



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Aprendizaje de formas
terrestres a través de un
recorrido de campo dentro de
un entorno virtual interactivo**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

P R E S E N T A

Abril Kumari Camarillo Hernández

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dra. Mayumy Amparo Cabrera
Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**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 APRENDIZAJE DE FORMAS TERRESTRES A TRAVES DE UN RECORRIDO DE CAMPO DENTRO DE UN ENTORNO VIRTUAL INTERACTIVO que presenté para obtener el título de INGENIERA 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.

ABRIL KUMARI CAMARILLO HERNANDEZ
Número de cuenta: 317346356

El siguiente trabajo es dedicado a quienes han sido un pilar fundamental en mi vida:

A mi madre Luz María, por su amor, fortaleza y sacrificio, por impulsarme a seguir adelante, por ser guía y ejemplo en mi vida, así como ser la razón detrás de cada logro alcanzado. A mi padre Anselmo y a mi hermano Isael, cuya exigencia y firmeza contribuyó a desarrollar la disciplina y el carácter para el cumplimiento de esta meta.

A mi mejor amiga Dana Martínez y a mi mejor amigo Antonio Herrera quienes se han convertido en una familia para mí y que han representado un apoyo fundamental en mi vida. Su acompañamiento, comprensión y respaldo constante fueron determinantes en momentos complejos, brindándome la fortaleza necesaria para continuar adelante y mantener el compromiso con este proceso académico. Su apoyo incondicional, confianza y cariño contribuyeron de manera significativa a mantener la motivación y dedicación.

A mi amor, Cristian Rodríguez por estar incluso antes de que este camino comenzara, por acompañarme en los momentos más difíciles y sostenerme cuando las fuerzas parecían no ser suficientes. Por cada palabra, gesto e instante en el que estuviste, incluso cuando yo no sabía cómo seguir. Gracias por caminar a mi lado, por creer en mí cuando más lo necesitaba y por formar parte de este logro, no solo desde lo emocional, sino también en cada paso de este proyecto, especialmente en el trabajo de campo. Por permitirme también acompañarte en tu propio camino, siendo testigo de tu crecimiento profesional, lo cual me llena de orgullo y admiración. Este logro también es tuyo, por todo lo que diste sin pedir nada a cambio, te amo muchísimo.

A la familia Martínez Arizpe y Rafael Rodríguez por su cariño, por abrirme las puertas y hacerme sentir parte de ustedes. Gracias por su cercanía, por su apoyo y por todo aquello que, sin necesidad de decirlo, hizo este camino más llevadero. Su presencia significó mucho más de lo que puedo expresar.

Agradecimientos:

A la DGAPA de la UNAM por la beca otorgada y los recursos financieros para contar con el material que se incluye en este trabajo, a través del proyecto PAPIME PE101825 “Creación de un espacio inmersivo virtual con material educativo digital usando metaversos para la docencia de las Ciencias de la Tierra”.

A mi asesora de tesis la Dra. Mayumy Amparo Cabrera Ramírez, por su acompañamiento cercano, su disposición y la claridad con la que me orientó en este trabajo desde sus primeras etapas hasta su conclusión. Su confianza y sus observaciones, siempre precisas y oportunas, no solo contribuyeron a mejorar la calidad del trabajo, marcaron de manera significativa el desarrollo de este material, impulsándome a ir más allá de lo esperado.

A los miembros del jurado por el tiempo, atención y dedicación brindados a la lectura y revisión de este trabajo, así como sus observaciones las cuales permitieron mejorar la claridad, estructura y alcance de este material.

De manera especial, agradezco al Mtro. Luis Andres Salinas Omassi por su apoyo y por haber propiciado el acercamiento que dio origen a este trabajo. Asimismo, por su enseñanza y ejemplo durante mi formación, los cuales no solo aportaron a mi desarrollo académico, sino que también fueron una fuente constante de inspiración para no desistir y seguir adelante.

Al Ingeniero Eduardo Meza, por la inspiración brindada durante la pandemia, la cual fue determinante para continuar con mis estudios durante el periodo de educación a distancia y adaptación académica. Su motivación, orientación y ejemplo fueron fundamentales para mantener la perseverancia.

A quienes colaboraron en el trabajo de campo y en la elaboración de materiales como modelos 3D y recursos audiovisuales, por su apoyo y disposición durante el desarrollo de este proyecto.

A las amistades que formé a lo largo de la carrera, tanto dentro de las aulas como en el gimnasio, gracias por su compañerismo, apoyo y momentos compartidos que hicieron este camino más llevadero y significativo. A mi entrenador Omar por brindarme la oportunidad de formar parte del equipo representativo de fisicoconstructivismo, por la confianza y motivación transmitidas durante esta etapa.

A todos ustedes, muchas gracias.

Índice

1. Introducción	4
1.1 Objetivo general	4
1.2 Objetivos específicos	4
1.3 Marco teórico	4
1.4 Geomorfología y vulcanismo en Puebla	6
1.5 Justificación académica	13
2. Representación tridimensional de formas terrestres.	14
2.1 Drones	14
2.1.1 Mavic 2 Pro	14
2.1.2 Phantom 4 pro V2	15
2.1.3 Uso de drones para realizar modelos 3D	15
2.2 Agisoft Metashape	17
2.2.1 Guía básica para crear un modelo 3D en Agisoft Metashape.	17
3. Diseño del entorno virtual interactivo.	29
3.1 Spatial.io	29
3.1.1 Guía para el uso básico de Spatial.io	29
3.1.1.1 Tiempos de elaboración del recorrido en Spatial io	39
3.2 Kuula	40
3.3 Sketchfab	45
3.4 Google Earth	47
3.4.1 Guía básica para un recorrido virtual en Google Earth.	48
3.4.1.1 Tiempos de elaboración del recorrido en Google Earth	54
4. Recorrido de campo.	59
4.1 Fichas de información de estaciones de práctica virtual.	59
4.1.1 Hummock	59
4.1.2 Laguna de Atexcac	60
4.1.3 Laguna “La Preciosa”	61
4.1.4 Mina “La preciosa”	62
4.1.5 Laguna de Aljojuca	63
4.1.6 Lahar San Isidro	64
4.1.7 Cráter San Isidro	65
4.1.8 Cráter de Tecuitlapa	66
4.2 Recorrido virtual en Google Earth	67
4.3 Recorrido virtual en Spatial io	68
5. Conclusiones	69
6. Referencias	69

1. Introducción

1.1 Objetivo general

Construir un recorrido virtual interactivo tanto dentro de Google earth como dentro de la plataforma de metaversos Spatial Io, utilizando modelos tridimensionales de formas terrestres obtenidos en un recorrido de campo en la zona de los alrededores de San Salvador el Seco, Puebla; con el propósito de facilitar el aprendizaje y la comprensión de los procesos geomorfológicos por parte de estudiantes de Ingeniería Geológica.

1.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar y clasificar las formas terrestres representativas observadas durante el recorrido de campo, a fin de contar con un conjunto de elementos geomorfológicos relevantes para el entorno virtual.
2. Generar modelos tridimensionales (3D) de las formas terrestres seleccionadas mediante técnicas de fotogrametría y modelado digital, garantizando su fidelidad geométrica y visual.
3. Integrar los modelos 3D en la plataforma de Sketchfab para poderlos visualizar dentro del metaverso Spatial Io, y Google Earth creando un recorrido virtual interactivo que reproduzca de manera realista la experiencia de la visita a campo.
4. Incorporar recursos didácticos interactivos (fotografías 360, textos, imágenes, audios, videos) dentro del entorno virtual, con el propósito de apoyar la comprensión de los procesos geomorfológicos

1.3 Marco teórico

Innovación didáctica en la enseñanza de la Geomorfología mediante entornos virtuales.

1. Fundamentos pedagógicos:

El proyecto se sustenta en el aprendizaje experiencial, que concibe aprender como un ciclo activo de vivir la experiencia, observarla, conceptualizar y experimentar de nuevo (Kolb). En la enseñanza de la Geomorfología, este enfoque encaja debido a que gran parte del aprendizaje tradicionalmente se apoya en los trabajos de campo, donde el estudiante explora el terreno y relaciona lo observado con los conceptos teóricos. En este sentido, los “trabajos de campo” virtuales permiten retomar esta lógica, pero trasladándose a entornos digitales interactivos donde el alumnado explora, observa, contrasta con modelos y vuelve a actuar dentro del entorno.

Asimismo, la enseñanza de la geomorfología requiere promover el pensamiento espacial, el cual comprende habilidades como: la visualización, el análisis de relaciones espaciales, la comprensión de la escala y la identificación de patrones dentro del paisaje, dichas capacidades han sido reconocidas por el National Research Council como competencias transversales fundamentales para la resolución de problemas y que deben

integrarse de una manera más explícita en el currículo, particularmente en disciplinas como la geografía y las geociencias. En este sentido, los entornos virtuales interactivos permiten activar dichas habilidades mediante escenarios navegables, representaciones tridimensionales y modelos digitales que facilitan el análisis del relieve.

Después de la pandemia de COVID-19, el uso de nuevas tecnologías en la educación superior incrementó, impulsando la incorporación de herramientas digitales como la realidad virtual para mantener experiencias de aprendizaje más activas y significativas.¹ Desde este punto de vista, un entorno virtual aplicado a las geociencias como la geomorfología no busca sustituir el trabajo de campo tradicional, sino complementarlo, permitiendo así procesos de búsqueda, análisis e interpretación espacial que apoyan la comprensión de los procesos geomorfológicos. De esta manera, el proyecto se orienta al diseño de una propuesta didáctica que integra enfoques pedagógicos actuales que responden a las necesidades de formación de estudiantes de Ingeniería Geológica.

2. Evidencia sobre salidas de campo virtuales en geografía y geociencias.

Las salidas de campo virtuales (Virtual Field Trips, VFT) se han incorporado de una manera progresiva en la enseñanza de la geografía y las geociencias como un recurso didáctico complementario. Estas nuevas herramientas no sustituyen el trabajo de campo físico, sino más bien, pretenden ofrecer beneficios claros como una mayor accesibilidad e inclusión ya que permite que los estudiantes que presentan limitaciones económicas o físicas puedan participar en actividades de exploración del territorio. Asimismo, las VFT ayudan a facilitar una previa preparación y un repaso posterior a las salidas de campo, lo que favorece a una mejor comprensión de los contenidos, mayor compromiso, una reducción de costes y de cuestiones de logística.

En el campo de las geociencias, el trabajo de Arrowsmith, Counihan y McGreevy² se señala que el uso de entornos de realidad virtual inmersiva permite a los estudiantes interactuar con representaciones tridimensionales del terreno, facilitando la comprensión de paisajes complejos y de procesos geológicos que suelen resultar difíciles de observar mediante recursos tradicionales. Dichos autores destacan que estas experiencias ayudan a incrementar el interés y la participación de los alumnos, además de apoyar el análisis espacial y la interpretación geomorfológica, especialmente cuando se emplean como complemento del trabajo de campo tradicional. De manera complementaria, el análisis de Colomo Magaña et al.¹ muestra un crecimiento sostenido en la implementación de realidad virtual, aumentada y mixta en la educación universitaria, destacando su uso como apoyo al aprendizaje activo sin sustituir las estrategias didácticas convencionales. Asimismo, experiencias

recientes documentadas en el contexto educativo australiano como la incorporación de excursiones virtuales ha favorecido una mayor participación del alumnado y una mejor disposición para el aprendizaje de contenidos geográficos y geológicos.³

3. Principios de aprendizaje multimedia y entornos virtuales.

El uso de entornos virtuales en la enseñanza de la geografía se sustenta en los principios del aprendizaje multimedia propuestos por Mayer⁴ en los cuales se señala que el aprendizaje es más efectivo cuando la información se presenta a través de dos canales complementarios: el visual y el verbal, así como el uso de ejemplos relevantes. Aplicados al campo de la geomorfología, estos principios facilitan que el alumnado construya representaciones mentales claras de las formas terrestres, así como de sus procesos de formación y sus interacciones espaciales, los cuales son aspectos fundamentales para el análisis del relieve. El uso de entornos virtuales inmersivos y modelos tridimensionales permite observar y explorar paisajes de manera interactiva, favoreciendo la comprensión de fenómenos geomorfológicos que difícilmente pueden ser visualizados mediante descripciones textuales, fortaleciendo así el aprendizaje significativo en las geociencias.²

1.4 Geomorfología y vulcanismo en Puebla

La geomorfología proviene del griego: geo (tierra), morphé (forma) y logos (estudios), es decir, el estudio de las formas de la Tierra. Por lo tanto, podemos definir a la geomorfología como una ciencia que estudia las características físicas de la superficie terrestre, sus formas terrestres (ríos, colinas, llanuras, playas, dunas de arena, etc), su origen, evolución y procesos que las modifican a lo largo del tiempo. Esta disciplina implica el análisis de fenómenos que ocurren en la superficie terrestre y en sus proximidades, así como la interacción entre diversos tipos de materiales y procesos físicos que los modifican.

