

EXCURSIONES GEOLÓGICAS VIRTUALES: UNA HERRAMIENTA PARA LA DOCENCIA Y LA DIFUSIÓN DE LA GEOLOGÍA DE MÉXICO. EJEMPLO TRANSECTO DURANGO-MAZATLÁN

Enrique González-Torres ^{1*}, Luca Ferrari ², Sergio Macías-Medrano ¹ y Javier Mancera-Alejándrez ¹

¹Departamento de Geología, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Avenida Universidad 3000, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

²Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México Campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001, Querétaro, C.P. 76230, México.

*eagtgaia@unam.mx (autor para correspondencia)

RESUMEN

Las Excursiones Geológicas Virtuales (EGV) constituyen un recurso para la docencia y difusión de la Geología de México como complemento de la enseñanza y el aprendizaje para los estudiantes. Las EGV tienen varias ventajas entre las que destacan, que los datos e imágenes se pueden presentar en varias escalas y perspectivas casi en forma simultánea o su permanencia en los medios digitales lo que hace posible que los estudiantes las puedan consultar repetidamente. Además, permiten superar diversas limitaciones de visitas presenciales, como la escasez de recursos económicos necesarios para su realización, la cantidad limitada de personas que pueden participar, la falta de seguridad que se registra en algunas regiones del país o casos limitantes como la reciente pandemia de COVID-19. Este trabajo busca compartir los aspectos centrales de la metodología utilizada para la realización de las EGV, que es resultado de la experiencia obtenida durante el desarrollo de este proyecto. La EGV que se presenta, se realizó a lo largo de la autopista Durango - Mazatlán, que constituye un transecto clásico de la geología del sector central de la provincia de la Sierra Madre Occidental, donde se pueden observar algunos de los rasgos estratigráficos y tectónicos más relevantes de la región.

Palabras clave: Excursión Geológica Virtual, Sierra Madre Occidental, Autopista Durango-Mazatlán, Geología de México, drones, virtualidad.

ABSTRACT

The Virtual Geological Field Trips (VGFT) constitute a resource for teaching and spreading of the knowledge of Mexico's Geology. It is a complement for the classroom and for students' learning. The VGFT have several advantages, among which stand out the presentation of data and images in several scales and perspectives almost simultaneously, their permanence in the digital media that make it possible for students to consult them repeatedly. They also allow to overcome various limitations of face-to-face visits, such as the scarcity of economic resources necessary for their realization, the limited number of people who can participate, the lack of security that is registered in some regions of the country, and restrictions like that of the COVID-19 pandemics. This work seeks to share the central aspects of the methodology used for the realization of the VGFTs, which is the result of the experience obtained during this project's development. The example of the VGFT that is presented was carried out along the Durango - Mazatlan highway, which constitutes a classic transect of the Sierra Madre Occidental central sector's geology, where some of the most relevant stratigraphic and tectonic features of the region can be observed.

Keywords: Virtual geological field trip, Sierra Madre Occidental, Durango-Mazatlan Highway, Geology of Mexico, drones, virtuality.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan algunas de las características más relevantes de las Excursiones Geológicas Virtuales (EGV) y la metodología diseñada para su realización. Las EGV constituyen una herramienta para complementar el proceso de enseñanza-aprendizaje y la difusión de la geología de México. Como caso de estudio se muestra la excursión Durango - Mazatlán, un transecto clásico del sector central de la provincia geológica de la Sierra Madre Occidental.

La enseñanza de la geología de México es parte fundamental en la formación de estudiantes de Ciencias de la Tierra. Su relevancia se debe a que el trabajo que desarrollan los geocientíficos requiere conocer la información geológica disponible de diferentes regiones del país para su análisis y aplicación en diversas ramas de la ingeniería y de otras disciplinas, como la exploración de recursos minerales, hídricos o energéticos.

De manera tradicional su impartición consiste principalmente en exposiciones por parte del profesor, participar en conferencias con especialistas de diferentes regiones del país, lecturas de artículos científicos, la revisión de cartografía geológica en diferentes escalas, por ejemplo, y cuando es posible, asistir a una excursión geológica de algunos días a regiones cercanas del país. Es casi imposible, complementar estos cursos con varias prácticas de campo que permitan conocer el amplio registro estratigráfico que soporta la evolución geológica y tectónica de México.

Por otra parte, el avance tecnológico y la asequibilidad de dispositivos que permiten documentar de manera fotográfica y videográfica sitios con importancia geológica, así como la integración de esta información en mapas interactivos disponibles en la web, han permitido generar diferentes modelos de "excursiones de campo virtuales (*Virtual Field Trips*)" (Qiu y Hubble, 2002).

En este sentido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM se ha planteado la conceptualización de las visitas o Excursiones Geológicas Virtuales (<https://drones.unam.mx/visitas-geologicas>) como una herramienta docente que permita a los estudiantes acercarse a sitios de relevancia geológica con el acompañamiento de especialistas de la zona de interés.

Inicialmente las EGV, fueron definidas como un conjunto de imágenes apoyadas con textos y/o otros recursos digitales, las cuales han ido evolucionado como herramientas más sofisticadas integrando gráficos de alta resolución, audio, video, imágenes 360° en entornos de análisis de datos especializados como los Sistemas de Información Geográfica (Cassady, *et al.*, 2008; Dolphin, *et al.*, 2019; Ruberto *et al.*, 2023).

