



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Excursión Geológica Virtual:
Transecto Durango –
Mazatlán**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Lizbeth Santiago Rivera

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. Enrique Alejandro González Torres



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EXCURSION GEOLOGICA VIRTUAL: TRANSECTO DURANGO □ MAZATLAN que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

LIZBETH SANTIAGO RIVERA
Número de cuenta: 314324357

*Este trabajo ha sido financiado con recursos de la
DGAPA/UNAM/PAPIME/PE106422/EXCURSIONES
GEOLÓGICAS VIRTUALES: UNA HERRAMIENTA PARA
LA DOCENCIA Y LA DIFUSIÓN DE LA GEOLÓGÍA DE
MÉXICO.*

... agradecimientos

Desde que era niña soñaba con alcanzar la cima de una montaña que solía contemplar a través de la ventana de la cocina de mi abuela, en Oaxaca. Sin embargo, el camino hacia ella me parecía inalcanzable; imaginaba que enfrentaría innumerables obstáculos como animales salvajes, personas peligrosas, desastres naturales... yo sentía que jamás lograría llegar.

Todo cambió cuando, en una plática con mi abuelo, supe que él subía esa montaña cada vez que tenía que llegar al pueblo central, ya que el transporte no era recurrente en la zona. Él lo hacía sin dudas, sin miedos, y ese día entendí que sí era posible y que, aunque el trayecto podría ser largo, con paciencia, valentía y determinación se puede alcanzar cualquier meta.

Hoy me llena de felicidad saber que soy capaz de subir esa montaña, y no solo eso, ahora comprendo el proceso que dio lugar a la formación de esa cadena montañosa que tanto me inspiró en la infancia. El paisaje que hoy contemplo es distinto, y sé que no lo habría alcanzado sin las personas que han sido parte de mi camino.

Este trabajo es solo una pequeña parte de ese paisaje. Representa el resultado de múltiples esfuerzos, no solo míos, sino de todos aquellos que me rodearon y apoyaron y por quienes hoy me siento profundamente agradecida.

A mis amistades, gracias por estar siempre, por ser mi refugio cuando lo necesitaba, porque logramos sobrevivir a las dificultades, por las risas que aliviaron las tragedias y por las lecciones que aprendimos en conjunto. Jamás olvidaré a mi equipo LLL, la amiga que me salvó en pandemia, el apoyo a mi emprendimiento, el trabajo en equipo y, sobre todo, el cariño y la confianza.

A mis profesores, a quienes debo mucho más que conocimientos. En ustedes encontré calidez humana, enseñanzas de vida y motivación constante. Gracias al Doctor Enrique González, cuya clase en tercer semestre reafirmó mi vocación. A la Maestra Isabel Domínguez, por su apoyo incondicional, sin el cual difícilmente habría concluido mis estudios. A la Maestra Edith Fuentes, por las charlas, por confiar en mi trabajo y llevarme a conocer el mar. A cada uno de los profesores que formaron parte de mi formación, gracias de corazón.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, agradezco profundamente por brindarme una educación de excelencia y un espacio de crecimiento personal y académico. La formación recibida aquí no solo me ha preparado para enfrentar retos profesionales, sino que también ha forjado mi carácter y me ha enseñado el valor de la dedicación y el esfuerzo. Llevaré con orgullo lo aprendido y los valores que aquí se me inculcaron.

A los colaboradores de este proyecto, gracias por sus aportes, su tiempo y sus conocimientos. Cada análisis y cada discusión técnica enriqueció este trabajo y me permitió aprender más de lo que imaginaba.

A mi familia, mis padres Rogelio y Beatriz, gracias por su esfuerzo y sacrificio, por darme esta oportunidad, por no rendirse y ofrecerme lo mejor dentro de sus posibilidades. Su dedicación se refleja en cada logro que mis hermanas y yo alcanzamos día con día

A mis hermanas Jenny, Nancy, Maira y Gloria, ustedes siempre han sido y serán mi mayor impulso. Gracias por brindarme felicidad, ánimo y apoyo, especialmente cuando necesitaba enfocarme en mis estudios. Prometo seguir esforzándome para construir un mejor futuro para nosotras. Las amo.

A mis pequeños Yui, Emi, Haru, Mantequilla y Michi, jamás olvidaré lo mucho que aliviaron mi corazón en los momentos más difíciles. Aunque algunos ya no estén, su huella y su amor siempre me acompañarán.

A quienes ya partieron, pero que sin lugar a duda fueron un apoyo invaluable, les agradezco profundamente por haber formado parte de mi vida. Su recuerdo me acompaña y me inspira a seguir adelante.

ÍNDICE

RESUMEN	1
I INTRODUCCIÓN	2
1.1 La importancia de la Geología de México	3
1.2 Los retos de las prácticas de campo	4
1.3 El avance tecnológico: las nuevas herramientas	6
1.4 Historia, evolución y ejemplos	8
1.5 Objetivos	11
1.6 Zona de estudio	12
II METODOLOGÍA	14
2.1 Elementos visuales	15
2.2 Elementos gráficos	18
2.3 Diagrama de flujo	21
III MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL	22
3.1 Estratigrafía general	24
3.2 Contexto tectónico extensional	35
3.3 Eventos geodinámicos	39
IV EXCURSIÓN GEOLÓGICA VIRTUAL: Transecto Durango - Mazatlán.....	40
Estación 1	42
Estación 2	46
Estación 3	49
Estación 4	52
Estación 5	54
Estación 6	56
Estación 7	59
Estación 8	61
Estación 9	64
Estación 10	67
Estación 11	68
Estación 12	70
Estación 13	72
Estación 14	74
Estación 15	76
Actividades complementarias	80
V CONCLUSIONES.....	84
REFERENCIAS	87
ANEXO A: Ejemplos de otras excursiones geológicas virtuales.....	101
ANEXO B: Guía para el profesor.....	106

RESUMEN

En los planes de estudio de las carreras de Ingeniería Geológica e Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se incluye la asignatura de Geología de México como parte fundamental de la formación del futuro profesionalista en ingeniería. El estudio de esta materia resulta crucial, ya que permite a los estudiantes familiarizarse con la información geológica de su entorno, abarcando diversas regiones del país.

Un complemento esencial para un adecuado desarrollo en las ciencias de la Tierra es la realización de las prácticas de campo, las cuales juegan un papel clave en la preparación de los estudiantes para el ámbito laboral. Sin embargo, existen diversas limitaciones que dificultan la realización de estas prácticas de manera efectiva y completa.

En este contexto, la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra está desarrollando, en el marco del proyecto PAPIIME PE106422, una serie de excursiones geológicas virtuales. Esta iniciativa tiene como objetivo proporcionar a docentes, estudiantes e interesados la oportunidad de explorar, junto con especialistas, sitios de relevancia geológica en el país. Además, propone la creación de material didáctico que complemente las clases de Geología de México y sirva como guía para enfrentar las complicaciones de las prácticas de campo.

El trabajo se enfoca en el transecto Durango - Mazatlán, que atraviesa una porción de la Sierra Madre Occidental. Esta área ya ha sido objeto de estudio en investigaciones previas, como las de McDowell y Keizer (1977), y Henry y Fredrikson (1987). La excursión permite observar, a través de los cortes de la carretera, las unidades geológicas en su secuencia estratigráfica, las cuales forman parte de la Sierra Madre Occidental Central. El recorrido se inicia en la zona norte de Durango y se extiende hacia la costa de Sinaloa. A lo largo de las 15 estaciones propuestas, los estudiantes podrán identificar la evolución geológica de la región, así como los principales episodios extensionales, evidenciados por las discordancias entre las ignimbritas y los pulsos de mineralización asociados.

I
INTRODUCCIÓN

1.1 La importancia de la Geología de México

En la enseñanza geocientífica existen diversas asignaturas de gran relevancia para los estudiantes. Algunas de estas materias integran herramientas específicas que facilitan la aplicación práctica de los conceptos teóricos impartidos en clase. No obstante, es importante realizar nuevos materiales educativos que contribuyan a mejorar la enseñanza de la geología.

En los planes de estudio de las carreras de Ingeniería Geológica e Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se incluye la asignatura de Geología de México, como parte integral de la formación para el profesionalista en ingeniería. El estudio de esta materia es importante debido a que necesitamos familiarizarnos con la información geológica de nuestro entorno, abarcando diversas regiones a lo largo del país.

Este conocimiento adquirido nos capacita para abordar eficazmente problemáticas relacionadas con las distintas ramas a las que nos incorporamos en nuestra vida laboral. Un ejemplo es la capacidad para enfrentar desafíos en la búsqueda y evaluación de recursos minerales, hídricos o energéticos.

La asignatura de Geología de México se imparte a través de exposiciones por parte de los profesores. A menudo se complementa con conferencias de especialistas de las diversas regiones del país, también, se realiza la lectura de artículos científicos y el análisis e interpretación de cartografía geológica a diferentes escalas.

Sin embargo, es importante destacar que aunque estos métodos proporcionan una base teórica sólida, a menudo resulta complicado complementar estos cursos con prácticas de campo significativas. Las limitaciones de tiempo y recursos hacen que sea casi imposible llevar a cabo excursiones geológicas extensas, que permitan a los estudiantes explorar directamente el amplio registro estratigráfico que respalda la evolución geológica y tectónica de México.

1.2 Los retos de las prácticas de campo



Figura 1. Estudiar una carrera en el área de Ciencias de la Tierra implica realizar observaciones y análisis detallados del terreno, actividad comúnmente conocida como práctica de campo. Fotografía: Lizbeth Santiago Rivera. Coordenadas: 19.113552, -99.19488. Fecha: octubre de 2023.

De acuerdo con la mayoría de los geólogos, "el campo" es esencial para la enseñanza y el aprendizaje en esta disciplina (Petcovic, Stokes y Caulkins, 2014), ya que permite a los estudiantes comprender cómo se aplica la geología a través de sus propias experiencias (Figura 1), asegurando la comprensión de conceptos que la teoría, por sí sola, no puede explicar con claridad. Propicia que el estudiante, por sí mismo, infiera e interprete los procesos que predominaron a través del tiempo a partir del registro geológico.

El enfoque tradicional de las escuelas de geociencias incluye prácticas de campo en los programas de estudio, siendo un elemento básico dentro de los mismos (Drummond y Markin, 2008). En las carreras de la Facultad de Ingeniería son consideradas para algunas asignaturas, en donde cada profesor crea la guía de campo para cubrir los objetivos del programa, sin embargo, la duración de la práctica y los recursos económicos necesarios suelen ser una limitante para el aprovechamiento de estas.

Una de las claves para el óptimo aprendizaje durante estas prácticas depende de la cantidad y calidad de los datos recopilados. Durante los días de campo, los estudiantes se enfrentan a diversas situaciones que ponen a prueba sus habilidades, tales como el uso de mapas topográficos, geológicos o especializados, la ubicación y utilización de GPS en el campo, la observación y descripción de

afloramientos, rocas específicas o estaciones designadas, el manejo del equipo geológico básico, la toma de datos y el registro de muestras, así como la capacidad para realizar interpretaciones basadas en las observaciones.

No obstante, llevar a cabo salidas al campo fuera de las aulas conlleva diversas complicaciones que deben abordarse para garantizar una experiencia segura y eficiente.

Entre los desafíos se encuentra la necesidad de gestionar adecuadamente los tiempos para programar las salidas, ya que muchas prácticas se llevan a cabo en los mismos lapsos y lugares. Con el objetivo de no perjudicar a los estudiantes, se coordinan las fechas entre los docentes para asignar los días de cada práctica.

El transporte que traslada a alumnos y profesores de las aulas al campo debe ser revisado con regularidad para prevenir accidentes o contratiempos. En algunas ocasiones, es necesario contratar compañías externas que proporcionen choferes y transportes capacitados, pues muchos de los afloramientos se encuentran en zonas de difícil acceso (Figura 2).



Figura 2. La ubicación de los afloramientos es una variable muy importante al considerar en la planeación, muchos de estos se encuentran en zonas de difícil acceso. Fotografía: Lizbeth Santiago Rivera. Coordenadas: 18.490546; -98.399284. Fecha: octubre de 2023.

La escasez de recursos destinados para las prácticas de campo es otro factor que limita las salidas. Además, la duración de estas ha disminuido en los últimos años, lo que puede restringir las actividades planeadas o bien, provocar que se realicen de manera apresurada.

Un aspecto relevante para la comunidad es la seguridad de las zonas que se pretenden visitar. Lamentablemente, el nivel de inseguridad en nuestro país a menudo limita el acceso a investigadores, profesores y estudiantes a regiones de importancia geológica. La última encuesta realizada por el INEGI registró un incremento del 61% en cuanto a la percepción de inseguridad por parte de la población mexicana (INEGI, 2024). Por otro lado, Control Risks menciona que México obtiene una calificación de media a alta en cuestión de seguridad, a menudo relacionado con el narcotráfico, pues en muchos estados hay presencia de crimen organizado (ControlRisks, 2024). Esta situación plantea desafíos adicionales para la planificación y ejecución de salidas al campo.

Finalmente, eventos de carácter especial como lo fue la pandemia derivada del Covid - 19 han puesto a prueba las herramientas desarrolladas para la enseñanza en línea. En este periodo, las prácticas fueron canceladas debido a las restricciones implementadas para minimizar los contagios, destacando así la necesidad crucial de contar con planes flexibles y adaptables para hacer frente a circunstancias imprevistas. El área de la educación fue afectada al implementarse modalidades a distancia que si bien, pueden funcionar para clases teóricas, no garantizan los mismos resultados en cuestiones de prácticas de laboratorio y en este caso, las prácticas de campo.

1.3 El avance tecnológico: las nuevas herramientas

En los últimos años, hemos sido testigos de un acelerado avance tecnológico, marcado por la constante aparición de herramientas innovadoras destinadas a mejorar nuestra calidad de vida. Este progreso implica actualizaciones en diversos

campos, la educación no es una excepción. La necesidad de adaptarse al uso de herramientas tecnológicas se ha vuelto imperativa, ya que no solo simplifica, sino que también aumenta la eficiencia de los procesos de aprendizaje.

En la actualidad contamos con dispositivos que simplifican la creación de contenido y ofrecen medios para su difusión. El sector educativo ha incorporado algunos de estos recursos con el objetivo de mejorar la formación de los estudiantes (Figura 3). Explorar otros enfoques de carácter innovador y tecnologías educativas nos permiten obtener experiencias de manera virtual o mediante simulaciones interactivas. Estas herramientas ofrecen una alternativa efectiva para complementar las clases teóricas, proporcionando la oportunidad de visitar virtualmente las provincias geológicas analizadas en clase y mejorar la comprensión a través de visitas virtuales a dichas regiones.

En este contexto, la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra está desarrollando, en el marco del proyecto PAPIME PE106422, una serie de excursiones geológicas virtuales. Esta iniciativa busca proporcionar a docentes, estudiantes e interesados la oportunidad de explorar, sitios de relevancia geológica en el país de la mano de especialistas.



Figura 3. La implementación de los drones ha contribuido un avance significativo en la creación de material docente que requieren de imágenes y videos que cubran grandes extensiones del terreno. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.756667; 105.424444. Fecha: abril de 2022.

Mediante el uso de imágenes satelitales y tridimensionales, textos, gráficos, mapas digitales, drones y el uso de archivos de audio y video elaborados con softwares

especializados, se han diseñado prácticas de apoyo para la asignatura de Geología de México. Este enfoque permite conocer las grandes provincias del país, ofreciendo un acercamiento a los diversos afloramientos y estructuras enseñadas en las clases.

En varias universidades, escuelas y asociaciones se han implementado como complemento a sus cursos de geología, excursiones geológicas virtuales (EGV) con el fin de apoyarse en el uso de herramientas tecnológicas para mejorar las experiencias ofrecidas, un ejemplo de esto es la Universidad del estado de Arizona con “Virtual Field Trips: Seeking answers through explotación”. Este sitio permite tener visitas interactivas con un seguimiento no lineal de distintos lugares (Ver Anexo 1).

El trabajo desarrollado en distintas plataformas nos brinda un panorama amplio de las diversas posibilidades que existen para abordar el tema de las visitas virtuales. Aunque muchas de ellas utilizan tecnologías con fines turísticos, también encontramos opciones que permiten visualizar el trabajo de campo llevado a cabo por geólogos de todo el mundo.

1.4 Historia, evolución y ejemplos

Diversos sectores han sido favorecidos por las excursiones virtuales. El turismo, por ejemplo, ha implementado visitas a diversas regiones del mundo. De igual manera, algunos museos cuentan con salas virtuales en donde se observa el contenido e información de las piezas del recinto.

No existe mucha información acerca de los orígenes de las primeras visitas virtuales, se sabe que este concepto desempeñó un papel fundamental en el desarrollo digital del siglo XX. Durante la primera ola de realidad virtual entre finales de los ochenta y principios de los noventa se crea la World Wide Web, sin embargo, las realidades física y digital, surgieron en primera instancia como entidades

separadas y competidoras, ya que, antes de la amplia difusión de los teléfonos inteligentes, la integración de las dimensiones reales y digitales de la vida era mucho más difícil de lograr de manera efectiva (Bowen y Giannini, 2014).

En el caso de los museos virtuales, se tiene un registro de este término a la par del nacimiento de la web, alcanzó su punto máximo en 1998 según los libros analizados mediante Google Books Ngram Viewer (Gaia, 1999). Los primeros objetivos de estas visitas enuncian que no se quería simular una visita real, más bien se buscaba que el sitio web sirviera como instrumento para preparar y profundizar la visita real, tal como lo mencionó el Museo de Ciencias de Milán.

La manera en la cual se le fue dado seguimiento a estos proyectos tuvo mucho que ver con las conferencias que permitían hablar sobre estas innovaciones, inspirando a otros a seguir sus pasos. También la emoción de los usuarios al encontrarse con algo nuevo sirvió para propulsar el desarrollo de las futuras visitas a los museos y también de abrirse camino a otros senderos hasta llegar a la época actual (Gaia et al., 2020).

Ahora bien, al hablar de las excursiones geológicas virtuales, podemos encontrar que Geological Society of America y Open University del Reino Unido crearon videos de salidas de campo, las cuales en primera instancia fueron muy atractivas visualmente, pero carecían de interacción con los estudiantes. Con el fin de corregir lo anterior, Optical Data Corporation crea algunos videos con contenido rico en imágenes y clips de movimiento diseñados para ser controlados mediante Hypercar2, un interfaz que permitía una interacción en donde el alumno puede controlar la información mostrada, pero no puede extraer información, modificar, añadir datos o interpretaciones (Harper, 1990).

En otras disciplinas se implementó el mismo concepto, por ejemplo, el Proyecto Vesalius de la Universidad Estatal de Colorado creó un laboratorio de anatomía

informatizado, donde se digitalizó un cadáver humano y el estudiante podía diseccionar el cuerpo (Roper, 1989).

En 1995 se crea un mapa geológico dinámico que proporciona más información cartográfica que su contraparte impresa (Condit, 1995). Con el crecimiento explosivo del internet y de la Word Wide Web se crean actualizaciones a los sistemas existentes. Con ayuda de los applets previstos por Java, complementos a los navegadores y otras mejoras a las extensiones, la web puede ofrecer una mejor calidad en audio, video y contenido multimedia en general de manera limitada y casi a tiempo real (Hurst, 1997).

Actualmente existen muchas maneras de llevar a cabo excursiones con enfoques científicos. Alrededor del mundo diversas instituciones se han dado a la tarea de incursionar en modelos de aprendizaje que permitan llevar el trabajo de campo a las pantallas de los estudiantes. Al final de este documento, en el Anexo 1, se presenta un resumen de algunas instituciones que han incorporado materiales virtuales en su enseñanza. Entre ellas se encuentran:

- Welcome to the columns of the Giants: Embark on a 360 - degree geologic expedition
- Virtual Field Trips: Seeking answers through exploration.
- Epicc Virtual Field Experiences
- e – Rock
- 3D GLG

En las redes existe un sinnúmero de catálogos geológicos y excursiones que muchas universidades han puesto en práctica.

La siguiente página muestra un listado de varias plataformas que cumplen con estas características:

[**80 Unique Virtual Field Trips**](#) 

1.5 Objetivos

Objetivo General

- Complementar la enseñanza de la asignatura de Geología de México que permita a los estudiantes comprender de una mejor manera los temas presentados en clase.

Objetivos Particulares

- Elaboración de una guía estática que contribuirá con un documento escrito más detallado de la Excursión Geológica Virtual (EGV).
- Proponer y señalar los elementos necesarios para el desarrollo de una guía estática.
- Observar y describir los afloramientos selectos en el transecto Durango – Mazatlán.



Figura 4. Práctica de campo en el Espacio Escultórico de Ciudad Universitaria. Las prácticas de campo presenciales no deben dejar de llevarse a cabo, es importante señalar que las nuevas tecnologías son un apoyo, no un sustituto. Fotografía: Lizbeth Santiago Rivera. Coordenadas: 19.318492, -99.182321. Fecha: octubre de 2023.

Es importante indicar que existen otros materiales docentes para complementar las clases de Geología de México. La colección de Excursiones Geológicas Virtuales se complementa con las “Cátedras Selectas de la Geología de México”.

Durante el confinamiento provocado por la pandemia, el Instituto de Geología junto a la Facultad de Ingeniería, transmitieron de manera virtual una serie de conferencias magistrales con especialistas, disponibles en línea a través del sitio web de la Facultad De Ingeniería: [Cátedras Selectas de Geología de México](#) o del Instituto de Geología de la UNAM: [Cátedras Selectas de la Geología de México](#).

1.6 Zona de estudio

Este proyecto se llevó a cabo a lo largo de la carretera Durango – Mazatlán, México (Figura 5). El transecto ya ha sido estudiado anteriormente en trabajos de McDowell y Keizer (1977) además de Henry y Fredrikson (1987). También, en excursiones geológicas que formaron parte de congresos de la IAVCEI (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior), GSA (Cordilleran Section of the Geological Society of America) y la AIMMGM (Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México).

La apertura de la nueva autopista Durango – Mazatlán, permitió que se llevaran a cabo versiones actualizadas de las excursiones anteriores, como ejemplo, las realizadas por Aranda - Gómez et al., (2015) y Ferrari et al., (2020), este último ha propuesto un nuevo modelo para la interpretación de la evolución geodinámica en la zona en sus recientes artículos (Ferrari et al., 2018).

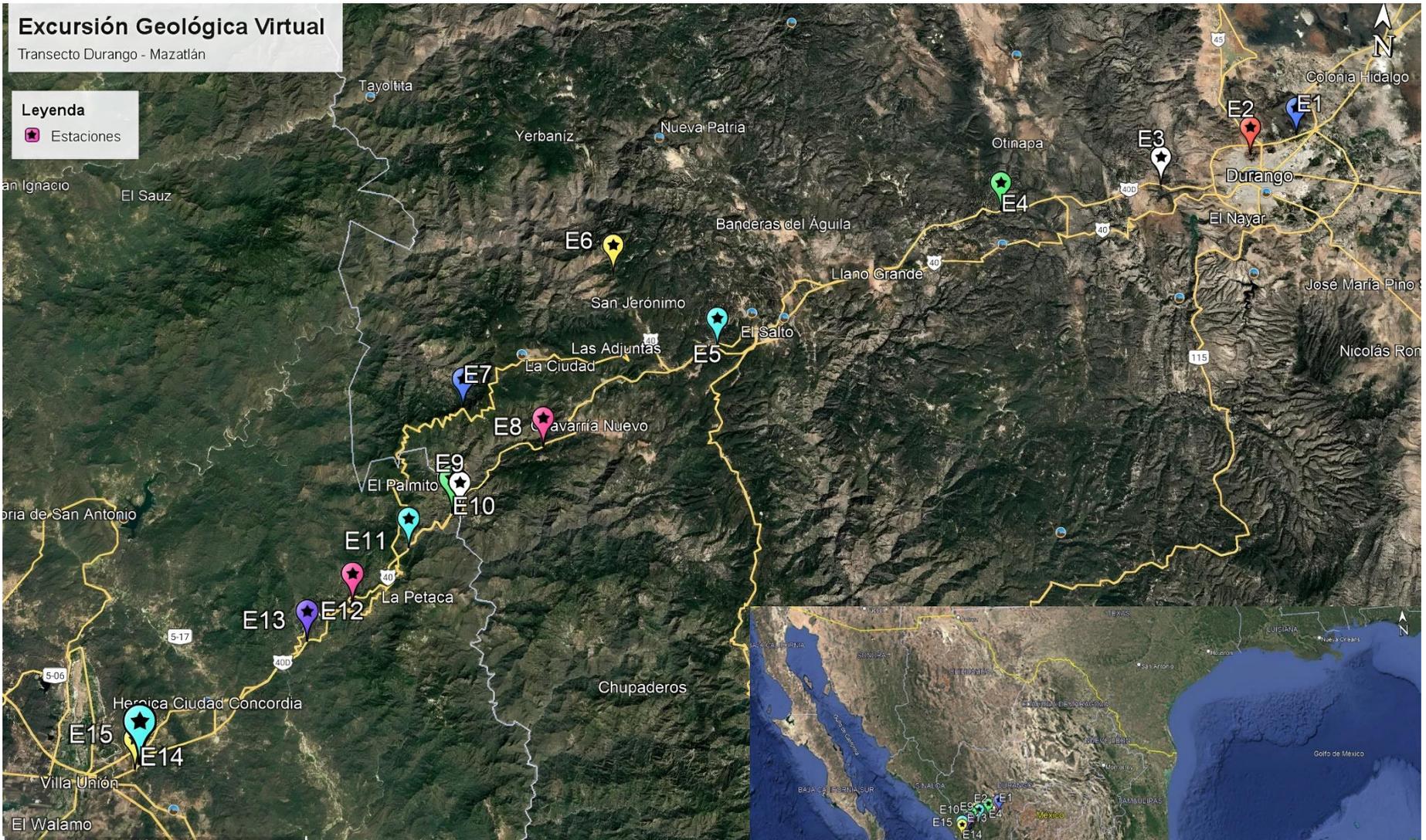


Figura 5. Zona de estudio en entorno Google Earth, las estaciones se marcaron con distintos colores para mejorar la distinción entre cada una. Esta excursión permite observar los afloramientos en los cortes de la carretera de las unidades geológicas en orden estratigráfico que forman parte de la Sierra Madre Occidental Central, comenzando desde la zona norte de Durango hacia la costa de Sinaloa, lo que nos permite identificar la evolución geológica de la región central, así como los principales episodios extensionales marcados por las discordancias presentes entre las ignimbritas y los pulsos de mineralización asociados. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.

II

METODOLOGÍA

La elaboración de la guía estática se llevó a cabo simultáneamente con la creación del mapa interactivo, este es un recurso en línea, parte de un repositorio de la página web de Ingeniería Geológica Asistida en GitHub, disponible en:

[EGV Durango - Mazatlán](#)

La inclusión de una guía estática busca optimizar la eficiencia de la excursión virtual, permitiendo su consulta en cualquier lugar sin la necesidad de utilizar muchos recursos, ya que puede descargarse en cualquier dispositivo y consultarse desde cualquier ubicación.

2.1 Elementos visuales

En esta guía fueron utilizados elementos visuales, algunos provenientes del material audiovisual que se obtuvo en la excursión con el especialista. Estos elementos permiten representar de forma accesible y dinámica aspectos del entorno geológico, favoreciendo una experiencia inmersiva y didáctica para el lector.

Las fotografías han sido un recurso ampliamente utilizado desde su creación. Permiten ilustrar descripciones y situaciones teóricas relevantes para que los estudiantes comprendan los conceptos tratados y visualicen espacialmente la teoría. A lo largo de la historia, la fotografía ha evolucionado con los avances tecnológicos, y hoy en día, hay muchos dispositivos capaces de capturar momentos con diversas características y enfoques. Los dispositivos móviles actuales pueden tomar fotografías con alta definición (Figura 6).

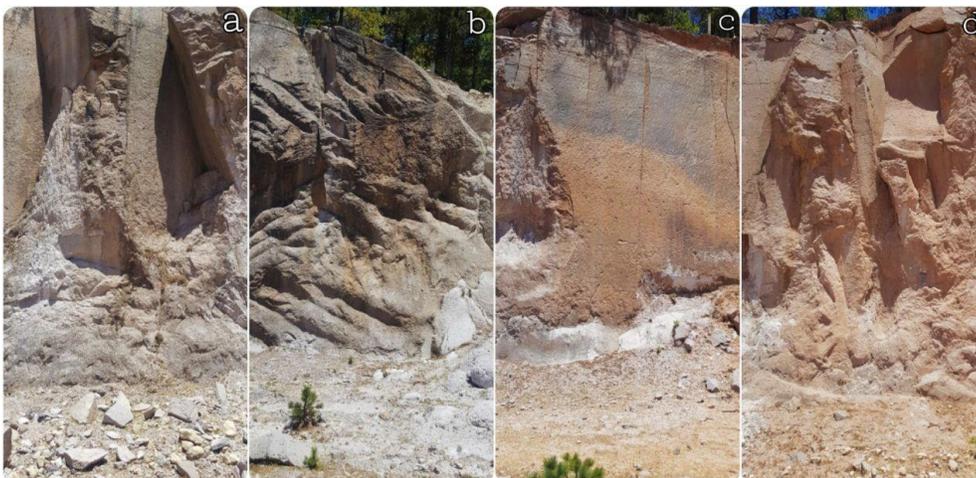


Figura 6. Los dispositivos móviles actuales son capaces de capturar imágenes en diferentes puntos de acceso, la resolución de las fotografías depende en gran medida de las características del equipo. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.756667; -105.424444. Fecha: abril de 2022.