Dentro de la geomorfología, las formas terrestres se definen como las características físicas de la superficie terrestre, estas pueden variar de tamaño ya que pueden abarcar desde molehills hasta montañas y placas tectónicas. Las formas terrestres se clasifican principalmente en⁵:

1. Origen del proceso
 - 1.1. Formas terrestres erosionales y deposicionales
 - 1.2. Exógeno
 - 1.2.1. Meteorización y laderas
 - 1.2.2. Fluviales
 - 1.2.3. Glaciares y glaciofluviales
 - 1.2.4. Periglaciares
 - 1.2.5. Eólicas
 - 1.2.6. Costeras
 - 1.2.7. Kársticas

- 1.3. Endógeno
 - 1.3.1. Formas tectónicas
 - 1.3.2. Formas volcánicas y plutónicas
 - 1.3.3. Formas estructurales
- 2. Escala y morfología
 - 2.1. Escala tectónica
 - 2.2. Escala regional y local

Las estructuras que se encuentran en este trabajo son:

1. Hummocks: Forma de relieve caracterizada por ser un montículo, loma o cresta que aparece en diversos contextos geológicos, principalmente en glaciares, avalanchas de escombros (Figura 76) y registros sedimentarios.⁶
2. Axalapascos (o axalapaxco): Nombre regional y cultural utilizado en México para describir a un volcán tipo maar que contiene un lago en su cráter mientras que los que están secos se llaman xalapaxcos. En Puebla se localizan varios de estos edificios destacando: Atexcac, La Preciosa (Figuras 77 y 78), Alchichica, Quechulac, entre otras.^{7 8}
3. Maar: tipo de volcán caracterizado por ser un cráter de explosión originado por un proceso de vulcanismo freatomagmático. Geomorfológicamente, se define como una forma de relieve negativa, lo que significa que el fondo del cráter se encuentra por debajo del nivel del suelo circundante. Algunos ejemplos emblemáticos son: Aljojuca, Tecuitlapa (Figuras 80 y 83), Alchichica y Quechulac.^{7 9}
4. Lahares: Flujos de lodo generados por la saturación de detritos volcánicos con agua (Figura 81), lo que provoca el movimiento rápido de materiales como tierra, rocas, nieve o hielo por las laderas de los volcanes.⁵
5. Mina: Se define como un conjunto de infraestructuras físicas y labores necesarias para la explotación de un yacimiento, con el objetivo de lograr la extracción rentable de minerales útiles (Figura 79). Las minas a cielo abierto generan nuevas geoformas, mientras que las subterráneas pueden provocar subsidencia o colapso del terreno.^{10 5}
6. Cráter: Depresión o rasgo morfológico cóncavo que se forma en la superficie terrestre, principalmente a causa de procesos volcánicos o por el impacto de cuerpos celestes.⁵ Un ejemplo particular es el Cráter San Isidro (Figura 82).

El vulcanismo en el estado de Puebla se integra principalmente en el sector oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) también conocida como Cinturón Volcánico Mexicano, se extiende desde el estado de Nayarit (en la costa del Pacífico) hasta el Veracruz (en el Golfo de México) es el motor geodinámico de la región central de México.⁷ Este arco volcánico continental, cuya génesis responde a la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa Norteamericana,⁹ dicta la evolución estructural de la orografía poblana (Figura 1).

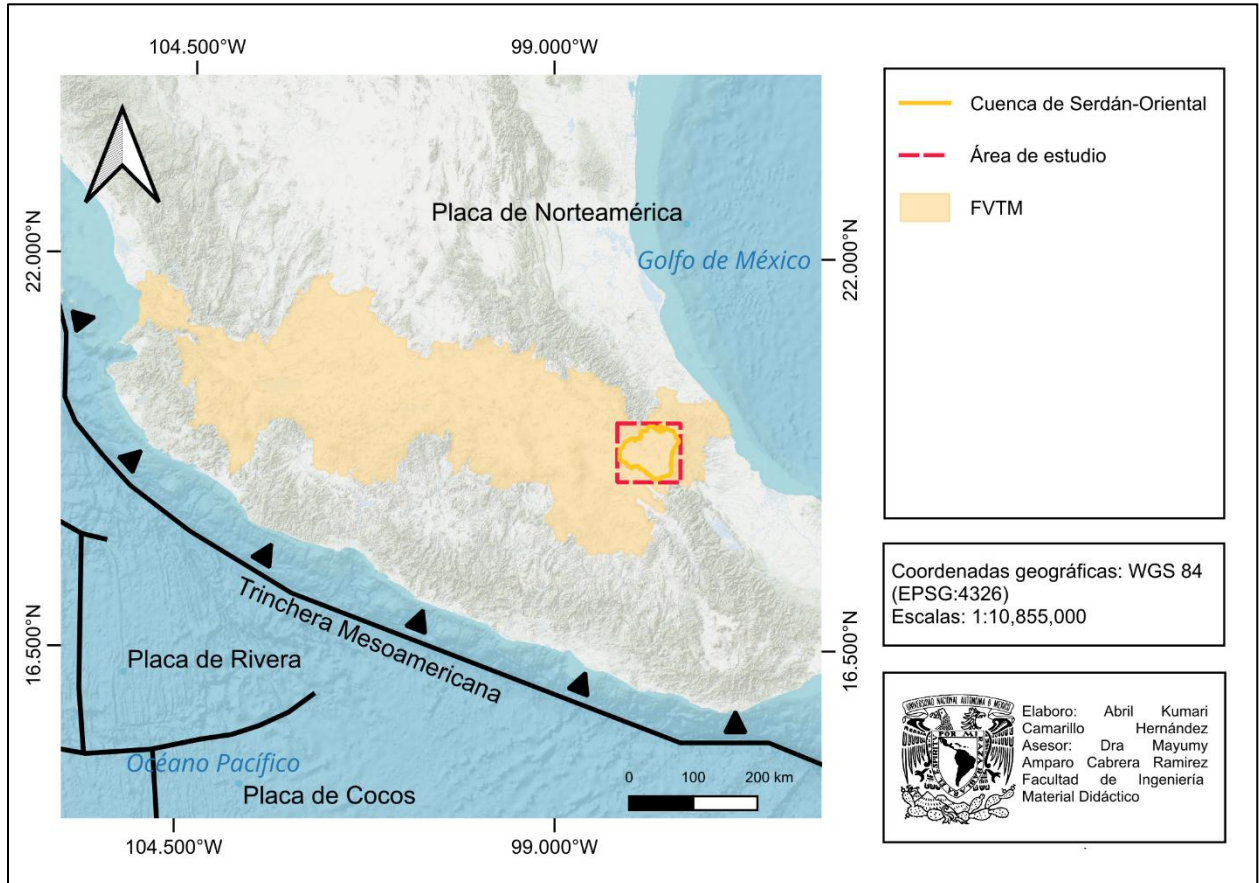


Figura 1. Representación de la Faja Volcánica Trans-Mexicana junto con los principales rasgos tectónicos, así como la Cuenca de Serdán-Oriental y el área de estudio.⁹

La transformación radical del paisaje poblano comenzó en el Mesozoico, cuando el territorio actual formaba parte de un fondo oceánico. Durante los periodos Jurásico y Cretácico, procesos de sedimentación marina prolongada generaron un potente basamento carbonatado compuesto por calizas y lutitas que alcanzan espesores de hasta 3,000 metros. Al finalizar el Mesozoico, la Orogenia Laramide actuó como el gran motor estructural que plegó y falló estas rocas, elevando el terreno y configurando los sistemas montañosos que hoy delimitan la región.⁹

Ya en el Cenozoico, específicamente durante el Mioceno (hace unos 19-10 millones de años), se instauró el arco volcánico inicial de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), caracterizado por estratovolcanes de composición intermedia. Posteriormente, un episodio máfico en el Mioceno tardío generó extensas mesetas basálticas, seguido de una etapa de vulcanismo silícico y bimodal que dio origen a grandes calderas e ignimbritas en el Plioceno temprano.

Fue durante la transición al Cuaternario cuando el relieve poblano adoptó su rasgo más distintivo: la acumulación masiva de coladas de lava provenientes de la cordillera Cofre de Perote-Pico de Orizaba obstruyendo los antiguos cauces fluviales, transformando un drenaje abierto que desembocaba en el Golfo de México a un sistema endorreico (cerrado) de la Cuenca de Serdán-Oriental (Figura 2). Este

confinamiento permitió la formación de grandes lagos que experimentaron una colmatación sedimentaria de unos 70 metros de espesor.⁹ Este legado hidrológico, marcado por una elevada capacidad de almacenamiento en los acuíferos, fue el factor determinante para el desarrollo de un volcanismo bimodal y freatomagmático único en la cuenca.⁷

Dentro de esta cuenca sobresalen estructuras de gran magnitud como la Caldera de Los Humeros, uno de los volcanes tipo caldera más grandes de México, que consta de dos estructuras anidadas y alberga un importante campo geotérmico activo.⁷ Sin embargo, los rasgos más distintivos del vulcanismo monogenético en Puebla son los axalapaxcos o maares, cráteres de explosión con lago formados por la interacción violenta entre el magma ascendente y el nivel freático. Ejemplos emblemáticos como Aljojuca y Tecuitlapa muestran historias eruptivas complejas:

- Aljojuca evolucionó a través de cinco episodios que incluyeron fases estrombolianas iniciales y explosiones freatomagmáticas que provocaron colapsos de sus flancos.
- Tecuitlapa destaca por ser un cono de toba que alberga en su interior cuatro conos de escoria alineados, aunque se le suele agrupar con los "axalapaxcos" de la zona, su estructura como cono de toba con un fondo elevado y poco profundo impide la permanencia de un lago, limitándolo a inundaciones estacionales que desaparecen en épocas de estiaje.⁹

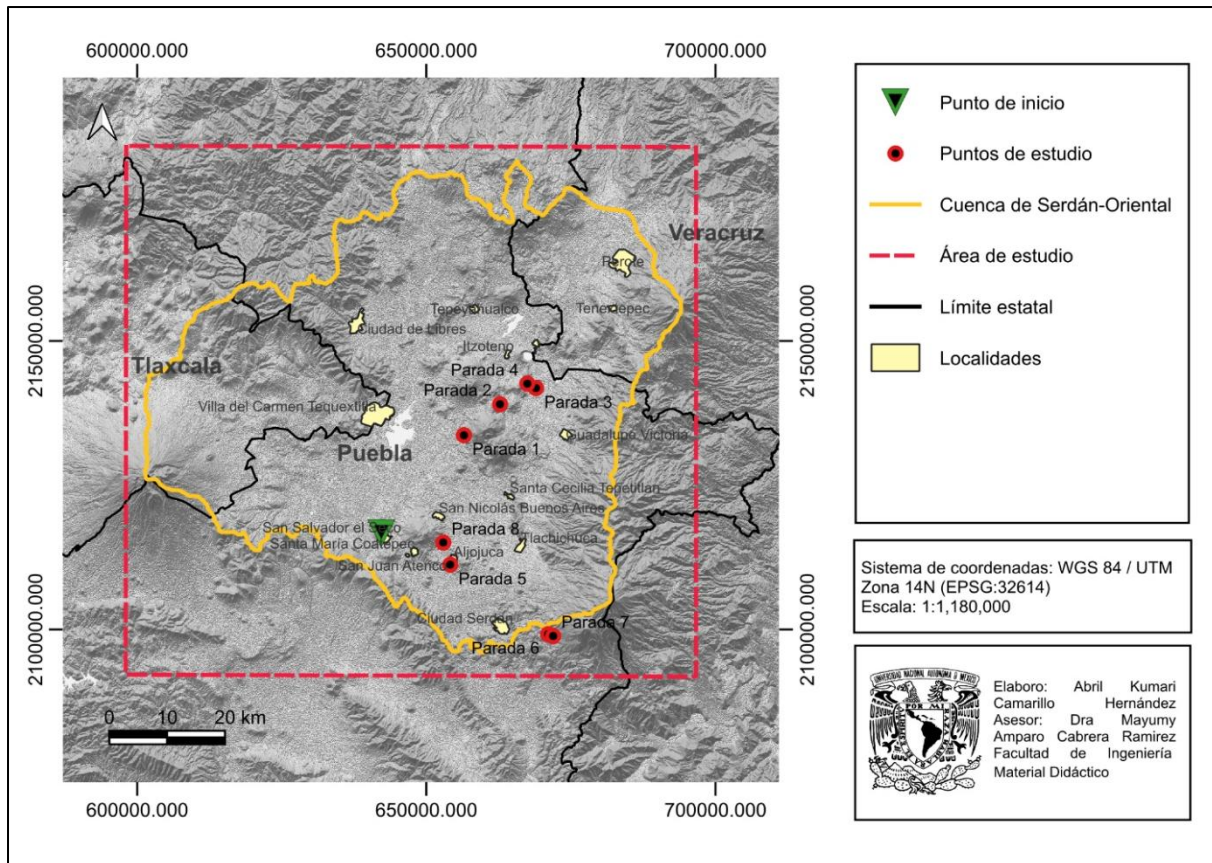


Figura 2. Mapa del área de estudio, donde se observa como los principales puntos de estudio se encuentran dentro y de una manera muy cercana a la Cuena de Serdán-Oriental.⁹

En cuanto al magma que alimentó las explosiones en el sector oriental de la FVTM tiene un origen tanto del manto profundo (impulsado por la subducción) como de la fusión de la corteza terrestre, interactuando a menudo en cámaras magmáticas complejas antes de alcanzar la superficie.¹¹ Siendo así que, estas erupciones sean particularmente peligrosas debido a la generación de oleadas piroclásticas, mezclas turbulentas de gas y ceniza que pueden desplazarse a velocidades superiores a los 200 km/h, superando barreras topográficas.⁸

En resumen, la evolución tectónica provocó que Puebla pasara de ser un lecho marino a un altiplano volcánico confinado, definido por una corteza gruesa, cuencas sin salida al mar (Figura 3) y suelos ricos en minerales volcánicos (Figura 4). Como resultado, la población de Puebla y del centro de México ha sido atraída por estos suelos fértiles (Figura 5) y el clima favorable (Figura 6), lo que ha convertido a esta provincia volcánica en la región más poblada del país. Esta alta densidad de población constituye un factor crítico en las evaluaciones de peligro volcánico, ya que los habitantes se asientan cerca de estructuras geológicas que, aunque puedan parecer inactivas, forman parte de un sistema tectónico y magmático que continúa dinámico en el presente.