De manera particular las EGV que estamos realizando buscan atender la necesidad de acercamiento de los interesados de Ciencias de la Tierra a sitios representativos de la Geología de México de forma virtual complementando su formación. Además, al ser recursos dispuestos en la web de forma abierta y permanente, también serán recursos que contribuirán a su difusión, podrán ser ampliamente difundidas. En ellas se aprovechan los conocimientos y experiencia de especialistas de cada región seleccionada, quienes guiarán a los interesados a través de mapas interactivos digitales en ambiente web utilizando la información geológica disponible para cada punto de interés. Estos materiales permiten realizar observaciones de campo de carácter multiescalar casi simultáneas y desde diferentes perspectivas (Qiu y Hubble, 2002; Ruberto *et al.*, 2023).

Un compendio de EGV pone al alcance de cualquiera la posibilidad de conocer sitios representativos de la geología de México sin que sean temas limitantes como la seguridad, la cantidad de participantes, los recursos económicos necesarios para su realización e incluso la posibilidad de que se interrumpan las actividades presenciales por cualquier motivo como la situación de la pandemia COVID-19.

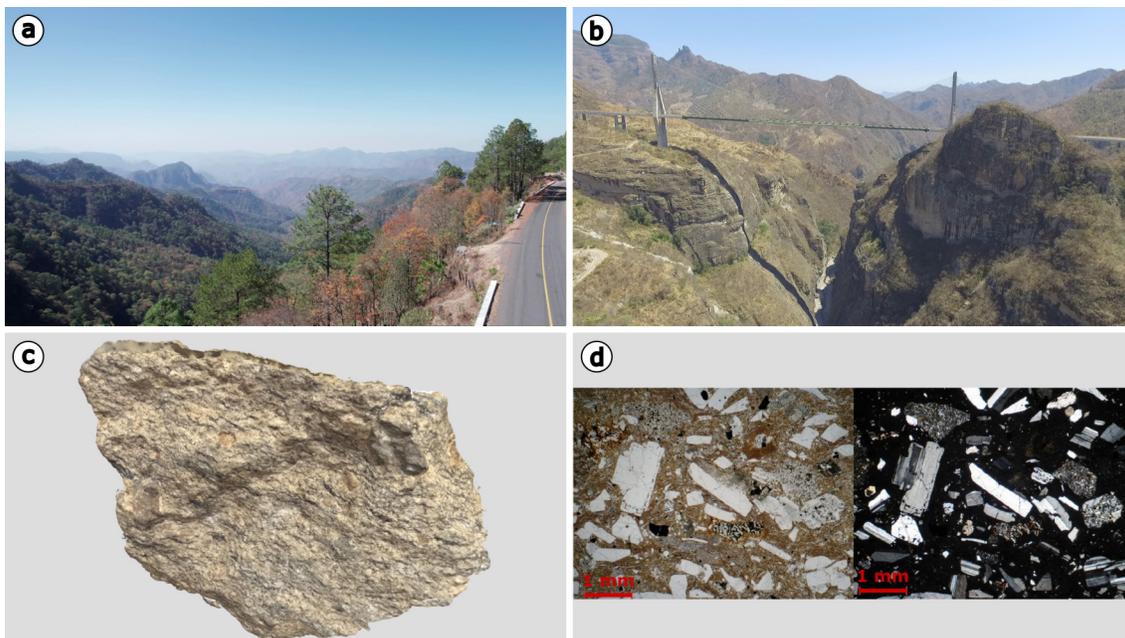


Figura 1. Observaciones geológicas multiescalares: a. Vista panorámica desde el Espinazo del Diablo hacia el valle del río Baluarte. b. Afloramiento en la base del puente Baluarte. c. Muestra de mano de ignimbrita y d. Microfotografía en luz paralela y nicols cruzados de lámina delgada de una ignimbrita.

La colección de EGV se complementa con otros recursos digitales como las “Cátedras Selectas de Geología de México”, que son conferencias magistrales virtuales que se transmitieron en vivo entre 2020 y 2021 durante el confinamiento provocado por la pandemia y que fueron organizadas por el Instituto de Geología y la Facultad de Ingeniería a través de la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la UNAM, acervo que quedó grabado y disponible para todo el público en forma permanente en:

http://www.dict.unam.mx/Catedras_Selectas_de_Geologia_de_Mexico.php

Las excursiones geológicas de campo continúan siendo fundamentales en la formación de los estudiantes de las geociencias, debido a que contribuyen al desarrollo de habilidades como observar, reconocer, describir y cartografiar las unidades litológicas así como sus relaciones geométricas y temporales en el campo. Sin embargo, las EGV ofrecen la oportunidad de complementar dichas habilidades a nivel multiescalar sin la necesidad de estar en el sitio y aprovechar el entorno de la web (Figura 1).

La EGV “Transecto Durango-Mazatlán” forma parte de la colección de excursiones que se están preparando para documentar sitios en las diferentes provincias geológicas de México en el marco del proyecto PAPIME PE106422 “Excursiones geológicas virtuales: una herramienta para la docencia y la difusión de la geología de México” y buscan contribuir a que los estudiantes e interesados tengan una experiencia cercana a una visita de campo presencial.

METODOLOGÍA

La metodología que aquí se describe tiene como propósito crear EGV a través de un flujo de trabajo reproducible y que contempla dos elementos principales. El primero se relaciona con la recopilación del conocimiento de especialistas en torno a una región de interés. El segundo apunta a transmitir el conocimiento empleando estrategias docentes distintas a las convencionales, a través de un entorno web en donde converja dicho conocimiento, en conjunto con la incorporación de información interactiva derivada de drones, sistemas de información geográfica, fotogrametría y edición videográfica, que ha sido alojada en diversas redes sociales y/o unidades de almacenamiento virtuales.

