

# LA ZONA DE TOLIMÁN EN LA SIERRA GORDA DE QUERÉTARO: UNA VENTANA A LA RAÍZ DE LAS MONTAÑAS DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL

Alberto Vásquez-Serrano<sup>1</sup>, Elizabeth Rangel-Granados<sup>2</sup>, Ángel Francisco Nieto-Samaniego<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Procesos Litoféricos, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México. alberto-vasquez@ciencias.unam.mx

<sup>2</sup>Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510 Coyoacán, Ciudad de México, México. elizrangel@gmail.com

<sup>3</sup>Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla 3001, Campus UNAM., Juriquilla La Mesa, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México. afns@geociencias.unam.mx

## RESUMEN

La Sierra Madre Oriental (SMO) constituye una de las principales cadenas montañosas de México. A lo largo de esta sierra se encuentran rocas plegadas y levantadas. En este trabajo se presenta la zona basal de la SMO en el área de Tolimán Querétaro, como si fuera vista a través de una ventana. Nuestro trabajo tiene que ver con zonas de deformación extrema en la base de las montañas, que son denominadas zonas de despegue. Estas zonas representan la raíz de las montañas. Para este propósito se construyó un video titulado: "La raíz de las montañas: zona de despegue Tolimán", con información geológica actualizada de la Sierra Gorda de Querétaro, localizada en el centro de México. Esta sierra es un laboratorio natural que puede usarse para enseñar a los alumnos del nivel medio, superior y público en general, el origen, desarrollo y geometría final de los sistemas montañosos.

**Palabras clave:** Zona de despegue, raíz de las montañas, Sierra Gorda de Querétaro, deformación.

## ABSTRACT

*The Sierra Madre Oriental (SMO) constitutes one of the main mountain ranges in Mexico. Along this mountain range there are folded and uplifted rocks. In this work, the basal zone of the SMO, in the Tolimán Querétaro area, is presented as it would be seen through a window. Our work present zones of extreme deformation at the base of mountains, which are called detachment zones. These zones represent the root of the mountains. For this purpose, a video was created entitled: "La raíz de las montañas: zona de despegue Tolimán", with updated geological information on the Sierra Gorda de Querétaro,*

*located in central Mexico. This mountain range is a natural laboratory that can be used to teach middle and high school students about the origin, development, and final geometry of mountain systems.*

**Keywords:** Detachment zone, root of the mountain, Sierra Gorda de Querétaro, contractional deformation.

## INTRODUCCIÓN

La manera tradicional de transmitir la información científica es mediante conferencias, carteles, diseño de experimentos y el uso de videos. Estos últimos, representan un gran instrumento de transmisión del conocimiento, debido a su uso en las redes sociales. En este trabajo se presenta el primer capítulo de un proyecto de elaboración de videos cortos sobre temas relacionados con la formación de las montañas. Estos temas son de interés para gran parte de la población que vive en el oriente y sur de México, y para muchos lugares en el mundo. Para mostrar los avances en el conocimiento sobre el origen y formación de las cadenas montañosas, usaremos como ejemplo a la Sierra Gorda de Querétaro (Figura 1). Dichas montañas pertenecen a la parte central de la Sierra Madre Oriental (una cadena montañosa ubicada en la parte oriental de México). Esta sierra ha sido asociada al acortamiento de rocas sedimentarias marinas durante el Cretácico Tardío (Eguiluz et al., 2000), hace aproximadamente 80 millones de años (Cuéllar-Cárdenas et al., 2012; Fitz-Díaz et al., 2018; Vásquez-Serrano et al., 2018). La Sierra Gorda es un laboratorio natural para estudiar y entender la construcción de las montañas mediante la observación directa de la geometría de las rocas. En un primer capítulo se aborda el tema de las zonas de despegue, las cuales son la raíz de las montañas. Las zonas de despegue son sitios de gran deformación

que generalmente no están expuestos en la superficie, pero que en la Sierra Gorda de Querétaro se encuentran aflorando (Vásquez-Serrano *et al.*, 2021). Esto brinda una gran oportunidad para estudiar su geometría, la cantidad de deformación que acomodan en la corteza terrestre y los mecanismos que actúan en su desarrollo (Vásquez-Serrano *et al.*, 2021). En los alrededores del poblado de Tolimán, dentro de la Sierra Gorda de Querétaro, se observan rocas del Cretácico Inferior pertenecientes a una formación geológica llamada San Juan de la Rosa, que representan a la zona de despegue del sistema montañoso de la parte centro oriental de México.