Aunque es una manera fácil de capturar singularidades, es importante destacar limitaciones relevantes a considerar, como la calidad en condiciones de poca luz. Afortunadamente, las fotos tomadas con el dispositivo se realizaron en horas con buena iluminación evitando estas complejidades (Figura 7).

Sin embargo, la calidad varía fuertemente al acercarse o alejar la imagen, lo que limita algunos ángulos requeridos para las imágenes. Además, es esencial contar con una buena batería y capacidad de almacenamiento, ya que la calidad de la fotografía influye en su tamaño.



*Figura 7. Muestra rica en fragmentos líticos de tamaños variables, con cristales pequeños de sanidino, plagioclasa y pómez.
Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.756667; -105.424444. Fecha: abril de 2022.*

Una de las alternativas usadas en este proyecto para aprovechar las limitaciones anteriores es la creación de ortomosaicos fotográficos. Este es un recurso que se emplea para compartir imágenes de alta resolución, con las cuales se puede apreciar de manera interactiva los detalles de cada elemento del talud.

En la estación 5, se generó un ortomosaico disponible en la plataforma gigapan a partir de 58 fotografías, mismas que fueron procesadas en el programa Metashape de Agisoft con una resolución de 1 cm/pix, visualizar en: [Ortomosaico](#)

Para capturar imágenes de grandes extensiones, se recurrió a la fotografía aérea con drones (Figura 8). Estas fotografías muestran zonas más amplias de las regiones en las que nos encontramos. La perspectiva única proporcionada por un dron permite capturar imágenes desde alturas y ángulos difíciles o imposibles de lograr con otros dispositivos. La calidad es esencial, ya que los drones cuentan con cámaras de alta resolución que capturan imágenes nítidas y detalladas.

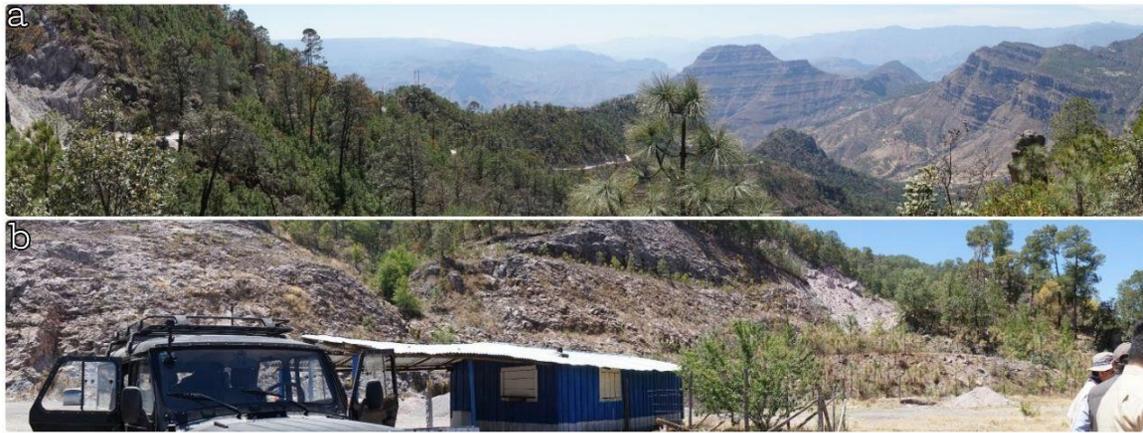


Figura 8. Ejemplos de fotografías panorámicas realizadas durante la excursión. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.848228; -105.574129. Fecha: abril de 2022.

Otra técnica utilizada fue la fotografía esférica, cuya principal característica es la inmersión completa de los espectadores, permitiéndoles explorar la fotografía desde cualquier ángulo. Esto proporciona una mayor interactividad con los estudiantes. A diferencia de las fotografías aéreas, las imágenes esféricas capturan por completo el entorno, proporcionando una visión completa de la escena (Figura 9). Sin embargo, en un primer plano, suelen deformar los bordes y ocupar más espacio de almacenamiento. Además, requieren de equipos específicos y procesamientos más complejos.

Es importante destacar que el uso de drones implica ciertas medidas para su máximo aprovechamiento. Las limitaciones de altitud en ciertas regiones afectan la calidad de las tomas, y es necesario considerar las condiciones meteorológicas y la fauna para evitar contratiempos. La duración de la batería también es un factor crucial, ya que el uso intensivo de recursos afecta directamente su funcionamiento.

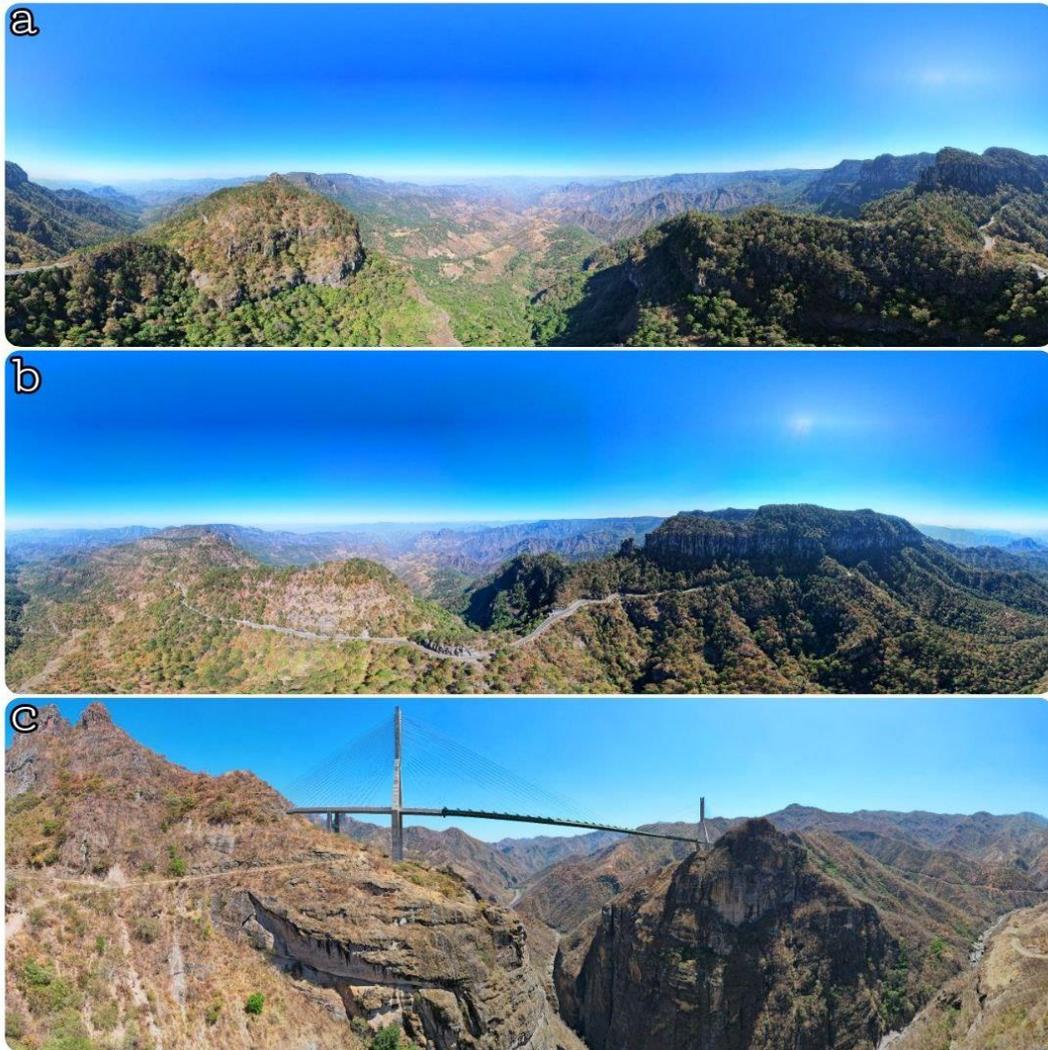


Figura 9. Ejemplos de fotografías esféricas realizadas durante la excursión. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.663266; -105.765511. Fecha: abril de 2022.

2.2 Elementos gráficos

En el área de las geociencias son usados elementos gráficos que facilitan la interpretación del contexto geológico analizado, al sintetizar información espacial y estratigráfica de manera precisa. Esta guía cuenta con algunos de estos elementos detallados a continuación.

Las secciones geológicas son ampliamente utilizadas en el ámbito de la investigación para ilustrar de manera gráfica y detallada, las capas geológicas de un área específica. Estas secciones permiten distinguir la litología, las estructuras geológicas y, en algunos casos, la presencia de tectónica a través de fallas o

pliegues en la sección. Para enriquecer la excursión, nos apoyamos en diversas investigaciones previas que complementan la información de cada estación (Figura 10).

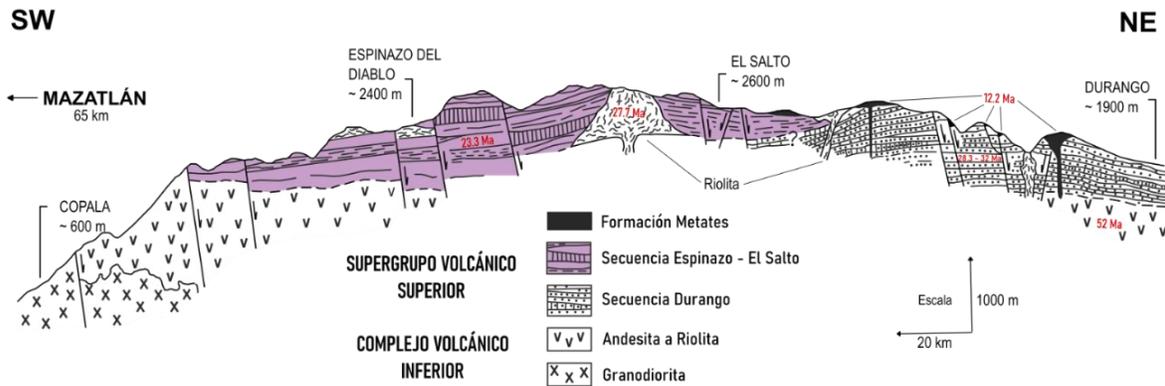


Figura 10. Ejemplo de sección geológica transversal esquemática a través de la Sierra Madre Occidental entre Durango y Mazatlán. Perfil y distancias horizontales tomadas a lo largo de la Carretera Nacional México 40 (modificado de McDowell & Keizer, 1977). Esta sección será utilizada más adelante en la estación 7.

Las columnas estratigráficas son fundamentales para obtener una representación vertical y secuencial de los estratos geológicos presentes en un lugar determinado. Es importante destacar que estas columnas son representaciones gráficas que facilitan la comprensión de la ubicación estratigráfica de cada estación y la relación entre los distintos cuerpos de roca.

Además, las columnas estratigráficas son herramientas valiosas para interpretar la historia geológica de una región y comprender la secuencia temporal de los eventos geológicos que han tenido lugar a lo largo del tiempo. Al integrar toda la información de secciones geológicas, mapas y datos de campo, obtuvimos una visión más completa y precisa de la evolución geológica de la zona.

El uso de mapas es fundamental para la ubicación precisa de las estaciones. Los mapas geológicos permiten delimitar las litologías dentro de un área, proporcionando no solo una ubicación espacial, sino también una perspectiva temporal de los procesos geológicos. En este proyecto se emplearon Sistemas de Información Geográfica (SIG), lo cual facilitó la generación de mapas representativos para cada estación de manera sencilla y eficiente (Figura 11).

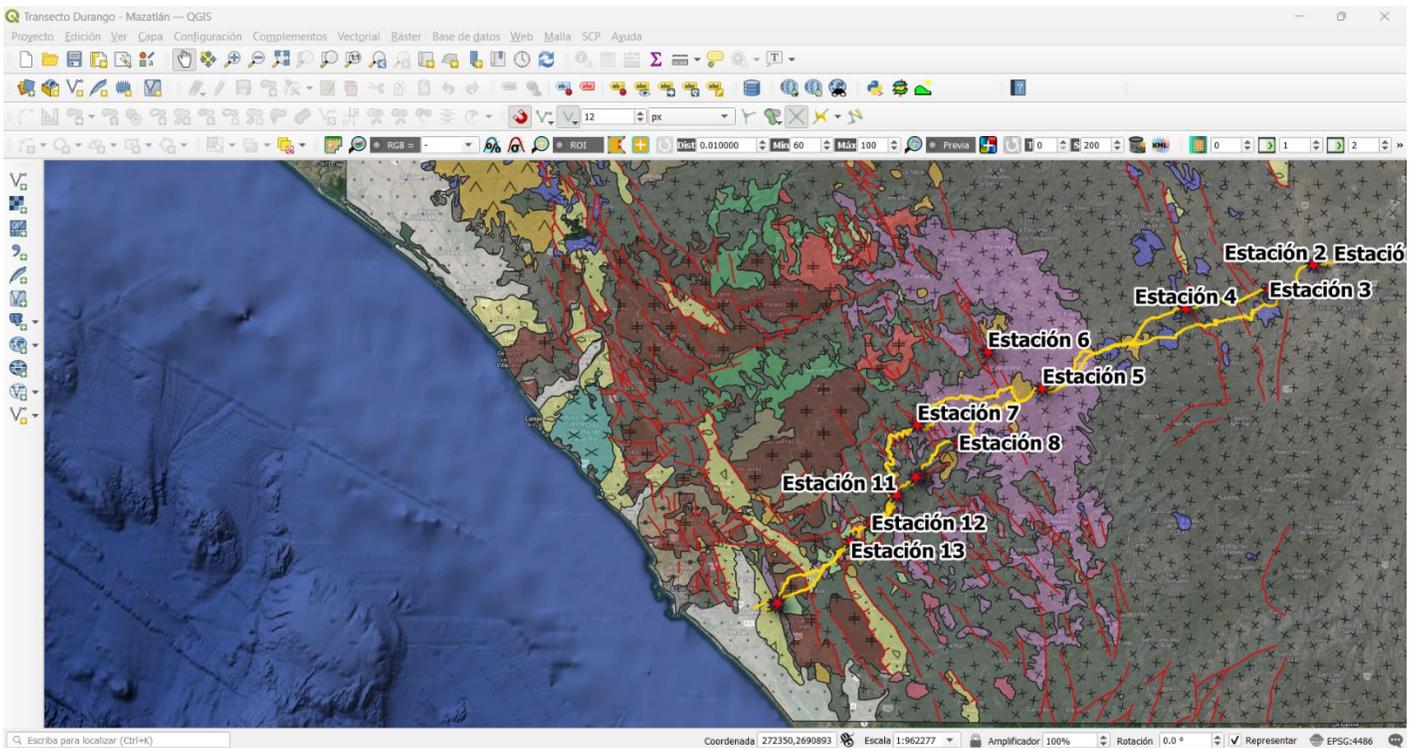


Figura 11. Interfaz de QGIS utilizada durante la elaboración de los mapas geológicos de la excursión. En la imagen se observa la disposición de capas vectoriales empleadas para la delimitación de unidades litológicas y elementos estructurales del área de estudio.

La edición de algunas fotografías se llevó a cabo mediante el uso de programas como Inkscape y Paint 3D. Estos softwares fueron empleados para incorporar detalles relevantes, como los contactos entre las sucesiones geológicas y otras características destacadas presentes en los afloramientos.

Considerar y utilizar diversos programas que ofrecen herramientas especializadas facilita significativamente nuestras explicaciones. Este enfoque tecnológico no solo optimiza los procesos de análisis, sino que también destaca el papel crucial que la tecnología desempeña en el ámbito educativo. La integración de estas herramientas tecnológicas nos brinda una perspectiva renovada sobre cómo la tecnología puede enriquecer y potenciar el aprendizaje.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que sintetiza las principales etapas del proceso metodológico seguido durante el desarrollo del proyecto. Esta representación gráfica permite visualizar de manera ordenada y concisa las herramientas mencionadas anteriormente.

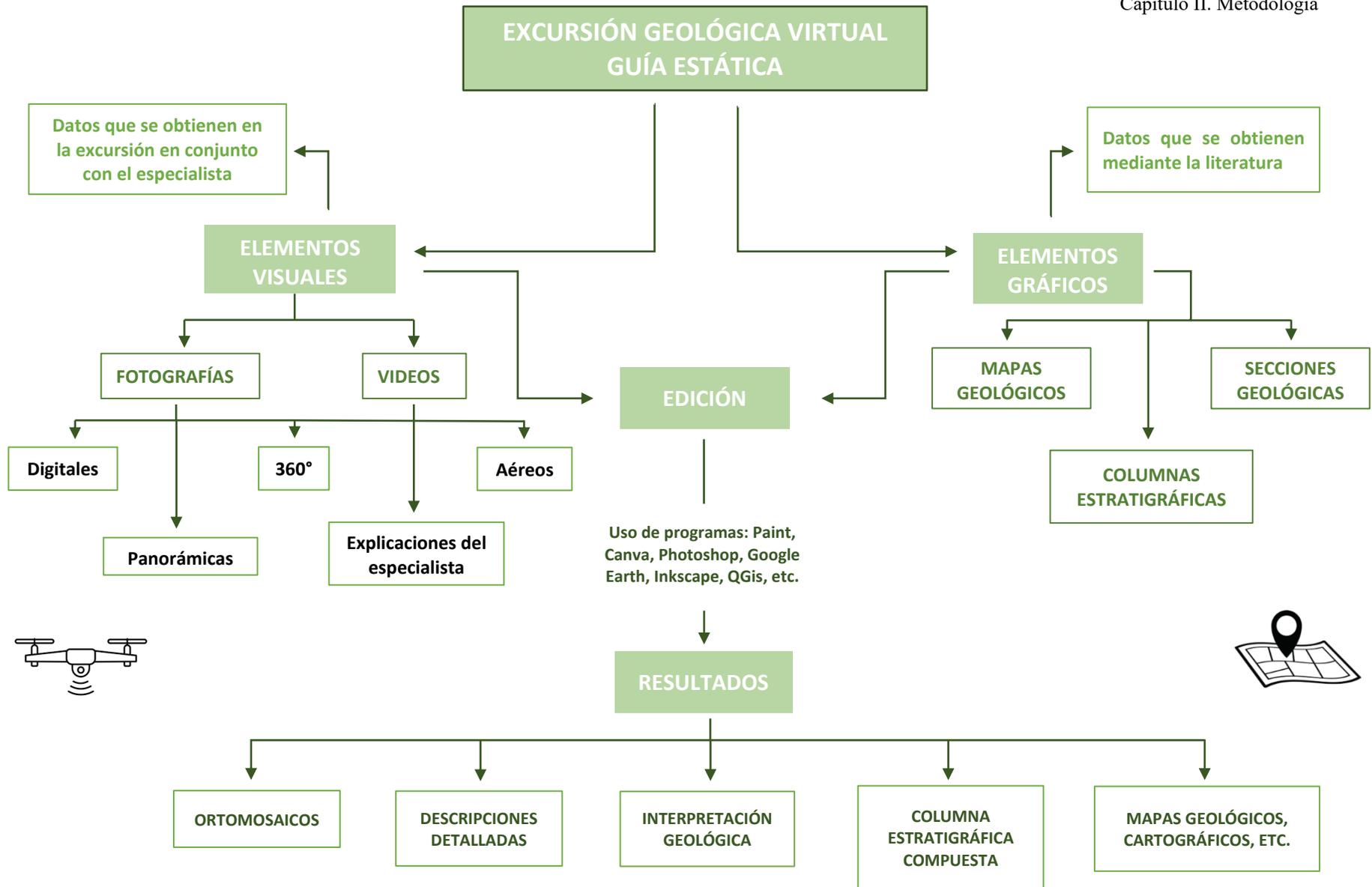


Figura 12. Diagrama de flujo que ilustra los tipos de datos obtenidos en una Excursión Geológica Virtual Estática. Se muestran los diferentes elementos visuales y gráficos usados, así como las herramientas de edición empleadas para la integración y análisis de la información.

III

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

El presente capítulo tiene el objetivo de proporcionar el contexto geológico general de la Sierra Madre Occidental, dentro la cual se desarrolla la Excursión Geológica Virtual (EGV) que forma parte del sector central de la SMO de acuerdo con la división de Ferrari et al., (2005).

La carretera Durango – Mazatlán atraviesa una serie de sucesiones de gran relevancia en el occidente de México. Importantes eventos tectono – magmáticos se han llevado a cabo en la región denominada como Sierra Madre Occidental (SMO).

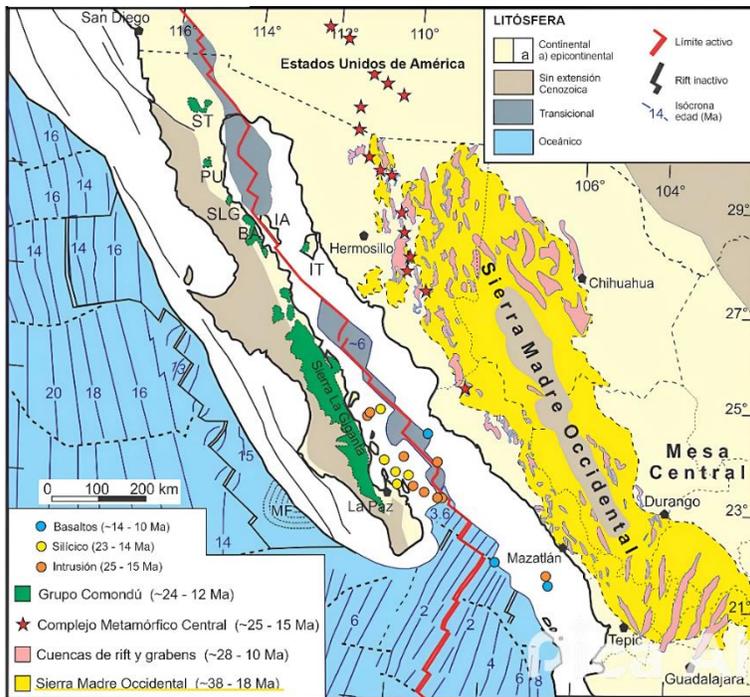


Figura 13. Mapa geotectónico que muestra los diferentes tipos de litósfera, la provincia ígnea silícea de la Sierra Madre Occidental y sus principales cuencas extensionales, la distribución del Grupo Comondú de Baja California y la litología de las muestras neógenas epicontinentales (modificado de Ferrari et al., 2013, y Duque-Trujillo et al., 2015).

La SMO es una provincia fisiográfica que abarca una extensión aproximada de 1200 km de largo y de 200 - 400 km de ancho, posee altitudes superiores a los 2000 metros sobre el nivel del mar. Se extiende desde la frontera con Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana, limita al oeste con el Golfo de California y al este con la Mesa Central. También se destaca como una provincia volcánica. Desde este punto de vista, se extiende más allá de la región fisiográfica y abarca parte del este de Chihuahua y la Mesa Central. Su característica distintiva son los grandes volúmenes de ignimbritas silíceas presentes en la zona (Figura 13) (Ferrari et al., 2005).

El transecto de la región Durango - Mazatlán que integra la EGV, permite observar gran parte de la columna estratigráfica.

3.1 Estratigrafía general

De manera general, se han distinguido cinco conjuntos ígneos principales citados a continuación:

Tabla 1. Conjuntos ígneos reportados en la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2005).

Complejo Volcánico Inferior (CVI), definido por McDowell y Keitzer, 1977.	Cretácico Superior – Paleoceno: se encuentran rocas plutónicas y volcánicas.
Supergrupo Volcánico Superior (SVS), definido por McDowell y Keitzer, 1977.	Eoceno: se originaron principalmente rocas volcánicas de composición andesítica, aunque también se encontraron algunas de composición dacítica y riolítica en menor medida.
Este conjunto forma parte de una extensión del cinturón de “Basalto - Andesitas del sur de la cordillera (SCORBA)”, definido por Cameron et al., 1989.	Oligoceno Temprano - Mioceno Temprano: se emplazaron ignimbritas silíceas en dos pulsos principales.
El último conjunto contiene vestigios de varios episodios de extensión que se asocian con la apertura del Golfo de California. Henry y Aranda-Gómez, 2000.	Después de cada pulso ignimbrítico, se produjeron coladas de lava de composición basáltica - andesítica.
	Mioceno Tardío, Plioceno y Cuaternario: se emplazaron coladas de basalto y depósitos de ignimbritas alcalinas en las áreas periféricas de la SMO.

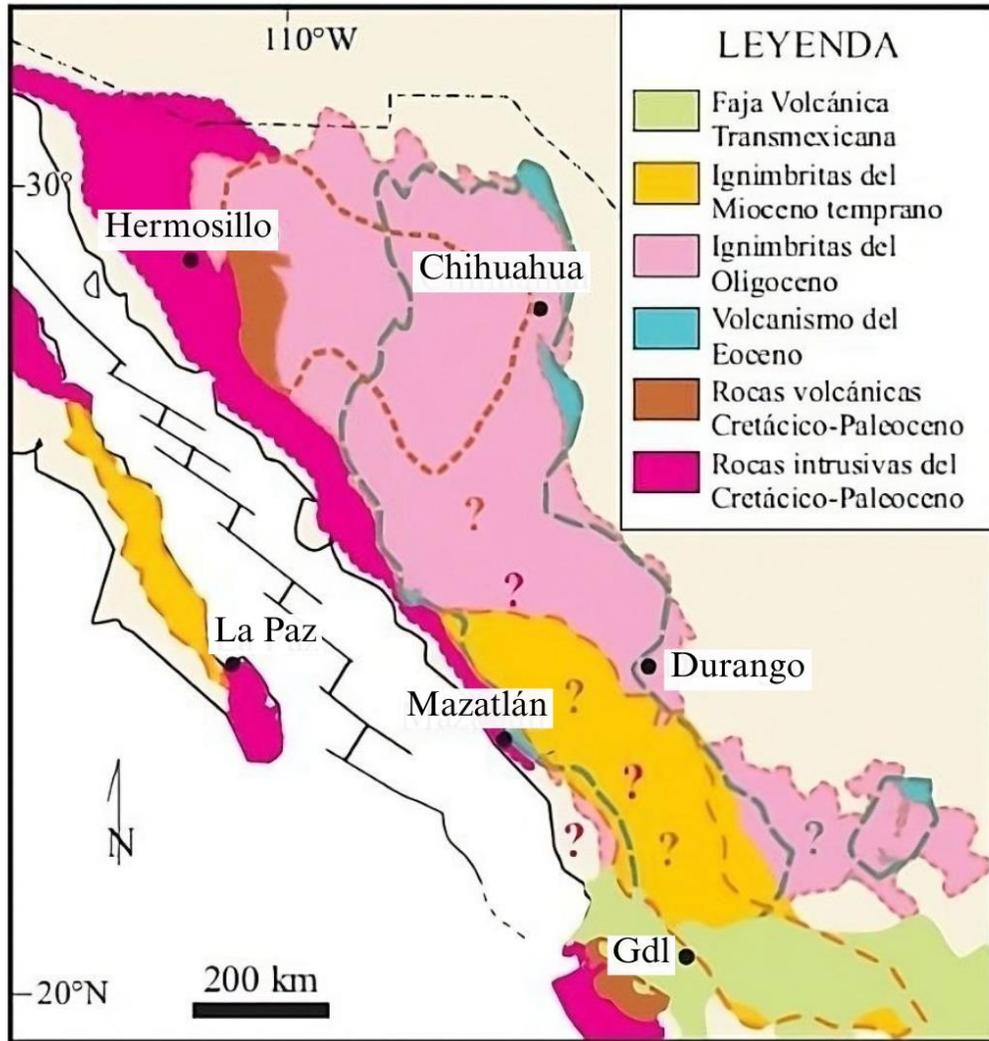


Figura 14. Extensión geográfica de la Sierra Madre Occidental. La distribución de los conjuntos del Cretácico - Eoceno se infiere a partir de la cubierta ignimbrítica del Oligoceno y Mioceno Temprano. Las escasas rocas volcánicas del Oligoceno en Baja California no se muestran debido a la escala (modificado de Ferrari et al., 2005).

El magmatismo se emplazó en un intervalo de 28 Ma (de los 46 a los 18 Ma) e incluye a los cuerpos plutónicos, las andesitas precursoras, las dos fases ignimbríticas principales y el emplazamiento de lavas máficas que recubren la secuencia (Ferrari et al., 2020). La actividad más joven registrada se relaciona con la extensión de las Sierras y Cuencas y la Provincia Extensional del Golfo de California (Henry y Aranda-Gómez, 1992; McDowell y Roldán, 1991; Ferrari et al., 2013).

La cobertura de rocas ígneas de la SMO se edifica sobre un basamento heterogéneo pobremente expuesto del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico.

1. Afloramientos de rocas ígneas – metamórficas precámbricas con afinidad al cratón de Norteamérica se reconocen en el noreste de Sonora. Rocas de edad grenvilliana (~1.0 Ga) se identifican en la parte centro – oriental de Chihuahua (Ruiz et al., 1988b; McDowell y Mauger, 1994).
2. Secuencias de rocas marinas cubren rocas cristalinas proterozoicas del norte y noreste del país, estudios indican que dichas secuencias corresponden a dos ambientes principales (Poole et al., 1991).
3. En la porción centro – oriental de Sonora, afloran rocas mesozoicas que consisten en una secuencia de sedimentos clásticos continentales y marinos del Paleógeno Tardío – Jurásico Temprano (Stewart y Roldán Quintana, 1991; Valencia Moreno et al., 1999).

Gran parte de la historia de la provincia se divide en dos periodos principales de actividad magmática continental.

Durante la orogenia Laramide se formó lo que hoy se conoce como Complejo Volcánico Inferior; rocas graníticas de tipo calcoalcalino del Cretácico y principios del Paleógeno, junto con rocas volcánicas relacionadas han sido registradas en el sur de Sinaloa y posiblemente en gran parte de la Sierra Madre Occidental (McDowell y Keizer, 1977).

