San Diego Region*. California: San Diego Association of Geologist, pp. 127-136.

Reichle, M. (1991). Earthquake planning scenario for the San Diego-Tijuana area. En P.L. Abbot y J.W. Elliot (eds.) *Enviromentalperils, San Diego Region*. California:San Diego Association of Geologist, pp. 127-136.

Rosquillas, N., A. y Mendoza, G., L. (2002). Proyecto RADIUS caso Tijuana (Reporte Final). Tijuana, H. Ayuntamiento Constitucional de Tijuana y Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. 2ª ed.

Servicio Geológico Mexicano (2003). Carta Geológico-Minera Tijuana I11-11, Baja California, a escala 1:250 000. Secretaría de Economía, México, D. F.

Strahler, A., N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*: Volume 38, Issue 6, pp. 903-920.
<https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Spiridonov, A. I. (1974). *Cartografía geomorfológica*. Moscú: Niedra. 182 pp. (en ruso).

Spiridonov, A. I. (1982). *Metodología general de las investigaciones geomorfológicas y la cartografía geomorfológica*. La Habana: Ed. Universidad de La Habana.

Todd, V. (comp.) (2004). Preliminary Geologic Map of the El Cajon 30' x 60' Quadrangle, Southern California. Version 1.0. California: United States Geological Survey.

United States Geological Survey (2006). Quaternary fault and fold database for the United States. Recuperado el 14 de octubre de 2016 de:
<http://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>.

Winckell, A., Le Page, M., Chávez, G., Vela, R., Castañeda, R. y González, C. (2000). ¿Y si un terremoto de magnitud 6?5 se produjera en la falla La Nación? Aportes para un escenario sísmico en Tijuana. Tijuana: El Colegio de la Frontera Norte e Institut de RecherchePour Le Développement.