En Geología, se conoce como “formación” al paquete de rocas cuyas características permiten diferenciarlo de otros por medio de observaciones de campo. Durante una etapa de quietud se forman depósitos de sedimentos (fragmentos de roca de distintos tamaños) que después se hacen roca (proceso de litificación) y forman capas horizontales (principio de horizontalidad original en las rocas sedimentarias). Estas capas se pliegan y se rompen cuando ocurre la formación de las montañas. También en Geología, cuando se habla de **rocas** se usa el término “Inferior” o “Superior, por ejemplo, rocas del Cretácico Inferior; pero cuando se habla de **tiempo** se usa “Temprano” o “Tardío”, por ejemplo, se dice estas rocas se formaron en el Cretácico Temprano.

## METODOLOGÍA

El proyecto “Explorando la Sierra Gorda de Querétaro” tiene como objetivo mostrar los avances en el conocimiento de la formación de las cadenas montañosas. Específicamente, aquellas asociadas con el acortamiento de la corteza terrestre y haciendo énfasis en la geometría y deformación en los denominados “cinturones de pliegues y cabalgaduras”. Para alcanzar este objetivo se plantea la elaboración de videos cortos sobre sitios emblemáticos dentro de la Sierra Gorda de Querétaro. Allí se muestran aspectos fundamentales para entender la formación de las montañas. Los videos toman en cuenta la información geológica disponible que se ha adquirido por los científicos en los últimos 30 años, y en especial por parte del grupo de trabajo del Dr. Gustavo Tolson en el Instituto de Geología de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México) y los trabajos publicados por la Dra. Eliza Fitz y la Dra. Berlaine Ortega, entre otros (Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012; Fitz-Díaz *et al.*, 2012, 2018; Ortega-Flores *et al.*, 214; Vásquez-Serrano *et al.*, 2018, 2021). Dicha información está relacionada con la configuración de la geometría, cantidad de deformación, edad y origen de la Sierra Madre Oriental.

Una vez realizada una recopilación extensa de la información geológica (tipos de rocas, fallas y pliegues), se procedió a realizar una campaña de campo en sitios clave donde se observó, de manera clara, los aspectos geológicos a tratar en el video del primer capítulo. Para este capítulo se recorrieron lugares emblemáticos en los alrededores del poblado de Tolimán, Querétaro:

[https://drive.google.com/file/d/14\\_d7gFle5wIzJy4ICc\\_2ziEgw9Elm3AC/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14_d7gFle5wIzJy4ICc_2ziEgw9Elm3AC/view?usp=sharing)

En ese poblado se expone en toda su plenitud una zona de alta deformación en las rocas del Cretácico Inferior, que representan la zona de despegue (zona que concentra mucha deformación y que separa a rocas sedimentarias deformadas, en la parte superior, de rocas no deformadas o poco deformadas en la parte inferior). En el trabajo de campo se tomaron fotografías y videos de las rocas, estructuras geológicas, y paisajes de las montañas de la Sierra Gorda.

Después de hacer la recopilación de la información, se procedió

a escribir un guion. En el caso del primer capítulo, este guion se enfocó en la descripción general de la construcción de las montañas, en particular de las zonas de despegue. Creemos que este tema es un buen inicio para explicar los distintos aspectos geológicos de la Sierra Gorda de Querétaro. Con el guion listo, fue posible hacer el video en el programa PowerDirector®, donde se incluyó música ambiental, efectos de sonido, etiquetas en fotografías y videos, así como la narración.

Durante los avances en la elaboración del video del primer capítulo llamado “La raíz de las montañas: zona de despegue Tolimán” se fue revisando el contenido y la manera en cómo se expresa la información. La versión final se encuentra en la siguiente liga:

<https://www.youtube.com/watch?v=GymsXDne6ys>

Este video será publicado y difundido en distintos medios. Uno de ellos será la apertura de un canal en YouTube® que estará dedicado a difundir aspectos interesantes relacionados con las cadenas montañosas. Adicionalmente, se buscarán otros medios digitales para su promoción, ya sean páginas web, o en eventos de divulgación de la ciencia que se organicen dentro de México. El video también usa animaciones tomadas de otros videos de YouTube® (ej. Formation of Himalayas), los cuales se mencionan en la descripción del video, dentro del canal donde se proyecta.