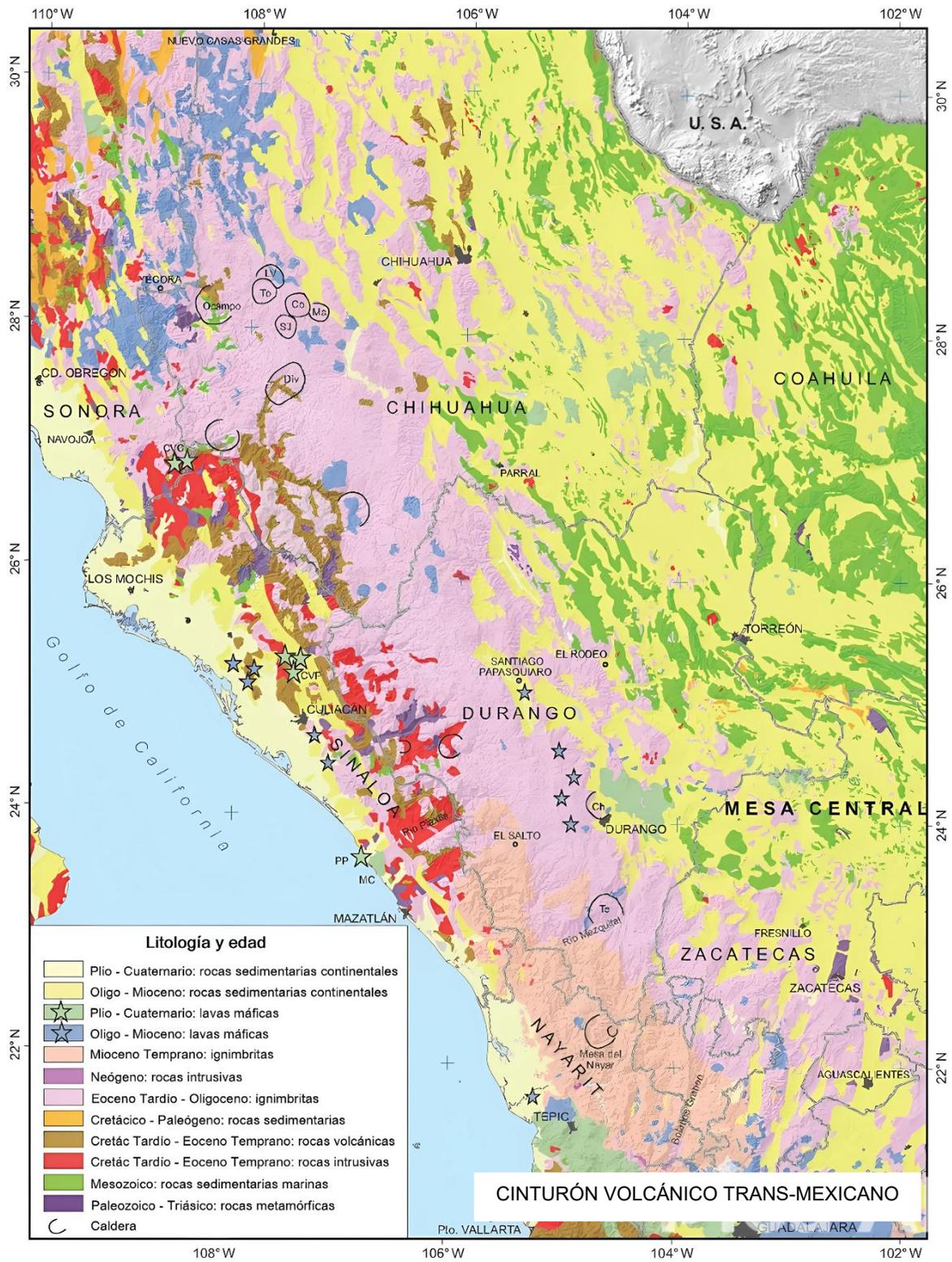


Figura 15. Mapa geológico simplificado de la Sierra Madre Occidental (SMO) y regiones adyacentes basado en el mapa geológico de México (Ferrari et al., 2008) (modificado según Ferrari y Luna, en prep., citado en Ferrari et al., 2020). MC = Mesa Cacaxtla, PP = Punta Piaxtla. Calderas: LV = Las Varas, To = Tomochic, SJ = San Juanito, CO = Comanche, MA = Manzanita, Div = Cañón Divisadero-Cobre, Ch = Chupaderos, Te = Temoaya.

Henry y Fredrikson, 1987 y Henry et al., 2003 clasificaron las rocas halladas en Sinaloa en dos grupos principales, cuyas edades disminuyen a medida que nos alejamos de la costa hacia el este – noreste.

Tabla 2. Características de las intrusiones descritas por Henry y Fredrikson, 1987; Henry et al., 2003.

Intrusiones sin – tectónicas	Intrusiones post – tectónicas
Tonalitas y granodioritas máficas con una débil foliación.	Granodioritas y granitos leucocráticos, que se distinguen más homogéneos masivos.
Han sido muestreadas cerca de la costa, a menos de 50 km.	Se encontraron en la parte epicontinental debajo de la provincia silícica.
Se emplazaron durante o antes de un episodio de compresión relativamente fuerte.	Se formaron después del episodio compresional.
Sus edades varían entre 101 y 86 Ma	Edades que varían entre 82 y 45 Ma

Las rocas volcánicas ubicadas generalmente en las barrancas del occidente de la SMO, al sur de Sinaloa, cerca de Tayoltita, Río Piaxtla, Río Presidio y Copala, se han clasificado como tobas, lavas andesíticas, lavas de flujo riolíticas, rocas sedimentarias volcanoclásticas e intrusiones hipabisales. Los flujos de cenizas y lavas riolíticas tienen edades que oscilan entre 77 y 69 Ma (U – Pb, Montoya et al., 2019). Los afloramientos de rocas riolíticas a lo largo de la carretera Durango - Mazatlán han registrado edades similares de 74.7 y 69.1 Ma (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en Ferrari et al., 2020).

En Tayoltita se tiene registro de conglomerados volcánicos, areniscas, lechos rojos y fangolitas que descansan sobre una sucesión andesítica (Montoya et al., 2019). Son parte de las formaciones Las Palmas y Camichín, cuyas edades de deposición van de 52.1 ± 1.4 Ma y de 43.2 ± 2.3 Ma respectivamente (Davidson, 1932; Henshaw, 1953). Por otra parte, en el valle del Río Presidio se han registrado depósitos similares, la preservación es deficiente a lo largo del Transecto Durango – Mazatlán, no obstante, en la estación 8 se podrá distinguir un depósito vulcanosedimentario, de flujos de lava andesítica, lechos rojos y conglomerados que fueron estudiados en Potrerillos y en la nueva carretera al este - noreste de Copala (Henry y Fredrikson, 1987).

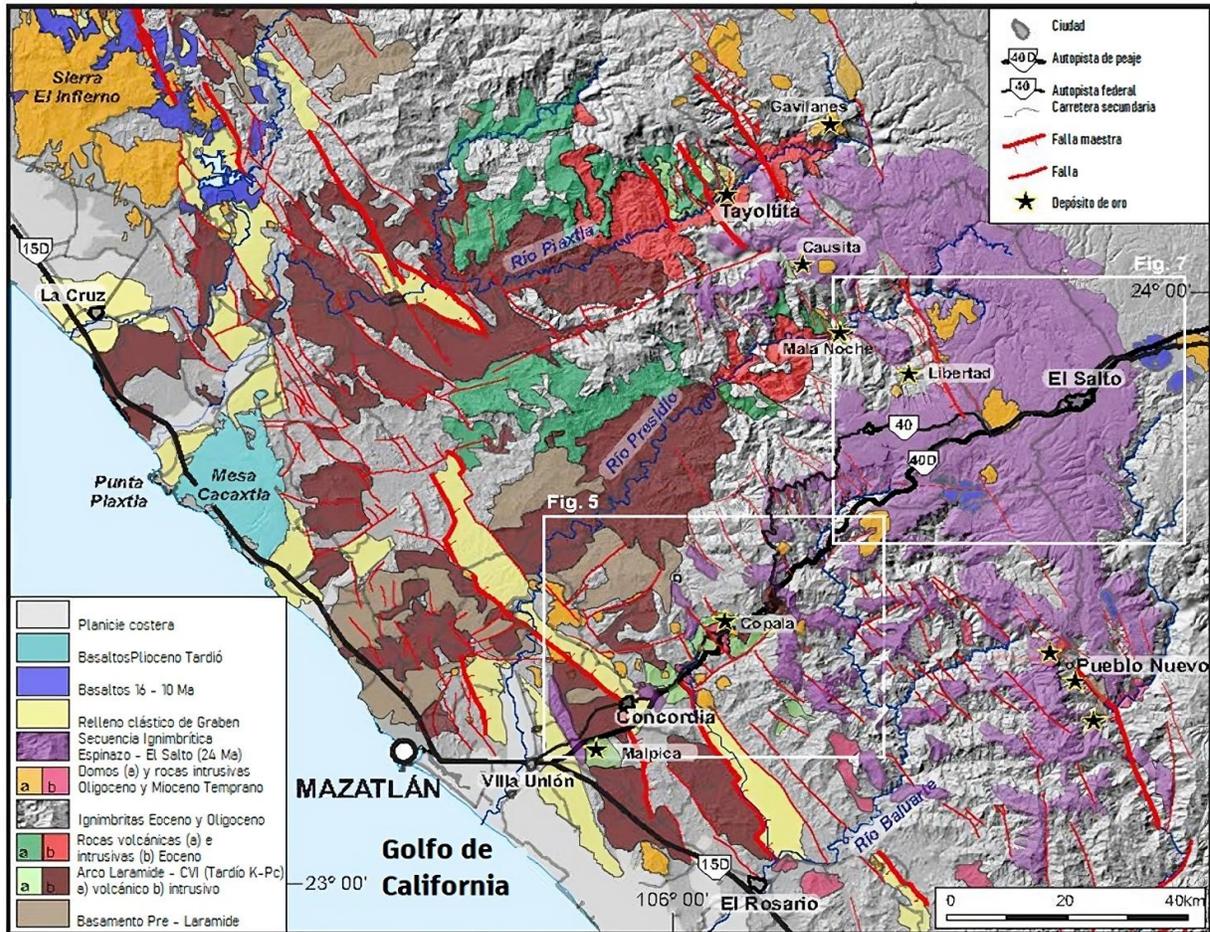


Figura 16. Mapa geológico regional del centro de Sinaloa y el extremo occidental de Durango con edades de rocas intrusivas. También se muestran las principales estructuras extensionales post-Eoceno y depósitos de mineral (modificado de Henry y Fredrikson, 1987; Ferrari et al., 2013; y Montoya et al., 2019).

Posterior a la orogenia Laramide, tuvo lugar un período de extensión de la corteza, acompañado por la emisión de ignimbritas riolíticas y lavas basálticas, lo que da lugar al Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Kaizer, 1977).

Este importante evento origina una de las más importantes singularidades de la SMO, convirtiéndola en la mayor provincia ígnea silícica que alcanza casi los 400,000 km² con su extenso apilamiento de ignimbritas (Aguirre et al., 2003) que se emplazaron en un corto periodo, alrededor de 38 a 28 Ma. En la porción sur, se registró una segunda fase entre ~24 y 18 Ma (Ferrari et al., 2002; 2013). Diversos estudios han revelado secuencias más antiguas (~40-50 Ma) y de edad oligocena (McDowell y Mauger, 1994; Aguirre-Díaz y McDowell, 1991; Gans, 1997; Loza-Aguirre et al., 2012) en el flanco oriental, lo que sugiere que durante el Eoceno hubo

una etapa de extensión similar a la del Oligoceno. El vulcanismo ignimbrítico persistió hasta al menos 23 Ma en la porción noroccidental de la Sierra.

Las secciones estratigráficas dentro de la UVS incluyen alrededor de 1000 m de ignimbritas riódacíticas a riolíticas, con lavas félsicas menores asociadas y delgados horizontes volcanoclásticos (McDowell y Clabaugh, 1979).

Se identificaron seis unidades cartográficas (Figura 17). La unidad A consiste en tobas de caída de cenizas e ignimbritas, las unidades B y C son lavas masivas basálticas y riolíticas, las unidades D, E y F pertenecen a una secuencia de ignimbritas, siendo D y F relativamente delgadas, mientras que E es una unidad masiva columnar (Waite, 1970).

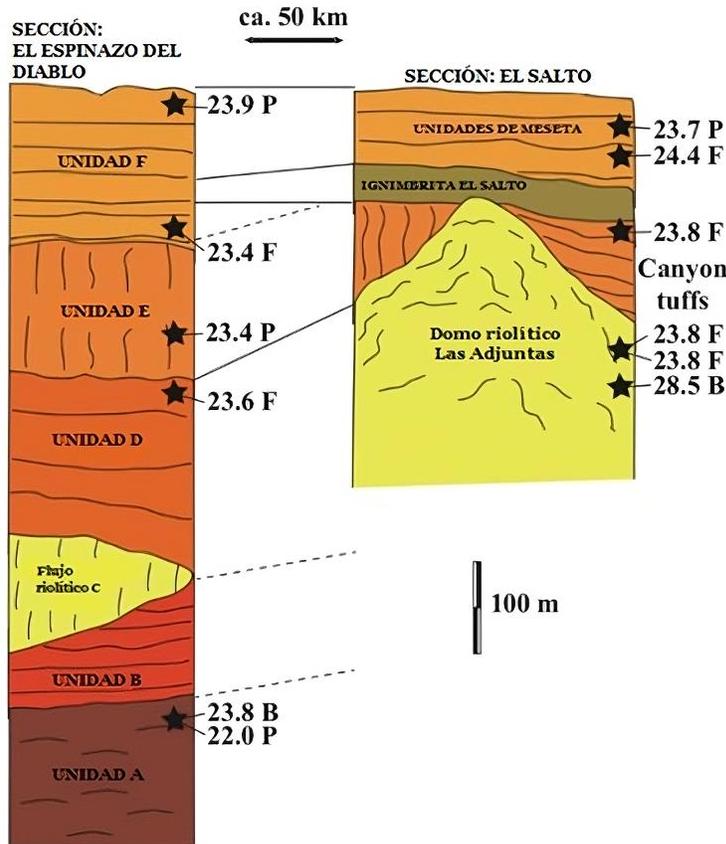


Figura 17. Columnas estratigráficas compuestas y generalizadas para las secciones Espinazo del Diablo (Waite, 1970) y El Salto (Wahl, 1973), mostrando correlaciones estratigráficas (modificado de McDowell y Keizer, 1977). Las edades K-Ar originales han sido recalculadas con las constantes de decaimiento de uso actual. F = feldespatos alcalinos, P = plagioclasa, B = biotita.

Se ha reportado una alineación de domos riolíticos con dirección NNW – SSE emplazados a lo largo del sistema de fallas extensionales Pueblo Nuevo – Tayolita.

El domo Las Adjuntas actuó como una barrera para el flujo lateral de unidades inferiores en la sección El Salto - Espinazo (Figura 18) (Ferrari et al., 2013). El sistema de fallas se emplazó antes de esta secuencia, lo cual puede explicar las variaciones en el espesor y probablemente ser la fuente de la erupción.

Trabajos recientes indican que la sección El Salto yace en inconformidad angular sobre ignimbritas y andesitas del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano (Ferrari et al., 2013).

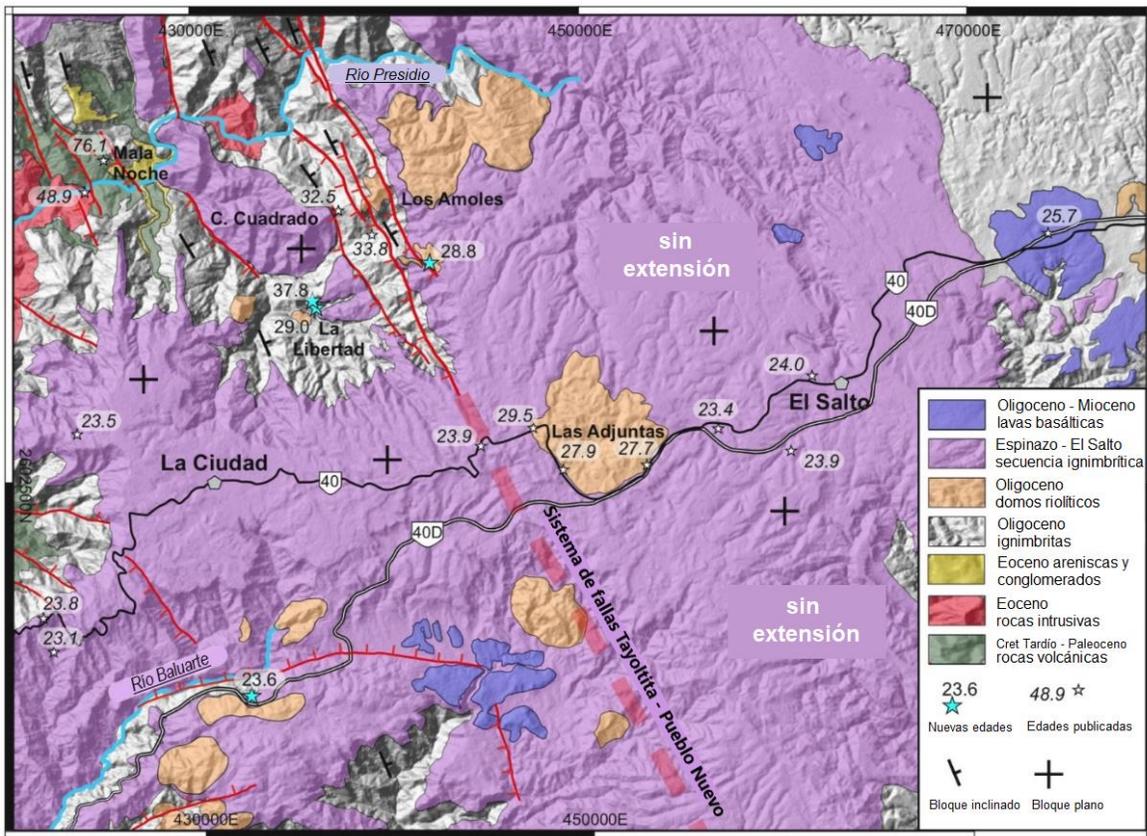


Figura 18. Mapa geológico de la parte oriental del transecto Mazatlán-Durango con edades publicadas y nuevas (modificado de Loza - Aguirre et al., en prep., citado en Ferrari et al., 2020).

Hacia el este de El Salto, las exposiciones son principalmente de las tobas del Cañón con un espesor de hasta 300 m. En el margen oriental de la sucesión, se distingue un cuello basáltico alterado, de al menos 200 m de espesor, con numerosas vesículas rellenas y brechas marginales (Ferrari, Orozco, trabajo no publicado, citado en Ferrari et al., 2020).

La secuencia alcanza la ciudad de Durango, donde se deposita sobre la Caldera de Chupaderos. Las partes más jóvenes de la secuencia se conservan al este de Navios, con flujos y tapones de ríolita, depósitos de caída de cenizas y tobas ricas en pómez cubiertos por basaltos de la Formación Metates (Ferrari et al., 2020). En la parte inferior de la secuencia volcánica de Durango, predominan las unidades del Complejo de la Caldera de Chupaderos (Swanson et al., 1978). Este complejo, con un diámetro estimado de 40 a 50 km, generó dos mantos ignimbríticos mayores y uno menor en tres episodios. La Formación Águila es una toba vítrea cristalina, se emitió inicialmente desde una zona central de chimeneas de 8 km de diámetro. Posteriormente, el colapso más extenso de la caldera dio lugar a una depresión que fue rellenada por la Formación Águila y la Formación Cacaria (Figura 19).

La Formación Cacaria es una combinación heterogénea de rocas volcánicas y sedimentarias, con potencial económico en yacimientos de casiterita y el conocido yacimiento de mineral de hierro del Cerro de Mercado (McDowell et. al., 2005).

Se depositó en conjunto con el resurgimiento de la caldera, conforme se aleja del centro de esta, la formación se engrosa, alcanzando un espesor de 300 m cerca de su margen anterior. La segunda gran erupción de la caldera resultó en la Formación Santuario, caracterizada como una toba soldada, gris clara y cristalina que aparentemente tuvo su origen a partir de un sistema de chimeneas distribuidas a lo largo de la caldera.

McDowell y McIntosh (2012) indican que el intervalo entre las erupciones pudo haber durado 15000 años. La actividad posterior involucra el origen de la Formación Santa María, una ignimbrita vítrea fina y densamente soldada, seguida por la erupción de basaltos desde el margen sur de la caldera interior. Las lavas máficas emplazadas representan al magma presente en los niveles más profundos de Chupaderos, por lo menos en las últimas etapas de su desarrollo (Ferrari et al., 2020).

La secuencia volcánica de Durango cuenta con una edad que oscila de 32 a 30 Ma (McDowell y McIntosh, 2012). Las rocas intrusivas contemporáneas al SVS están

expuestas en los cañones profundos y hacia la costa, con edades indicativas de un emplazamiento poco profundo en una corteza ya adelgazada (Duque-Trujillo et al., 2015). Estos plutones tienen composiciones químicas y edades similares a las ignimbritas y domos de la SMO meridional, sugiriendo fuentes eruptivas comunes (Ferrari et al., 2020). El magmatismo en Sinaloa y Nayarit retornó a una posición más occidental a finales del Cenozoico, siendo equivalente al Grupo Comondú de Baja California y otras rocas alrededor (Gastil et al., 1979; Hausback, 1984; Sawlan, 1991; Mora-Alvarez y McDowell, 2000; Umhoefer et al., 2001; Calmus et al., 2011).

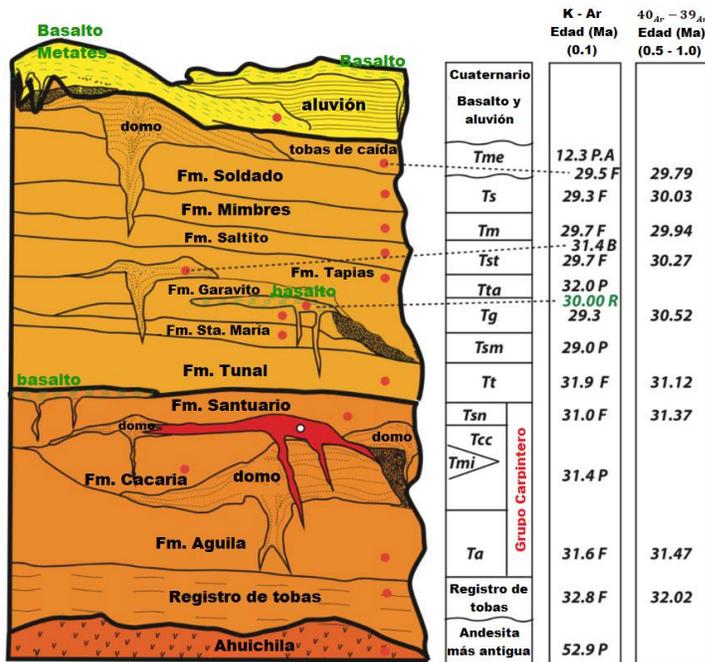


Figura 19. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia volcánica de Durango (modificada a partir de McDowell y Keizer, 1977). El espesor compuesto para la sección es de aproximadamente 1.000 m. Las unidades félsicas del Complejo de la Caldera de Chupaderos aparecen en naranja más oscuro por encima de la andesita de Ahuichila. Las edades K-Ar han sido recalculadas. F = feldespato alcalino, P = plagioclasa, B = biotita, A = anfíbol, R = roca total.

Posterior a la emisión ignimbrítica continuo un vulcanismo máfico. Estudios recientes han clasificado los conjuntos anteriores como SCORBA (Conjunto de Andesitas de la Cordillera Austral) y vulcanismo Na – alcalino máfico (Ferrari et al., 2018a), que entraron en una erupción simultánea entre 35 y 18 Ma en diversas áreas de la SMO.

Las teorías que sustentan el origen de este conjunto han sido debatidas por algunas observaciones:

1. Existe una amplia distribución del vulcanismo y su composición bimodal a lo largo del Oligoceno Temprano al Mioceno Medio, rasgo más típico de un magmatismo dentro de la placa en un entorno extensional que de un arco de suprasubducción clásico.
2. El mayor volumen de vulcanismo se produjo a lo largo de una amplia zona en la frontera entre Chihuahua y Sonora, donde los centros eruptivos están espacialmente asociados a grabenes que se extienden activamente.
3. La composición isotópica de las andesitas basálticas es demasiado evolucionada para ser el resultado de la fusión activa por fluidos de la cuña del manto (Cameron et al., 1980, 1989; McDowell, 2007; Vidal-Solano et al., 2008; González-León et al., 2010).
4. La falta de correlación de los valores más bajos de ϵNd con el aumento de los contenidos de SiO_2 aboga en contra de los procesos que implican la asimilación de la corteza continental.
5. Las características isotópicas descritas, junto con la falta de correlación con los contenidos de SiO_2 apuntan el origen de las SCORBA's a la fusión de la litosfera del manto con granate, metasomatizada por fluidos o fundidos derivados del slab (Vidal-Solano et al., 2008; González-León et al., 2010).
6. La señal geoquímica relacionada en los SCORBAs se considera heredada y no vinculada con la subducción en el Oligoceno - Mioceno (Ferrari et al., 2018^a), de hecho su distribución coincide con la extensión inferida del cratón proterozoico de Laurentia (Figura 20) (Ferrari et al., 2020).

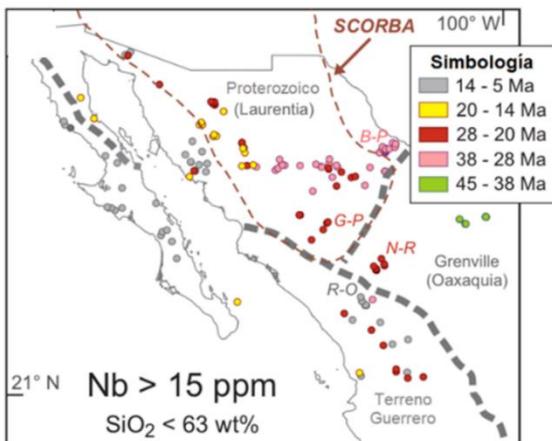
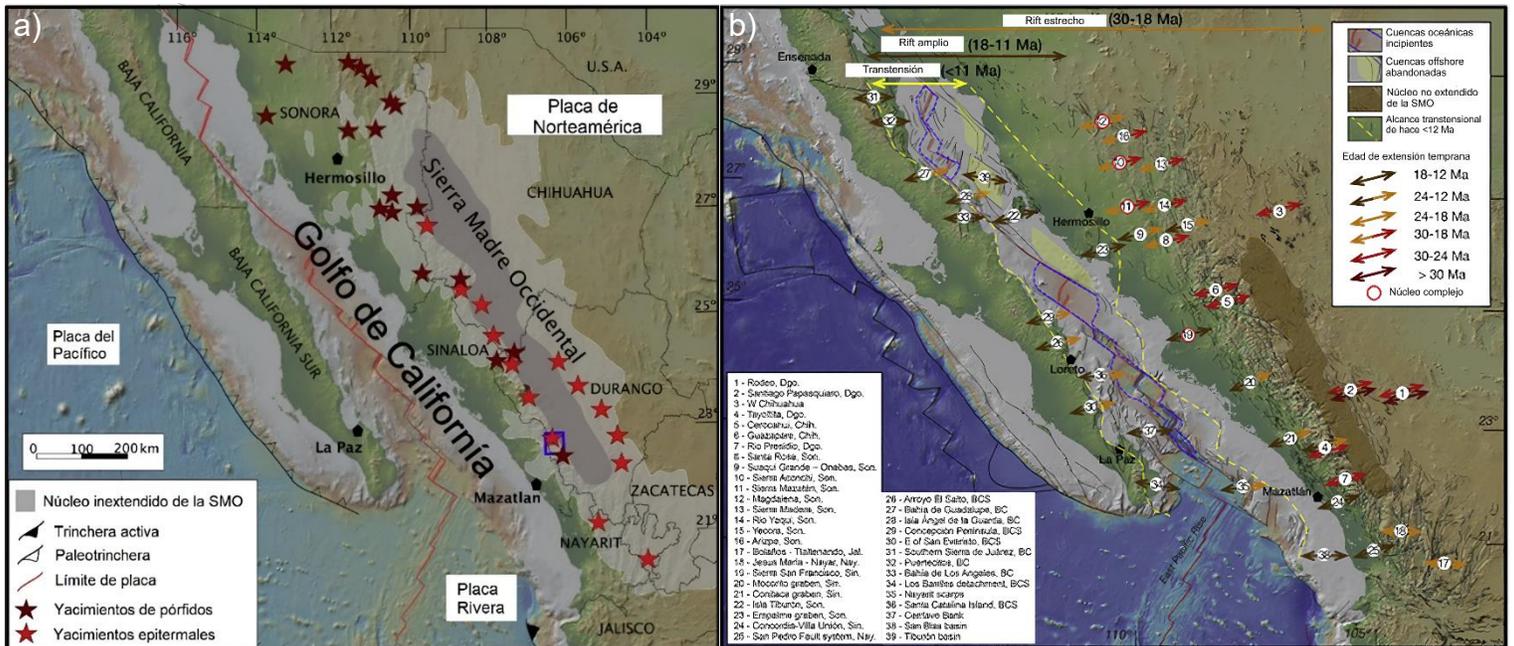


Figura 20. Distribución geográfica de rocas ígneas máficas con contenidos de Nb superiores a los típicos de los arcos relacionados con la subducción (> 15 ppm; Kelemen et al., 2014), lo que indica la fusión parcial de fuentes de manto enriquecido; la distribución del conjunto SCORBA estudiado por Cameron et al. (1989) también se indica con la línea discontinua correspondiente al basamento proterozoico de Laurentia (modificado de Centeno-García et al., 2011). B-P = área Benavides-Pozos; G-P = área Guadalupe Calvo-Parral; N-R = Nazas-Rodeo; O-R = Otinapa-Río Chico.