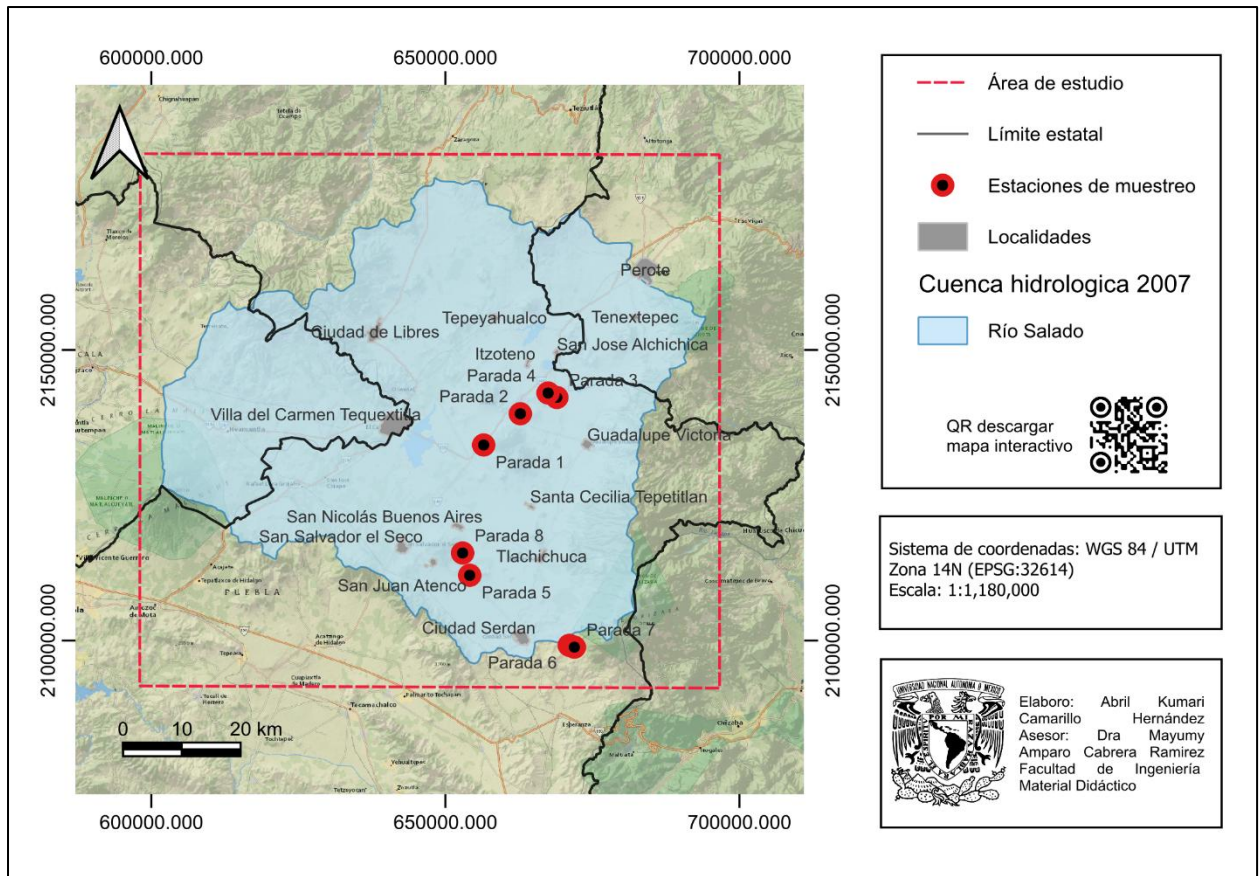


Figura 3. Mapa de la cuenca hidrologica que abarca la zona de estudio.

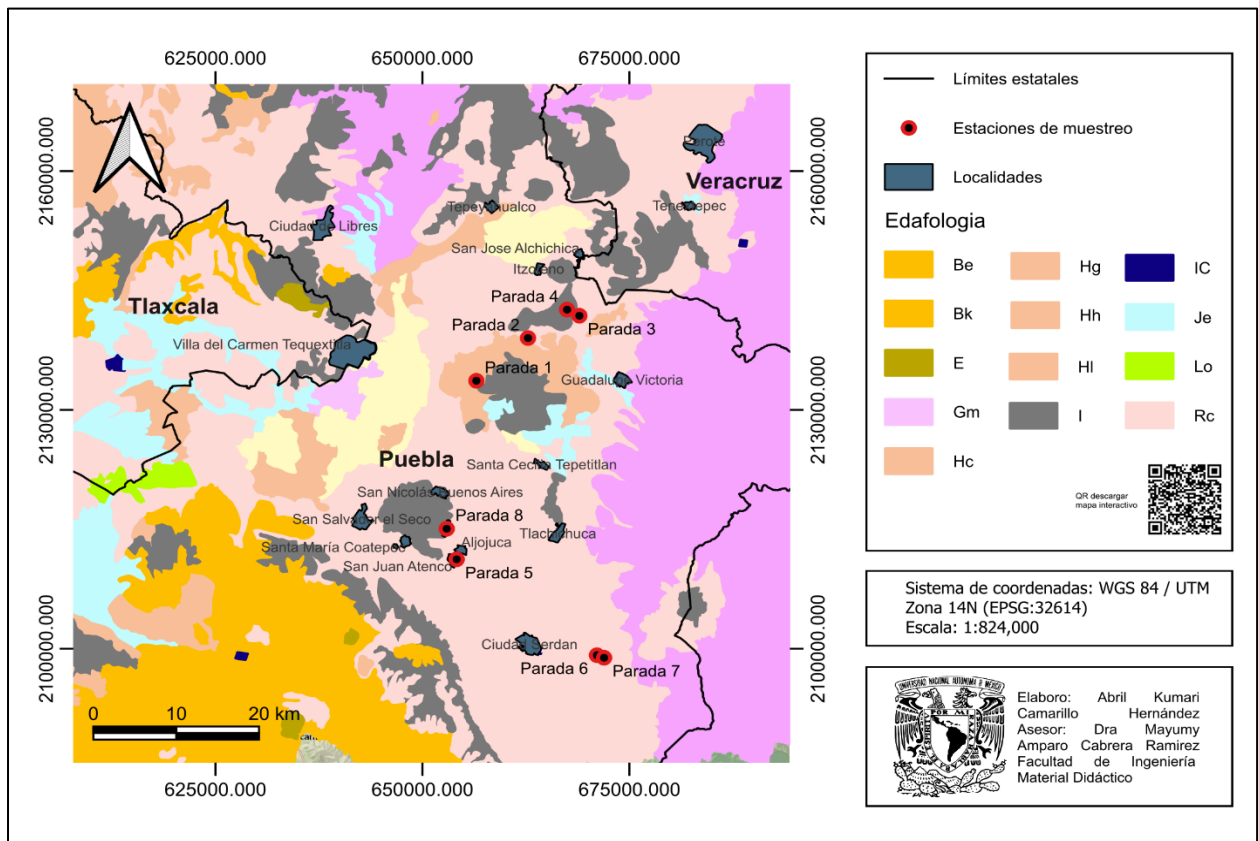


Figura 4. Mapa edafológico del área de estudio, abarcando los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

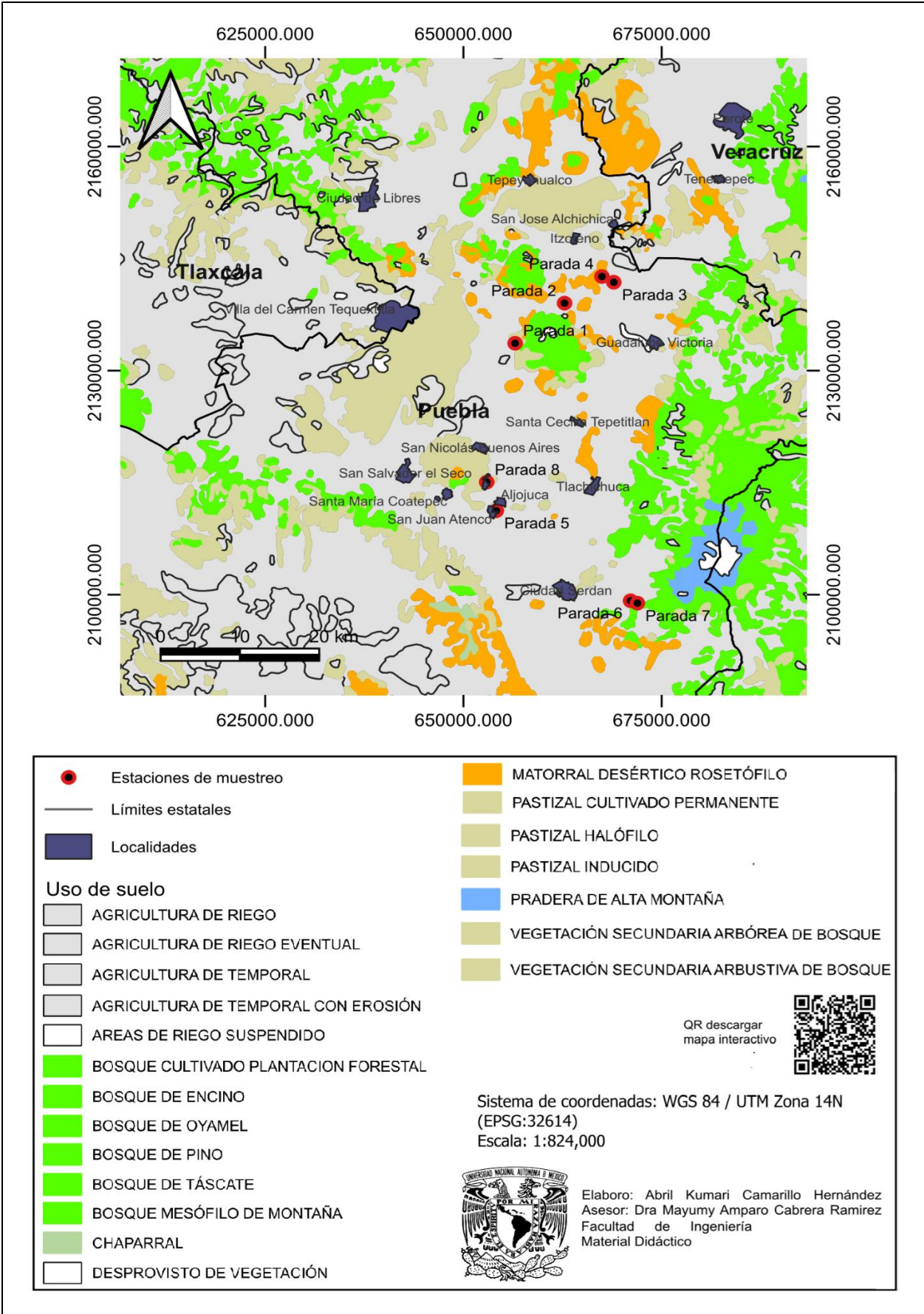


Figura 5. Mapa del uso de suelo del área de estudio, abarcando los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