Acompañando al video del capítulo I, en el sitio de YouTube®, se incluye un glosario con términos especializados en el análisis de las montañas como: Acortamiento de la corteza terrestre, Cinturón de Pliegues y Cabalgadoras Mexicano, Teoría de la Cuña Crítica o Cuña Orogénica, Pliegues isoclinales recostados, entre otros. Estos mismos términos también son incluidos en un glosario al final del siguiente apartado.

## RESULTADOS

A partir de la metodología previa, se construyó un video con una duración de 5:50 min. Este video explica en una introducción la formación de las montañas a partir del acortamiento de la corteza terrestre, poniendo como ejemplo una animación de la cadena montañosa de Los Himalaya en Asia (video “Formation of Himalayas”. <https://www.youtube.com/watch?v=PDrMH7RwupQ>). El video continúa con la explicación de los mecanismos de formación de las montañas a partir de la teoría de la cuña crítica, también denominada cuña orogénica (orogénesis: proceso de construcción de montañas). Esta teoría explica la formación de las montañas a partir del apilamiento de material, como ocurre cuando se empuja material de construcción o nieve con un bulldozer (Davis *et al.*, 1983). También esta teoría demuestra la existencia de una zona de alta deformación (Figuras 1 y 2). Esta zona es conocida por los geólogos como zona de despegue y constituye la raíz de las montañas (Vásquez-Serrano *et al.*, 2021). Se sabe que esas zonas experimentaron alta deformación, ya que están plegadas intensamente perdiendo su forma horizontal.

Finalmente, en la última parte del video se muestra la manera en cómo se ve el interior de las montañas, a través de la exposición de rocas sedimentarias en el poblado de San Joaquín, Querétaro (Figura 1a). Así mismo, se presenta la localización de una zona de despegue en los alrededores del poblado de Tolimán, Querétaro (Figura 1b). Adicionalmente, se muestran sitios clave donde se observan las evidencias geológicas de la existencia de la zona de despegue de Tolimán.

La liga de la localización de los sitios mencionados en el video, así como la liga del video en el canal de YouTube© de Alberto Vásquez, son las siguientes:

Video:

<https://www.youtube.com/watch?v=GymsXDne6ys>

Sitios en Google Earth©:

[https://drive.google.com/file/d/14\\_d7gFle5wizJy4ICc\\_2ziEgw9Elm3AC/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14_d7gFle5wizJy4ICc_2ziEgw9Elm3AC/view?usp=sharing)

Las coordenadas de los sitios también son presentadas en el video, el formato de las coordenadas esta dado en el sistema UTM-WGS84 cuadrante 14Q en el centro de México.

Consideramos que tanto el primer video que se presenta en este trabajo como los futuros videos de la serie “Explorando la Sierra Gorda de Querétaro” son adecuados para alumnos de nivel medio. Se incluye un glosario de términos que pueden ayudar a comprender mejor lo que se trasmite en el video. Así mismo, los videos pueden llegar a ser una herramienta de enseñanza en las universidades donde haya carreras relacionadas con Ciencias de la Tierra. Finalmente, también creemos que puede ir dirigido al público adulto general ya que es un tema de interés para las personas que viven dentro de las cadenas montañosas en el mundo, como la Sierra Madre Oriental.



Figura 1. Vistas panorámicas de la Sierra Gorda de Querétaro. En los alrededores del poblado de San Joaquín (a) se puede ver a las rocas deformadas correspondientes al interior de las montañas, la cuales se encuentran plegadas y fracturadas. En una vista panorámica de las montañas al norte del poblado de Tolimán (b), se puede observar a las rocas de la formación San Juan de la Rosa que representan la zona de despegue o la raíz de las montañas. Esta zona de despegue separa a las rocas deformadas del Cretácico Medio-Tardío (Formaciones geológicas Peña Azul, Tamaulipas y Soyatal) de rocas poco deformadas del Triásico Tardío (Formación El Chilar). Las coordenadas en las fotografías están en el sistema UTM-WGS84 cuadrante 14 Q.