De esta manera, se busca conducir al usuario durante la navegación en la EGV a partir de un conjunto de PI (puntos de interés) pertinentes para explicar la geología de una zona en particular. El flujo de trabajo se divide en 4 etapas, tal y como lo muestra la Figura 2:

1. Desarrollo del entorno web.
2. Trabajo de campo.
3. Trabajo de gabinete.
4. Retroalimentación de la información.

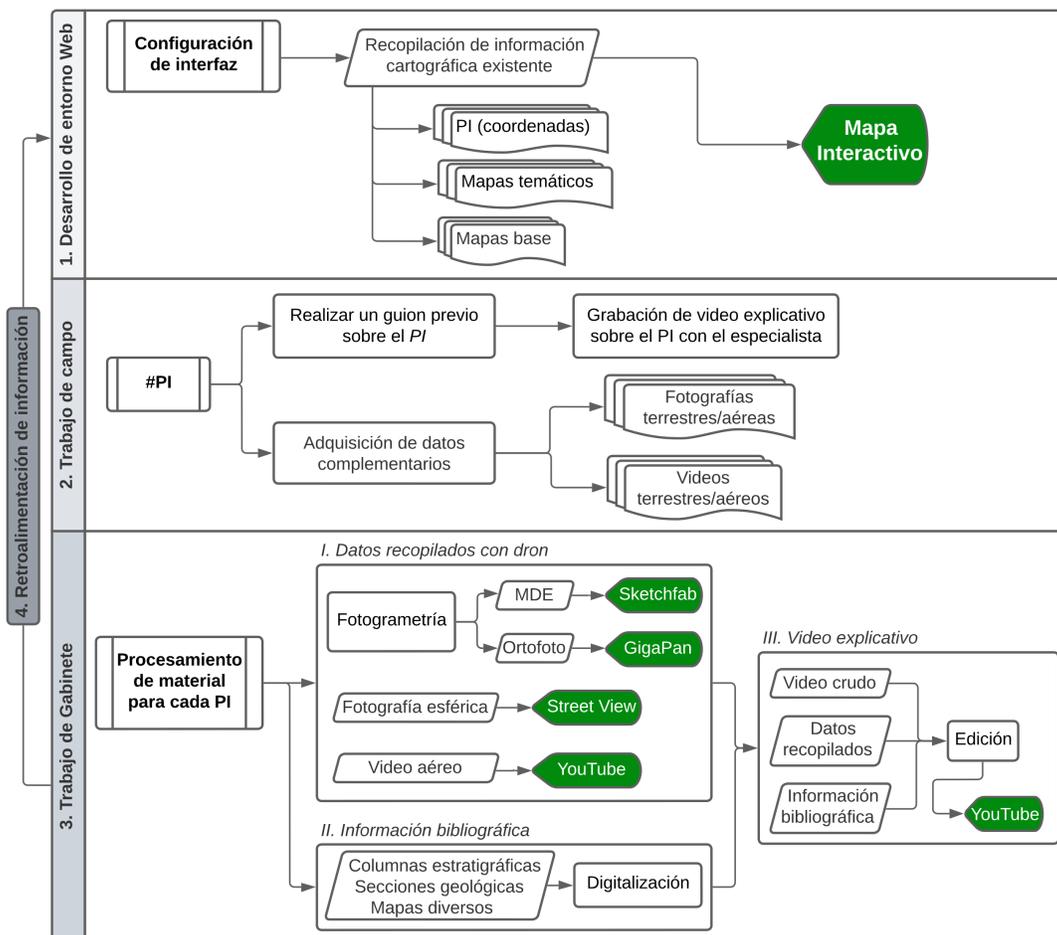


Figura 2. Flujo de trabajo de la metodología para la realización de las EGV. MDE: Modelo Digital de Elevación; PI: Punto de interés.

Etapa 1. Desarrollo del entorno web

Esta etapa tiene como finalidad crear un entorno en el que se comunique de manera didáctica el conocimiento geológico, por medio del potencial de diversos medios digitales para interactuar con videos, imágenes, mapas y modelos 3D integrados a cada PI, que funcionen como insumos principales de la excursión en cuestión, de la zona o región de interés y de la adquisición de datos en campo. Lo anterior nos lleva a definir dos subniveles de trabajo, ya que en primera instancia se contempla la configuración de la interfaz y, posteriormente, retroalimentar con información derivada de los trabajos de campo y gabinete.

Las EGV se trabajan en un entorno web (Figura 3), ya que es un ambiente de desarrollo versátil para su difusión, configurable de acuerdo con las necesidades de cada EGV con mantenimiento permanente y actualización de la página y, sobre todo, es compatible con diversas librerías incorporables como *Leaflet*, diseñada para el desarrollo de mapas que cumple con el propósito de la navegación interactiva y aporta una herramienta de comunicación relevante dentro del conocimiento geológico.



Figura 3. Entorno web y su interacción con las diferentes plataformas digitales utilizadas en las EGV.

Dicha librería se desarrolla por medio del lenguaje *JavaScript* con licencia libre y de código abierto, lo cual, dentro de un contexto docente, es sumamente valioso. En este sentido, la utilidad del primer subnivel consiste en configurar la interfaz sobre la cual se estará trabajando durante el desarrollo de la EGV. En ella, se contempla el diseño del mapa a partir de la integración de los PI y su extensión espacial, así como también la incorporación de mapas base (imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, mapas de sombra, localidades y vías de comunicación) y como parte fundamental la cartografía especializada que represente lo explicado por el especialista.

Este trabajo requiere de coordinación entre el guía de la excursión y el equipo de trabajo encargado del desarrollo tecnológico para recopilar la información existente sobre cartografía y conducirla a un proceso de digitalización o conversión de formatos para posteriormente integrarla al entorno web.