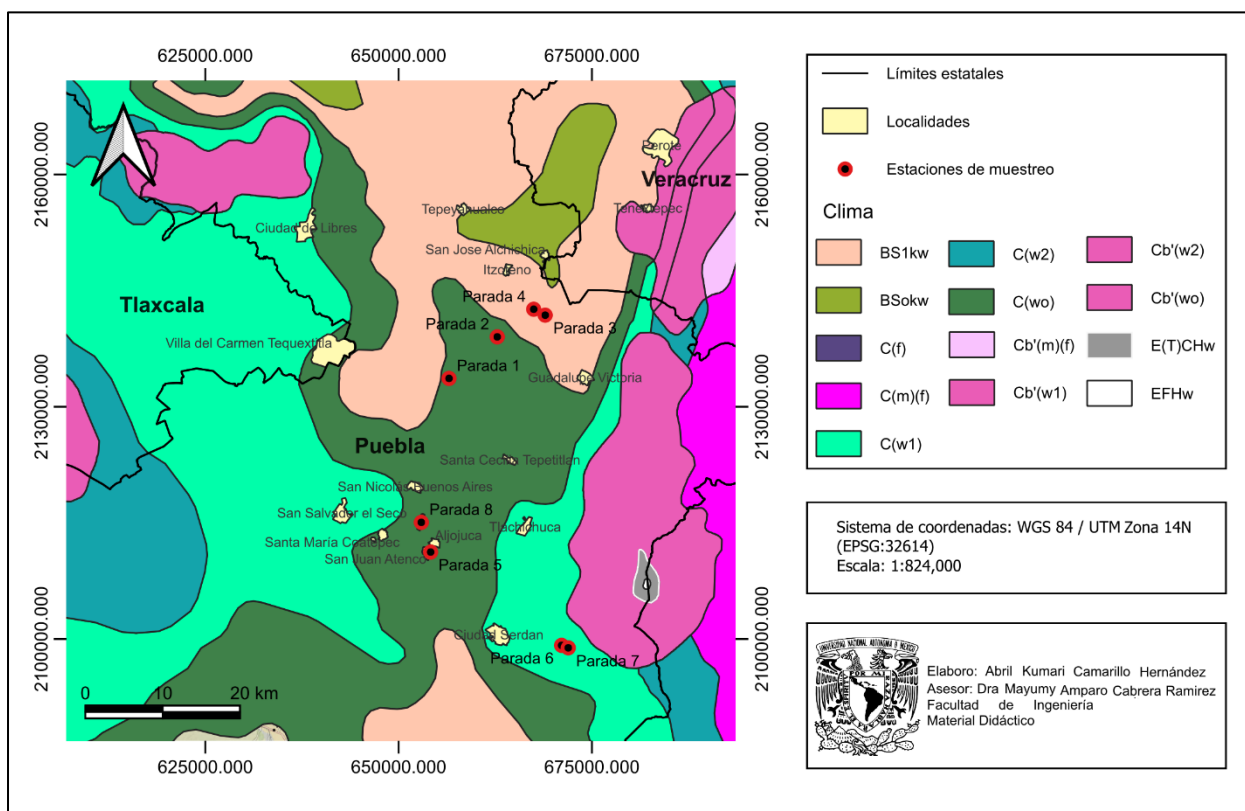


Figura 6. Mapa del clima del área de estudio, abarcando los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

1.5 Justificación académica

La enseñanza de la geomorfología y de los procesos terrestres en la carrera de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM enfrenta diversos retos, entre los que destacan:

- La complejidad conceptual de los fenómenos
- La necesidad de articular la teoría con la observación directa
- Las limitaciones logísticas asociadas a las prácticas de campo, como:
 - Disponibilidad de tiempo
 - Presupuesto
 - Seguridad
 - Accesibilidad a los sitios de estudio.

Estas condiciones derivan en una exclusión parcial de estudiantes en el acceso a las experiencias de campo, lo que limita que no todos los estudiantes puedan experimentar de manera plena el trabajo de campo, afectando su oportunidad de adquirir experiencias formativas en una etapa clave de su formación profesional. Ante este panorama, el desarrollo de un material didáctico basado en un entorno virtual interactivo dentro de plataformas como Google earth y Spatial lo aunado a recursos multimedia como lo son videos y modelos 3D se plantea como una propuesta innovadora y pertinente. Asimismo, de manera complementaria, el uso de herramientas de inteligencia artificial generativa permite la creación y apoyo en la

elaboración de recursos visuales y contenidos digitales, facilitando su interpretación y comprensión.

Este recurso no pretende sustituir el trabajo de campo real, sino complementarlo y enriquecerlo al ofrecer a los estudiantes la posibilidad de explorar modelos tridimensionales de formas terrestres obtenidas a partir de un recorrido de campo real. De esta manera, se favorece la observación detallada del relieve, la identificación de rasgos geomorfológicos y la comprensión de los procesos que les dan origen, dentro de un entorno accesible en cualquier momento y sin restricciones de tiempo o lugar.

Tomando en consideración el punto de vista pedagógico, la propuesta se sustenta en el aprendizaje experiencial y en el uso de entornos virtuales como una estrategia que favorece el aprendizaje significativo. La interactividad del entorno permite que el estudiante no sólo reciba información de forma pasiva, sino que participe activamente en la construcción de su conocimiento, relacionando conceptos teóricos con representaciones visuales y espaciales, lo que contribuye al desarrollo de competencias propias de la disciplina como:

- El pensamiento espacial
- La capacidad de análisis geológico
- La interpretación de procesos naturales en un contexto tridimensional.

A nivel institucional, la UNAM promueve la incorporación de tecnologías innovadoras a la docencia universitaria, en concordancia con las tendencias actuales de la educación superior. En este sentido, el proyecto se alinea con dicha visión al integrar herramientas de realidad virtual y entornos digitales en la formación de ingenieros geólogos capaces de desenvolverse en contextos académicos y profesionales cada vez más digitalizados. En síntesis, la justificación de este material radica en fortalecer la calidad de la enseñanza de la geomorfología, amplía el acceso a experiencias de campo, incrementa la motivación del alumnado y aporta un recurso didáctico con potencial de aplicación en otros cursos y áreas de las geociencias.

2. Representación tridimensional de formas terrestres.

2.1 Drones

Un dron es un vehículo aéreo no tripulado que integra ingeniería y tecnología de vanguardia, incorporando cámaras digitales y diversos sensores (como los infrarrojos) que permiten la obtención de imágenes aéreas y la adquisición de información geográfica y técnica.^{12 13}

2.1.1 Mavic 2 Pro

El Mavic 2 Pro es un dron que está diseñado para la fotografía aérea profesional, desarrollado en colaboración con Hasselblad para integrar la cámara L1D-20c. Este

dispositivo destaca por su equilibrio entre ingeniería avanzada y tecnología de imagen, permitiendo capturar fotos de 20 megapíxeles con un gran detalle de color gracias a la tecnología Hasselblad Natural Colour Solution (HNCS). Tiene un peso de despegue de 907 g, sus dimensiones plegado son 214 x 91 x 84 mm, lo que lo hace altamente portátil. Ofrece un tiempo máximo de vuelo de 31 minutos (a una velocidad constante de 25 km/h) y un tiempo de vuelo estacionario de hasta 29 minutos, puede alcanzar una velocidad máxima de 72 km/h en modo Sport (S-mode) llegando a soportar vientos de entre 29 y 38 km/h (nivel 5 en la escala de Beaufort). De igual manera, Incluye herramientas como Hyperlapse (modos Libre, Círculo, Course Lock y Waypoint), ActiveTrack 2.0 (capaz de identificar hasta 16 objetos simultáneamente, así como sensores de visión e infrarrojos en todas las direcciones: frontal, trasera, superior, inferior y lateral).¹³

2.1.2 Phantom 4 pro V2

El Phantom 4 Pro V2.0 es un dron de alto rendimiento diseñado para la captura de imágenes aéreas profesionales, que introduce mejoras clave en propulsión y transmisión respecto a su predecesor. Siendo este dispositivo equipado con un sensor CMOS de 1 pulgada y 20 megapíxeles y un obturador mecánico con una velocidad de hasta 1/2000 s, lo que elimina la distorsión del obturador rodante al capturar objetos en movimiento rápido o al volar a alta velocidad. El dron tiene un peso total de 1375 g, el cual incluye tanto la batería como las hélices por lo que alcanza una velocidad máxima de 72 km/h (45 mph) en modo Sport y ofrece un tiempo de vuelo aproximado de 30 minutos y puede resistir vientos de hasta 10 m/s. Incluye sensores de visión frontales, traseros y descendentes, además de un sistema de detección de obstáculos por infrarrojos, los sensores infrarrojos situados en los laterales tienen un rango de detección de 0.2 a 7 metros, pero solo funcionan en los modos Beginner (Principiante) y Tripod (Trípode). Tiene un diseño de chasis rígido y no plegable por lo que mantiene una distancia diagonal de 350 mm de forma permanente.¹⁴

Por tanto, la estructura del Mavic 2 Pro prioriza la portabilidad mediante su diseño plegable, la estructura fija del Phantom 4 Pro V2.0 prioriza la robustez y la estabilidad necesaria para albergar componentes como su obturador mecánico y sistemas de propulsión de alta eficiencia.

2.1.3 Uso de drones para realizar modelos 3D

La utilización de drones para la creación de modelos 3D ha amplificado áreas como la geología y la topografía, ofreciendo una alternativa más rápida, flexible y económica frente a los métodos tradicionales de fotogrametría aérea con aviones. De acuerdo con Bascur et al.¹² el proceso se basa en la combinación de vehículos aéreos no tripulados con cámaras digitales y sensores específicos para una adquisición masiva de datos. El proceso se puede desarrollar a través de las siguientes etapas:

1. Planificación y adquisición de datos

El primer paso consiste en realizar vuelos programados sobre el área de interés.

- a. Misiones de cuadrícula: Se utilizan parámetros de registro estándar donde el dron cubre el terreno siguiendo una cuadrícula, tomando fotos con el eje de la cámara perpendicular al suelo (nadir).
- b. Parámetros clave: Se debe definir el traslape (overlap) entre imágenes adyacentes y la distancia de muestreo del suelo (GSD), determina la resolución espacial, es decir, la superficie que representa cada píxel en la imagen.
- c. Nuevas modalidades: Existen técnicas avanzadas como el hill scan, que utiliza un modelo de terreno preexistente para optimizar la captura en zonas con relieve abrupto.

2. Mejora de la precisión geográfica (RTK y PPK).

La precisión de las coordenadas de las imágenes que va tomando el dron, puede ser mejorada mediante procesos RTK y PPK:

- a. RTK (Real Time Kinematics): Proporciona correcciones de posición en tiempo real.
- b. PPK (Post Processed Kinematic): Método de mejor elección dado que evita la pérdida de conexión entre la base y el dron en terrenos accidentados. En este caso, tanto el dron (rover) como la base guardan la información geográfica y de posicionamiento por separado que después son para ajustar la metadata (EXIF, Exchangeable image file format) de las fotos con precisión centimétrica.¹²

3. Flujo de trabajo digital y modelado.

Una vez obtenidas las fotos con las coordenadas ajustadas, se procesan mediante software especializado

- a. Alineación y calibración: Se orientan las fotos y se calibra la cámara
- b. Nube de puntos: Se genera primero una nube de puntos básica por coincidencia de imágenes y luego una nube densa para obtener mayor calidad y detalle
- c. Malla y Texturizado: Se crea una malla (mesh) que une los puntos para formar la superficie
- d. Productos finales: Se generan el Modelo Digital de Elevación (DEM) y el ortomosaico (imagen corregida geoméricamente).
- e. Aplicación del modelo 3D: Finalmente, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS), se integran estos productos para crear el modelo 3D definitivo, permitiendo realizar interpretaciones geológicas precisas y extrapolaciones al subsuelo.¹²

Por lo tanto, estos modelos permiten obtener una definición superior (del orden de centímetros) en comparación con los modelos satelitales (del orden de metros), especialmente en zonas de cortes verticales o afloramientos de difícil acceso.

2.2 Agisoft Metashape

Es una herramienta que se utiliza para la generación de modelos tridimensionales de alta resolución mediante técnicas fotogramétricas. Su aplicación permite obtener representaciones precisas y detalladas de superficies y estructuras naturales, lo que resulta especialmente útil en estudios de geografía física, geomorfología y geología. Los modelos 3D generados facilitan el análisis de formas del relieve, estructuras volcánicas, procesos erosivos y relaciones espaciales entre unidades geológicas. Asimismo, la posibilidad de escalar y georreferenciar los modelos permite integrar la información en Sistemas de Información Geográfica, realizar mediciones de distancias, áreas y volúmenes, y apoyar la interpretación y cartografía geológica. En conjunto, estas metodologías constituyen una herramienta fundamental para el análisis espacial y la documentación precisa de fenómenos geológicos y geomorfológicos.¹⁵

2.2.1 Guía básica para crear un modelo 3D en Agisoft Metashape.

Esta guía explica paso a paso cómo generar un modelo tridimensional (3D) utilizando Agisoft Metashape, desde la preparación de las fotografías hasta la exportación del modelo final, así mismo, los modelos 3D de esta práctica virtual fueron realizados por el M.C Sergio Salinas Sánchez y la alumna Cynthia Merari González Romero.