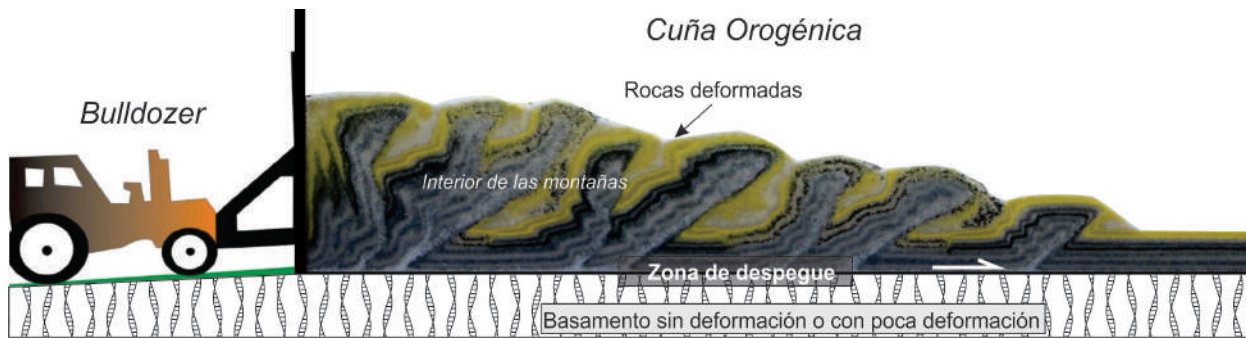


Figura 2. Arquitectura de una cuña crítica o cuña orogénica (Davis *et al.*, 1983) tomando como ejemplo una cuña experimental que simula la formación de las montañas en la Sierra Gorda de Querétaro (Vásquez-Serrano, 2018).

## Glosario de términos geológicos usados

- **Acortamiento de la corteza terrestre.** Apilamiento de material rocoso de la corteza terrestre mediante su plegamiento y rotura, debido a la compresión inducida por el choque de placas tectónicas.
- **Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras Mexicano.** Definición geológica-estructural de la Sierra Madre Oriental, debido a que está formada por dobleces (pliegues) y fracturas (fallas geológicas inversas o cabalgaduras) en las rocas. Este término fue propuesto por la Dra. Elisa Fitz en su artículo publicado en 2012 (Fitz-Díaz *et al.*, 2012).
- **Teoría de la Cuña Crítica o Cuña Orográfica.** Es una teoría propuesta por Davis *et al.* (1983) para explicar los mecanismos de formación de las montañas, a través del apilamiento de rocas de la corteza terrestre debido al choque de placas tectónicas. Un análogo de este proceso es lo que ocurre que cuando se apila material de construcción por un bulldozer.
- **Pliegues isoclinales recostados.** Son pliegues geológicos apretados donde sus flancos tienen la misma inclinación (isoclinales). Los pliegues isoclinales recostados tienen sus flancos y su plano axial (plano que divide en dos al ángulo entre los flancos) subhorizontales (Fossen, 2016).
- **Rocas.** Son un agregado de minerales, es decir que las rocas están constituidas por una aglomeración de minerales, en muchas de las rocas estos minerales no se pueden ver a simple vista, pero en ciertas rocas (metamórficas y algunas ígneas) si podemos ver los minerales. Dependiendo del origen de las rocas se clasifican en tres grupos principales: ígneas, metamórficas y sedimentarias (Tarbuck *et al.*, 2005). Este último grupo de rocas se puede formar a partir del depósito de fragmentos de otras rocas (sedimentos) o por la precipitación química, por ejemplo, de carbonato de calcio. En el caso de la Sierra Madre Oriental, sus rocas son principalmente sedimentarias (Fitz-Díaz *et al.*, 2018).
- **Deformación.** En geología, el término deformación toma una definición más compleja que solo un simple “cambio de forma”, y tiene que ver con cuatro aspectos: rotación, traslación, cambio de volumen y distorsión, de un macizo rocoso. El estudio de la deformación también hace referencia al tiempo debido a que en Geología nos interesa entender cómo fue la evolución de la deformación en el tiempo (Fossen, 2016).
- **Capas de la Tierra.** La Tierra está formada por distintas capas producto de una diferencia en la densidad (Atmósfera,

Hidrosfera y Tierra sólida). Para el caso de la capa sólida de la Tierra, ésta se divide según su densidad de mayor a menor en núcleo, manto y corteza. La corteza se divide en dos tipos: corteza continental y oceánica. La corteza terrestre es la capa más externa y se encuentra fragmentada en bloques llamados placas tectónicas (una explicación sencilla se puede encontrar en Alaniz-Álvarez *et al.*, 2011). El choque entre placas puede inducir deformación por acortamiento en las rocas, lo cual genera la formación de montañas (Fossen, 2016).