3.2 Contexto tectónico extensional

Una de las mejores zonas para estudiar los procesos de extensión de la corteza, sin lugar a duda es la región occidental de México. A finales del Eoceno comienza un prolongado periodo de extensión que afectó ampliamente el oeste del país, y que al final se concentra en la región del Golfo de California. La actividad transtensional que se vincula con el Golfo condujo a la ruptura de la litósfera después del Mioceno Tardío (Ferrari et al., 2018a). En el centro de la SMO existe un núcleo no deformado que marca el límite entre las Sierras y Cuencas Mexicanas al este y la Provincia Extensional del Golfo al oeste (Henry y Aranda-Gómez, 2000). Sin embargo, las estructuras extensionales muestran continuidad espacial entre estas provincias, por lo que no hay motivo de tal separación (Ferrari et al., 2013).



Eoceno – Oligoceno

Esta extensión inicia en el Eoceno en la Mesa Central y se extiende hacia la parte oriental de la SMO en Durango, formando parte de las Sierras y Cuencas Mexicanas (Aranda y McDowell, 1998; Ángeles Moreno et al., 2017; Ferrari et al., 2018a; Nieto Samaniego et al., 2019). El primer pulso forma el sistema de fallas San Luis – Tepehuanes (SLTFS), que atraviesa ambas regiones con una tendencia de ~N50W y una amplitud de ≥ 50 km, abarcando 700 km desde San Luis de la Paz en Guanajuato hasta Tepehuanes en Durango. Este sistema tiene numerosas fallas normales y albergan distritos mineros como Zacatecas y Fresnillo. Algunas de las fallas datan del Eoceno Tardío, siendo consistentes con la presencia de diques relacionados con un granito portador de turmalina de ~51 Ma en Sierra de Salinas, Zacatecas (Aranda-Gómez et al., 2007; Silva-Romo, 1996).

La extensión continuó en diversas áreas del centro y norte de México hace aproximadamente 30 a 32 Ma (Ferrari et al., 2018a). Se utiliza la orientación de los enjambres de diques y las vetas mineralizadas, perpendiculares a la extensión ENE, como un indicador de la edad en diferentes áreas. Ejemplos incluyen diques en el sur de Sinaloa con una antigüedad de hasta 32 Ma (Henry y Fredrikson, 1987; Henry, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Ferrari et al., 2013, 2018a), fallas normales al norte de Durango hace ~31 Ma y sistemas de vetas en el centro y norte de México con edades entre 31 y 26 Ma (Aguirre-Díaz; McDowell, 1993; Henry y Aranda-Gómez, 1992). Se sugiere que un pulso similar de extensión afectó gran parte del centro de México. Aunque el pulso del Oligoceno no se ha identificado en el norte de México, se ha documentado fallas normales y exhumación alrededor de 31 - 25 Ma en el rift del Río Grande en Nuevo México (Chamberlin, 1983; Rickett et al., 2015), sugiriendo que este pulso pudo haber afectado una gran parte de la provincia de Sierras y Cuencas Mexicanas (Henry y Aranda-Gómez, 1992).

Un temprano pulso de extensión impactó significativamente el centro de México, de edad aproximada entre 32.3 y 28.7 determinada a partir de una falla normal en el distrito minero de Pinos, sureste de Zacatecas (Aranda-Gómez et al., 2007). Además, la mineralización en Veta Madre en Guanajuato data de hace 30.2 Ma

(Martínez - Reyes et al., 2015). En el oeste de Durango, la mineralización a lo largo de las vetas con rumbo NNW en La Ciénega y Bacis se estima en 30 Ma (Ramírez - Salamanca, 2019).

Por otra parte, el pulso a finales del Oligoceno se ha registrado en el sur de las Sierras y Cuencas. Las áreas afectadas por fallas normales de alto ángulo incluyen el Canal de Salto, el suroeste de Arizona, Texas, Sonora y el extremo sur de la Sierra Madre Occidental (Kerr y Kidwell, 1991; Spencer et al., 1995; Henry y Price, 1986; McDowell y Roldán-Quintana, 1991; Nieto-Samaniego, 1999).

Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano

En el centro de Sonora se ha identificado la Formación Baucarit (King, 1939), que incluye depósitos epiclásticos y volcánicos que ocupan cuencas extensionales. Se reconocieron flujos de lava basáltica andesítica con edades entre 27 y 20 Ma, intercaladas con rocas sedimentarias en la base de la sucesión y cortados por fallas normales de alto ángulo (McDowell et al., 1997; González-León et al., 2000; Paz-Moreno et al., 2003).

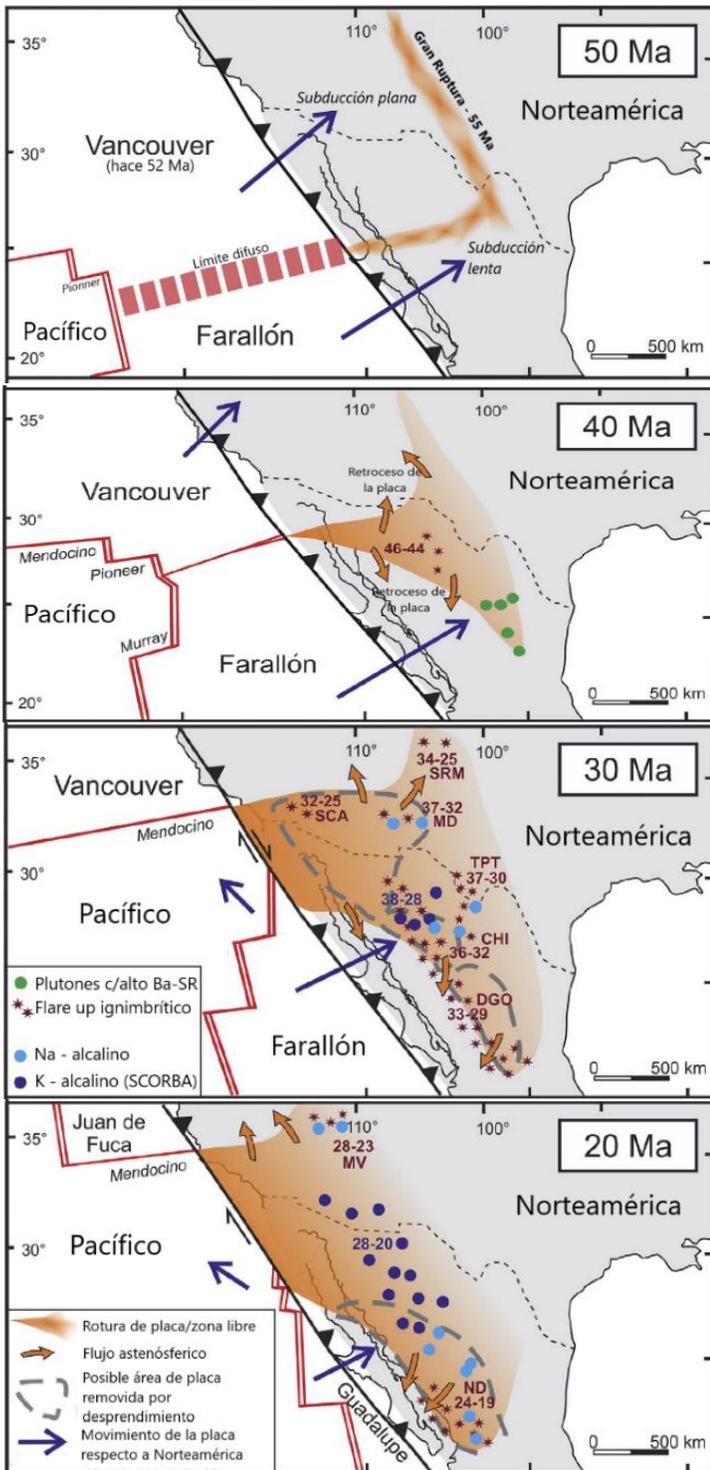
En muchas de las cuencas se distinguen domos de lava masivos y flujos de composición intermedia con fenocristales distintivos de anfíbol marrón, con edades de ~25-20 Ma (McDowell et al., 1997; González-León, 2010). Estas lavas entraron en erupción a lo largo de las fallas que limitan las cuencas, fragmentándose rápidamente ladera abajo y depositando material clástico grueso en las cuencas sedimentarias (McDowell et al., 1997).

Simultáneo al fallamiento, ocurrió una extensión de gran magnitud entre 25 y 15 Ma en Sonora (Nourse et al., 1994; Vega-Granillo y Calmus, 2003; Wong et al., 2010). Estas estructuras están alineadas en un cinturón con tendencia NNW que se extiende hacia el suroeste de Arizona, siguiendo el límite aproximado entre bloques inclinados al oeste, hacia la costa de Sonora e inclinados al este, hacia el centro de la Sierra Madre Occidental (Gans, 1997).

En el suroeste de Chihuahua, se ha documentado volcanismo y sedimentación sinextensional entre ~27 y 23 Ma (Murray et al., 2013, 2014). En

el occidente de Durango y Sinaloa, se observa una discordancia angular entre ignimbritas de ~32 - 30 Ma y la sucesión El Salto - Espinazo del Diablo de ~24 Ma. También se han reportado conglomerados intercalados con flujos de lava basáltica con edades entre 17.5 y 14 Ma en los grabenes Mocorito y Conitaca en Sinaloa, así como domos riolíticos con edades entre ~23 y 17.5 Ma emplazados a lo largo de fallas normales en Sinaloa y Nayarit (Ferrari et al., 2013). En el sur de Sinaloa, se ha documentado una discordancia angular entre ignimbritas de ~23 Ma y depósitos de grava que llenan la cuenca, con un dique máfico de ~11 Ma que atraviesa las gravas (Henry y Aranda-Gómez, 2000 y Aranda - Gómez et al., 2015).

3.3 Eventos geodinámicos



~55Ma: rotura plana de Farallón (Big Break de Sigloch et al., 2008), disminución de la contracción Laramide.

~52Ma: la placa de Vancouver se separa de Farallón a lo largo de un límite difuso al sur de la zona de fractura que intersecta el NO de México.

50-40Ma: El límite Vancouver - Farallón se estabiliza, la ventana del slab se ensancha lentamente por el retroceso en los bordes de las placas.

-La triple unión se desplaza hacia el norte en relación con Norteamérica.

46-44Ma: primera aparición de ignimbritas en Chihuahua.

45-35Ma: emplazamiento de rocas intrusivas con alto contenido en Ba - Sr en el NE de México.

36-30Ma: el desprendimiento de la anomalía W y, posiblemente, de otros fragmentos de placa más pequeños hacia el sur, remueven rápidamente la placa debajo del oeste de México.

Sobre el área libre del slab:

-Inicio de fallamiento normal (Sierras y Cuencas Mexicanas).

-Erupción de ignimbritas (sur de EE. UU. y la SMO).

-Emplazamiento de basaltos dentro de placa con fuente astenosférica (Na -alcalino) y litosférica (K -alcalino: SCORBA) (Chihuahua, Mogollón - Datil).

-30Ma: Primer contacto entre las placas del Pacífico y Norteamérica, inicio del límite de transformación.

28-20Ma: Fallamiento extensional generalizado en la SMO. Emplazamiento de grandes volúmenes de SCORBA en Chihuahua - Sonora y el sur de Arizona sobre el centro de la zona libre de slabs.

24-19(?)Ma: Desprendimiento del slab suroccidental de Farallón (anomalía del Golfo S de Sigloch et al., 2011).

Flare up ignimbrítico y emplazamiento de basaltos Na - alcalinos en el sur de la SMO y Marysvale.

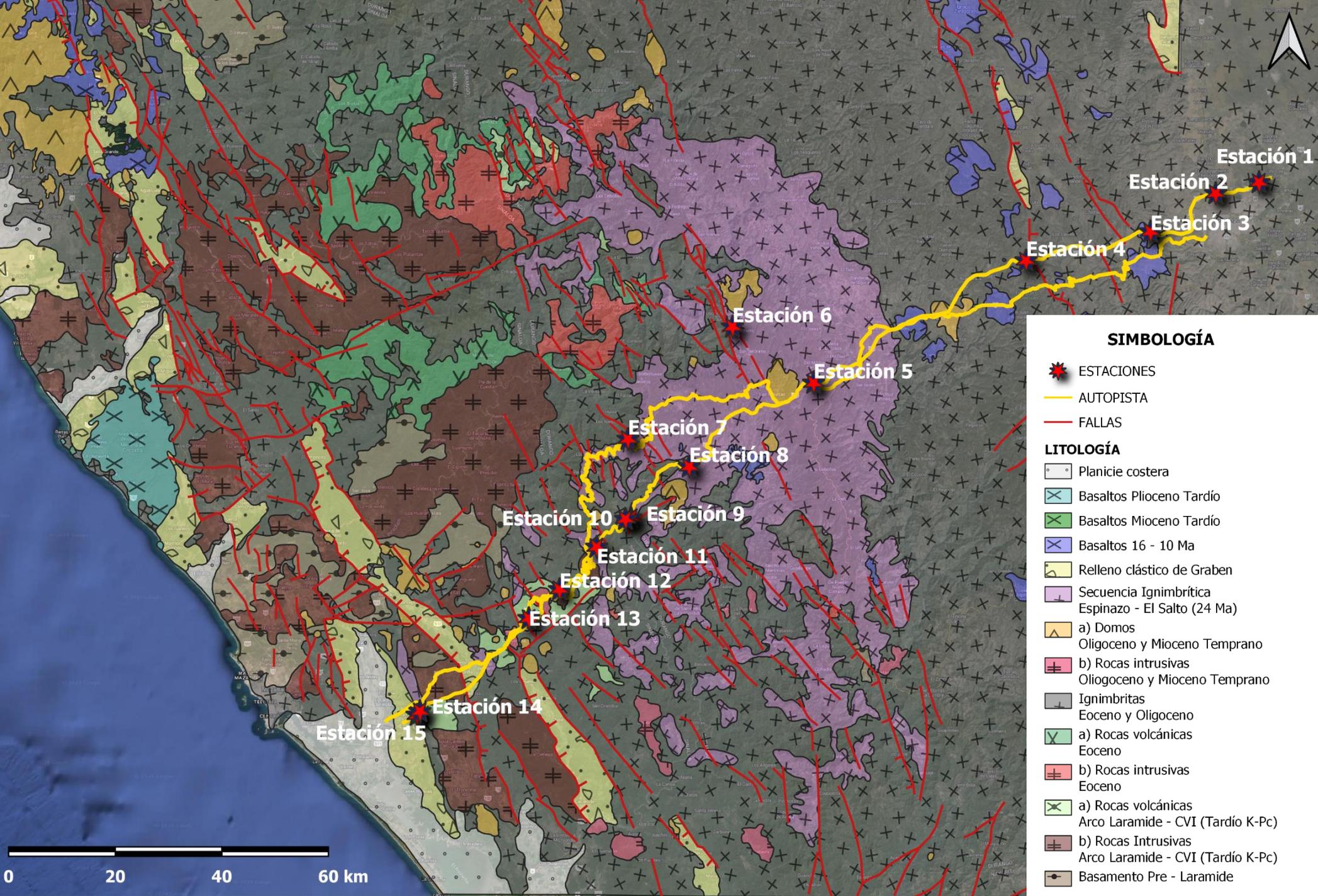
19-15Ma: La placa Guadalupe se separa.

Foco de ruptura en la zona del Golfo.

Figura 22. Contexto geodinámico y evolución tectonomagmática del suroeste de Norteamérica entre 50 y 20 Ma. Configuración de placas (modificado de Wright et al., 2016). Campos volcánicos: SCA = SW California-SE Arizona (Shafiqullah et al., 1980); MD = Mogollon-Datil (McIntosh et al., 1990); SRM = Southern Rocky Mountains (Lipman et al., 2015); TPT=Trans-Pecos-Texas (McDowell, 1979); CHI=Chihuahua (McDowell y McIntosh, 2012); DGO=Durango (McDowell y McIntosh, 2012); MV=Marysvale (Steven et al., 1984); ND= Nayarit-Durango (Ferrari et al., 2002). Las posibles zonas de desprendimiento de slabs se infieren a partir de anomalías rápidas visualizadas en la tomografía sísmica de Sigloch et al. (2008).

IV

EXCURSIÓN GEOLÓGICA VIRTUAL: Transecto Durango – Mazatlán Guía Estática



Representación del trayecto Durango - Mazatlán

Figura 23. Mapa geológico de la Excursión Geológica Virtual. En este mapa se muestra el trayecto recorrido, así como la litología y las estructuras presentes en la zona. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera con datos del Dr. Luca Ferrari.

ESTACIÓN 1

Ubicación:

Nos encontramos en la zona Norte de Durango cerca del poblado Mauricio Antonio Pinal.

Coordenadas: 24.085694; - 104.603533

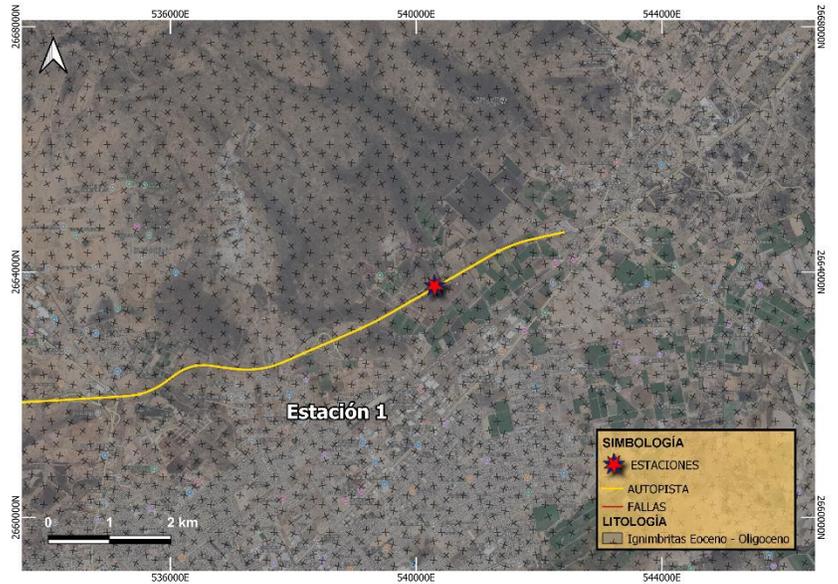


Figura 24. Mapa geológico representativo de la estación 1. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera. *

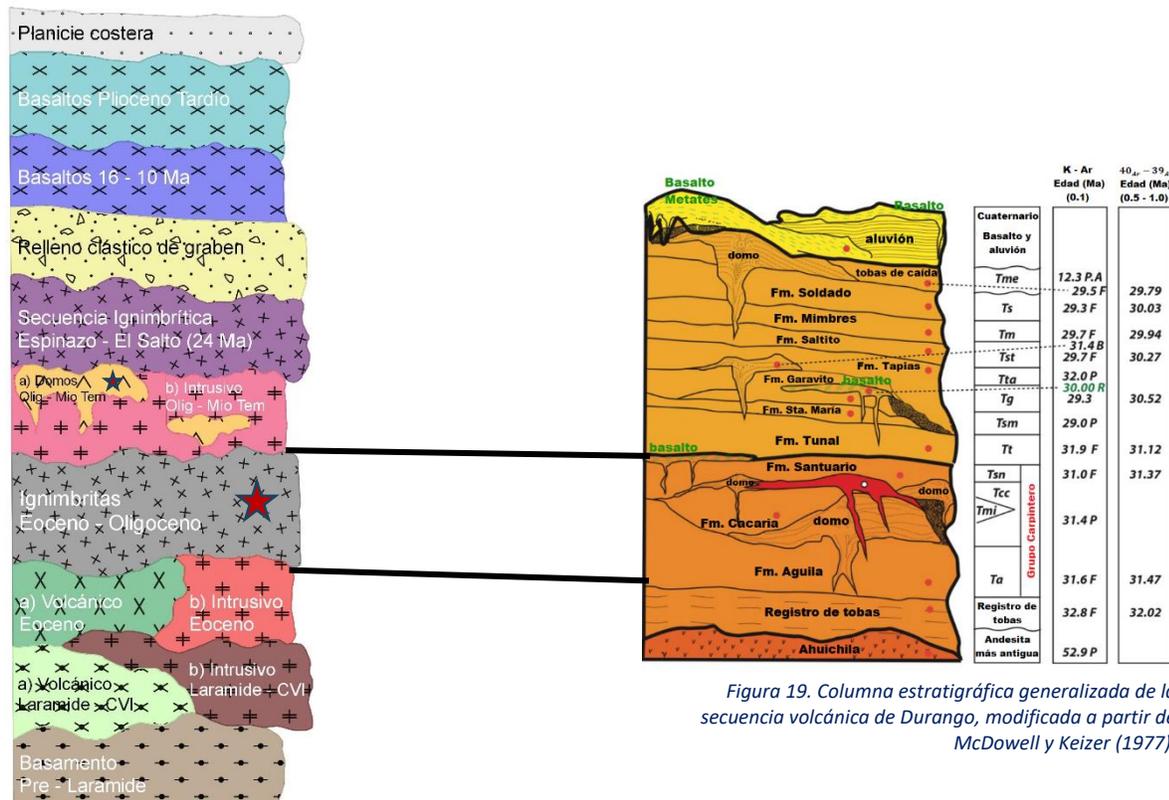


Figura 19. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia volcánica de Durango, modificada a partir de McDowell y Keizer (1977).

Figura 25. Columna estratigráfica interpretativa del Transecto Durango – Mazatlán.

*Debido a la cantidad de información vectorial, los mapas presentados en esta guía estática son ligeramente distintos a la versión web de la excursión.

Posición estratigráfica: Secuencia máfica más antigua relacionada con las ignimbritas de la Sierra Madre Occidental. Cubre a las Formaciones Águila, Cacaría y Santuario agrupadas como Carpinteros, definida así por Lyons en 1975.

Descripción: En el primer afloramiento observamos una secuencia volcánica bimodal de ignimbritas y basaltos. Se observan coladas basálticas de grano fino sin mucha autobrecha, que son parte de un escudo basáltico denominado Basalto Calera (Swanson et. al, 1978) y no poseen una química intraplaca.



Figura 26. Fotografía de las secuencias bimodales en el afloramiento. Se distingue un contacto marcado con otra unidad, así como la distinción entre las ignimbritas y los basaltos. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 24.085694; -104.603533. Fecha: abril de 2022.

Algunas ignimbritas tienen una edad aproximada de 31.5 Ma, se formaron a partir de una caldera cuya actividad se ha definido entre 31.5 – 31.3 Ma por el método Ar – Ar (McDowell et. al., 2005; McDowell y McIntosh, 2012). Posteriormente, se registran ignimbritas de 29 Ma provenientes de otras localidades.

En la secuencia predomina la componente máfica sobre las ignimbritas.



Figura 27. Las distinciones entre las secuencias ignimbríticas y basálticas suele ser bastante notoria en varios afloramientos. Incluso se distingue una inclinación posible resultado de un evento tectónico que afectó las unidades. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 24.085694; -104.603533. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: Las coladas basálticas se han correlacionado con los basaltos SCORBA (Cameron et al., 1989). Estos se atribuyen al inicio de la extensión de la SMO, aunque otros trabajos los relacionan con un vulcanismo de arco.

Los dos principales procesos para la generación de grandes volúmenes de magma silíceos son la diferenciación de basaltos procedentes del manto en combinación con procesos de asimilación cortical (AFC por sus siglas en inglés) y la fusión parcial de la corteza.

En la SMO se han propuesto ambos mecanismos de generación de los magmas silíceos, los procesos de la AFC principalmente por el grupo de Cameron et al., (1980) y la fusión parcial de la corteza inferior por Ruiz et al., (1988) al inicio de la primera fase extensional. Siendo esta última de las más utilizadas para explicar la formación de esta provincia geológica.

Algunos apartados que argumentan la hipótesis se citan continuación:

- Si el evento se encuentra asociado a una extensión y a la apertura de una ventana astenosférica, se origina magma máfico en el manto que posteriormente provoca fusión (anatexis) produciendo magmas silícicos al llegar a la base astenosférica y luego a la base de la corteza.
- Es importante mencionar que hasta el momento no se conoce una forma de producir grandes volúmenes de magmas silícicos en un periodo corto de tiempo, a no ser que se fusione la corteza.
- En condiciones ideales es suficiente una unidad de basalto para producir una unidad silícica por anatexis. En cambio, si se considera la cristalización fraccionada (AFC) como la responsable de la formación de esta unidad, se requerirían seis o siete unidades de basalto para producirla, lo cual en la SMO implicaría una fusión de casi todo el manto superior (Ferrari et al., 2018; 2020). Además, necesitamos tener indicios de cristalización de rocas de composición intermedia, es decir, además de los basaltos, poder observar andesitas, dacitas y riolitas en cantidades inferiores.
- Otro de los motivos que refuerza la teoría de la anatexis, se debe a las fallas extensionales que, en la mayoría de los casos, están relacionados con basaltos y que se logran distinguir en el afloramiento localizados en el borde de la caldera, pero en general los demás basaltos analizados en el sur de la SMO han sido asociados a fallas.

Estos procesos no son excluyentes uno del otro, es decir, pueden estar presentes en los mismos lugares. De manera tal que podamos observar distintas características que concuerden con ambas teorías a lo largo de todo el transecto que abarca la excursión.

ESTACIÓN 2

Ubicación: Nos encontramos en el Cerro del Mercado, cerca del poblado Guadalupe.

Coordenadas: 24.054845; -104.672131

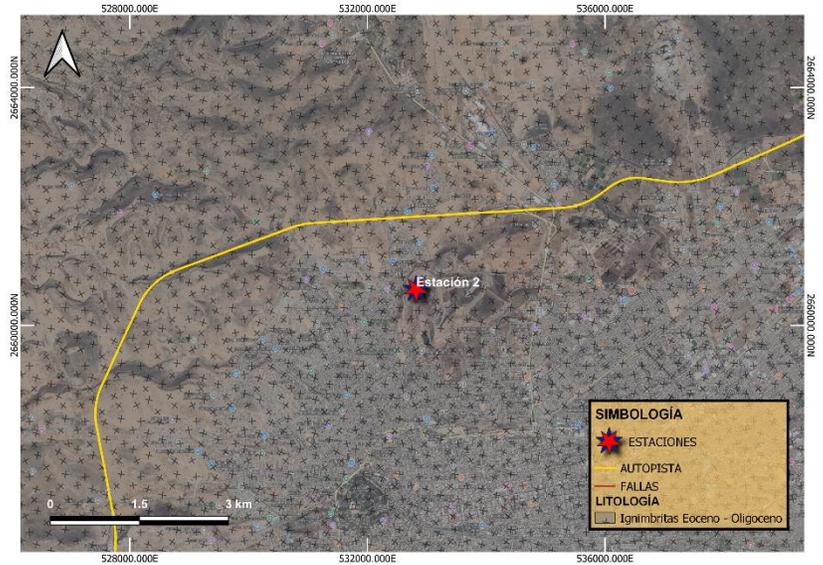


Figura 28. Mapa geológico representativo de la estación 2. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Posición estratigráfica: Formación Cacaria, parte del Grupo Carpinteros.

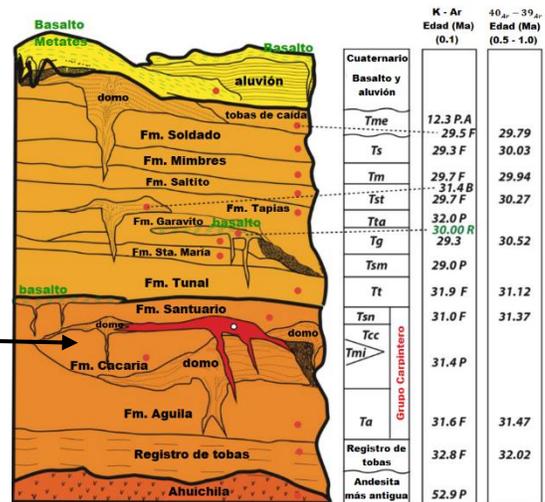


Figura 19. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia volcánica de Durango, modificada a partir de McDowell y Keizer (1977).

Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Descripción: En los tajos del Cerro del Mercado se observan los vestigios de un yacimiento de hierro, que se encuentra en la fase terminal de explotación. Este yacimiento es conocido en todo el mundo como un ejemplo clásico de *yacimiento de óxido de hierro - apatito (IOA)* y también, es probablemente la localidad más prolífica en términos de fluorapatito en calidad gema (Young et al., 1969; Corona-Esquivel et al., 2018).

Destacado como uno de los principales depósitos de hierro en México, su historia de explotación se remonta a 1828. Por sus características texturales, mineralógicas y de resistencia a la alteración, se ha categorizado como un depósito de origen magmático (Corona et al. 2009).



Figura 29. Vista panorámica de los tajos del Cerro del Mercado. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 24.054845; -104.672131. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: El yacimiento de IOA del Cerro de Mercado se asocia principalmente a una intrusión silícica subvolcánica que es parte de la Formación Cacaria, y que se asienta en la Caldera Chupaderos.