Proceso metodológico:

El orden recomendado y aceptado es:

1. **Alinear fotografías → nube de puntos dispersa**
2. **(Opcional) Limpieza de la nube dispersa**
3. **Construir nube de puntos densa**
4. **Construir malla (modelo 3D)**
5. **Construir textura**
6. **Escalado / georreferenciación (si aplica)**
7. **Exportación**

Requisitos previos

1. Software: Agisoft Metashape (Standard o Professional).
2. Fotografías con buen traslape (60–80%), buena iluminación y sin desenfoque.
3. Hardware recomendado: procesador multinúcleo y al menos 16 GB de RAM.
4. Espacio en disco y preferentemente contar con una tarjeta gráfica

I. Crear un nuevo proyecto

1. Abrir Agisoft Metashape, crear un proyecto nuevo y guardarlo desde el inicio (Figura 7).

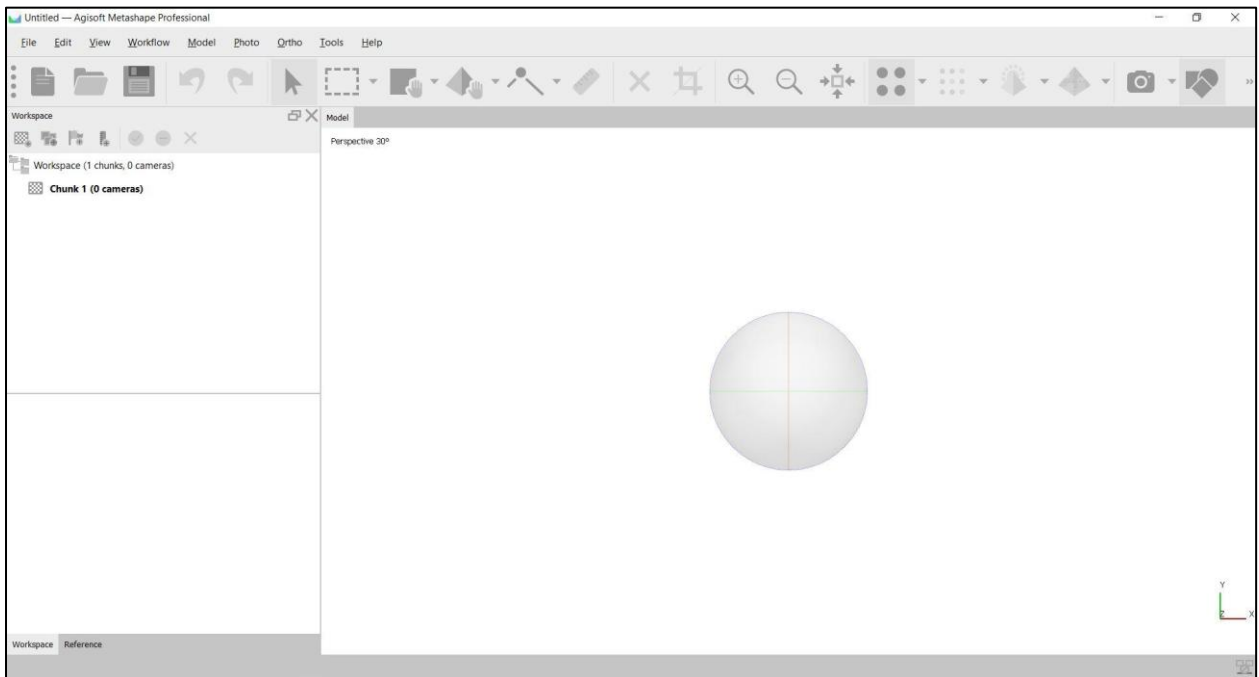


Figura 7. Captura de pantalla para la demostración del paso I.1 © Agisoft Metashape.

II. Importar fotografías

1. Agregar las fotos mediante Workflow > Add Photos o Add Folder (Figura 8 y 9).

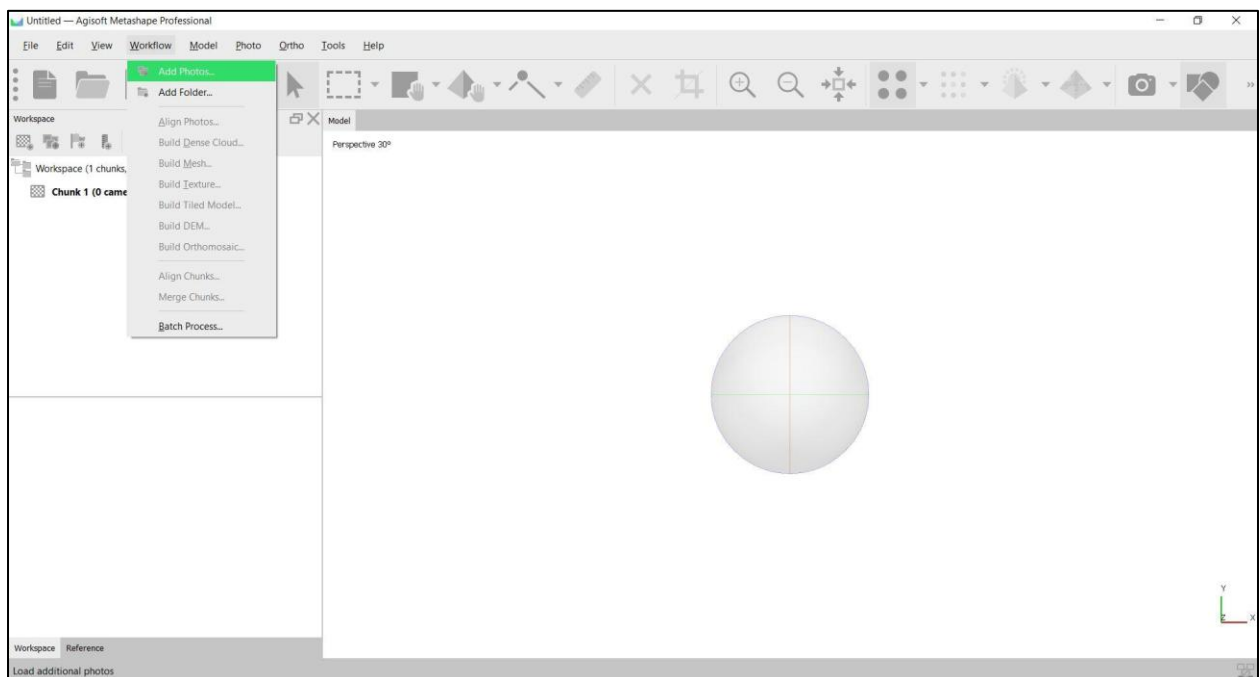


Figura 8. Captura de pantalla para la demostración del paso II.1 mediante "Add Photos". © Agisoft Metashape.

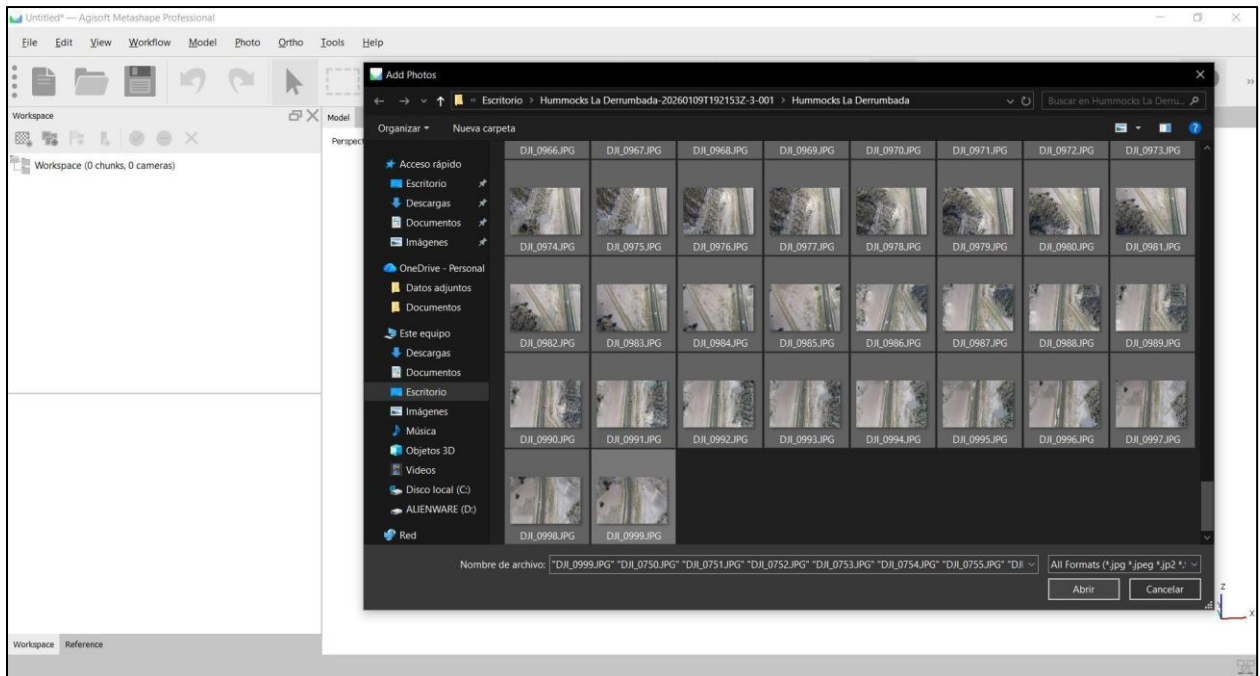


Figura 9. Captura de pantalla para la demostración del paso de II.1 mediante “Add Folder”. © Agisoft Metashape.

III. Alinear fotografías

1. Workflow > Align Photos (Figura 10).

Parámetros recomendados:

a. Accuracy: High (Figuras 11 y 12).

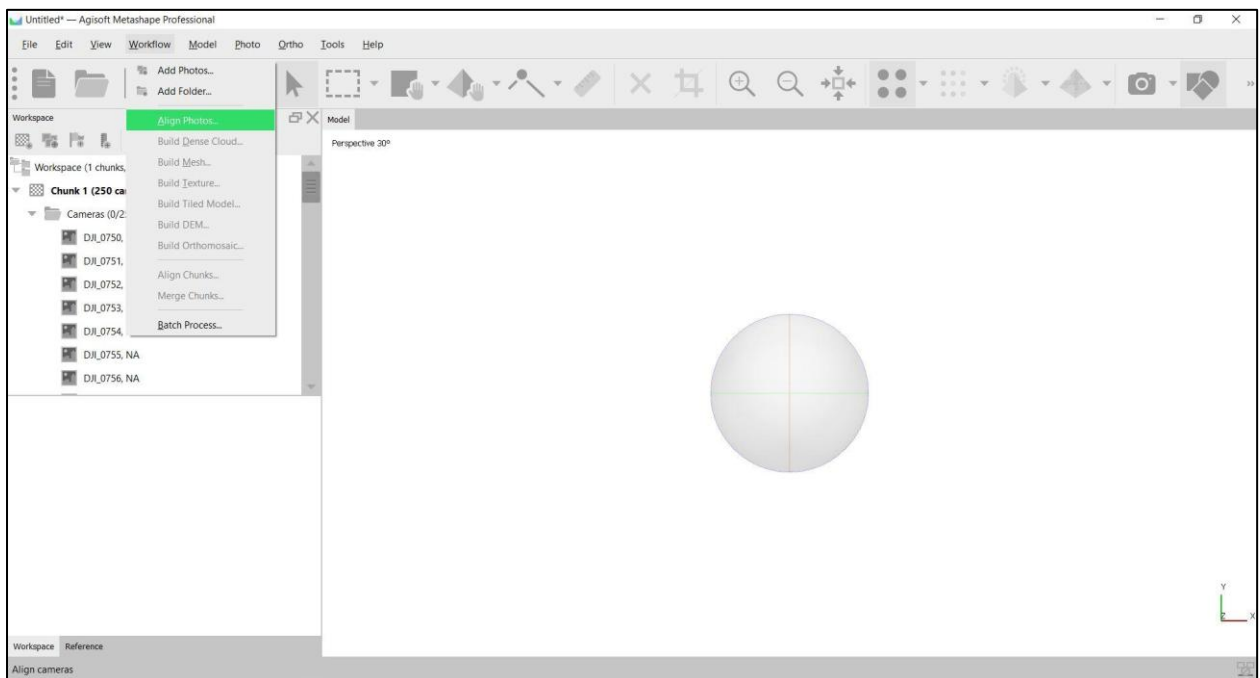


Figura 10. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1 © Agisoft Metashape.