- **Zona de cizalla.** Son sitios en la corteza terrestre donde se concentra la deformación. Cuando la deformación es frágil (quebradiza), se generan fracturas en las rocas y, si hay desplazamiento significativo en la zona de cizalla, se forman fallas geológicas (Fossen, 2016).

## CONCLUSIONES

El uso de material audiovisual para la explicación de fenómenos naturales complejos es una práctica vital para la transmisión del conocimiento. Los avances en el área de las Ciencias de la Tierra ocurridos en los últimos años, necesitan de un medio eficiente y fácil de construir por los científicos para su transmisión al público en general. La elaboración de videos cortos de temas geológicos específicos, que ligen procesos geológicos complejos con entornos familiares para las personas, ayuda mucho a la transmisión del conocimiento. El potencial de difusión actual de material audiovisual en redes sociales permite compartir de manera eficiente los avances científicos más recientes. El video “La raíz de las montañas, zona de despegue Tolimán” muestra las características de una zona de alta deformación en la corteza terrestre y explica su importancia en el proceso de formación de las montañas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo valioso en la toma de los videos y fotografías durante el trabajo de campo a Sofía Erandi Ortega Fernández y María Fernanda Sampayo. Apreciamos mucho el apoyo técnico en la elaboración del video (edición y producción) a Edgar Rangel Granados. Así mismo, agradecemos el apoyo económico al proyecto PAPIIT IN107219-UNAM. Los autores agradecen los comentarios, sugerencias y correcciones atinadas al manuscrito por parte de los revisores (Juan Carlos Mesino Hernández y Francisco García Moctezuma) y la editora (Susana A. Alaniz Álvarez), lo cual ayudó mucho a mejorar el manuscrito y el video.

## REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., Morán-Torres, L.D. (2011). Experimentos Simples para entender una Tierra complicada, Libro 3: ¡Eureka! Los continentes y los océanos flotan. Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 32 p.
- Cuéllar-Cárdenas, M.A., Nieto-Samaniego, Á.F., Levresse, G., Alaniz-Álvarez, S.A., Solari, L., Ortega-Obregón, C., López-Martínez, M. (2012). Límites temporales de la deformación por acortamiento Laramide en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 179-203.
- Davis D., Suppe J., Dahlen F. A. (1983). Mechanics of fold/thrust belts and accretionary wedges. *Journal of Geophysical Research*, 88:1153–1172.
- Eguiluz, S., Aranda-Gómez, M., and Marret, R., 2000. Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. LIII, 1–26.
- Fitz-Díaz, E., Tolson, G., Hudleston, P., Bolaños-Rodríguez, D., Ortega-Flores, B., Vasquez-Serrano, A. (2012). The role of folding in the development of the Mexican fold-and-thrust belt. *Geosphere*, 8(4), 931-949.
- Fitz-Díaz, E., Lawton, T. F., Juárez-Arriaga, E., Chávez-Cabello, G. (2018). The Cretaceous-Paleogene Mexican orogen: Structure, basin development, magmatism, and tectonics. *Earth-Science Reviews*, 183, 56-84.
- Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge University Press.
- Tarback, E. J., Lutgens, F. K., Tasa, D., y Científicas, A. T. (2005). *Ciencias de la Tierra*, Volumen 1. Madrid: Pearson Educación.
- Vásquez-Serrano, A., Tolson, G., Fitz-Díaz, E., Chávez-Cabello, G. (2018). Influence of pre-tectonic carbonate facies architecture on deformation patterns of syntectonic turbidites, an example from the central Mexican fold-thrust belt. *Journal of Structural Geology*, 109, 127-139.
- Vásquez-Serrano, A. (2018). Incorporación de depósitos sintectónicos en la deformación progresiva de cinturones de pliegues y cabalgaduras: su rol mecánico y mecanismos de deformación. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. 189 p.
- Vásquez-Serrano, A., Nieto-Samaniego, Á. F., Rangel-Granados, E., Alaniz-Álvarez, S., Olmos-Moya, M. D. J. P. (2021). Architecture of an upper-level weak detachment zone: Mexican Fold and Thrust Belt, central Mexico. *Journal of Structural Geology*, 148, 104361.

Manuscrito recibido: 30 de abril de 2022

Manuscrito corregido recibido: 25 de junio de 2022

Manuscrito aceptado: 30 de junio 2022