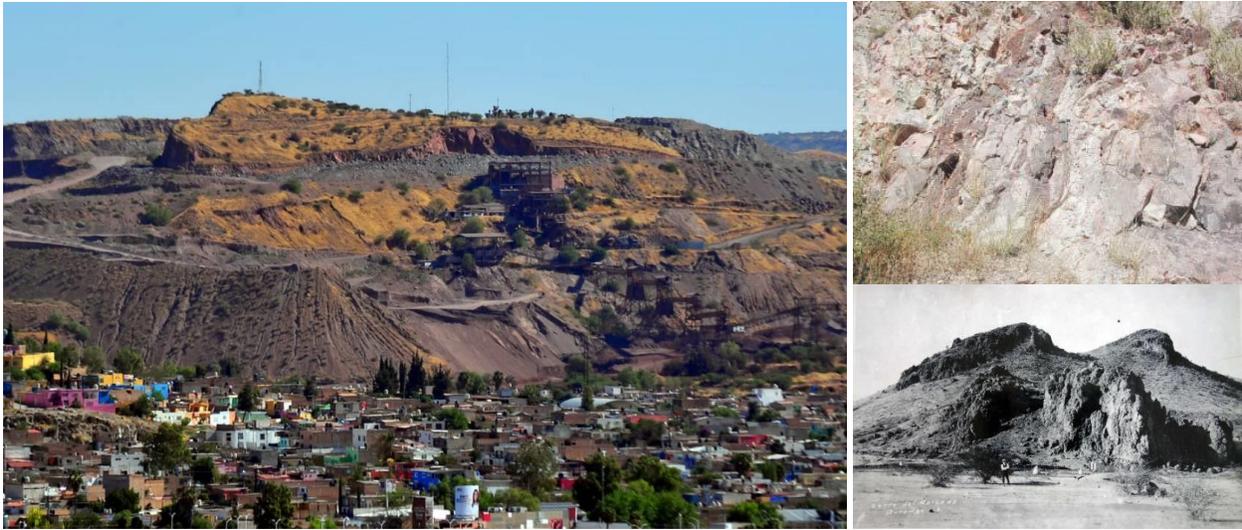


Figura 30. Fotografías obtenidas en web del Cerro del Mercado. Fotografía: El Sol de Durango. Fecha: Julio de 2023.

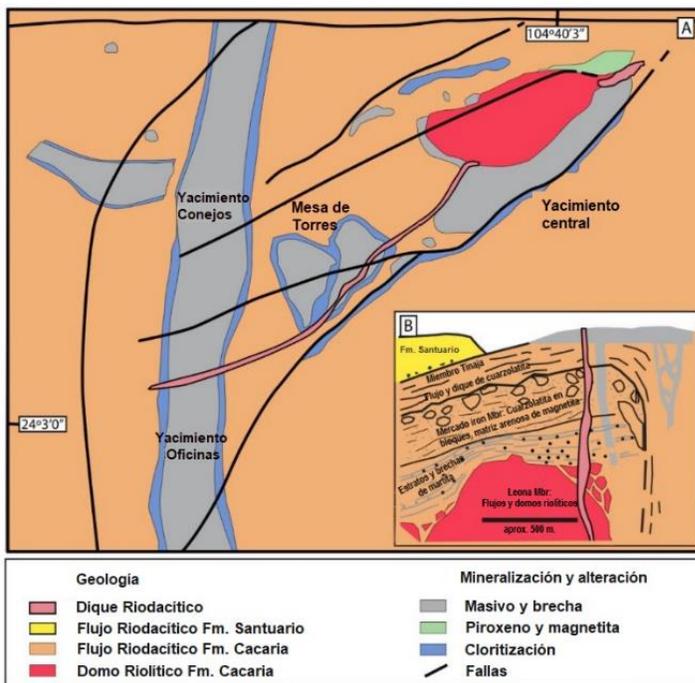


Figura 31. (A) Mapa simplificado geológico del depósito del Cerro de Mercado. (B) Secuencia estratigráfica del Cerro del Mercado (modificado de McDowell et al., 2005).

Los productos volcánicos de la caldera descansan a través de una discordancia de tipo inconforme sobre unidades plegadas de calizas del Cretácico, con algunas intercalaciones locales de conglomerados discontinuos (Conglomerado Ahuichila) y flujos de andesita del Eoceno (McDowell et al., 2005).

El depósito está cortado por diques riodacíticos fechados en 28 Ma. La edad mínima del yacimiento ha sido asignada por la formación Cacaria del Oligoceno, entre 34.5 y 31.4 Ma mediante el método Ar-Ar (McDowell et al., 2005).

Un detalle interesante es que los flúor-apatitos del yacimiento han sido utilizados como marcadores estándar a nivel internacional para fechamientos.



Figura 32. Flúor-apatito en matriz, calcedonia y martita. Cerro del Mercado, Durango. Fotografía: Mercadillo de rocas.

ESTACIÓN 3

Ubicación:

Se continua en la zona Norte de Durango cerca del poblado Dieciséis de Septiembre.

Coordenadas:

24.005217; -104.804024

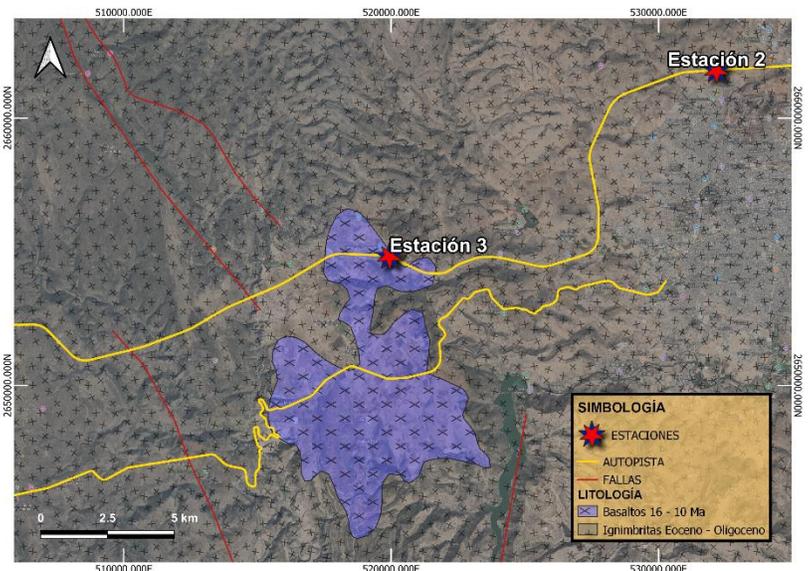


Figura 33. Mapa geológico representativo de la estación 3. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica: Nos encontramos en una unidad conocida como Basaltos Metates.

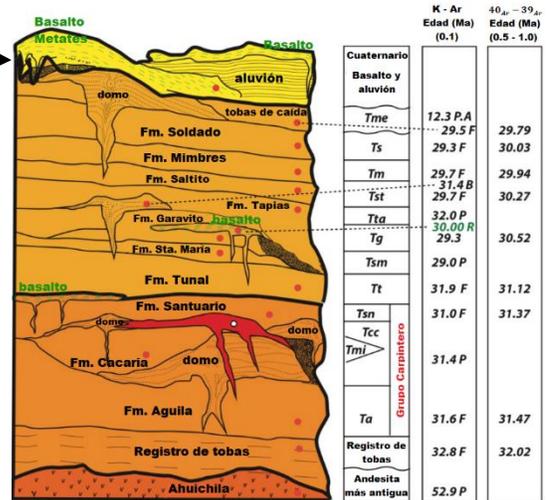


Figura 19. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia volcánica de Durango, modificada a partir de McDowell y Keizer (1977).

Descripción: En esta parada se puede apreciar una vista panorámica de una colada de basaltos alcalinos, de tipo hawaíítico con olivino y kersutita. Se alojan al borde del graben Río Chico – Otinapa, la cual es una estructura extensional de 20 km de ancho y más de 180 km de largo que va de Durango a Santiago Papasquiario.

Esta unidad se ha fechado alrededor de 12 a 11.5 Ma, pero han sido reconocidos a lo largo de toda la SMO sur entre 13 y 10 Ma, se han encontrado también en el borde del Golfo de California, entre Nayarit de 11.5 a 10 Ma, Sinaloa, el sur de Sonora e incluso en muestras dragadas del piso oceánico (McDowell & Keizer, 1977; Henry y Aranda – Gómez, 2000).



Figura 34. Muestras de mano de los basaltos encontrados en el afloramiento. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 24.005217; -104.804024. Fecha: abril de 2022.



Figura 35. Este afloramiento está presente a lo largo de la carretera entre Durango y Llano Grande. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 24.005217; -104.804024. Fecha: abril de 2022.

Interpretación:

Estos basaltos fueron definidos originalmente como Basaltos Metates (Córdoba, 1963).

Se emitieron a lo largo de las fallas extensionales que marcan un episodio importante de la extensión del Mioceno Tardío. Este evento regional se asocia a la ruptura del slab después de la subducción de la placa Farallón y el ascenso

astenósferico que afecta a toda la región sur de la SMO, el Golfo de California y la parte oeste de la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari et al., 2005).

ESTACIÓN 4

Ubicación:

Estamos a lo largo del transecto Durango – El Salto, entre los pueblos Canoas y San Manuel.

Coordenadas: 23.957849;
-105.033487

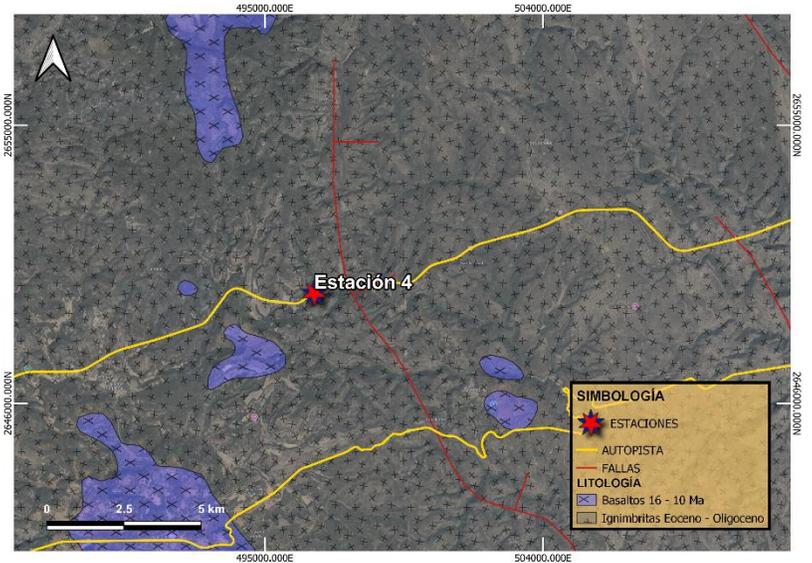


Figura 36. Mapa geológico representativo de la estación 4. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.

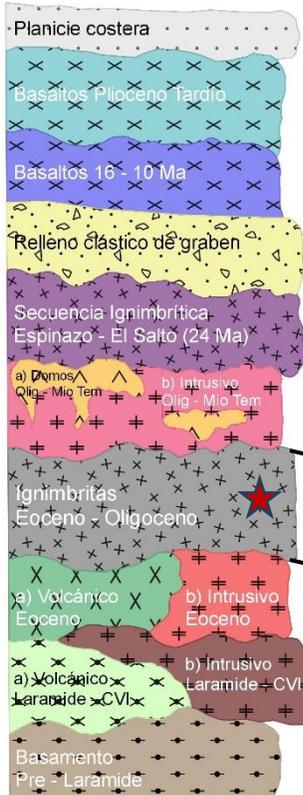


Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica: Formaciones identificadas como El Soldado, Garabito y Mimbres. La Formación El Soldado tiene una edad de 30.23 Ma, mientras que las otras oscilan entre 30.3 y 30.1 Ma (McDowell & Keizer, 1977).

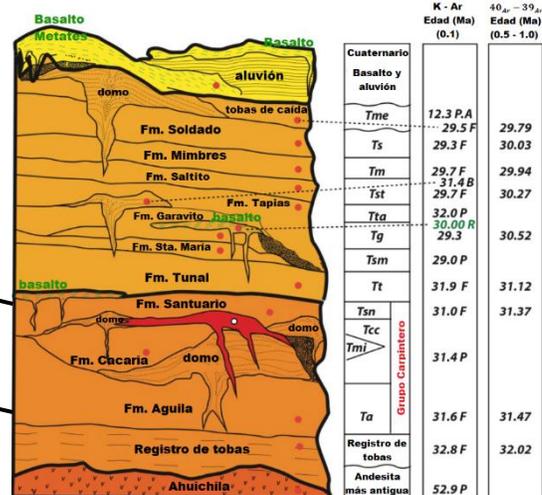


Figura 19. Columna estratigráfica generalizada de la secuencia volcánica de Durango, modificada a partir de McDowell y Keizer (1977).



Figura 37. Vista lateral del afloramiento con horizontes de ceniza. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.957849; -105.033487. Fecha: abril de 2022.

Descripción:

En este afloramiento se distinguen pequeños horizontes de depósito de ceniza, entre dos unidades de flujos ignimbríticos muy finos de facies distales.



Figura 38. Vista panorámica de los flujos presentes en el afloramiento. El orden en el cual se acomodaron las unidades brinda un indicio del tipo de vulcanismo presente y el tiempo en el que se depositaron. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.957849; -105.033487. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: Las rocas han sido interpretadas como las principales ignimbritas del primer flare up del Oligoceno. La fuente no es conocida, pueden venir de decenas de kilómetros de distancia, cubriendo grandes extensiones entre

Durango y El Salto. Es probable que los depósitos de ceniza sean remanentes de algún depósito mayor de caída (McDowell y Keizer, 1977).

ESTACIÓN 5

Ubicación:

La unidad es nombrada El Salto por el pueblo homónimo cercano a unos kilómetros al NE.

Coordenadas: 23.756667; -
105.424444

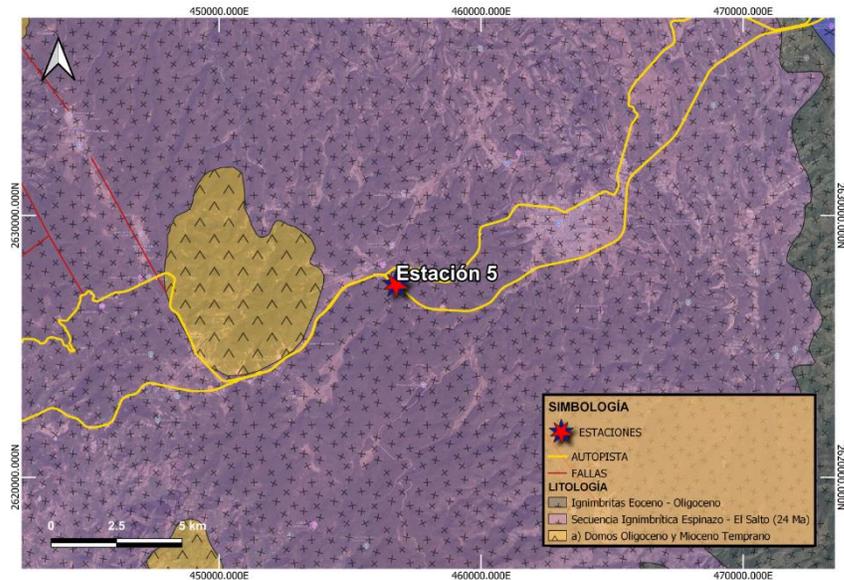


Figura 39. Mapa geológico representativo de la estación 5. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica: Secuencia El Salto – Espinazo del Diablo.



Figura 40. La muestra de mano se describe rico en fragmentos líticos de tamaños variables, posee cristales pequeños de sanidino, plagioclasa y pómez no muy aplastada, posiblemente sea de facies intermedias.

Descripción: La ignimbrita se muestra ampliamente distribuida en toda la región. En particular se logra distinguir una parte medianamente soldada, esta característica disminuye conforme nos acercamos a la cima. Es una secuencia muy gruesa que se adelgaza a lo largo del trayecto que va de Sinaloa a Durango.

Las rocas de este afloramiento fueron estudiadas por primera vez por McDowell y sus estudiantes alrededor de los años setenta (McDowell y Keizer, 1977). Al fecharlas, se dieron cuenta que tenía edades más jóvenes respecto a la secuencia de Durango. Sin embargo, en el 2012 se fecharon mediante Ar - Ar en 23.9 a 24 Ma.

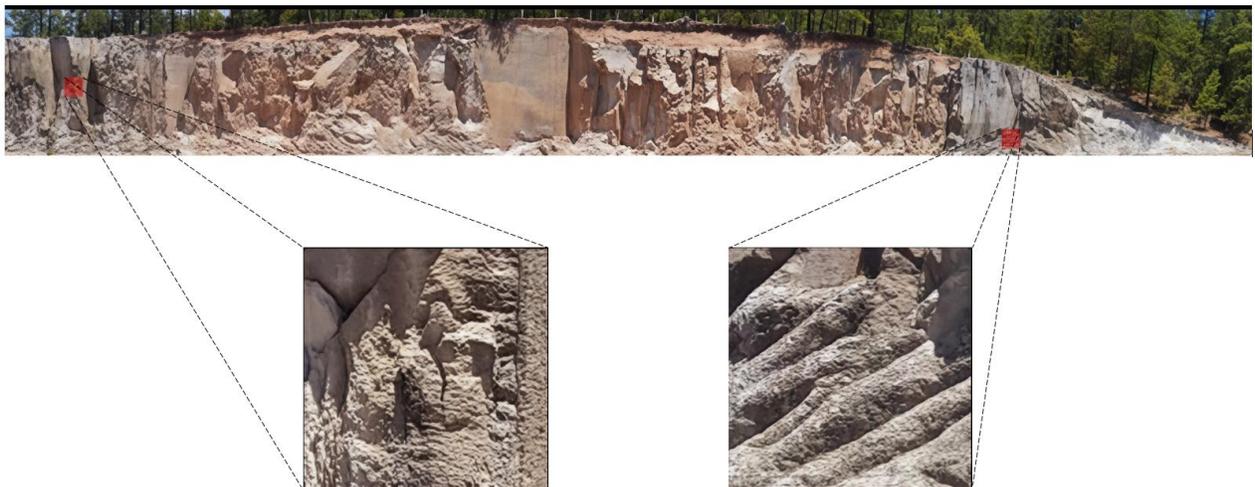


Figura 41. Ortomosaico del afloramiento, en los acercamientos es posible observar el esfuerzo bajo el que fueron sometidas las ignimbritas. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.756667; -105.424444. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: Se ha argumentado que las ignimbritas del Oligoceno junto a la descrita en este afloramiento de finales del Oligoceno e inicios del Mioceno Temprano tuvieron efectos que están ligadas a cambios climáticos importantes al producir grandes volúmenes de ceniza y fertilizar con hierro partes cercanas a la costa, lo que provocó una proliferación de fitoplancton ocasionando el efecto opuesto al invernadero (Cather et al., 2003). No se conoce ningún vulcanismo efusivo local con la edad descrita en este punto.

ESTACIÓN 6

Ubicación:

Nos encontramos al N – NE del Valle del Río Presidio, entre los pueblos Cencerro, Amole y Tepextle.

Coordenadas: 23.848228; - 105.574129

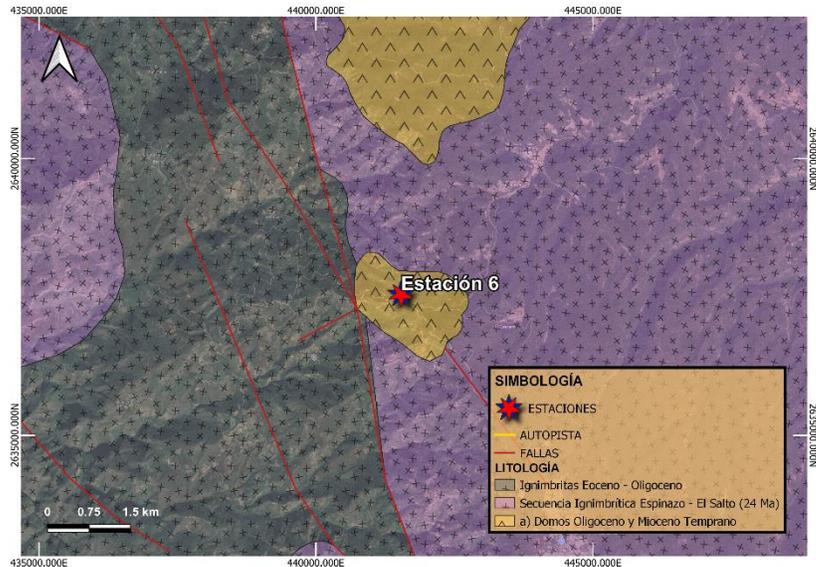


Figura 42. Mapa geológico representativo de la estación 6. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica:

Secuencia del Oligoceno intercalada con ignimbritas del Cerro Cuadrado, correlacionables con la secuencia el Salto – Espinazo del Diablo.

Descripción:

En esta parada se observa una sucesión ignimbrítica de 32.5 Ma inclinada al ENE, acompañada de un flujo andesítico de 33.8 Ma que se correlacionan con las ignimbritas más profundas dentro de la secuencia de Durango (Ferrari et al., 2013).

Se presentan en una discordancia angular respecto a otra sucesión de ignimbritas casi horizontales de 24 - 23.5 Ma que forman parte del Cerro Cuadrado y han sido correlacionadas con la secuencia de El Salto – Espinazo del Diablo (Ferrari et al., 2020).



Figura 43. Fotografía panorámica de la inconformidad angular entre la sucesión ignimbritica plana de Cerro Cuadrado con la sucesión ignimbritica inclinada ENE de finales del Eoceno – principios del Oligoceno. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.848228; -105.574129. Fecha: abril de 2022.

Interpretación:

Esta discordancia es un indicador importante de una fase extensional del Oligoceno Tardío en la Provincia Extensional del Golfo de California. El descubrimiento posee una gran importancia, ya que antes de 2012 se creía que la extensión en el Golfo ocurrió hace 12.5 Ma, después de la subducción. Sin embargo, la extensión a partir del Oligoceno ha sido documentada en varios estados, incluyendo Sonora, Sinaloa y Nayarit, al norte de Cerro Cuadrado, en el valle del río Presidio y en el área de Tayoltita (Henry y Aranda-Gómez, 2000).



Figura 44. Fotografías esféricas de las vistas Norte y Sur de la estación 6. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.848228; -105.574129. Fecha: abril de 2022.

La secuencia del Oligoceno está basculada por un sistema de fallas normales con dirección NNW - SSE regional que van desde Pueblo Nuevo hasta más al norte de Tayoltita. A lo largo de estas fallas se encuentra una serie de domos riolíticos fechados alrededor de 29 Ma, por ejemplo, el domo El Amole tiene una edad media de $28,86 \pm 0,82$ Ma (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en Ferrari et al., 2020), mientras que, el domo Las Adjuntas posee una edad de $27,9 \pm 0,4$ Ma (McDowell y Keizer, 1977).

Se cree que el sistema de fallas que corto e inclinó la sucesión de ignimbritas comenzó a funcionar alrededor de los 30 o 29 Ma. Existe la posibilidad de que haya sido la fuente de las ignimbritas, ya que su distribución se encuentra asociada a estas fallas y no hay evidencia de calderas volcánicas (Ferrari et al., 2020).

También se ha identificado un alineamiento de yacimientos epitermales de oro y plata fechados entre 30 y 20 Ma, que posiblemente están asociados con las intrusiones y domos riolíticos emplazados bajo este control estructural (Bryan y Ferrari, 2012; Ferrari et al., 2020). El yacimiento La Libertad se encuentra ~1.000 m por debajo de la superficie y está formada por vetas de fisura ricas en plata de 1.4 a 10 m de espesor, orientadas hacia el norte y con un buzamiento pronunciado al oeste (Haptonstall, 1980).

ESTACIÓN 7

Ubicación:

Nos encontramos en el mirador El Espinazo del Diablo, a lo largo de la carretera libre Durango – Mazatlán. Al norte de esta localización se encuentra el Valle del Río Presidio y al sur el Valle del Río Baluarte. El poblado más cercano es llamado La Mesa de los Negros.

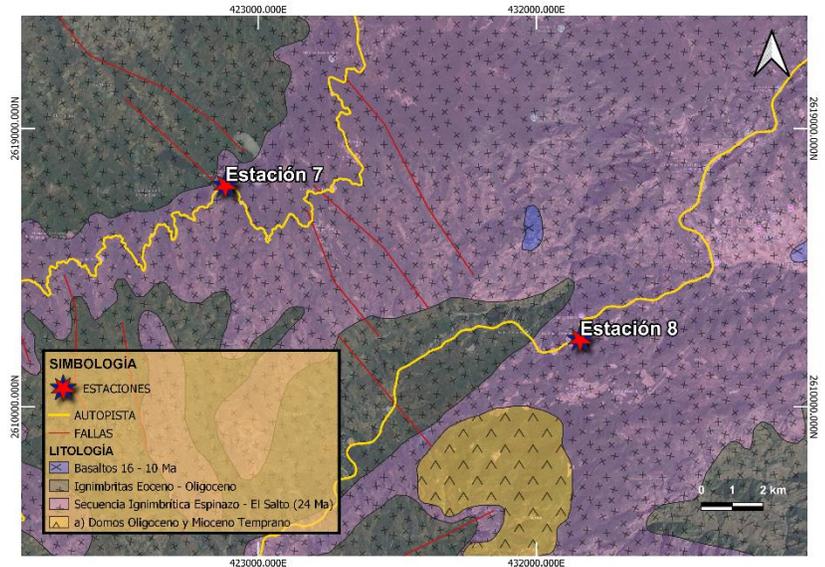


Figura 45. Mapa geológico representativo de la estación 7. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Coordenadas: 23. 663266; -105.765511

Posición estratigráfica: En este punto se distinguen todavía las unidades superiores de la secuencia del Salto - Espinazo del Diablo, fechada entre 23.5 y 24 Ma (McDowell, et. al, 1977).

Descripción: La secuencia descrita hacia el Salto (este) no tiene un espesor mayor a 200 m, sin embargo, hacia el Golfo (oeste) tiene espesores de casi 1000 m. El puente Baluarte ha sido construido sobre una unidad basal de esta secuencia de más de 400 m de espesor.

Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.



Figura 46. Vista esférica de la secuencia ignimbrítica El Salto – Espinazo del Diablo. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23. 663266; -105.765511. Fecha: abril de 2022.

Al oeste del Salto la topografía se vuelve abrupta. Anteriormente existían grandes valles producto de la extensión del Oligoceno Tardío que bascularon ignimbritas de 31 - 30 Ma (Ferrari et al., 2013).

Hacia el fondo se logran distinguir bloques inclinados de ignimbritas en el W - SW que probablemente son del primer *flare up* del Oligoceno de 32 a 30 Ma, más al fondo se encuentran secuencias horizontales de la secuencia.

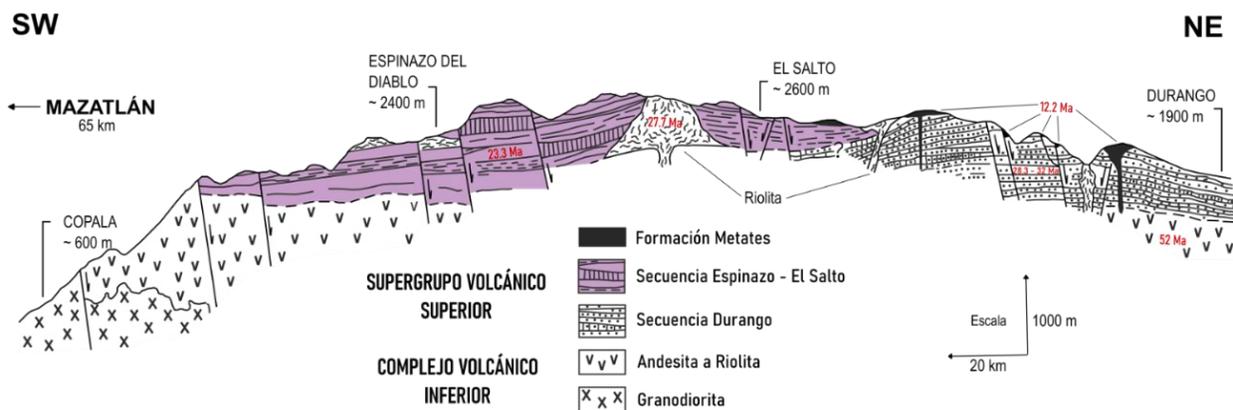


Figura 47. Sección transversal esquemática a través de la Sierra Madre Occidental entre Durango y Mazatlán. Perfil y distancias horizontales tomadas a lo largo de la Carretera Nacional México 40 (Modificado de McDowell & Keizer, 1977).

Interpretación: Al ocurrir los eventos eruptivos que dieron origen a estas sucesiones volcánicas, las ignimbritas fluyen hacia el Golfo rellenando los valles y en general, la paleotopografía. Es importante mencionar que actualmente existe una inmersión del relieve que explicaría la creación de ambos valles en lados opuestos uno del otro (Ferrari et al., 2020).

La extensión del Oligoceno Tardío basculó las ignimbritas más antiguas que se encuentran al este (32 - 30 Ma) y creó una gran depresión tectónica en donde fluyeron las ignimbritas que formaron dicha morfología (Ferrari et al., 2013).

Aunque la inclinación va cambiando hacia otro sentido provocado por fallas antitéticas como el sistema de fallas de Concordia, más al oeste sigue un basculamiento por otra fase extensional ocurrida durante el Mioceno.

ESTACIÓN 8

Ubicación:

Este punto se ubica cercano a los poblados Pino Gordo y Paso de Piedra.