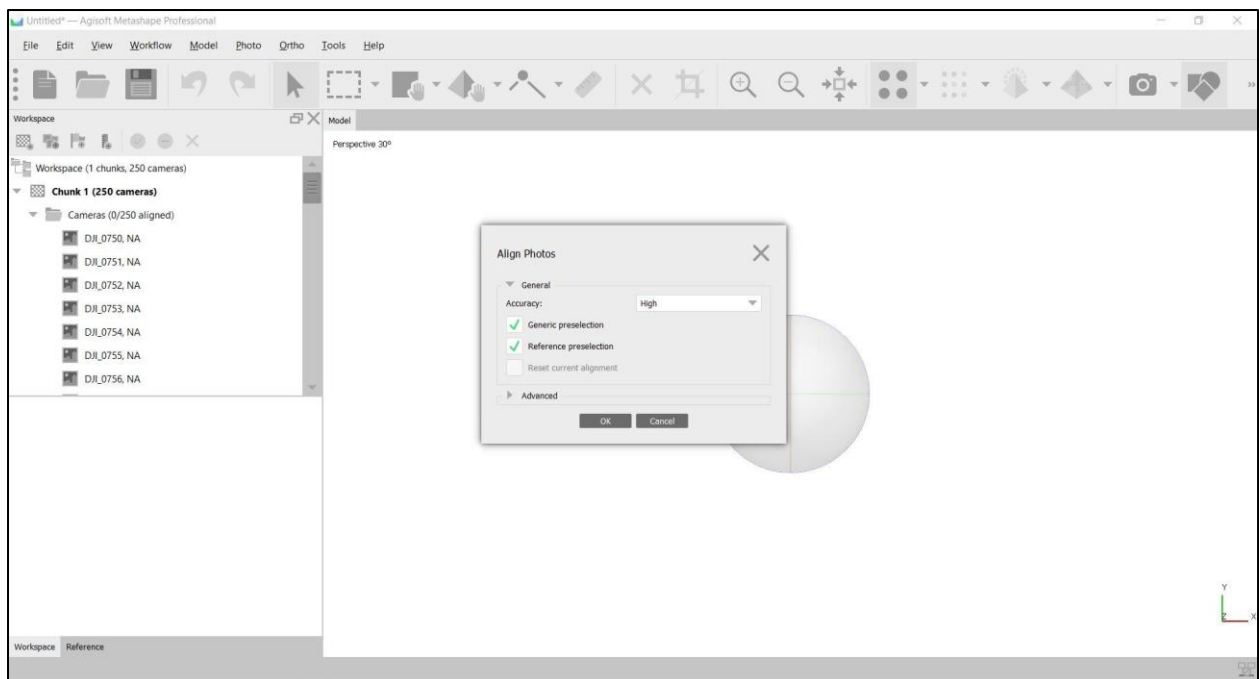


Figura 11. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1.a © Agisoft Metashape.

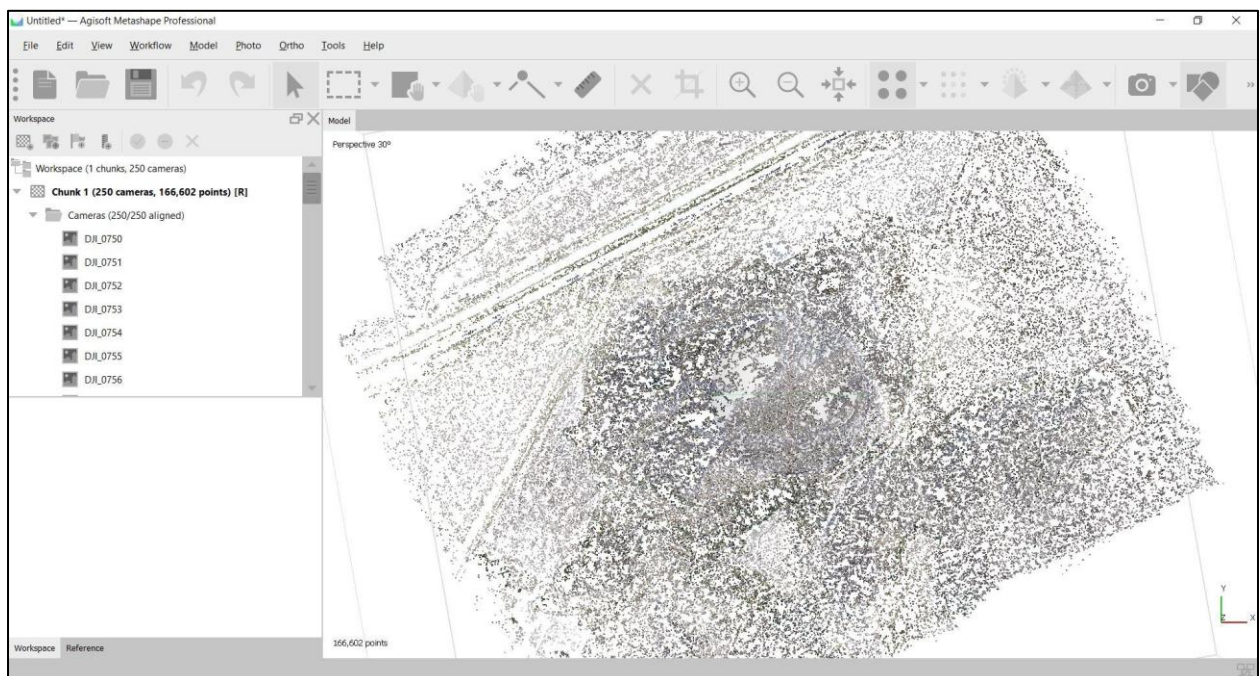


Figura 12. Captura de pantalla para la demostración de cómo queda el trabajo después de aplicar el paso III.1.a © Agisoft Metashape.

IV. Limpieza de nube de puntos

1. Activar la vista de Tie Points.
2. Utilizar las herramientas de selección para eliminar puntos erróneos o ruido.
3. Presionar Delete para borrar los puntos seleccionados.

Nota: Este paso mejora la calidad del modelo final.

V. Construir nube de puntos densa

1. Workflow > Build Dense Cloud (Figura 13 y 14).

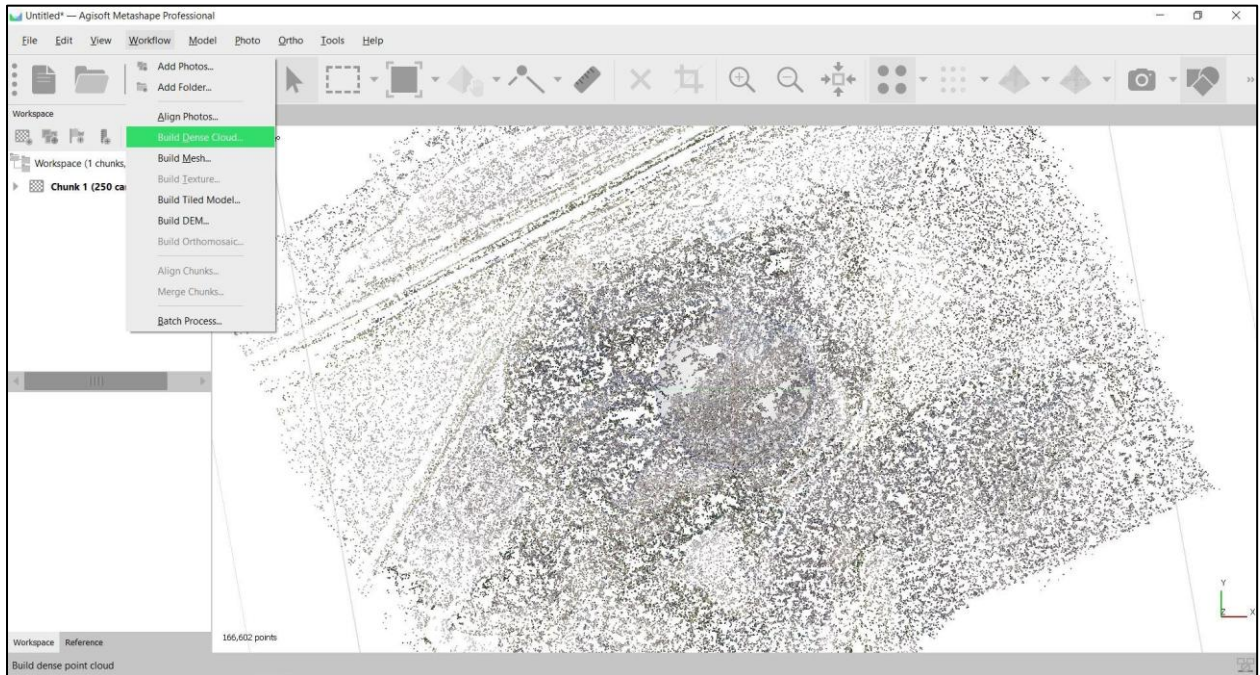


Figura 13. Captura de pantalla para la demostración del paso V.1. © Agisoft Metashape.

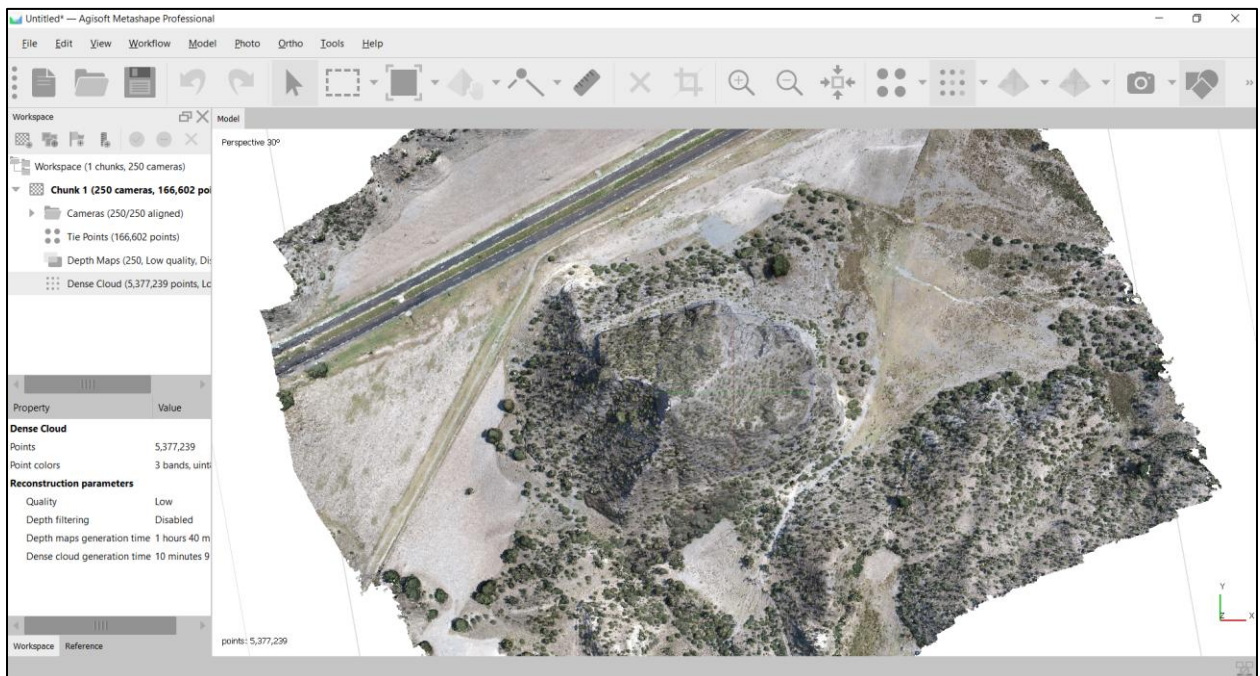


Figura 14. Captura de pantalla para la demostración de cómo queda el trabajo después de aplicar el paso del apartado V. © Agisoft Metashape.

VI. Generar la malla 3D

1. Workflow > Build Mesh (Figura 15).

- a. Surface type: Arbitrary o Height Field (Figura 16).
- b. Source data: Dense Cloud (Figura 17).

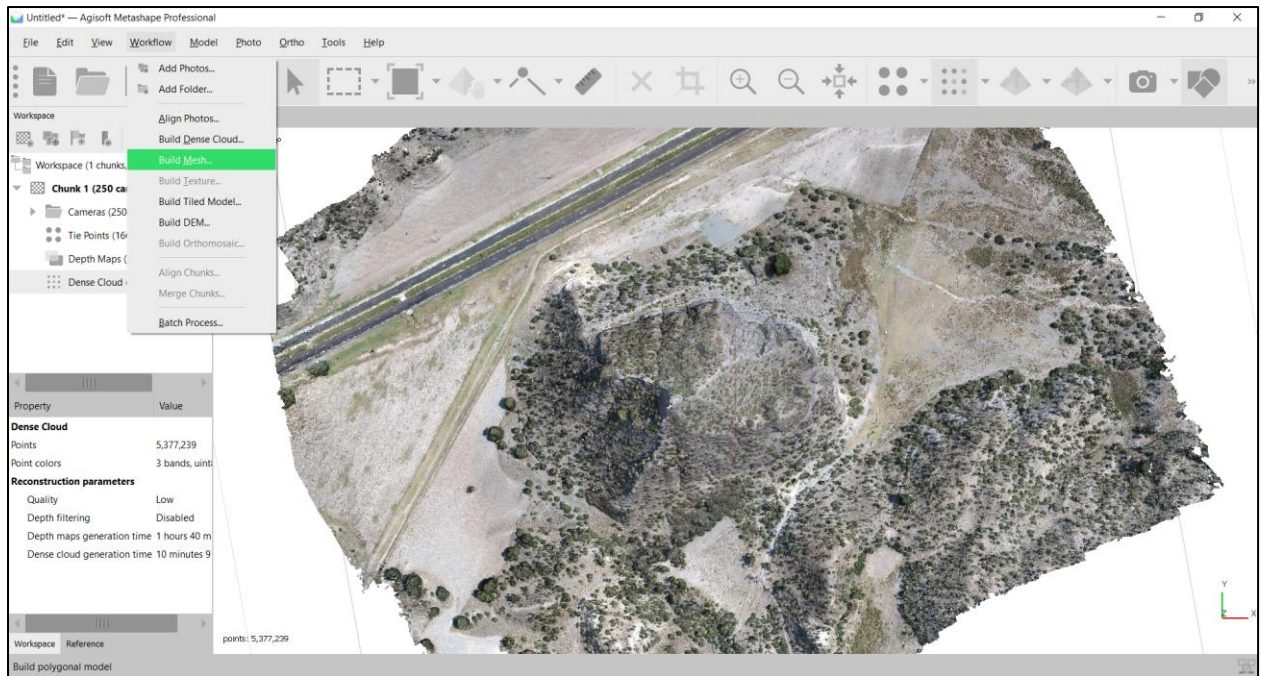


Figura 15. Captura de pantalla para la demostración del paso VI.1 © Agisoft Metashape.