Etapa 2. Trabajo de campo

El trabajo de campo tiene como finalidad recopilar la información necesaria que se incorporará a la EGV para cada uno de los PI que se han contemplado. En este sentido, dicha información consiste en videos explicativos del sitio y en la adquisición de datos adicionales. El equipo utilizado para la adquisición de información de campo consta de cámara y tripié, micrófonos inalámbricos, drones y estabilizador de cámara (Figura 4).

Para el caso de los videos explicativos, se sugiere al especialista definir las ideas de lo que se pretende explicar en cada uno de los PI a modo de guion y con el cual se pueda realizar una secuencia lógica la explicación sobre la geología a lo largo de la EGV.



Figura 4. Equipo utilizado en campo: a. Dron DJI Air 2S; b. Cámara Sony a7 con receptor de sonido Boya montados en tripié; c. Emisoras de sonido con micrófonos Lavalier Boya; d. Cámara de acción 360 GoPRO MAX.

La adquisición de datos gira principalmente en torno al manejo de los drones y las aptitudes que puede proporcionar dentro del contexto de las excursiones, cómo la perspectiva panorámica, la altura de observación y la visión total a 360° tanto de fotografías, como de videos.

Este último punto abre un abanico de posibilidades muy amplio que incluye fotografías esféricas, ortomosaicos de alta resolución o el desarrollo de fotogrametría, con la finalidad de obtener modelos 3D de rasgos relevantes del relieve. Estos modelos servirán para ilustrar el video explicativo y de acuerdo con su pertinencia, como elementos adicionales aprovechando su capacidad interactiva para reforzar el conocimiento.

Etapa 3. Trabajo de gabinete

Esta es la última etapa de la metodología en donde se procesa la información, tanto la recabada en campo como la que está disponible en diversas referencias bibliográficas y que está referenciada en alguno de los elementos generados. Por tal razón, tiene que ser dividida en tres grandes grupos definidos de la siguiente manera:

- I. Datos recopilados con dron.
- II. Información bibliográfica.
- III. Video explicativo.

Hay que destacar que antes de comenzar el procesamiento de la información se debe hacer una síntesis de lo que se comenta en cada video explicativo, con la finalidad de tener un contexto amplio de los materiales que se necesitan considerar para la excursión.

Una vez mencionado lo anterior, los grupos I y II se pueden trabajar de manera simultánea y en cada uno de ellos se generarán diversos productos que irán retroalimentando al mapa interactivo a través de las plataformas *Sketchfab*, *GigaPan*, *Street View* o *YouTube*, de acuerdo con la naturaleza de cada producto.

Dado que las EGV se encuentran en un entorno web, esta información generada puede incorporarse a través de las plataformas digitales sin conflicto del manejo de plataformas de terceros.

Grupo I. Datos recopilados con dron

Dado que el dron nos permite emplear diversas aplicaciones de adquisición de datos como captura de video o fotografía y ejecución de vuelos fotogramétricos, la diversidad de medios digitales es amplia y el material se debe clasificar de acuerdo con el tipo de proceso, como es la edición videográfica o el procesamiento fotogramétrico.

Para el material videográfico, gran parte se emplea para ilustrar el video explicativo del especialista, contemplando incluso fotografías panorámicas; sin embargo, en el caso de las fotografías esféricas, existe la posibilidad de interacción desde *Street View* (ver por ejemplo el 'PI 7. Espinazo del Diablo' de la EGV Durango-Mazatlán). En cuanto al procesamiento fotogramétrico, los productos derivados tienen principalmente dos salidas, por un lado, *Sketchfab* para visualizar modelos 3D y por otro *GigaPan* para acceder a las fotografías de alta resolución.

Grupo II. Información bibliográfica

El grupo II está destinado para trabajar en primera instancia en la recopilación de información bibliográfica pertinente, incluyendo gran parte del material que el especialista ha generado y publicado en diversas investigaciones. Posteriormente, será necesario pasar el material por un proceso de digitalización con la finalidad de incorporarlo principalmente al video explicativo. Este material es diverso, aunque depende en gran medida de lo que se pueda disponer en ese momento; sin embargo, en su mayoría está conformado por columnas estratigráficas, secciones geológicas o mapas con diferentes temáticas.

Grupo III. Video explicativo

Para concluir este proceso, se procede con la edición del video explicativo que tiene como finalidad guiar la EGV punto por punto, por lo que cada uno de los videos debe estructurarse de tal forma que pueda emplear el material digitalizado en pasos anteriores. Dado que la plataforma en donde se compartirá el video es YouTube, se tiene que considerar una breve descripción del video, un índice a modo de línea de tiempo que represente los diferentes temas que se mencionan en él, los diferentes enlaces a referencias bibliográficas que se emplearon y la asociación entre videos de esta EGV.

Etapa 4. Retroalimentación de la información

La Etapa 4 se desarrolla de manera paralela a la anterior, pues se trata de ir incorporando dentro del mapa interactivo configurado desde la Etapa 1 todo el material generado y compartido en las diversas plataformas digitales, para dar forma a la versión más actualizada de la EGV.

La ventaja de esta etapa apunta a que el mapa interactivo se convierte en un canal de comunicación entre los participantes con el cual se pueda dar seguimiento a la fase de desarrollo de la EGV, por ser el medio en el que converge toda la información de una manera estructurada para la explicación de la geología de un sitio o zona en específico.