Coordenadas:

23.618765; -105.652757

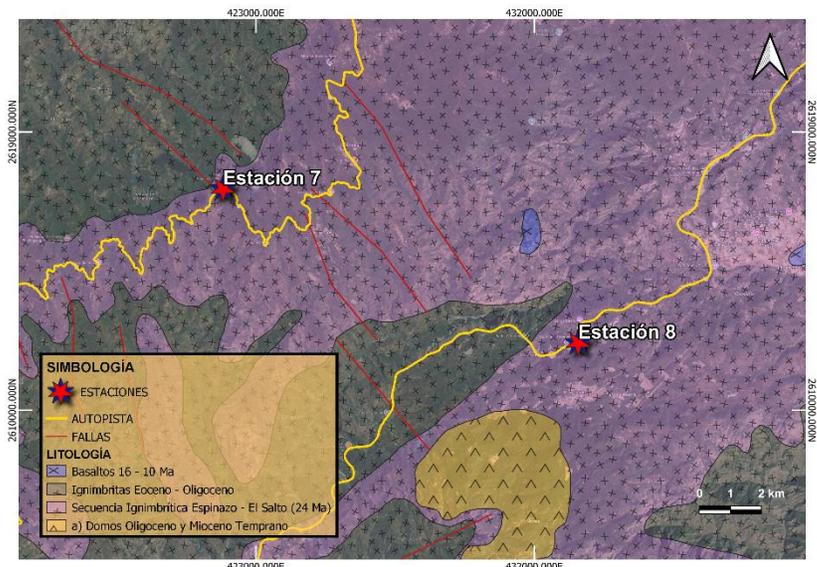


Figura 48. Mapa geológico representativo de la estación 8.
Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica: En esta parada se muestra el relleno vulcanosedimentario de un paleovalle constituido por la secuencia El Salto - Espinazo del Diablo.



Figura 49. Vista del afloramiento de capas horizontales de la secuencia del Salto. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.618765; -105.652757. Fecha: abril de 2022.

Descripción:

En la parte superior se distinguen capas regulares y horizontales, en la zona inferior se observa una secuencia final de probable origen vulcano - sedimentario. Más abajo, otra secuencia que podría ser la primera que se formó después de la extensión del Oligoceno Tardío, es decir, después del emplazamiento de las ignimbritas del primer flare up, vistas en anteriores paradas (Ferrari et al., 2005).



Figura 50. Depósito del relleno vulcanosedimentario. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.618765; -105.652757. Fecha: abril de 2022.

El relleno estratificado, probablemente de origen fluvial, con capas bien definidas también está ligeramente inclinado.

Interpretación:

Todo indica que después del Salto hacia el occidente está el sistema de fallas extensionales que va de Pueblo Nuevo a Tayoltita y que empezó a actuar después de 30 Ma. Posiblemente al tiempo en el cual se emplazaron grandes domos riolíticos fechados en 29 Ma (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari et al., 2020).



Figura 51. Vista de las capas horizontales de la secuencia del Salto. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.618765; -105.652757. Fecha: abril de 2022.

Las fallas continúan hasta al menos 24 Ma, probablemente hayan ocasionado el basculamiento de la secuencia horizontal en el sitio. Se distinguen ignimbritas que no han sido fechadas, pero se muestran más deformadas con alteración, que podrían ser del Oligoceno. Con esto se refuerza la interpretación de que los depósitos que se distribuyen hacia el Espinazo del Diablo forman parte del relleno de un paleovalle (Ferrari et al., 2020).



Figura 52. Vista panorámica del afloramiento descrito. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.618765; -105.652757. Fecha: abril de 2022.

ESTACIÓN 9

Ubicación espacial:

Nos encontramos en el Puente Baluarte, el más alto de México. Con una altitud de 1300 m. Ofrece una vista panorámica de la secuencia subyacente.

Coordenadas: 23.534585; - 105.759368

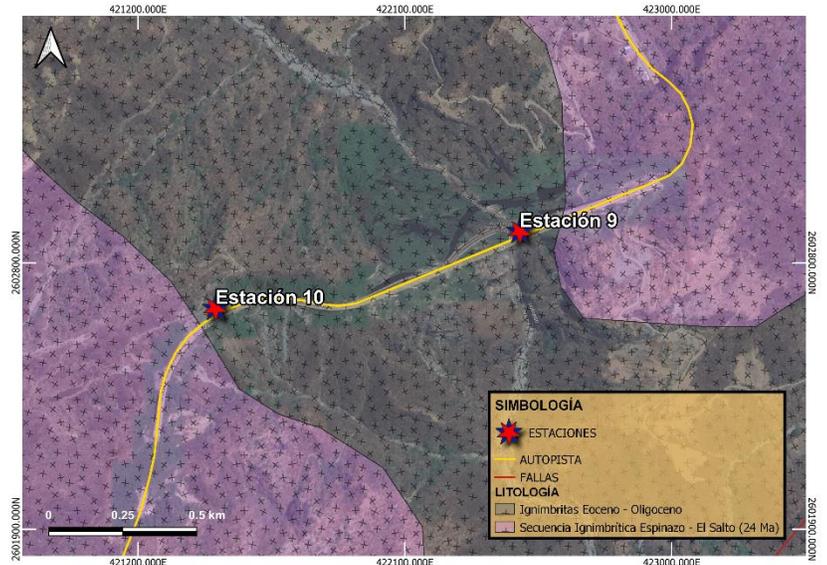


Figura 53. Mapa geológico representativo de la estación 9. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica:

Este puente se construyó sobre una secuencia de depósitos piroclásticos. Debido a sus dimensiones notables se cree que la unidad volcánica de aproximadamente 400 m relleno un paleovalle. Aunque no se ha realizado una datación precisa en este punto se puede seguir hacia arriba a lo largo del río Baluarte, donde forma la base de la sucesión ignimbrítica El Salto - Espinazo del Diablo.



Figura 54. Vista esférica del Puente Baluarte. Este puente tiene una longitud total de 1124 m y una altura sobre la barranca de 402.5 m, por lo que es considerado el puente atirantado más alto de México. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.534585; -105.759368. Fecha: abril de 2022.



Figura 55. Base debajo del Puente Baluarte. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.534585; -105.759368. Fecha: abril de 2022.

Descripción:

La base está constituida por una serie de capas finas pseudoestratificadas que no se han podido alcanzar, pero podrían representar depósitos de oleadas piroclásticas ligeramente compactadas.

Encima de estas capas, se encuentra una unidad extremadamente masiva de ignimbritas, compuesta por pómez, líticos y ceniza. Llama la atención el tamaño de los fragmentos líticos, que alcanzan casi 1 m de longitud y las pómez que tienen aproximadamente 25 cm de diámetro.



Figura 56. Vista panorámica del puente Baluarte. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.534585; -105.759368. Fecha: abril de 2022.

Interpretación:

El tipo de características observadas indicaría una fuente próxima que no se ha identificado de una erupción voluminosa cuyos depósitos rellenaron una topografía preexistente, existen otras

zonas donde hay brechas de rezago o flujos con tamaños grandes donde actualmente se está buscando la fuente.

La cima de la secuencia de caída llega a casi 2700 m de altura. No es que la secuencia tenga un espesor tan grande, pero en el momento de emplazarse, se direccionó hacia el occidente en una depresión tectónica, lo que reafirma la idea de que esta secuencia es posterior a la primera fase de extensión que creó una gran depresión hacia el lado del Golfo (Ferrari et al., 2013 y trabajo no publicado).

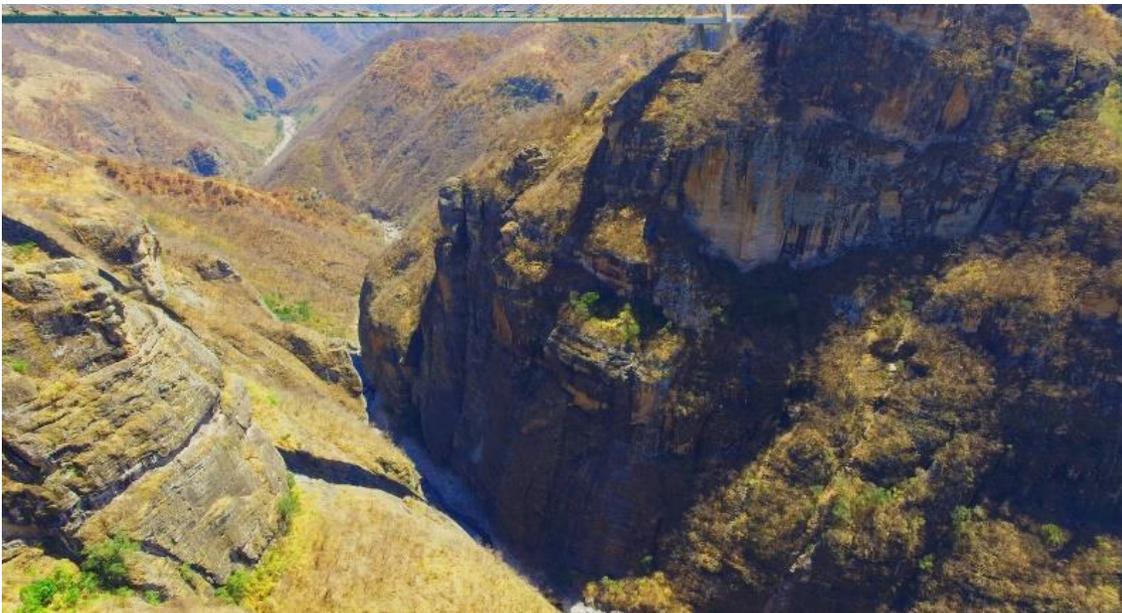


Figura 57. Base pseudoestratificada de las secuencias. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.534585; -105.759368. Fecha: abril de 2022.

ESTACIÓN 10

Ubicación:

Inmediatamente al sur del Puente Baluarte, en el lado derecho del río.

Coordenadas:

23.532189; -105.769410

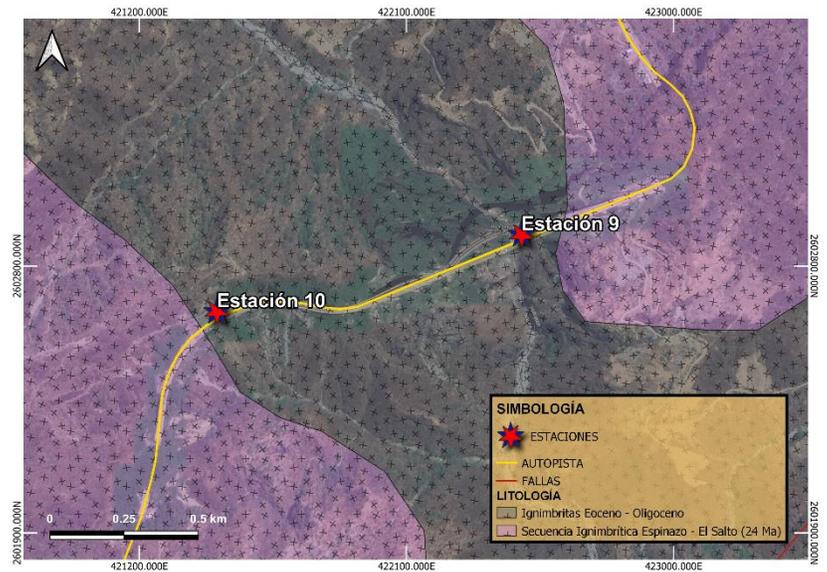


Figura 58. Mapa geológico representativo de la estación 10. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica:

Este punto se relaciona de igual manera con la secuencia El Salto – Espinazo del Diablo.

Descripción:

Se expone una brecha constituida por diversas rocas volcánicas, incluyendo ignimbritas y lavas silíceas en una matriz fina que podría interpretarse como una brecha coignimbrítica rezagada. Debajo del puente se encuentra un flujo compuesto por pómez, ceniza y fragmentos líticos de tamaño métrico.

Interpretación:

Estas brechas están asociadas a la cercanía con los puntos de emisión de flujos piroclásticos. La interpretación es coherente con una fuente magmática cercana al Puente

Baluarte, asociada al inicio de la secuencia El Salto - Espinazo del diablo (Ferrari et al., 2020).



Figura 59. Brecha heterométrica de rocas volcánicas. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.532189; -105.769410. Fecha: abril de 2022.

ESTACIÓN 11

Ubicación:

Antes de entrar al túnel
Sinaloense.

Coordenadas:

23.486167; -105.821975

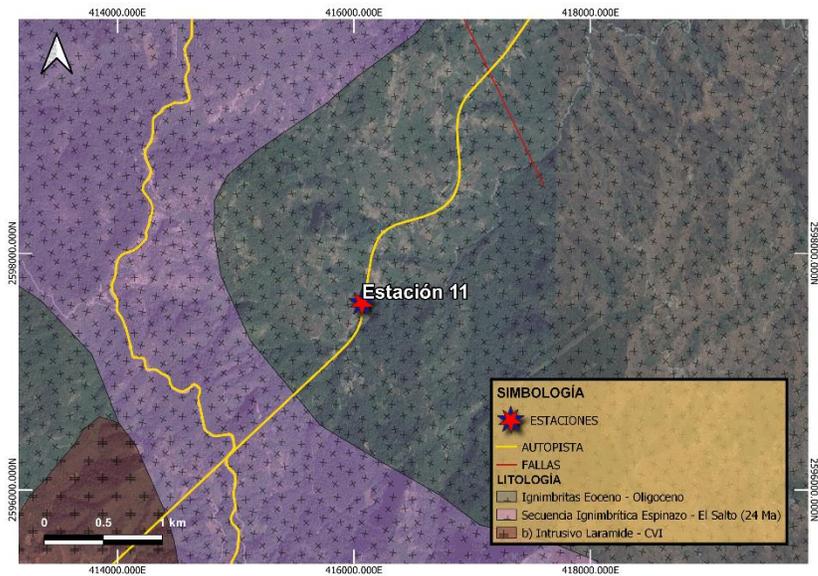


Figura 60. Mapa geológico representativo de la estación 11. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.

Posición estratigráfica: Nos ubicamos nuevamente en la unidad ignimbrítica perteneciente al Supergrupo Volcánico Superior.

Descripción: En este afloramiento se aprecia una secuencia clástica heterogénea de tonalidad rojiza, que ha sido identificada como parte del Supergrupo Volcánico Superior. Esta secuencia se encuentra sobrepuesta por una ignimbrita con fiammes muy claras, notablemente consolidada que se ve interrumpida por una falla de alto ángulo con una orientación de 215° al sur-suroeste. Tanto la ignimbrita como la secuencia clástica presentan esta inclinación, además han sido cortadas por un dique máfico de 3 m de espesor, que tiene una orientación de N32W y se extiende en dirección 60° al noreste (Ferrari et al., 2020).



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.



Figura 61. Afloramiento clástico heterogéneo rojizo. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.486167; -105.821975. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: La edad de la ignimbrita ha sido determinada mediante datación U-Pb, se ha estimado en 31.72 ± 0.25 Ma (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en

Ferrari et al., 2020). Esta datación la relaciona con el primer episodio de actividad explosiva de las ignimbritas previamente observadas en la región de Durango, hacia el occidente.

La visita a este punto implica una observación de la parte más profunda del Supergrupo Volcánico Superior, las ignimbritas de El Salto - Espinazo del Diablo, rodean al afloramiento dispuestas horizontalmente.

ESTACIÓN 12

Ubicación:

Este punto se ubica cercano a Santa Lucia, pasando la planicie costera.



Coordenadas: 23.416309; -105.889837

Posición estratigráfica: Este afloramiento es parte del Batolito de Sinaloa y ha sido fechado mediante el método U-Pb en aproximadamente 62.7 ± 0.75 Ma, lo que corresponde al inicio del Paleoceno (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en Ferrari et al., 2020).

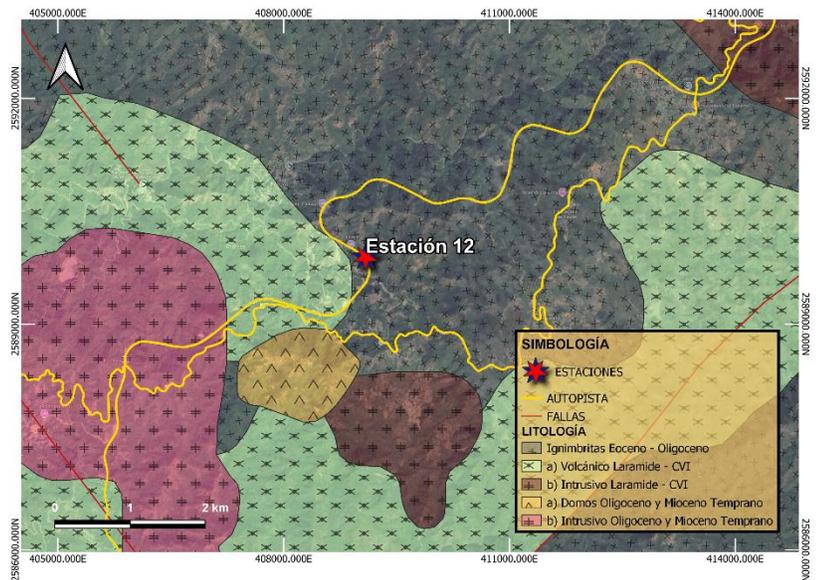


Figura 62. Mapa geológico representativo de la estación 12. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.

Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.



Figura 63. Intrusivo de grano fino. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.416309; -105.889837. Fecha: abril de 2022.

Descripción: En este punto, podemos observar un afloramiento antiguo intrusivo de granito de grano fino, que ha cortado una ignimbrita parcialmente alterada por propilitización.



Figura 64. Se pueden apreciar colores distintos que muchas veces son indicadores de una alteración presente en el afloramiento. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.416309; -105.889837. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: El Batolito de Sinaloa ha sido objeto de estudio en numerosos lugares a lo largo del centro y sur de Sinaloa, en dirección hacia la costa. Forma parte del Complejo Volcánico Inferior (CVI) o del Arco Volcánico Laramide del Cretácico Tardío e inicios del Paleoceno, extendiéndose a lo largo de la parte oriental del Golfo e incluso en el Batolito Peninsular de Baja California. Tanto los cuerpos intrusivos del Oligoceno como los del Paleoceno en la zona de Copala están rodeados por una aureola de alteración, lo que sugiere la posibilidad de que varios episodios de mineralización hayan afectado la región (Ferrari et al., 2020).

A pesar de la similitud en la alteración y mineralización de la ignimbrita con el CVI, esta última ha sido datada y se ha determinado que tiene una edad del Oligoceno (Ferrari et al., 2020). Este hallazgo es relevante, ya que en ocasiones se ha encontrado una mineralización posterior al Paleoceno en lugares como el distrito minero de Copala, con una edad de alrededor de 30 Ma (Ramírez-Salamanca, 2019).

ESTACIÓN 13

Ubicación:

Llegando al poblado
Chupaderos.

Coordenadas:

23.368553; -105.945770

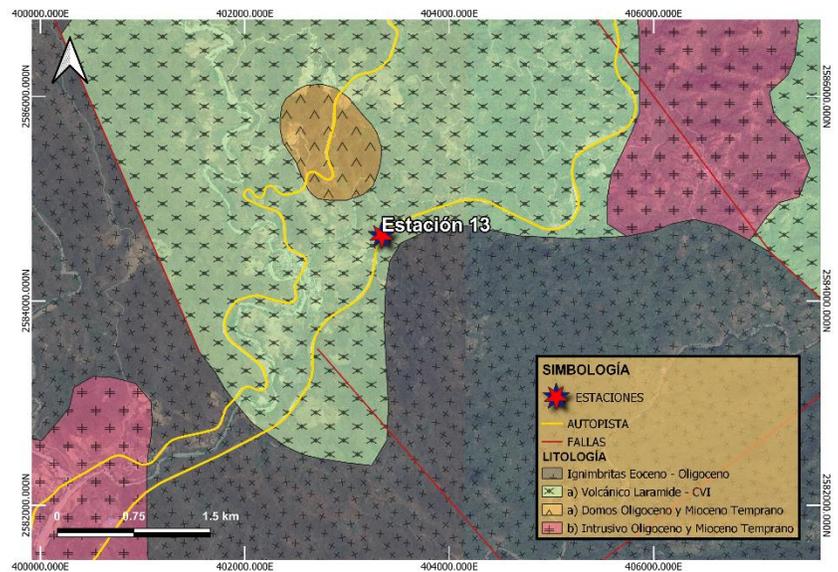


Figura 65. Mapa geológico representativo de la estación 13.

Posición estratigráfica:

Nos ubicamos en un punto que anteriormente se reconocía como parte del Complejo Volcánico Inferior, sin embargo, recientes estudios indican que puede ser parte de unidades del Oligoceno.



Figura 66. Secuencia ignimbrítica basculada. El desplazamiento proveniente es marcado con una línea punteada amarilla, mientras que el dique que corta la secuencia se presenta mediante un contorno blanco. Fotografía: Sergio Enrique Macías Medrano. Coordenadas: 23.368553; -105.945770. Fecha: abril de 2022.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Descripción: En este lugar se expone una secuencia no soldada de ignimbritas alteradas. Presentan argilitización y propilitización, además es atravesada por un dique máfico no alterado que se extiende en dirección N20°W, 44°SE.

La secuencia también está basculada aproximadamente 35° hacia el suroeste. Se observa un desplazamiento derivado de una falla normal a lo largo del contacto entre las unidades de ignimbritas.

Interpretación: Esta secuencia se había atribuido con anterioridad al Complejo Volcánico Inferior del Paleoceno. Sin embargo, al fechar estas ignimbritas mediante el método U-Pb, se ha obtenido una edad aproximada de 30.52 ± 0.7 Ma (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en

Ferrari et al., 2020). Lo que demuestra que existe una segunda fase de mineralización relacionada con cuerpos volcánicos del Oligoceno (Ramírez-Salamanca, 2019; Bryan y Ferrari, 2012).

El desplazamiento que la falla representa afecta ligeramente al dique que corta la secuencia, lo que sugiere una fase de extensión posterior al Mioceno Tardío (Henry, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000, Ferrari et al, 2013).

ESTACIÓN 14

Ubicación:

Este afloramiento se encuentra cercano a la planicie costera de Sinaloa.

Coordenadas: 23.214736; - 106.144259

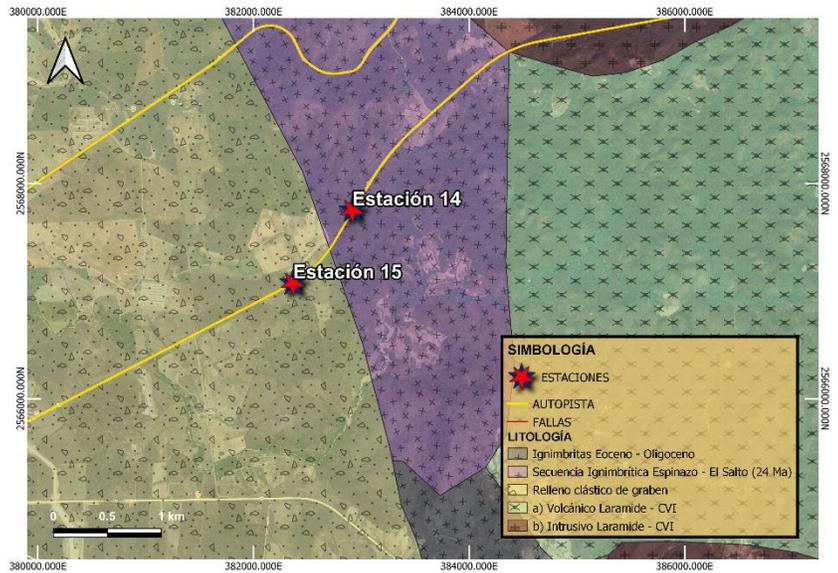


Figura 67. Mapa geológico representativo de la estación 14. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.



Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Posición estratigráfica: Unidad correlacionable con la secuencia El Salto - Espinazo del Diablo.

Interpretación: Las relaciones estratigráficas y de corte permiten indicar que la extensión que originó el basculamiento ocurrió antes del dique. Se puede correlacionar con otros diques distribuidos en toda la planicie costera con edades entre 11 y 10 Ma (Henry y Aranda, 2000; Ferrari et al., 2020).

Descripción: Se logra observar una ignimbrita lítica bastante inclinada de 65° hacia el W - SW. A su vez, está cortada por un dique máfico de unos 10 m de espesor que es básicamente vertical con meteorización esferoidal.



Figura 68. Afloramiento de ignimbritas. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.214736; -106.144259. Fecha: abril de 2022.



Figura 69. En este punto los afloramientos se muestran bastante alteradas por distintas intrusiones. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.214736; -106.144259. Fecha: abril de 2022.

La ignimbrita ha sido fechada por U - Pb con 24.67 ± 0.86 Ma (Loza - Aguirre et al., en prep., citado en Ferrari et al., 2020), siendo correlativa con la secuencia El Salto - Espinazo del Diablo, que hacia la parte alta de la Sierra está completamente horizontal, sin embargo, esta zona con esta inclinación indica una fase de extensión entre 24 y 11 Ma posterior a la fase que basculó a las ignimbritas de 31 - 30 Ma de la secuencia en Durango.

De acuerdo con (Ferrari et al., 2020), se reconocen al menos dos grandes pulsos extensionales:

1. Primera extensión en el Oligoceno Tardío (entre 30 y 24 Ma).
2. Segunda extensión en el Mioceno (entre 24 y 10 Ma).

Además de esto debe de existir una extensión más reciente, puesto que hacia la parte del Golfo las secuencias permanecen basculadas y hundidas hasta llegar a la ruptura de la litósfera continental.

ESTACIÓN 15

Ubicación:

Nos encontramos al inicio de la autopista Mazatlán – Durango.

Coordenadas: 23.208569; - 106.149579

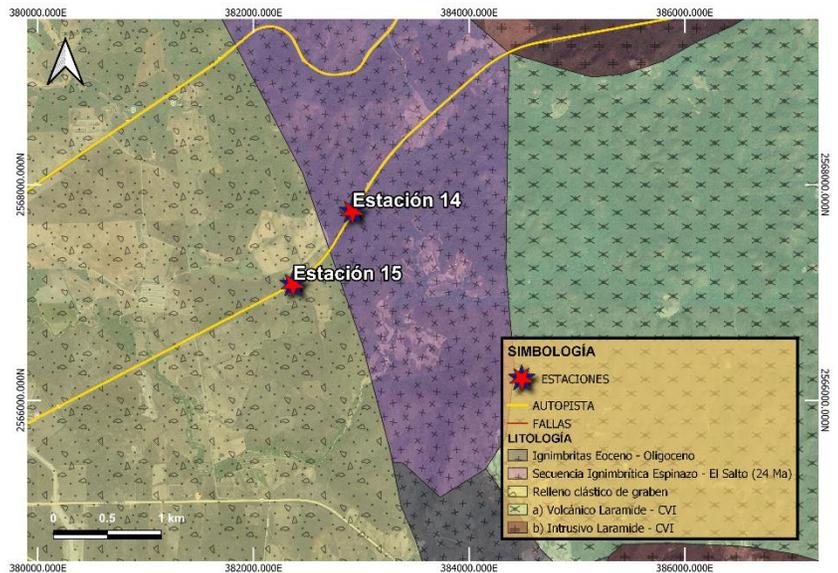


Figura 70. Mapa geológico representativo de la estación 15. Elaboración: Lizbeth Santiago Rivera.

Posición estratigráfica: En este punto nos encontramos con un cuerpo de gravas heterométricas con clastos provenientes del Supergrupo Volcánico Superior y del Complejo Volcánico Inferior.

Figura 25. Columna estratigráfica compuesta del Transecto Durango – Mazatlán.

Descripción:

Se presenta una secuencia de gravas heterométricas moderadamente consolidadas, con clastos de hasta 50 cm de tamaño, que muestran una estratificación notable. Estas se depositaron en un semigraben y han sido inclinadas 30° hacia el W-SW rumbo al Golfo de California. En este punto no es posible observar la Falla de Concordia puesto que permanece basculada.

Los clastos presentes en estas gravas abarcan una amplia variedad de rocas antiguas, incluyendo rocas graníticas meteorizadas (TKi de Henry y Fredrikson, 1987), así como una diversidad de tobas y lavas de composición silícica a intermedia del Supergrupo Volcánico Superior y del Complejo Volcánico Inferior. Algunos clastos de conglomerado o brecha pueden haber sido reelaborados a partir de un depósito anterior.

En toda la región costera de Sinaloa y Nayarit, el basculamiento se dirige hacia el Golfo de California. Sin embargo, al sur de Nayarit y al norte de Mazatlán, las inclinaciones son contrarias, es decir, hacia el E - NE. Esta característica es típica de la segmentación extensional de la margen oriental del Golfo (Ferrari et al., 2013).

La misma secuencia muestra una serie de fallas normales sintéticas con respecto a la falla principal. A lo largo de la carretera, las gravas son atravesadas por diques máficos casi verticales, los cuales han sido datados en aproximadamente 11 Ma y son comunes en toda la costa (Henry y Aranda ,2000; Aranda-Gómez et al., 2015).



Figura 71. Gravas heterométricas estratificadas con clastos de hasta 50 cm de tamaño. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.208569; -106.149579. Fecha: abril de 2022.

Interpretación: La diversidad de tipos de clastos, que incluyen tanto rocas graníticas como volcánicas del Complejo Volcánico Inferior, sugiere que estas gravas requieren una inclinación sustancial para exponerlos, lo cual es coherente con las inclinaciones de hasta 40° observadas en las rocas volcánicas subyacentes. La menor inclinación de las gravas indica que se acumularon después de los procesos iniciales de fallamiento e inclinación, lo que sugiere que la extensión pudo haber ocurrido durante un período de tiempo significativo. Del mismo modo, el dique máfico claramente fue emplazado después de algunas fallas, pero probablemente antes de que finalizara la deformación.