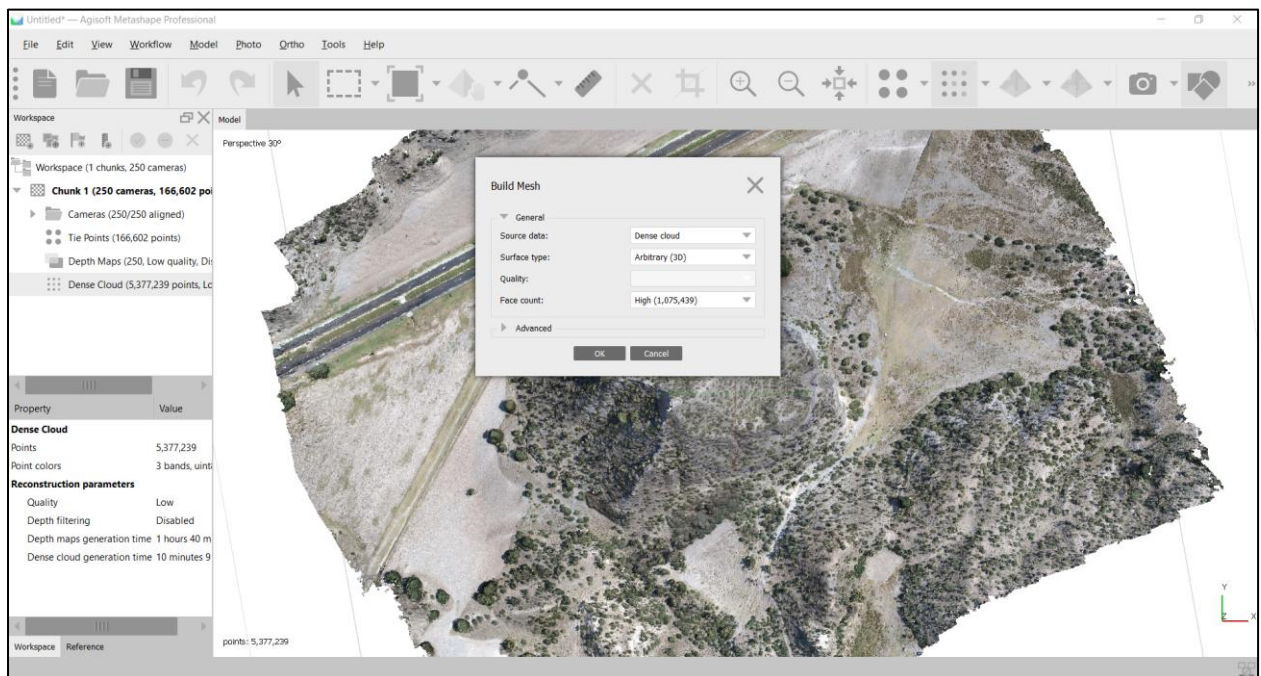


Figura 16. Captura de pantalla para la demostración del paso VI.1.a. © Agisoft Metashape.

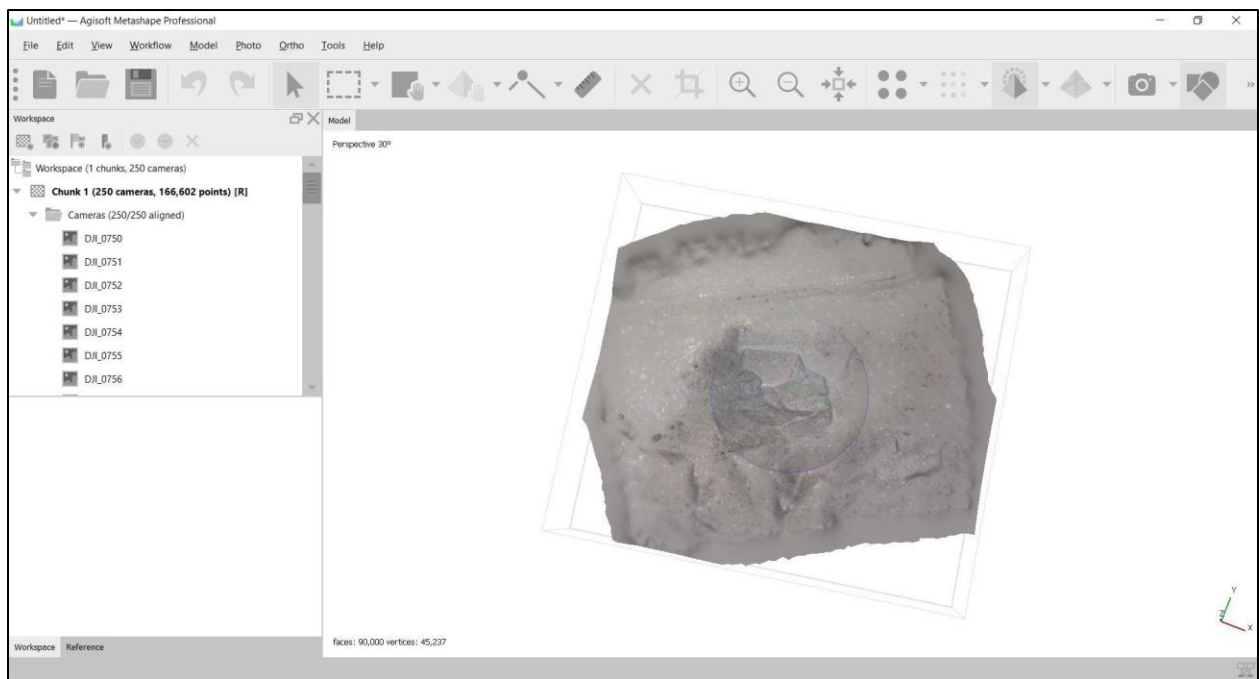


Figura 17. Captura de pantalla para la demostración del paso VI.1.b © Agisoft Metashape.

VII. Aplicar textura

1. Workflow > Build Texture (Figura 18).
 - a. Mapping mode: Generic.
 - b. Blending mode: Mosaic (Figura 19 y 20).

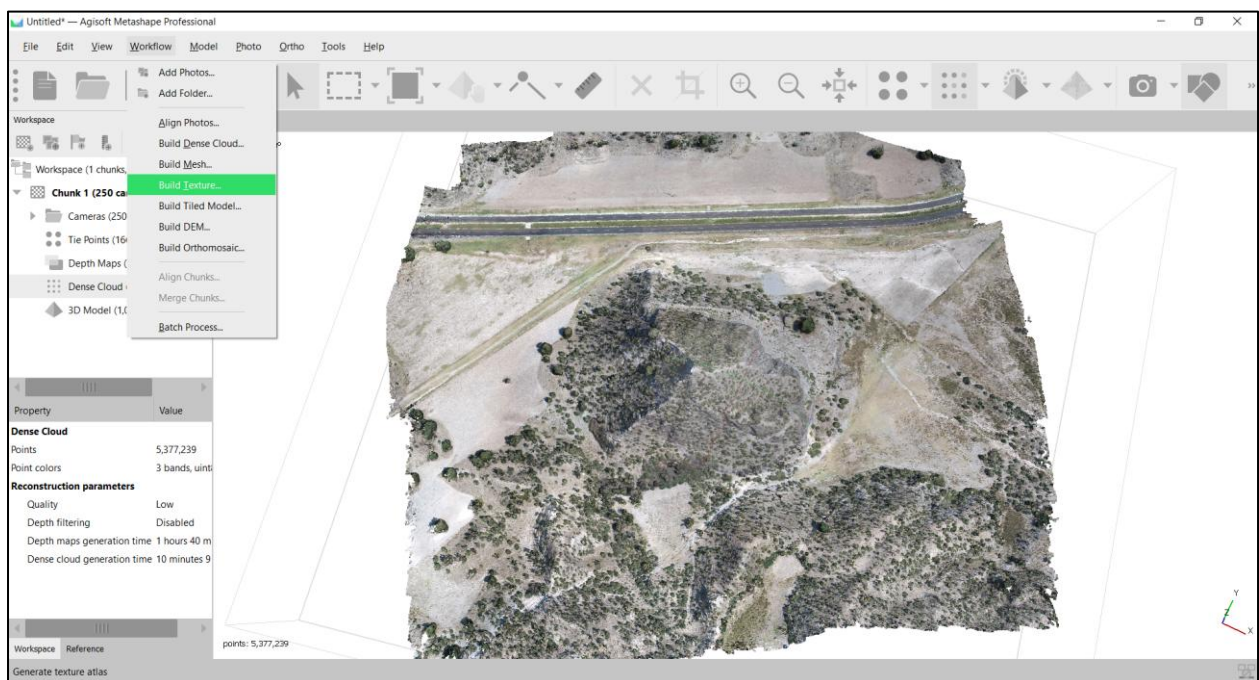


Figura 18. Captura de pantalla para la demostración del paso VII.1. © Agisoft Metashape.

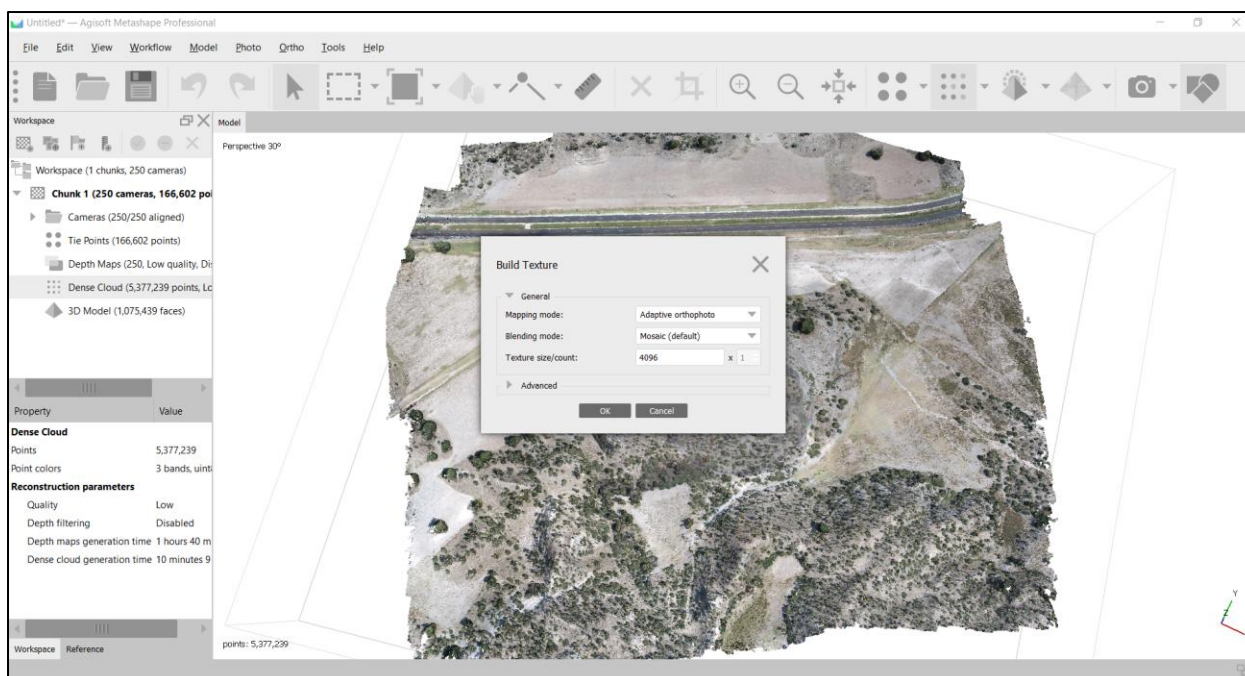


Figura 19. Captura de pantalla para la demostración del paso VII.1.a y VII.1b. © Agisoft Metashape.