EJEMPLO DE EGV: TRANSECTO DURANGO-MAZATLÁN, SIERRA MADRE OCCIDENTAL

La excursión geológica a lo largo de la carretera Durango-Mazatlán es un transecto clásico que fue estudiado en los trabajos pioneros de McDowell y Keizer (1977) y Henry y Fredrikson (1987) y que permite observar la evolución tectonomagmática de la parte central de la Sierra Madre Occidental (SMO, ver Figura 5). A lo largo de esta carretera se han llevado a cabo excursiones geológicas en 1997 y 2003 como parte de los congresos IAVCEI (Asociación Internacional de Vulcanología y Geoquímica del interior de la Tierra, por sus siglas en inglés) y de la sección Cordillerana de la *Geological Society of America*, respectivamente. En la última década la geología de la región ha sido revisada por Ferrari *et al.* (2013 y 2018) quienes han propuesto un nuevo modelo para interpretar la evolución geodinámica de esta región. Aprovechando estos trabajos y también la apertura de la nueva autopista Durango-Mazatlán se han llevado a cabo nuevas versiones de las excursiones en 2014 (Aranda-Gómez *et al.*, 2015) y en 2020 (Ferrari *et al.*, 2020). La excursión virtual se ha diseñado con base en esta última actualización de las excursiones anteriores.

La excursión permite examinar importantes episodios magmáticos y tectónicos del Cretácico y Cenozoico que han desarrollado la morfología del paisaje y han controlado la formación de yacimientos minerales tipo pórfidos y depósitos epitermales de clase mundial en esta parte de la SMO. Luego de la acreción de los terrenos Guerrero y Alisitos en el Albiano (Busby *et al.*, 2006; Martini *et al.*, 2016), varios pulsos de magmatismo continental construyeron la SMO, la provincia ígnea con mayor extensión del país. La fisiografía de la SMO comprende un altiplano con una elevación promedio superior a los 2000 m sobre el nivel del mar y cubre un área de ~1200 km de largo y ~200 a 400 km de ancho que se extiende desde la frontera entre México y los Estados Unidos de América hasta aproximadamente los 20 °N de latitud. La parte occidental de la SMO está afectada por sistemas de fallas normales que forman parte del rift del Golfo de California y que exponen muchos depósitos minerales.

Cómo provincia ígnea, la SMO incluye rocas del Cretácico superior al Mioceno temprano formadas durante dos periodos principales de actividad magmática continental (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari *et al.*, 2018). El primer período, que coincide con la orogenia Laramide, generó un conjunto batolítico y su contraparte volcánica, asociados con un arco magmático de supra-subducción activo entre ~100 y 50 Ma (Gastil, 1975; McDowell *et al.*, 2001; Henry *et al.*, 2003; Ortega-Gutiérrez *et al.*, 2014). Estas rocas, originalmente denominadas Complejo Volcánico Inferior por McDowell y Keizer (1977), formaron los batolitos de Sonora, Sinaloa y Jalisco, así como la sucesión volcánica del Cretácico tardío al Paleoceno de la Formación Tarahumara en Sonora (Wilson y Rocha, 1949; McDowell *et al.*, 2001), y sucesiones volcánicas similares en Sinaloa y Durango (Montoya-Lopera *et al.*, 2019). Durante un período de transición entre ~50 y 40 Ma, caracterizado por el emplazamiento de magmatismo de volumen relativamente bajo sobre un cinturón de 800 km de ancho (Figura 5), la extensión de la corteza comenzó en una amplia región desde la Mesa Central a la SMO (Aranda y McDowell, 1998; Ángeles Moreno *et al.*, 2017; Ferrari *et al.*, 2018; Nieto-Samaniego *et al.*, 2019).