Aunque no se han identificado flujos de lava que puedan haber sido alimentados por estos diques en las cercanías, existen flujos de lava planos a lo largo de la costa tanto al sur en Nayarit como al norte en Sinaloa (Ferrari et al., 2013). Esto sugiere que inicialmente se formó una cuenca continental de sedimentación

clástica, seguida de un basculamiento, posiblemente entre hace 20 y 11 Ma. Durante la etapa final de la subducción, ya había indicios de extensión, como se ha observado en Durango.



Figura 72. Los clastos de la secuencia provienen tanto del Supergrupo Volcánico Superior y el Complejo Volcánico Inferior. Fotografía: Sergio Enrique Macias Medrano. Coordenadas: 23.208569; -106.149579. Fecha: abril de 2022.

La orientación de la falla, la inclinación de los estratos, los datos de la falla, así como la orientación de los diques, indican que la extensión se produjo en dirección E - NE (Henry, 1989). Se considera que este episodio forma parte de un proceso de extensión del Mioceno Temprano o Medio (Henry, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Ferrari et al., 2013).

Actividades complementarias

La Excursión Geológica Virtual del Transecto Durango – Mazatlán constituye una herramienta didáctica innovadora que permite explorar, de manera remota, un recorrido detallado por distintos afloramientos del occidente de México, guiado por el especialista Dr. Luca Ferrari. Esta experiencia ofrece una oportunidad única para el análisis de unidades litológicas, estructuras geológicas y relaciones estratigráficas.

Con el fin de complementar esta experiencia virtual, se proponen una serie de actividades diseñadas para fomentar un aprendizaje significativo e interdisciplinario. El docente podrá seleccionar e implementar las actividades que considere adecuadas para sus estudiantes, en función de los perfiles académicos presentes y los objetivos del curso.

Indicaciones generales:

Formar equipos de 3 a 5 integrantes. Es recomendable que los equipos estén conformados por estudiantes de distintas carreras o especialidades, con el fin de fomentar una perspectiva interdisciplinaria que enriquezca la discusión y el análisis.

Seleccionar la actividad a realizar y seguir las instrucciones correspondientes.

Al finalizar con la o las actividades, se les invita a debatir sus respuestas con el grupo.

Tabla 3. Actividades propuestas para la Excursión Geológica Virtual: Transecto Durango - Mazatlán.

Actividad 1: “El reconstructor”	
<i>Objetivo: Reconstruir la columna estratigráfica del transecto Durango – Mazatlán a partir de las estaciones descritas en la excursión. La actividad busca reforzar los conceptos de superposición y correlación de unidades geológicas, así como la identificación de discordancias.</i>	
Instrucciones:	Utilizando la información disponible en cada una de las estaciones de la guía estática, organiza las unidades geológicas a partir de su posición estratigráfica, desde la base hasta la cima de la columna. Toma como referencia la Figura 25 incluida en la guía. Para cada unidad, redacta una breve descripción que incluya sus principales características litológicas, procesos geológicos asociados y edad aproximada. Asegúrate de señalar las discordancias mencionadas en la excursión y de justificar su ubicación en la columna.
Actividad 2: “Lector de rocas”	
<i>Objetivo: Identificar unidades litológicas, estructuras geológicas y contactos entre formaciones en afloramientos reales mediante la interpretación visual de imágenes.</i>	
	Escoge y analiza detenidamente las fotografías de la excursión geológica virtual incluidas de la en la guía estática. Utilizando un editor de imágenes digital (por ejemplo, Canva, PicsArt, Inkscape o cualquier otro de tu elección), señala de forma clara los

Instrucciones:	contactos entre unidades, estructuras geológicas relevantes (como fallas o diques), tipos de roca presentes y cualquier indicio de inclinación o deformación observable. Acompaña tu análisis con una breve explicación escrita que justifique tus observaciones y la interpretación realizada.
Actividad 3: “Bitácora virtual de campo”	
<i>Objetivo: Fomentar la reflexión crítica y el pensamiento geológico, simulando la experiencia de una salida de campo presencial.</i>	
Instrucciones:	<p>Imagina que estás realizando la excursión de manera presencial y llevas contigo tu libreta de campo. Con base en las explicaciones del Dr. Luca Ferrari en la Excursión Geológica Virtual (disponible en el siguiente enlace: https://inggeolasist.github.io/SMOc_EGV1/#2), elabora una bitácora que contenga tus observaciones personales, reflexiones, análisis e interpretaciones sobre los afloramientos visitados virtualmente.</p> <p>Incluye esquemas o diagramas complementarios que representen los afloramientos, unidades litológicas o estructuras geológicas relevantes. Puedes enriquecer esta actividad utilizando los resultados obtenidos en la <i>Actividad 2</i>.</p>
Actividad 4: “Caso de exploración”	
<i>Objetivo: Desarrollar habilidades de análisis y toma de decisiones en un contexto geológico realista.</i>	
Instrucciones:	Imagina que formas parte del equipo técnico de una empresa geotérmica interesada en zonas con evidencia de actividad volcánica antigua y presencia de fracturamiento tectónico, condiciones propicias para la exploración de recursos geotérmicos.
<p>Recorre virtualmente las estaciones 6 a 9 de la excursión geológica y junto con tu equipo, analiza las características geológicas presentadas en cada una. Con base en esta información, selecciona la estación más adecuada para instalar una sonda exploratoria.</p> <p>Elige una de las siguientes opciones y fundamenta tu decisión:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estación 6: Presencia de domos riolíticos y sistemas de fallas activos. • Estación 7: Grandes espesores de ignimbritas, sin fracturamiento evidente. • Estación 9: Ignimbritas muy gruesas, sin evidencia directa de calor residual. <p>Se valorará la calidad del análisis, el uso adecuado de conceptos geológicos y la justificación técnica de la elección.</p>	
Actividad 5: “Videoblog del estudiante”	
<i>Objetivo: Fomentar la comunicación científica oral a través de la simulación de una explicación geológica en campo, desarrollando habilidades para transmitir conocimiento técnico de manera clara y precisa.</i>	
Instrucciones	Cada equipo elegirá una de las estaciones presentadas en la Excursión Geológica Virtual y realizará una exposición en formato videoblog, simulando el papel del especialista a cargo de la visita (por ejemplo, el Dr. Luca Ferrari).
El videoblog deberá tener una duración máxima de 5 minutos e incluir:	

- Una presentación clara de la estación seleccionada (ubicación, contexto geológico, unidades litológicas, estructuras, etc.).
- Material visual de apoyo (pueden usar imágenes, esquemas, mapas, o capturas de la excursión virtual).
- La respuesta fundamentada a la pregunta específica correspondiente a esa estación.

Se valorará la claridad en la comunicación, el uso preciso del lenguaje geológico, la capacidad de síntesis y la creatividad en la presentación del video.

Lista de preguntas para la actividad 5:

Estación 1: Considerando los mecanismos propuestos para la generación de magmas silíceos (AFC vs anatexis cortical), ¿Cuáles evidencias de campo observadas en esta estación refuerzan la hipótesis de la fusión parcial de la corteza?

Estación 2: El yacimiento de IOA del Cerro del Mercado se asocia a una intrusión silícica en la Caldera Chupaderos. ¿Qué procesos magmáticos y estructurales permiten la formación de un yacimiento de este tipo?

Estación 3: Los basaltos alcalinos hawaínicos de esta estación están relacionados con un evento extensional del Mioceno tardío. ¿Qué importancia tiene esta extensión en el marco tectónico regional posterior a la subducción de Farallón?

Estación 4: La presencia de horizontes de ceniza entre flujos ignimbríticos distales sugiere un tipo particular de actividad volcánica. ¿Qué se puede inferir sobre la fuente volcánica y la dinámica eruptiva de esta región?

Estación 5: En el afloramiento descrito en la Estación 5, se observa una secuencia gruesa de ignimbritas con partes medianamente soldadas. ¿Qué indica esta soldadura parcial sobre la energía del evento eruptivo y la cercanía a la fuente?

¿Cómo se relaciona esta ignimbrita con cambios climáticos globales del Oligoceno, específicamente en cuanto a la fertilización marina por hierro?

Estación 6: La discordancia angular entre sucesiones ignimbríticas de diferentes edades revela un evento tectónico. ¿Qué implica esto sobre el inicio de la extensión en el sur de la SMO y su relación con la apertura del Golfo de California?

Estación 7: El cambio en la inclinación de las ignimbritas sugiere actividad tectónica compleja. ¿Cómo se interpreta esta variabilidad en el contexto del sistema de fallas de Concordia y su relación con fases extensionales sucesivas?

Estación 8: El relleno vulcanosedimentario observado forma parte de un paleovalle. ¿Qué eventos tectónicos y eruptivos se requieren para explicar esta geometría estratigráfica?

Estación 9: La ignimbrita con fragmentos líticos de gran tamaño sugiere una fuente eruptiva cercana. ¿Qué métodos podrían usarse para localizar esta fuente y cuáles son los indicios geológicos clave?

Estación 10: La presencia de brechas coignimbríticas indica cercanía a un centro eruptivo. ¿Cómo se distinguen estas brechas de otras brechas volcánicas en campo y qué información aportan sobre el evento eruptivo?

Estación 11: El dique máfico corta tanto a la ignimbrita como a la secuencia clástica. ¿Qué nos revela esta relación sobre la cronología de la actividad magmática y tectónica en la región?

Estación 12: La intrusión granítica del Paleoceno está parcialmente alterada y cortada por unidades más jóvenes. ¿Qué indica esta superposición sobre la historia termal y de mineralización en el margen costero de la SMO?

Estación 13: La secuencia ignimbrítica alterada y basculada, junto con el corte por un dique máfico, permite establecer una historia tectónica. ¿Cómo se reconstruye la secuencia de eventos y qué fases extensionales están involucradas?

Estación 14: La inclinación de la ignimbrita cortada por un dique vertical con meteorización esferoidal indica una relación temporal. ¿Qué conclusiones se pueden extraer sobre el momento de la extensión y el emplazamiento de diques?

Estación 15: Las gravas heterométricas con clastos de distintas procedencias y atravesadas por diques máficos reflejan una historia compleja. ¿Qué nos dice esta sucesión sobre los procesos de sedimentación, fallamiento y magmatismo postextensional en la costa del Pacífico mexicano?

CONCLUSIONES

Es fundamental innovar el material didáctico con el que se imparten las clases actualmente. La tecnología ofrece la oportunidad de crear herramientas para complementar el proceso de enseñanza – aprendizaje en la asignatura de Geología de México.

La elaboración de una guía estática en función de una excursión geológica virtual permitirá la visualización detallada de los aspectos relevantes a lo largo de un recorrido geológico conocido. Su utilidad se extiende más allá de ser una simple alternativa para las visitas presenciales, ya que también actúa como una herramienta esencial en situaciones donde la ejecución de excursiones puede resultar complicada. El fácil acceso y manejo del archivo contribuye significativamente a la eficacia del material didáctico, ofreciendo a los docentes y estudiantes la posibilidad de llevar consigo la guía y recrear la excursión por su cuenta.

Las excursiones geológicas de carácter virtual no deben considerarse un sustituto de las prácticas y/o visitas de campo. Dado el estado incipiente de su implementación y desarrollo en nuestro país, se convierten en una valiosa herramienta pedagógica que nos otorga la oportunidad de mejorar la presentación de los materiales adquiridos en campo.

Los docentes requieren aprovechar e incorporar el uso de herramientas tecnológicas para la enseñanza de las ciencias de la Tierra y dar difusión a la comunidad de los materiales elaborados.

Es importante que las metodologías para realizar excursiones geológicas virtuales se mejoren con base en la experiencia adquirida, de tal manera que, al integrarse nuevas excursiones, se incorporen aquellas experiencias que aporten significativamente al proyecto.

Este proyecto ha requerido la aplicación de una diversidad en áreas del conocimiento que en ocasiones se sitúan más allá del ámbito de la geología tradicional. La actualización e innovación de los materiales para las asignaturas demandan una preparación integral para determinar bajo que formatos se facilitará el entendimiento de los complicados procesos geológicos. Aspectos como el uso de drones, la correcta captura de fotografías

y videos, la adquisición de equipo especializado, así como la elaboración de gráficos, edición de imágenes y procesamiento de datos, son competencias que debemos adquirir de manera específica para superar las limitantes de una educación tradicional.

El dominio de estas habilidades no solo fortalece la calidad de la enseñanza, sino que también amplía las posibilidades de participación y aprendizaje de los estudiantes, preparándolos para enfrentar los desafíos de una sociedad que cada vez emplea más herramientas tecnológicas.

La innovación en la enseñanza geológica también puede ser un factor clave para el impulso de la investigación científica en el país. Con un enfoque más dinámico y accesible, las universidades y centros de investigación pueden fomentar una cultura de colaboración interdisciplinaria, en la que los avances tecnológicos se apliquen a la ciencia geológica para abordar problemas complejos de manera más eficiente.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G.J. and McDowell, F.W., 1991, *The volcanic section at Nazas, Durango, Mexico, and the possibility of widespread Eocene volcanism within the Sierra Madre Occidental*: Journal of Geophysical Research, v. 96, p. 13,373–13,388.
- Aguirre-Díaz, G.J. and McDowell, F.W., 1993, *Nature and timing of faulting and synextensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico*: Geological Society of America Bulletin, v.105, p.1435–1444.
- Aguirre-Díaz, G.J. y Labarthe-Hernández, G., 2003. *Ignimbritas de fisura: origen de las fisuras para las ignimbritas voluminosas de la Sierra Madre Occidental y su relación con el fallamiento de la Cuenca y la Cordillera*: Geology, 31(9), 773. doi:10.1130/g19665.1
- Angeles-Moreno, E., Nieto-Samaniego, Á. F., Ruiz-González, F. J., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S. A., de Jesús Paulina Olmos Moya, M., et al., 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(C), p. 65–77.
- Aranda-Gómez, J. J., 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, 116–134.
- 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.

- Aranda-Gómez, J.J., Luhr, J. F., Housh, T. B., Valdez-Moreno, G. and Chávez-Cabello, G., 2007, *Late Cenozoic intraplate-type volcanism in central and northern México: A review*: Geological Society of America Special Paper 422, p. 93–128.
- Bowen, Jonathan and Giannini, Tula., 2014, *Digitalism: The New Realism?* 10.14236/ewic/eva2014.38
- Calmus, T., Pallares, C., Maury, R., Aguillón-Robles, A., Bellon, H., Benoit, M., and Michaud, F., 2011, *Volcanic markers of the post-subduction evolution of Baja California and Sonora, Mexico: Slab tearing versus lithospheric rupture of the Gulf of California*: Pure Appl Geophys., v. 168, p. 1303–1330.
- Cather, S. M., Dunbar, N. W., McDowell, F. W., McIntosh, W. C., Sholle, P.A., 2003, *Early Oligocene global cooling, volcanic iron fertilization, and the ignimbrite flare-up of southwestern North America*: Geological Society of America Abstracts with Programs, 35, 255.
- Cameron, K.L., Nimz, G.J., Kuenz, D., Niemeyer, S., and Gunn, S., 1989, *Southern Cordilleran basaltic andesite suite, southern Chihuahua, Mexico: A link between Tertiary continental arc and flood basalt magmatism in North America*: Journal of Geophysical Research, v. 94, p. 7817–7840.
- Cameron, M., Bagby, W., and Cameron, K.L., 1980, *Petrogenesis of voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico*: Contrib. Mineral. Petrol. 74, p. 271–284.
- Centeno-Garcia, E., Busby, C., Busby, M., Geherels, G., 2011. *Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc*: Geol. Soc. Am. Bull. 123 (9/10), 1776–1797. <http://dx.doi.org/10.1130/B30057.1>
- Chamberlin, R.M., 1983, *Cenozoic domino-style crustal extension in the Lemitar Mountains, New Mexico*: A summary: New Mexico Geological Society, 34th Field Conference Guidebook, p. 111–118.

- Condit, C. D., 1995, *DDM-SVF: A prototype dynamic digital map of the Springerville Volcanic Field, Arizona*: GSA Today 5(4), 69±88.
- ControlRisks., 2024, Aumento en la calificación de riesgo de seguridad en México, <https://www.controlrisks.com/es/nuestro-analisis/spanish/aumento-en-la-calificacion-de-riesgo-de-seguridad-en-mexico>
- Córdoba, D. A., 1963, *Geología de la región entre Río Chico y Llano Grande, Municipio de Durango, Estado de Durango*: Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geología, 71, Parte 1, p. 21.
- Corona-Esquivel, Rodolfo & Tapia-Zúñiga, C. Henríquez, Fernando y Tritlla, Jordi y Morales-Insunza, A. & Levresse, Gilles & E.Pérez-Flores,. 2009. Geología y mineralización del yacimiento de hierro de Cerro de Mercado, Durango. En: Geología Económica de México (páginas 529-535). 2da edición, Servicio Geológico Mexicano, Editores: K. Clarck, G.A. Salas-Pizá, R.Cubillas-Estrada.
- Corona-Esquivel, R., Levresse, G., Solé, J., Henriquez, F., and Pi, T., 2018, New age in the geological evolution of the Cerro de Mercado Iron Oxide Apatite deposit, Mexico: Implication in the Durango apatite standard (DAP) age variability: Journal of South American Earth Sciences, 88, p. 367–373.
- Davidson, S., 1932, *Geology and ore deposit of Tayoltita, district of San Dimas, Durango, Mexico*: Unpublished PhD thesis, 172 p.
- DICT - División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra UNAM. *Cátedras Selectas de Geología de México*.
http://www.dict.unam.mx/Catedras_Selectas_de_Geologia_de_Mexico.php
- Drummond, C. N., & Markin, J. M. (2008). An analysis of the Bachelor of Science geology degree as offered in the United States: Journal of Geoscience Education, 56(2), 13–119. doi:10.5408/1089-9995-56.2.113
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., López-Martínez, M., Losndale, P., Bryan, S., Kuesner, J., Piñero-Lajas, D., and Solari, L., 2015, *Timing of rifting in the*

- southern Gulf of California and its conjugated margins: insight from the plutonic record*: Geological Society of America Bulletin, v. 127, p. 702–736.
- Murray, B.P., Busby, C.J., Ferrari, L., and 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, p. 1201–1235.
- Earth Science Resources. 80 Unique Virtual Field Trips. <https://micromyearth.com/virtual-field-trips>
- Evemuseografía., 2020. *Breve historia de los museos virtuales*. Eve Museografía. <https://evemuseografia.com/2020/10/26/breve-historia-de-los-museos-virtuales/>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., and Rosas-Elguera, J., 2002, *Ignimbrite flareup and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico—implications for the late subduction history of the Farallon plate*: *Tectonics* 21, 1035 10.1029 /2001TC001302.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M, and Bryan, S., 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 343-378. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a5>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., and Solari, L., 2013, *Late Oligocene to Middle Miocene rifting and syn-extensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: the beginning of the Gulf of California rift*: *Geosphere*. <https://doi.org/10.1130/GES00925.1>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T, Bryan, S. E., López-Martínez, M. and Silva-Fragoso, A., 2018a, *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*, v. 183, p.115–152.

- Ferrari, L., Castillo-Reynoso, J. C., Orozco-Esquivel, T., and Silva-Fragoso, A., 2018, *Digital geologic map and geochronologic, geochemical and geothermal database of the southeastern part of the Sierra Madre Occidental, Mexico*: Terra Digitalis, 2(2), <https://doi.org/10.22201/igg.25940694.2018.2.53>
- Ferrari, L., Levresse, G., Aranda-Gómez, JJ, Henry, CD, Valencia-Moreno, M., y Ochoa Landín, L., 2020. Tectonomagmatic Pulses and Multiphase Mineralization in the Sierra Madre Occidental, Mexico: Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/GB.61>
- Gaia, G., 1999. *Promoting a museum website on the net. MW99: Museums and the Web 1999*. <https://www.museumsandtheweb.com/mw99/papers/gaia/gaia>
- Gaia, G et al., 2020, *Museum Websites of the First Wave: The rise of the virtual museum*. Publicado por BCS Learning and Development Ltd. Proceedings of EVA, Londres.
- Gans, P., 1997, *Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the tectonic evolution of northwest Mexico*: Tectonics, 16, p. 388–408.
- Gastil, R.G., Krummenacher, D., and Minch, J., 1979, *The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California*: Geological Society of America Bulletin, v. 90, p. 839–857.
- Gigapan. *Durango-Mazatlán transect – Panorama* [Imagen interactiva]. <https://www.gigapan.org/gigapans/234292>
- González León, C.M., McIntosh, W.C., Lozano-Santacruz, R., Valencia-Moreno, M., Amaya-Martínez, R., and 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), p. 600–610.

- González-León, C.M., Valencia, V.A., López-Martínez, M., Bellon, H., Valencia-Moreno, M., and Calmus, T., 2010, *Arizpe sub-basin: A sedimentary and volcanic record of Basin and Range extension in north-central Sonora, Mexico*: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 27 (2), p. 292–312.
- Harper, T., 1990. *Hypercard and Videodisc: a case study in design*. In *Learning with Interactive Multimedia*: ed. S. Ambron and K. Hooper, pp. 331±348. Microsoft Press, Redmond, Washington.
- Hausback, B.P., 1984, *Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico*, in Frizzell, V.A., Jr., ed., *Geology of the Baja California Peninsula*: Pacific Section S. E. P. M., v. 39, p. 219–236.
- Henry, C. D., Aranda-Gómez, J. J., 2000, *Plate interactions control middlelate Miocene proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range*: *Tectonophysics*, 318, 1-26.
- Henry, C. D., Fredrikson, G., 1987, *Geology of part of southern Sinaloa, Mexico, adjacent to the Gulf of California*: Geological Society of America, Maps and Chart serie, MCH 063, 1 sheet, 14 p.
- Henry, C. D., McDowell, F. W., Silver, L. T., 2003, *Geology and geochronology of the granitic batholithic complex, Sinaloa, México*: Implications for Cordilleran magmatism and tectonics: Geological Society of America Special Paper, 374, 237-274.
- Henry, C. D., y Aranda-Gómez, J. J., 1992, *The real southern Basin and Range: mid- to late Cenozoic extension in Mexico*: *Geology*, v. 20, p. 701-704.
- Henry, C.D., 1989, Late Cenozoic Basin and range structure in western Mexico adjacent to the Gulf of California: Geological Society of America, Bulletin 101 (9), p. 1147–1156.

- Henry, C.D., and Price, J.G., 1986, *Early Basin and Range development in Trans Pecos, Texas and adjacent Chihuahua: Magmatism and orientation, and timing, and style of extension*: Journal of Geophysical Research, v. 91, p. 6213–6224.
- Henshaw, P.C., 1953, *Geology and ore deposits of the San Dimas district, Sinaloa and Durango*: Unpublished document, 531 p.
- Hurst, S. D., Perkins, R. D. and Karson, J. A., 1992. *Interactive computerized geologic field trips as case studies for geologic instruction*. Geological Society of America 24, A131 Abstracts with programs.
- INEGI., 2025, *Encuesta Nacional de Seguridad Publica Urbana (ENSU)*. Principales Resultados, Cuarto trimestre 2024.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ensu/doc/ensu2024_diciembre_presentation_ejecutiva.pdf
- Instituto de Geología, UNAM. *Cátedras selectas de la Geología de México*.
<https://www.geologia.unam.mx/contenido/catedras-selectas-de-la-geologia-de-mexico>
- IngGeolAsist. *Excursión Geológica Virtual – Sierra Madre Occidental*.
https://inggeolasist.github.io/SMOc_EGV1/#2
- Kelemen, P.B., Hanghøj, K., Greene, A.R., 2014. *One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust*. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, second ed. 4. Elsevier, Oxford, pp. 749–806. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00323-5>
- Kerr, D.R., and Kidwell, S.M., 1991, *Late Cenozoic sedimentation and tectonics, western Salton Trough, California: Geological excursions in southern California and Mexico*: Geological Society of America Annual Meeting, San Diego, California, Department of Geological Sciences, San Diego State University, Guidebook, p. 397–416.

- King, R.E., 1939. *Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico*: Geol. Soc. Am. Bull. 50, 1625–1722.
- Lipman, P.W., Zimmerer, M.J., McIntosh, W.C., 2015. *An ignimbrite caldera from the bottom up: Erosionally exhumed floor and fill of the resurgent Bonanza caldera, Southern Rocky Mountain volcanic field, Colorado*: Geosphere 11, p. 6, 46 pp, <http://dx.doi.org/10.1130/GES01184.1>
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, Á., Alaniz Alvarez, S. A., and Ortega-Obregón, C., 2012, *Cenozoic volcanism and extension in northwestern Mesa Central, Durango, México*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, p. 1–21.
- Lyons, J. I., 1975, *Volcanogenetic iron-ore of Cerro de Mercado and its setting within the Chupaderos Caldera, Durango, Mexico*: Austin, Univ. Texas in Austin, Master's Thesis, 119 p. (unpublished).
- Lyons, J.L., 1988, *Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and vicinity, Durango, Mexico*, in Clark, K.F., and Salas, G.A.P., eds., *A special issue devoted to the geology and mineral deposits of Mexico*: Economic Geology, v. 83, p. 1886–1906.
- Martínez-Reyes, J. J., Camprubí, A., Uysal, I. T., Iriondo, A., and González-Partida, E., 2015, *Geochronology of Mexican mineral deposits. II: Veta Madre and Sierra epithermal vein systems, Guanajuato district*: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), p. 349–355.
- McDowell, F. W., 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, 1479-1487.
- McDowell, F. W., Maugher, R. L., 1994, *K-Ar and U-Pb zircon chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in central Chihuahua State, Mexico*: Geological Society of America Bulletin, 106, 118-132.

- McDowell, F., and McIntosh, W., 2012, *Timing of intense magmatic episodes in the northern and central Sierra Madre Occidental, Western: Geosphere* 8, p. 1505–1526.
- McDowell, F., Roldán-Quintana, J., and Amaya-Martínez, R., 1997, *Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: Geological Society of America, Bulletin* 109, 1349–1360.
- McDowell, F.W., 1979. *Potassium-argon dating in the Trans-Pecos Texas volcanic field. In: Walton, A.W., Henry, C.D. (Eds.), Cenozoic Geology of the Trans-Pecos Volcanic Field of Texas: Bureau of Economic Geology, Guidebook* 19. The University of Texas at Austin, pp. 10–18.
- McDowell, F.W., 2007, *Geologic transect across the northern Sierra Madre Occidental volcanic field, Chihuahua and Sonora, Mexico: Geological Society of America, Digital Map and Chart Series*, <http://dx.doi.org/10.1130/2007.DMCH006.TXT>. (70 pp).
- McDowell, F.W., and Clabaugh, S.E., 1979, *Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico: Geological Society of America, S. 180*, p. 113–124.
- McDowell, F.W., and Mauger, R.L., 1994, *K-Ar and U-Pb zircon chronology of Late Cretaceous and Tertiary magmatism in central Chihuahua State, Mexico: Geological Society of America, Bulletin* 106, p. 118–132.
- McDowell, F.W., McIntosh, W.C., and Farley, K.A., 2005, *A precise $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ reference age for the Durango apatite (U-Th)/He and fission-track dating standard: Chem. Geol.* 214, p. 249–263.
- McDowell, F.W. y Roldán-Quintana, J., 1991, *Timing of late Tertiary extension in central Sonora, Mexico: Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 23, p. A247.