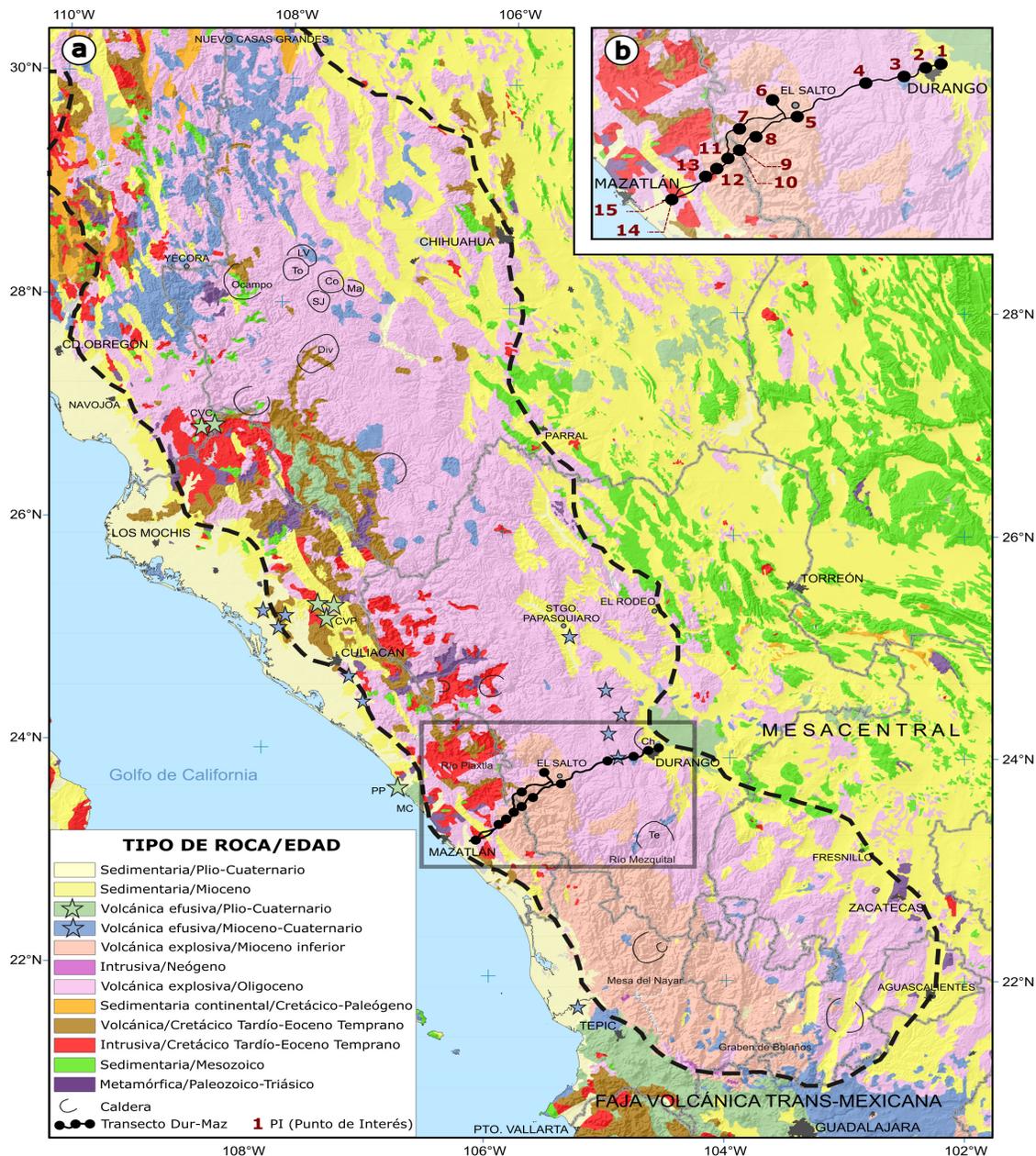


Figura 5. Mapa geológico: a. Extensión regional de la Sierra Madre Occidental con transecto Durango-Mazatlán; b. Vista a detalle del transecto Durango-Mazatlán con los Puntos de Interés (PI) visitados. Ch: Chupaderos, Co: Comanche, CVC: Campo Volcánico de Camargo, CVP: Campo Volcánico Pericos, Div: Divisadero, LV: Las Varas, Ma: Manzanita, MC: Mesa Cacaxtla, PP: Punta Piaxtla, SJ: San Juanito, Te: Temoaya, To: Tómochic.

Al final del Eoceno el vulcanismo cambia radicalmente para ser dominado por ignimbritas riolíticas y lavas basálticas de mucho menor volumen, construyendo una de las provincias volcánicas silíceas más grandes de la Tierra (Bryan y Ferrari, 2013). Estas rocas, denominadas Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Keizer, 1977), fueron emplazadas principalmente en dos pulsos ignimbriticos de ~ 35 a 29 Ma a lo largo de toda la provincia y de ~ 24 a 20 Ma en la mitad meridional (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari et al., 2002, 2007; McDowell y McIntosh, 2012). Las lavas máficas están relacionadas tanto con la fusión del manto astenosférico como con la litosfera continental y se encuentran intercaladas dentro de las sucesiones de ignimbritas, a menudo asociadas con fallas normales (Ferrari et al., 2018).

Las cuencas extensionales y los depósitos sedimentarios continentales asociados se formaron entre ~ 27 y ~ 15 Ma en un cinturón con tendencia NNO a lo largo de la mitad occidental de la SMO, que abarca la parte occidental de Sonora (McDowell et al., 1997; Gans, 1997; León et al., 2000; Wong et al., 2010; Murray et al., 2013) y la mayor parte de Sinaloa y Nayarit (Ferrari et al., 2013). Estas estructuras produjeron un adelgazamiento litósferico importante en la región del futuro Golfo de California, aunque la ruptura final de la litosfera ocurrió por deformación transtensional después del Mioceno tardío (Bennett y Oskin, 2014). Flujos de lava basáltica con afinidad intraplaca también fueron emplazados en el Mioceno medio-final y Plio-Cuaternario (Luhr et al., 2001; Aranda-Gómez et al., 2007; Ferrari et al., 2018).

Estos episodios tectonomagmáticos se pueden ubicar como parte de una evolución geodinámica compleja que acompañó el final de la subducción de la placa Farallón debajo de América del Norte y el desarrollo de un límite de placa transtensional en el Golfo de California (Ferrari *et al.*, 2018). Desde el Cretácico superior hasta el Eoceno inferior, la subducción de la placa de Farallón construyó un cinturón magmático representado por las rocas batolíticas y las contrapartes volcánicas de la *Lower Complex Volcanic* (LCV). A los 52 Ma, la placa de Vancouver comenzó a separarse del resto de la placa de Farallón (Atwater, 1989; Wright *et al.*, 2016), cuyo límite difuso de placa se introducía en México en la latitud de la frontera Sonora-Sinaloa. Esto emplazó volúmenes relativamente pequeños de magma en un área amplia y al inicio de la extensión en la placa superior. Otra consecuencia fue que comenzó a desarrollarse una ventana astenosférica (*slab window*) por efecto del retroceso, fragmentación y desprendimiento de los *slabs*, lo que, a su vez promovió el ascenso y fusión de la astenosfera.

Los fundidos astenosféricos provocaron la fusión del manto litosférico y la corteza, lo que produjo los pulsos ignimbríticos y varios episodios de extensión acompañada de erupción de lavas máficas, tanto en la provincia *Basin and Range* mexicana (Henry y Aranda-Gómez, 2000) como en la Provincia Extensional del Golfo (Ferrari *et al.*, 2013). El cese completo de la subducción en el Mioceno medio y el subsiguiente acoplamiento progresivo de una franja de la margen continental (actualmente la península de Baja California) con la placa del Pacífico que se mueve hacia el noroeste produjo la ruptura final de la litosfera continental en el Golfo de California.

Empezando en la costa de Sinaloa, la excursión permite ver las unidades geológicas que forman la parte central de la SMO en orden estratigráfico, los principales episodios extensionales, marcados por claras discordancias entre los paquetes ignimbríticos de la SMO, y los diferentes pulsos de mineralización asociados a ellos. La mayor parte de los PI se ubican a lo largo de la nueva autopista Durango-Mazatlán, cuyos cortes han permitido observar con mucha mayor claridad la geología de esta región.

Transecto Durango-Mazatlán Enlace de la EGV:
https://inggeolassist.github.io/SMOc_EGV1/

CONCLUSIONES

Las EGV integradas al proceso de enseñanza - aprendizaje de la geología de México constituyen una poderosa herramienta para la docencia. Aunque las EGV no sustituyen las prácticas y/o visitas de campo, ofrecen una amplia variedad de ventajas, entre las que destacan, el desarrollo de habilidades de observación de afloramientos en forma multiescalar y, desde diferentes perspectivas de forma casi simultánea, la ubicación espacial de los cuerpos de roca en mapas interactivos, el aprovechamiento de los conocimientos y experiencia de especialistas de diversas regiones del país y la posibilidad de una amplia difusión entre todos los interesados en dichos temas.

La difusión de la metodología utilizada en la elaboración de la EGV que se presenta constituye un marco de referencia a los interesados en incursionar en el desarrollo de estos materiales docentes, los cuales, aunque muestran un desarrollo incipiente en nuestro país, tienen un importante potencial para la docencia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias al financiamiento del proyecto DGAPA-UNAM, PAPIIME PE106422 "Excursiones geológicas virtuales: una herramienta para la docencia y la difusión de la geología de México". Los autores agradecen el apoyo en la edición de videos y la digitalización de cartografía realizadas por los estudiantes Lizbeth Santiago Rivera, Alexis Jerkan Quintos González y Ricardo Alonso Flores Flores, así como al M. en C. Rodrigo Gutiérrez Navarro por sus sugerencias sobre la metodología presentada en este trabajo. Asimismo, se agradece la revisión de dos árbitros anónimos y de la Mtra. Sandra Fuentes Vilchis, cuyas observaciones contribuyeron sustantivamente a mejorar el artículo.

REFERENCIAS

- Angeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, A. F., Ruiz-González, F. J., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., Olmos-Moya M. D. J. P. Xu S. y Miranda-Avilés, R. (2017). The transition between shortening and extensional regimes in central Mexico recorded in the tourmaline veins of the Comanja Granite. *Journal of South American Earth Sciences*, 73, 65-77.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.004>
- Aranda-Gómez, J. J., y McDowell, F. W. (1998). Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: Syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District. *International Geology Review*, 40(2), 116-134. <https://doi.org/10.1080/00206819809465201>
- Aranda-Gómez, J. J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G., y Chávez-Cabello, G. (2007). Late Cenozoic intraplate-type volcanism in central and northern México: A review. *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, 422, 93. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(04\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(04))
- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D., Ferrari, L., McDowell, F.W., and Valencia-Moreno, M., (2015), Cenozoic volcano-tectonic evolution of North-Western Mexico: A transect across the Sierra Madre Occidental volcanic field (along the new toll road 40D) and observations on extension-related magmatism in the southern Basin and Range and Gulf of California tectonic provinces: Centro de Geociencias, Guías de Excursiones Geológicas de México, 1, p. 1-90.
- Atwater, T. (1989). Plate tectonic history of the northeast Pacific and western North America.
<https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-N.21>
- Bennett, S. E., y Oskin, M. E. (2014). Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*, 42(3), 215-218. <https://doi.org/10.1130/G34904.1>
- Bryan, S. E., y Ferrari, L. (2013). Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. *GSA Bulletin*, 125(7-8), 1053-1078.
<https://doi.org/10.1130/B30820.1>
- Busby, C., Adams, B. F., Mattinson, J., y Deoreo, S. (2006). View of an intact oceanic arc, from surficial to mesozonal levels: Cretaceous Alisitos arc, Baja California. *Journal of volcanology and geothermal research*, 149(1-2), 1-46.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.06.009>
- Cassady, J. C., Kozłowski, A. G., y Kommann, M. A. (2008). Electronic field trips as interactive learning events: Promoting student learning at a distance. *Journal of Interactive Learning Research*, 19(3), 439.
- Dolphin, G., Dutchak, A., Karchewski, B., y Cooper, J. (2019). Virtual field experiences in introductory geology: Addressing a capacity problem, but finding a pedagogical one. *Journal of Geoscience*