- McIntosh, W.C., Sutter, J.F., Chapin, C.E., Kedzie, L.L., 1990. *High-precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sanidine geochronology of ignimbrites in the Mogollon-Datil volcanic field, southwestern New Mexico*: Bull. Volcanol. 52 (8), 584–601.
- Montoya-Lopera, P., Ferrari, L., Levresse, G., Abdullin, F., and Mata, L., 2019, *New insights into the geology and tectonics of the San Dimas mining district, Sierra Madre Occidental, Mexico*: Ore Geology Reviews, v. 105, p. 273–294. doi: 10.1016/j.oregeorev.2018.12.020
- Mora-Alvarez, G., and McDowell, F.W., 2000, Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of western Sonora, Mexico, in Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., and Stock, J.M., eds., *Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico*: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper v. 334, p. 123–141.
- Murray, B.P., Busby, C.J., and Verde Ramírez, M.A., 2014, *Extension and magmatism in the Cerocahui basin, northern Sierra Madre Occidental, western Chihuahua, Mexico*: Int. Geol. Rev., p. 1–25.
- Nieto-Samaniego, A.F., Ferrari, L., Alaniz-Alvarez, S.A., Labarthe-Hernández, G., and Rosas-Elguera, R., 1999, *Variation of cenozoic extension and volcanism across the southern Sierra Madre Occidental volcanic province, Mexico*: Geological Society of America Bulletin, v. 111, p. 347–363.
- Nieto-Samaniego, A.F., Olmos-Moya, M.D.J.P., Levresse, G., Alaniz-Alvarez, S.A., Abdullin, F., del Pilar-Martínez, A., and Xu, S., 2019, *Thermochronology and exhumation rates of granitic intrusions at Mesa Central, Mexico*: International Geology Review, p. 1–9.
- Nourse, J., Anderson, T., Silver, L., 1994. *Tertiary metamorphic core complexes in Sonora, Northwestern Mexico*: Tectonics 13 (5), 1161–1182.
- Paz-Moreno, F.A., Demant, A., Cochemé, J.-J., Dostal, J., Montigny, R., 2003. *The Quaternary Moctezuma volcanic field: A tholeiitic to alkalic volcanic episode in the*

- central Sonoran Basin and Range Province, México. In: Johnson, S.E., Paterson, S.R., Fletcher, J.M., Girty, G.H., Kimbrough, D.L., Martín-Barajas, A. (Eds.), Tectonic Evolution of Northwestern México and Southwestern USA. 374. Geol. Soc. Am. Sp. Pap, pp. 439–455.*
- Petcovic, H. L., Stokes, A., & Caulkins, J. L., 2014. *Geoscientists' perceptions of the value of undergraduate field education: GSA Today, 24(7), 4–10. doi:10.1130/GSATG196A.1*
- Poole, F. G., Madrid, R. J., Oliva-Becerril, J. F., 1991, *Geological setting and origin of stratiform barite in central Sonora, Mexico, in Raines, G. L., Lisle, R. E., Schafer, R. W., Wilkinson, W. H. (eds.), Geology and ore deposits of the Great Basin: Geological Society of Nevada, 1, 517-522.*
- Ramírez-Salamanca, G. A., 2019, Caracterización de los eventos hidrotermales de mineralización en los yacimientos Au-Ag en la Sierra Madre Occidental, ejemplos en la zona de Bacis y la Ciénega: Tesis para optar por el grado de Maestro en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 1-124.
- Ricketts, J.W., Kelley, S.A., Karlstrom, K.E., Schmandt, B., Donahue, M.S., and van Wijk, J., 2015, *Synchronous opening of the Rio Grande rift along its entire length at 25–10 Ma supported by apatite (U-Th)/He and fission-track thermochronology, and evaluation of possible driving mechanisms: Geological Society of America, Bulletin B31223.1–28.*
- Roper, S. D., 1989, *The Vesalius Project. Academic Computing, pp. 16-18, 41-13.*
- Ruiz, J., Patchett, P. J., Arculus, R. J., 1988a, *Nd-Sr isotope composition of lower crustal xenoliths: evidence for the origin of mid Tertiary felsic volcanics in Mexico: Contributions to Mineralogy and Petrology, 99, 36-43.*
- Ruiz J., Patchett, P. J., Ortega-Gutiérrez, F., 1988b, *Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of Mexico from Nd isotopic studies: Geological Society of America Bulletin, 100, 274-281.*

- Sawlan, M.G., 1991, *Magmatic evolution of the Gulf of California rift*, in Dauphin, J.P., and Simoneit, B.A., eds., *The gulf and peninsular province of the Californias*: American Association of Petroleum Geologists Memoir, v. 47, p. 301–369.
- Shafiqullah, M., Damon, P.E., Lynch, D.J., Reynolds, S.J., Rehrig, W.A., Raymond, R.H., 1980. *K-Ar Geochronology and Geologic History of Southwestern Arizona and Adjacent Areas*: 12. Arizona Geological Society Digest pp. 201–260.
- Sigloch, K., McQuarrie, N., Nolet, G., 2008. *Two-stage subduction history under North America inferred from multiple-frequency tomography*: Nat. Geosci. 1, 458–462.
- Silva-Romo, G., 1996, *Estudio de la estratigrafía y estructuras tectónicas de la Sierra de Salinas, Estados de SLP y Zacatecas*: M.Sc. thesis, PhD dissertation: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias.
- Spencer, J.E., Richard, S.M., Reynolds, S.J., Miller, R.J., Shafiqullah, M., Gilbert, W.G., and Grubensky, M.J., 1995, *Spatial and temporal relationships between mid-Tertiary magmatism and extension in southwestern Arizona*: Journal of Geophysical Research, v. 100, p. 10,321–10,351.
- Steven, T.A., Rowley, P.D., Cunningham, C.G., 1984. *Calderas of the Marysvale volcanic field, west-central Utah*: J. Geophys. Res. 89, 8751–8764. <http://dx.doi.org/10.1029/JB089iB10p08751>
- Stewart, J. H., Roldán-Quintana, J., 1991, *Upper Triassic Barranca Group; Nonmarine and shallow-marine rift-basin deposits of northwestern Mexico*, en Pérez-Segura, E., Jacques-Ayala, C. (eds.), *Studies of Sonoran geology*: Geological Society of America, Special Paper, 254, 19-36.
- Swanson, E. R., Keizer, R. P., Lyons Jr., J. I., Clabaugh, S. E., 1978, *Tertiary volcanism and caldera development near Durango City, Sierra Madre Occidental, Mexico*: Geological Society of America Bulletin, 89, 1000-1012.

- Umhoefer, P., Dorsey, R., Willsey, S., Mayer, L., and Renne, P., 2001, *Stratigraphy and geochronology of the Comondu group near Loreto, Baja California Sur, Mexico*: *Sedimentary Geology*, v. 144, p. 125–147.
- Valencia-Moreno, M., Ruiz, J., Roldán-Quintana, J., 1999, *Geochemistry of Laramide granitic rocks across the southern margin of the Paleozoic North American continent, Central Sonora, Mexico*: *International Geology Review*, 41, 845-857.
- Vega-Granillo, R., and Calmus, T., 2003, *Mazatlán metamorphic core complex (Sonora, Mexico): Structures along the detachment fault and its exhumation evolution*: *Journal of South America Earth Sciences*, 16 (4), p. 193–204.
- Vidal-Solano, J.R., Demant, A., Paz-Moreno, F.A., Lapierre, H., Ortega-Rivera, M.A., and Lee, J.K., 2008, *Insights into the tectonomagmatic evolution of NW Mexico: Geochronology and geochemistry of the Miocene volcanic rocks from the Pinacate area, Sonora*: *Geological Society of America Bulletin*, v. 120, p. 691–708.
- Waite, R.B., 1970, *Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental between Durango and Mazatlán, Mexico*: MA thesis, University of Texas, Austin, 133 p.
- Wong, M.S., Gans, P.B., and Scheier, J., 2010, *The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico*: *J. Geophys. Res.* 115 (B7), B07414.
- Wright, N.M., Seton, M., Williams, S.E., Müller, R.D., 2016. *The Late Cretaceous to recent tectonic history of the Pacific Ocean basin*: *Earth Sci. Rev.* 154, 138–173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.11.015>
- Young, E.J., Myers, A.T., Munson, E.L., and Conklin, N.M., 1969, *Mineralogy and geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico*: U.S. Geological Survey, Prof. Pap. 650 (D), p. D84–D93.

ANEXO A: Ejemplos de otras excursiones geológicas virtuales

¡Welcome to the columns of the Giants!

Embark on a 360 - degree geologic expedition

Resumen

Ryan Hollister, profesor destacado en Turlock High School, California desarrolló una salida virtual en la Sierra Nevada con el objetivo de que sus estudiantes aprendan y descubran los misterios geológicos de la formación del paisaje del sitio.

Se ha apoyado en fotografías esféricas y modelos tridimensionales de las rocas de la zona. De igual manera, se ha diseñado una explicación de algunos términos geológicos necesarios para comprender el propósito de la visita y actividades complementarias.



Figura A1. Vista esférica del primer stop en la visita virtual de Hollister. Tomado de Embark On A 360 – Degree Geologic Expedition.

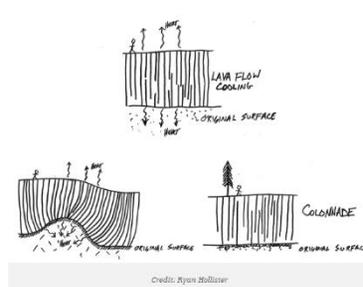


Figura A2. Dibujos de las juntas columnares realizadas por Hollister. Tomado de Embark On A 360 – Degree Geologic Expedition

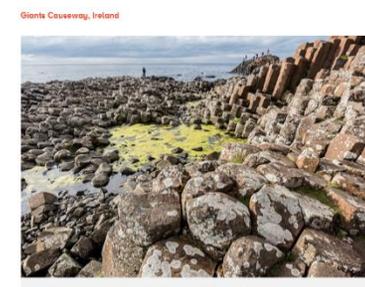


Figura A3. Calzada del Gigante en Irlanda, Shutterstock. Tomado de Embark On A 360 – Degree Geologic Expedition

Enlace: [Embark On A 360-Degree Geologic Expedition](#)

Virtual Field Trips

Seeking answers through exploration

Resumen

La Universidad del estado de Arizona ha diseñado diversas visitas interactivas en donde se puede dar un seguimiento no lineal con apartados que cada uno de los usuarios puede escoger. Se usan para complementar una amplia variedad de temas y se continúa desarrollando el proyecto.

Se han agregado videos de introducción con expertos en el tema quienes guían la visita, se anexaron fotografías esféricas y animaciones. En algunos casos se tienen que completar la actividad para poder seguir en la visita.



Figura A4. Vista de la plataforma educativa de Virtual Field Trips.



Figura A5. Estratificación mostrada junto a los controles de navegación en una visita virtual al Gran Cañón. Tomado de Virtual Field Trips.



Figura A6. Actividades diversas que permiten complementar cada una de las visitas en la plataforma. Tomado de Virtual Field Trips.

Enlace: [Virtual Field Trips](#)

Epicc Virtual Field Experiences

Resumen

En esta plataforma se puede visualizar una colección proveniente de museos diferentes llamado Comunidades de Invertebrados del Cenozoico del Pacífico Oriental. Está enfocado en presentar los datos obtenidos por distintas investigaciones sobre los cambios en el nivel del mar, paisaje, clima durante los últimos cien millones de años a través de las rocas y fósiles.

Junto a esta base de datos se desarrollaron las experiencias de trabajo de campo virtual, que permiten visitar las zonas paleontológicas a lo largo de la costa del Pacífico explorando imágenes de las recolecciones en alta resolución y tridimensionales, además se incluyen visualizaciones en formato de video junto a descripciones.



Figura A7. Imágenes satelitales de la geomorfología del lugar. Tomado de EPICC Virtual Field Experiences.

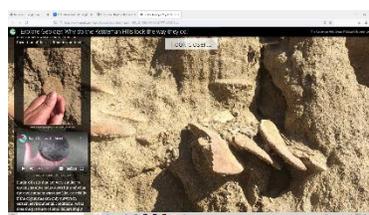


Figura A8. Fotografías diversas de las muestras en los afloramientos junto a videos descriptivos. Tomado de EPICC Virtual Field Experiences.



Figura A9. Descripción de las actividades realizadas por los estudiantes en las visitas a campo. Tomado de EPICC Virtual Field Experiences.

Enlace: [EPICC Virtual Field Experiences](#)

e – Rock

Resumen

Este proyecto proveniente de la Universidad de Aberdeen, tiene como objetivo proporcionar datos geológicos y visualizaciones para investigaciones, instituciones y público general. Se trata de muestras virtuales de rocas y afloramientos tridimensionales, además se agregan las coordenadas de la ubicación de dichos modelos y enlaces a referencias claves de las muestras.



Figura A10. Modelo tridimensional del afloramiento conocido como "parada de rocas multicolores" de gneiss metamorfoseado en NW Highlands GeoPark. Tomado de erock.



Figura A11. Modelo tridimensional de una falla en espejo sobre una falla normal en rocas carbonatadas cerca del mar muerto. Tomado de erock.

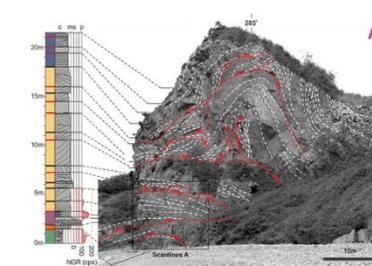
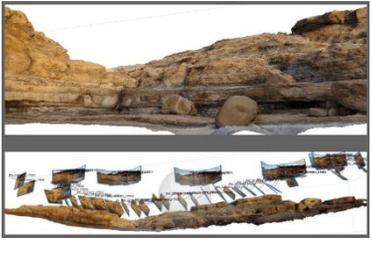


Figura A12. Sección geológica del modelo tridimensional Monkstone en una visita virtual estructural y estratigráfica de Pembrokeshire. Tomado de erock.

Enlace: [erock](http://erock.com)

3D GLG		
Resumen		
<p>Proveniente de la Universidad del Norte de Arizona, está enfocado al área de la geología sedimentaria, se propone una colección de modelos tridimensionales de estratos geológicos, estructuras y muestras de mano que se creó utilizando fotogrametría de múltiples imágenes de los laboratorios de dicha universidad.</p>		
		
<p><i>Figura A13. Mapa índice de modelos 3D de la Formación Paradox dentro del cañón del río San Juan en el SE de Utah. Tomado de Sedimentary Geology.</i></p>	<p><i>Figura A14. Fotografía de un afloramiento en Alhambra Rock. Tomado de Sedimentary Geology.</i></p>	<p><i>Figura A15. Arenisca marina profunda del Paleoceno, lodolita y conglomerado intraclástico soportado por matriz dentro de la Formación Carmelo expuesta en Point Lobos, California. Tomado de Sedimentary Geology.</i></p>
<p>Enlace: Sedimentary Geology</p>		

ANEXO B: Guía para el profesor

A continuación, se proponen las rúbricas que el docente puede aplicar para la evaluación de las actividades complementarias descritas, considerar que la implementación de éstas se llevará a cabo conforme a las necesidades del grupo y dichas evaluaciones pueden ser modificadas con base a lo que determine el docente.

Tabla B1. Rúbrica de evaluación – Actividad 1: “El Reconstructor”.

Criterio	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Orden y coherencia estratigráfica	El orden de las unidades es incorrecto o incoherente.	El orden tiene errores importantes, aunque muestra cierta intención de jerarquía.	El orden es mayormente correcto con pequeñas imprecisiones.	El orden es completamente correcto y respeta la lógica estratigráfica.
Descripción de unidades geológicas	Las descripciones son vagas, incorrectas o copiadas textualmente sin análisis.	Hay intentos de descripción, pero faltan detalles clave o hay errores conceptuales.	Las descripciones son claras y reflejan comprensión, con pocos errores.	Las descripciones son completas, técnicas y bien fundamentadas.
Identificación de discordancias	No se identifican discordancias o están mal ubicadas.	Se identifica alguna discordancia, pero de forma confusa o incompleta.	Se identifican correctamente, aunque con explicaciones limitadas.	Se identifican y explican correctamente todas las discordancias relevantes.
Presentación del material	El trabajo es desorganizado, sin estructura visual.	Presentación poco clara o descuidada.	Presentación ordenada, con estructura básica y legible.	Presentación clara, bien organizada, visualmente efectiva.
Trabajo en equipo y coherencia grupal	No hay integración del equipo, respuestas desconectadas.	Colaboración mínima o poco evidente.	Evidencia de colaboración con coherencia general.	Trabajo claramente colaborativo, con una propuesta unificada.

Tabla B2. Rúbrica de evaluación – Actividad 2: “Lector de rocas”.

Criterio	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Identificación de elementos geológicos	No se identifican contactos, estructuras o tipos de roca, o están mal ubicados.	Se identifican algunos elementos, pero con errores o de forma incompleta.	Se identifican correctamente la mayoría de los elementos.	Todos los elementos están correctamente identificados y señalados.
Uso de herramientas digitales	El trabajo no utiliza editores gráficos o lo hace de manera inadecuada.	Se utiliza una herramienta básica con poco aprovechamiento.	Se usa una herramienta de forma funcional y clara.	Se emplea la herramienta de forma creativa y precisa, con calidad visual.
Análisis y justificación geológica	No hay explicación o está fuera de contexto.	Hay una justificación breve pero poco desarrollada.	Se justifica adecuadamente con conceptos básicos.	El análisis es completo, bien argumentado y geológicamente riguroso.
Claridad en la presentación visual	Imagen desordenada, ilegible o confusa.	Presentación con elementos visibles, pero poco organizados.	Presentación clara y comprensible.	Excelente presentación visual, con señalizaciones limpias y útiles.

Tabla B3. Rúbrica de evaluación – Actividad 3: “Bitácora virtual de campo”.

Criterio	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Contenido de la bitácora	Poca o nula información; sin conexión con la excursión.	Incluye información superficial o incompleta.	Bitácora clara, coherente y conectada con la excursión.	Bitácora detallada, reflexiva y completa.
Reflexión y análisis personal	No hay reflexión; solo se repite lo visto en el video.	Hay cierta reflexión, pero limitada o poco profunda.	Incluye reflexiones con análisis personal.	Reflexión profunda, crítica y bien articulada.
Uso de esquemas y diagramas	No incluye diagramas o están mal hechos.	Incluye algún esquema básico o poco claro.	Diagramas claros y adecuados.	Diagramas completos, bien hechos y con valor explicativo.
Redacción y organización del texto	Texto desordenado o con errores frecuentes.	Redacción aceptable, pero con errores o falta de estructura.	Redacción clara y ordenada.	Excelente redacción, cohesión y estilo.

Tabla B4. Rúbrica de evaluación – Actividad 4: “Caso de exploración”.

Criterio	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Análisis geológico de las estaciones	No se analiza correctamente ninguna estación.	Se analiza una opción, pero de forma superficial o errónea.	Se analizan las opciones con criterios razonables.	Análisis comparativo riguroso de todas las opciones.
Justificación técnica de la elección	La elección no está justificada o es contradictoria.	Justificación poco clara o con argumentos débiles.	Justificación bien estructurada con base científica.	Justificación sólida, técnica y bien argumentada.
Claridad en la argumentación	La justificación es confusa o no se comprende.	Explicación poco estructurada o con ambigüedades.	Argumentación comprensible, con orden lógico.	Justificación clara, bien organizada y convincente.
Coherencia y trabajo en equipo	El trabajo carece de unidad o coherencia.	Evidencia de división del trabajo, pero poco integrada.	Trabajo colaborativo con coherencia global.	Trabajo bien integrado, evidencia clara de colaboración activa.

*Respuesta: La mejor opción para instalar una sonda exploratoria geotérmica es la **Estación 6**.*

Justificación:

1. Presencia de domos riolíticos

Los domos riolíticos son productos de magmas muy viscosos que tienden a solidificarse cerca de la superficie, generando calor residual importante en profundidad. Además, suelen estar asociados a actividad hidrotermal prolongada. En geotermia, estos cuerpos silíceos son potenciales fuentes de calor.

2. Evidencia de deformación activa

Se observa una discordancia angular entre unidades ignimbríticas antiguas y horizontales más recientes, lo que implica la existencia de deformación estructural asociada a fallas normales activas, que son vías potenciales para la circulación de fluidos calientes. Sin permeabilidad estructural, un reservorio caliente no puede ser explotado.

3. Combinación ideal: calor + fractura

Un sistema geotérmico requiere tres elementos:

- ✓ *Calor → aportado por el cuerpo ígneo (domos).*
- ✓ *Fluidos → que pueden originarse desde el manto o aguas meteóricas infiltradas.*
- ✓ *Permeabilidad → dada por fracturamiento tectónico.*

La Estación 6 reúne las tres. En cambio:

La Estación 7 tiene gran espesor de ignimbritas, pero sin estructuras fracturadas claras (baja permeabilidad).

La Estación 9, aunque tiene ignimbritas masivas con clastos líticos grandes (indicadores de proximidad a una fuente), no muestra evidencia de calor residual ni fracturas recientes.

Tabla B5. Rúbrica de evaluación – Actividad 5: “Videoblog del estudiante”.

Criterio	Malo	Regular	Bueno	Muy bueno
Contenido geológico y precisión técnica	Contenido incorrecto, incompleto o superficial.	Contenido parcialmente correcto, con errores menores.	Contenido adecuado y comprensible.	Contenido preciso, bien explicado y riguroso.
Respuesta a la pregunta guía	No se responde la pregunta correspondiente.	Respuesta poco clara o sin sustento.	Se responde correctamente con justificación básica.	Respuesta clara, bien fundamentada y contextualizada.
Habilidades de comunicación oral	Dificultades serias de expresión o lectura sin comprensión.	Comunicación aceptable, pero poco fluida o clara.	Exposición clara y comprensible.	Exposición natural, segura, didáctica y bien estructurada.
Creatividad y presentación del video	Video desorganizado o con problemas técnicos graves.	Video simple, sin errores graves, pero poco trabajado.	Video bien editado, con estructura básica.	Video creativo, bien editado, con buen ritmo y presentación visual.

Preguntas y respuestas de la actividad 5:

Estación 1: Considerando los mecanismos propuestos para la generación de magmas silícicos (AFC vs anatexis cortical), ¿Cuáles evidencias de campo observadas en esta estación refuerzan la hipótesis de la fusión parcial de la corteza?

R: Se observan coladas básicas sin evidencias claras de intermedios como andesitas o dacitas en grandes proporciones, lo que hace poco viable el modelo de cristalización fraccionada (AFC). Además, se mencionan fallas extensionales asociadas a los basaltos, que habrían facilitado el ascenso del magma máfico y su anatexis en la base cortical, reforzando la hipótesis de la fusión parcial de la corteza inferior.

Estación 2: El yacimiento de IOA del Cerro del Mercado se asocia a una intrusión silícica en la Caldera Chupaderos. ¿Qué procesos magmáticos y estructurales permiten la formación de un yacimiento de este tipo?

R: La formación de un yacimiento IOA (óxido de hierro - apatito) requiere de una fuente magmática rica en Fe y P, como las que generan intrusiones silícicas subvolcánicas. Estas se asocian a calderas como Chupaderos, donde el emplazamiento de magma permite la circulación de fluidos hidrotermales, facilitando la mineralización. La presencia de fluorapatitos y la alteración de las rocas hospedantes refuerzan esta interpretación.

Estación 3: Los basaltos alcalinos hawaííticos de esta estación están relacionados con un evento extensional del Mioceno tardío. ¿Qué importancia tiene esta extensión en el marco tectónico regional posterior a la subducción de Farallón?

R: La extensión del Mioceno tardío marcó una fase crítica en la evolución tectónica del occidente mexicano. Tras la desaparición de la subducción activa, el manto se elevó (ascenso astenosférico), provocando una descompresión que generó basaltos alcalinos. El graben Río

Chico - Otinapa, donde se encuentran los Basaltos Metates, es un ejemplo directo de esta actividad extensional.

Estación 4: La presencia de horizontes de ceniza entre flujos ignimbríticos distales sugiere un tipo particular de actividad volcánica. ¿Qué se puede inferir sobre la fuente volcánica y la dinámica eruptiva de esta región?

R: La presencia de cenizas intercaladas indica episodios explosivos intermitentes con emisiones de ceniza de caída entre eventos piroclásticos más energéticos. La facies distal de las ignimbritas sugiere una fuente lejana, posiblemente localizada decenas de kilómetros al oeste. Este comportamiento eruptivo evidencia un vulcanismo sostenido y de gran magnitud durante el Oligoceno.

Estación 5:

En el afloramiento descrito en la Estación 5, se observa una secuencia gruesa de ignimbritas con partes medianamente soldadas. ¿Qué indica esta soldadura parcial sobre la energía del evento eruptivo y la cercanía a la fuente?

R: La presencia de ignimbritas medianamente soldadas sugiere que el depósito fue suficientemente caliente y denso como para soldarse parcialmente, lo que implica un evento eruptivo de gran magnitud y posiblemente una cercanía relativa al centro de emisión.

¿Cómo se relaciona esta ignimbrita con cambios climáticos globales del Oligoceno, específicamente en cuanto a la fertilización marina por hierro?

R: La erupción masiva de ceniza volcánica rica en hierro pudo haber alcanzado zonas costeras y marinas, provocando una fertilización oceánica que incrementó la productividad del fitoplancton. Este proceso, al absorber más CO₂, pudo haber inducido un enfriamiento global, actuando como un mecanismo contrario al efecto invernadero clásico de las erupciones volcánicas.

Estación 6: La discordancia angular entre sucesiones ignimbríticas de diferentes edades revela un evento tectónico. ¿Qué implica esto sobre el inicio de la extensión en el sur de la SMO y su relación con la apertura del Golfo de California?

R: La discordancia entre unidades inclinadas del Oligoceno temprano y unidades horizontales del Oligoceno tardío indica que la extensión comenzó al menos desde los 30 Ma. Esta extensión temprana cuestiona modelos que ubicaban la ruptura cortical hasta el Mioceno y respalda evidencia de deformación previa a la apertura formal del Golfo de California, documentada en estados como Sonora, Nayarit y Sinaloa.

Estación 7: El cambio en la inclinación de las ignimbritas sugiere actividad tectónica compleja. ¿Cómo se interpreta esta variabilidad en el contexto del sistema de fallas de Concordia y su relación con fases extensionales sucesivas?

R: Las ignimbritas muestran inclinaciones variables, indicativas de fallamiento extensional en diferentes fases. El sistema de fallas de Concordia generó fallas antitéticas que provocan inversiones locales del basculamiento. Esto implica al menos dos fases de extensión: una del Oligoceno tardío que creó valles tectónicos, y otra del Mioceno que reactivó o modificó la inclinación de las unidades.

Estación 8: El relleno vulcanosedimentario observado forma parte de un paleovalle. ¿Qué eventos tectónicos y eruptivos se requieren para explicar esta geometría estratigráfica?

R: Se necesita una fase de extensión que haya generado el paleovalle, seguida por episodios eruptivos que depositaron ignimbritas y secuencias vulcanosedimentarias. El relleno indica sedimentación fluvial posterior, asociada a domos riolíticos del Oligoceno (fechados en ~29 Ma), lo que refuerza un escenario de extensión tectónica activa y volcanismo silícico subsecuente.

Estación 9: La ignimbrita con fragmentos líticos de gran tamaño sugiere una fuente eruptiva cercana. ¿Qué métodos podrían usarse para localizar esta fuente y cuáles son los indicios geológicos clave?

R: Se podría usar cartografía detallada, análisis petrográfico y geoquímico, así como datación radiométrica de unidades circundantes. La presencia de brechas de rezago, bloques métricos, capas masivas y variaciones de espesores son claves para delimitar la dirección del flujo y localizar una posible caldera colapsada o domo volcánico como fuente.

Estación 10: La presencia de brechas coignimbríticas indica cercanía a un centro eruptivo. ¿Cómo se distinguen estas brechas de otras brechas volcánicas en campo y qué información aportan sobre el evento eruptivo?

R: Las brechas coignimbríticas suelen tener matriz fina y fragmentos líticos mal clasificados, generados por el colapso de columnas eruptivas o re-trabajo de flujos piroclásticos. A diferencia de brechas epiclásticas o de flujo de lodo, estas muestran clastos angulosos, sin estructuras sedimentarias, y suelen encontrarse cerca de zonas fuente, revelando la energía y dirección de las erupciones.

Estación 11: El dique máfico corta tanto a la ignimbrita como a la secuencia clástica. ¿Qué nos revela esta relación sobre la cronología de la actividad magmática y tectónica en la región?

R: La relación de corte indica que el dique es más joven que ambas unidades encajonantes. Además, la inclinación de todas las unidades sugiere que hubo una fase de deformación posterior al emplazamiento de la ignimbrita (~31.7 Ma), y que el dique podría estar relacionado con eventos magmáticos posteriores a esta deformación inicial. La superposición de procesos muestra una historia tectonomagmática compleja, con varias fases activas durante el Oligoceno y Mioceno.

Estación 12: La intrusión granítica del Paleoceno está parcialmente alterada y cortada por unidades más jóvenes. ¿Qué indica esta superposición sobre la historia termal y de mineralización en el margen costero de la SMO?

R: Indica que el margen costero ha experimentado múltiples episodios magmáticos y termales. La alteración hidrotermal del batolito y su corte por unidades del Oligoceno sugieren una evolución policíclica, donde el batolito Laramíde inicial fue reactivado o sobreimpreso por eventos asociados al vulcanismo del Oligoceno. Esto coincide con la presencia de zonas mineralizadas en Copala y otras regiones cercanas.

Estación 13: La secuencia ignimbrítica alterada y basculada, junto con el corte por un dique máfico, permite establecer una historia tectónica. ¿Cómo se reconstruye la secuencia de eventos y qué fases extensionales están involucradas?

R: Primero se depositaron las ignimbritas (~30.5 Ma), posteriormente sufrieron alteración (argílica y propilítica) y fueron basculadas por fallas normales. Luego se emplazó un dique máfico, parcialmente afectado por el fallamiento, lo que sugiere al menos dos fases extensionales: una del Oligoceno que originó el basculamiento y otra posterior al Mioceno tardío que reactivó o generó fallas nuevas.

Estación 14: La inclinación de la ignimbrita cortada por un dique vertical con meteorización esferoidal indica una relación temporal. ¿Qué conclusiones se pueden extraer sobre el momento de la extensión y el emplazamiento de diques?

R: La ignimbrita (~24.7 Ma) fue basculada antes de que el dique (~11-10 Ma) la cortara. Esto implica una extensión temprana del Oligoceno tardío a Mioceno temprano, seguida por una intrusión más reciente. El dique también presenta evidencias de meteorización, lo que indica que ha estado expuesto por un periodo prolongado.

Estación 15: Las gravas heterométricas con clastos de distintas procedencias y atravesadas por diques máficos reflejan una historia compleja. ¿Qué nos dice esta sucesión sobre los procesos de sedimentación, fallamiento y magmatismo postextensional en la costa del Pacífico mexicano?

R: Las gravas indican un ambiente de depósito sintectónico en un semigraben activo, posterior al basculamiento de unidades más antiguas. El hecho de que los diques máficos corten estas gravas sugiere que el magmatismo continuó después de los eventos de sedimentación. La orientación de las fallas y los diques indica un régimen extensional en dirección E-NE, vinculado a la apertura progresiva del Golfo de California durante el Mioceno medio.

Las actividades propuestas buscan ir más allá de la simple observación pasiva de los contenidos de la excursión geológica virtual. A través de ejercicios prácticos, análisis visual, simulaciones de campo, trabajo colaborativo y comunicación científica, se pretende que los estudiantes construyan un conocimiento más profundo, significativo y aplicado.

Al participar activamente en estas tareas, los estudiantes no solo refuerzan su comprensión teórica, sino que también desarrollan competencias clave para su formación profesional.