- Education, 67(2), 114-130.
<https://doi.org/10.1080/10899995.2018.1547034>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., y Rosas-Elguera, J. (2002). Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico: Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4), 17-1.
<https://doi.org/10.1029/2001TC001302>
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., y Bryan, S. (2007). Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America.
[https://doi.org/10.1130/2007.2422\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(01))
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., y Solari, L. (2013). Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, 9(5), 1161-1200.
<https://doi.org/10.1130/GES00925.1>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S. E., Lopez-Martinez, M., y Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>
- Ferrari, L., Levresse, G., Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D., Valencia-Moreno, M., y Landín, L. O. (2020). Tectonomagmatic Pulses and Multiphase Mineralization in the Sierra Madre Occidental, Mexico. <https://doi.org/10.5382/GB.61>
- Gans, P. B. (1997). Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*, 16(3), 388-408.
<https://doi.org/10.1029/97TC00496>
- Gastil, R. G. (1975). Plutonic zones in the Peninsular Ranges of southern California and northern Baja California. *Geology*, 3(7), 361-363.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1975\)3%3C361:PZITPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3%3C361:PZITPR%3E2.0.CO;2)
- Henry, C. D., y Fredrikson, G. (1987). Geology of southern Sinaloa adjacent to the Gulf of California. Geological Society of America, Map and Chart Series. Map MCH063, 14.
- Henry, C. D., y Aranda-Gomez, J. J. (2000). Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range. *Tectonophysics*, 318(1-4), 1-26.
- Henry, C. D., McDowell, F. W., y Silver, L. T. (2003). Geology and geochronology of granitic batholith complex, Sinaloa, México: Implications for Cordilleran magmatism and tectonics. *Geological Society of America Special Papers*, 374, 237-273.
<https://doi.org/10.1130/0-8137-2374-4.237>
- León, C. M. G., McIntosh, W. C., Lozano-Santacruz, R., Valencia-Moreno, M., Amaya-Martínez, R., y Rodríguez-Castañeda, J. L. (2000). Cretaceous and Tertiary sedimentary, magmatic, and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi Quadrangles), northwest Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 112(4), 600-610.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112%3C600:CATSMA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112%3C600:CATSMA%3E2.0.CO;2)
- Luhr, J. F., Henry, C. D., Housh, T. B., Aranda-Gómez, J. J., y McIntosh, W. C. (2001). Early extension and associated mafic alkalic volcanism from the southern Basin and Range Province: Geology and petrology of the Rodeo and Nazas volcanic fields, Durango, México. *Geological Society of America Bulletin*, 113(6), 760-773.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113%3C0760:EEAAMA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C0760:EEAAMA%3E2.0.CO;2)
- Martini, M., Solé, J., Garduño-Martínez, D. E., Puig, T. P., y Omaña, L. (2016). Evidence for two Cretaceous superposed orogenic belts in central Mexico based on paleontologic and K-Ar geochronologic data from the Sierra de los Cuarzos. *Geosphere*, 12(4), 1257-1270. <https://doi.org/10.1130/GES01275.1>
- McDowell, F. W., y Keizer, R. P. (1977). Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 88(10), 1479-1487.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88%3C1479:TOMMIT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88%3C1479:TOMMIT%3E2.0.CO;2)
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., y Amaya-Martínez, R. (1997). Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 109(10), 1349-1360.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109%3C1349:IOSAVD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109%3C1349:IOSAVD%3E2.3.CO;2)
- McDowell, F. W., Roldán-Quintana, J., y Connelly, J. N. (2001). Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico. *Geological Society of America Bulletin*, 113(4), 521-531.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2001\)113%3C0521:DOLCET%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2001)113%3C0521:DOLCET%3E2.0.CO;2)
- McDowell, F. W., y McIntosh, W. C. (2012). Timing of intense magmatic episodes in the northern and central Sierra Madre Occidental, western Mexico. *Geosphere*, 8(6), 1505-1526.
<https://doi.org/10.1130/GES00792.1>
- Montoya-Lopera, P., Ferrari, L., Levresse, G., Abdullin, F., y Mata, L. (2019). New insights into the geology and tectonics of the San Dimas mining district, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Ore Geology Reviews*, 105, 273-294.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.12.020>
- Murray, B. P., Busby, C. J., Ferrari, L., y Solari, L. A. (2013). Synvolcanic crustal extension during the mid-Cenozoic ignimbrite flare-up in the northern Sierra Madre Occidental, Mexico: Evidence from the Guazapares Mining District region, western Chihuahua. *Geosphere*, 9(5), 1201-1235.
<https://doi.org/10.1130/GES00862.1>
- Nieto-Samaniego, A. F., Olmos-Moya, M. D. J. P., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., Abdullin, F., del Pilar-Martínez, A., y Xu, S. (2019). Thermochronology and exhumation rates of granitic intrusions at Mesa Central, Mexico. *International Geology Review*, 62(3), 311-319. <https://doi.org/10.1080/00206814.2019.1602789>
- Ortega-Gutiérrez, F., Elías-Herrera, M., Morán-Zenteno, D. J., Solari, L., Luna-González, L., y Schaaf, P. (2014). A review of batholiths and other plutonic intrusions of Mexico. *Gondwana Research*, 26(3-4), 834-868. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.05.002>
- Qiu, W., y Hubble, T. (2002). The advantages and disadvantages of virtual field trips in geoscience education. *The China Papers*, 1, 75-79.
- Ruberto, T., Mead, C., Anbar, A. D., y Semken, S. (2023). Comparison of in-person and virtual Grand Canyon undergraduate field trip learning outcomes. *Journal of Geoscience Education*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10899995.2023.2186067>
- Wilson, I. F., y Rocha, V. S. (1949). Coal Deposits of the Santa Clara District Near Tonichi, Sonora, Mexico: A Study Undertaken to Aid Industrial Development of the Region (Vol. 962). United States Department of the Interior, Geological Survey.
- Wright, N. M., Seton, M., Williams, S. E., y Mueller, R. D. (2016). The Late Cretaceous to recent tectonic history of the Pacific Ocean basin. *Earth-Science Reviews*, 154, 138-173.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.015>
- Wong, M. S., Gans, P. B., y Scheier, J. (2010). The ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B7). <https://doi.org/10.1029/2009JB007032>

Manuscrito recibido: 24 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 23 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 29 de mayo de 2023