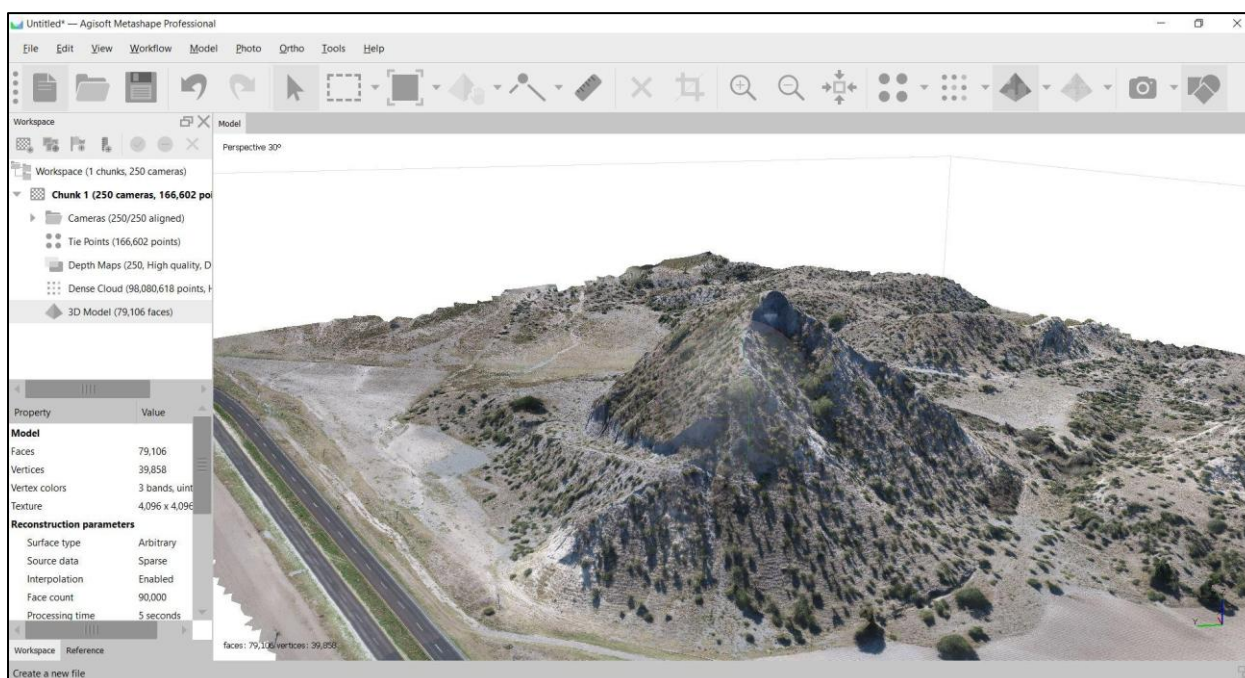


Figura 20. Captura de pantalla para la demostración de cómo queda el trabajo después de aplicar los pasos del apartado VII. © Agisoft Metashape.

VIII. Escalado y orientación (puntos de control-opcional)

El escalado consiste en ajustar el tamaño del modelo para que represente dimensiones reales (metros, centímetros, etc.), aun cuando no se cuente con coordenadas geográficas. La georreferenciación asigna un sistema de coordenadas espaciales (por ejemplo, UTM o WGS84) al modelo 3D, permitiendo su integración en SIG y cartografía.

IX. Exportar el modelo

1. File > Export > Export Model (Figura 21).
 - a. Formatos comunes: OBJ, PLY, FBX.

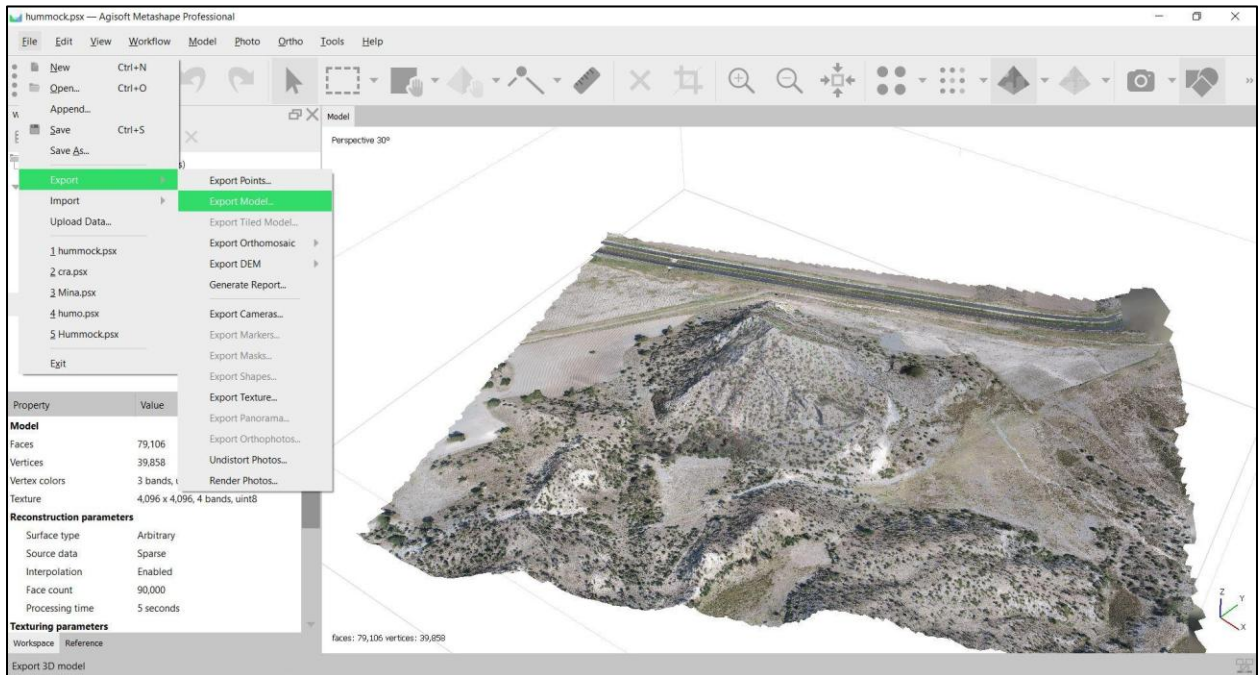


Figura 21. Captura de pantalla para la demostración del paso IX.1. © Agisoft Metashape.

A manera de demostración, se incluyen modelos tridimensionales elaborados en Agisoft Metashape, los cuales fueron posteriormente cargados en Sketchfab, para su visualización (Figuras 22-28).



Figura 22. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D del Hummock, Puebla. Recuperado de: <https://sketchfab.com/3d-models/hummock3d-9472268074d344dca9d702a988d8cb50> ©Sketchfab



Figura 23. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D de la Laguna de Atexcac, Puebla. Recuperado de <https://sketchfab.com/3d-models/laguna-de-atexcac-3e255f3be2734836bc48b63a9374d70d> © Sketchfab

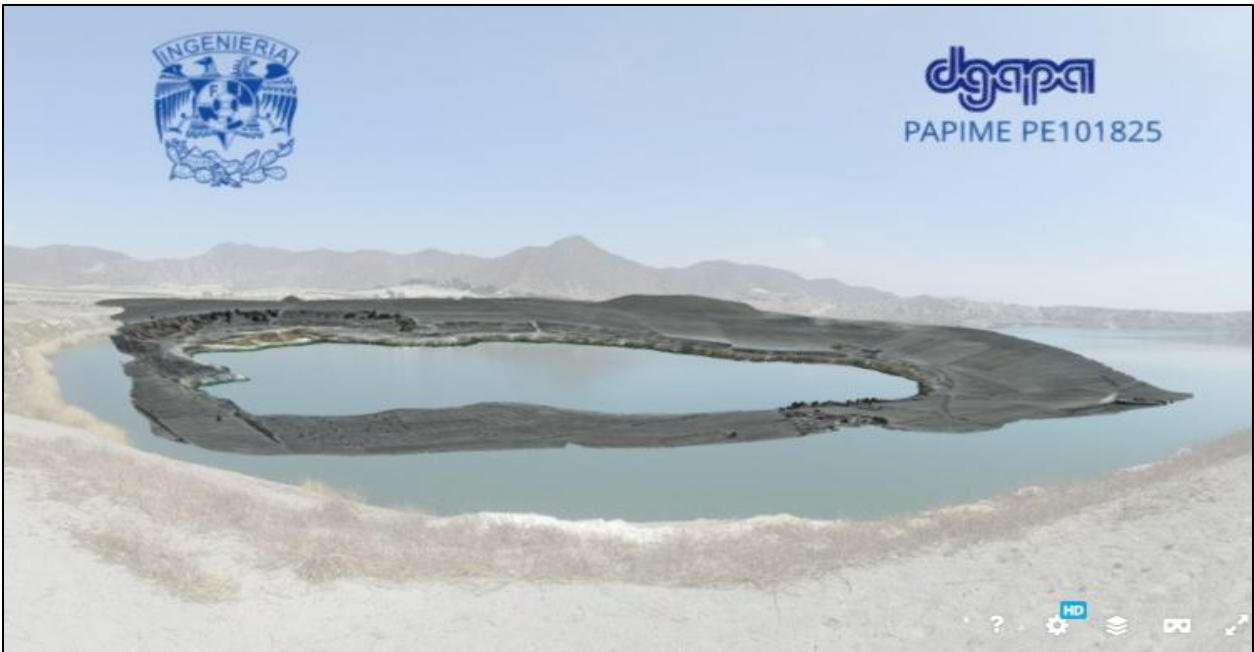


Figura 24. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D de la Laguna la Preciosa, Puebla. Recuperado de: <https://sketchfab.com/3d-models/laguna-la-preciosa-ecb501c4839248e3b8403c375c97f49e> © Sketchfab



Figura 25. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D de la Mina abandonada, La Preciosa, Puebla. Recuperado de <https://sketchfab.com/3d-models/mina-cerca-de-chichicuautla-puebla-6ffb294237b24f8e873864a2dd4fdf26> © Sketchfab

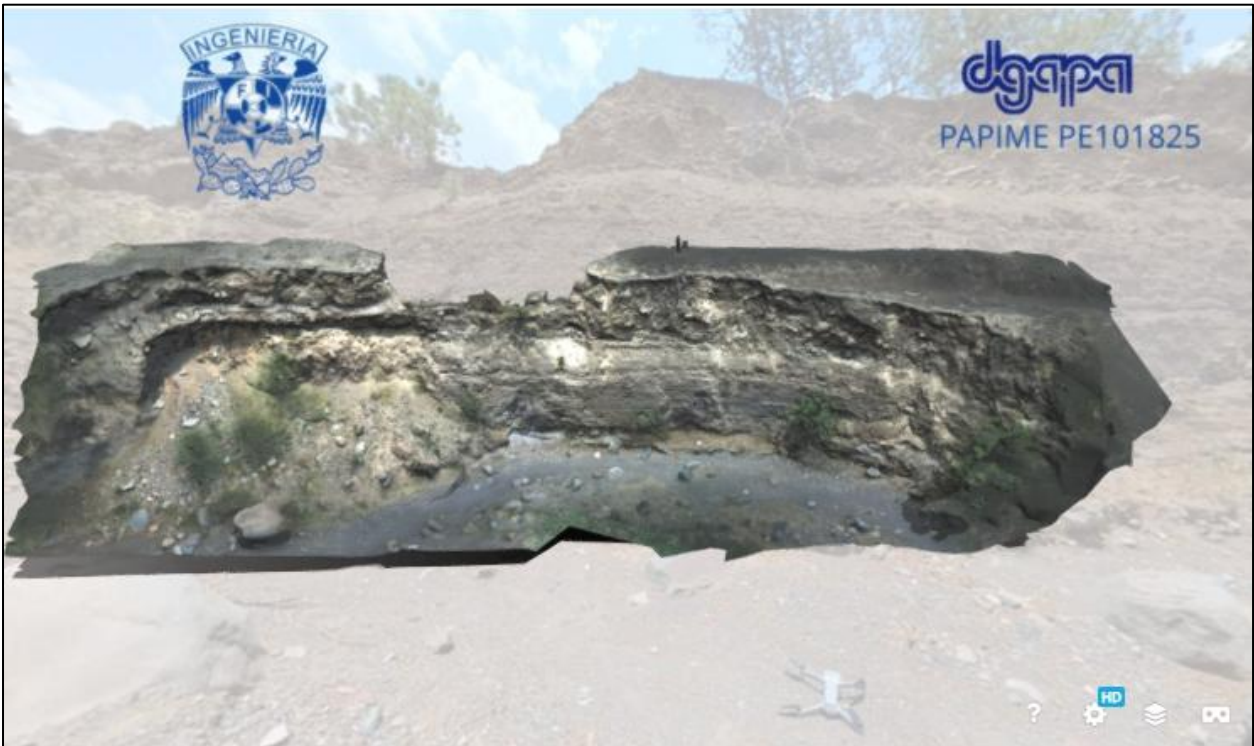


Figura 26. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D del Lahar de San Isidro, Puebla. Recuperado de <https://sketchfab.com/3d-models/lahar-cerca-de-crater-san-isidro-puebla-255996e722b54256ada4c5780160a793> © Sketchfab



Figura 27. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D del Cráter de San Isidro, Puebla. Recuperado de <https://sketchfab.com/3d-models/crater-san-isidro-puebla-853853c786e84f779c1b5ab62857f667> © Sketchfab



Figura 28. Captura de pantalla para la demostración del modelo 3D del Cráter de Tecuitlapa, Puebla. Recuperado de <https://sketchfab.com/3d-models/crater-de-tecuitlapa-puebla-mexico-7cfecd3086e44ee5947541db2ef497d3> © Sketchfab

3. Diseño del entorno virtual interactivo.

3.1 Spatial.io

Plataforma de computación espacial e inteligencia artificial dedicada a la creación, personalización y expansión de mundos virtuales interactivos de última generación. Se define principalmente como un ecosistema para el Contenido Generado por el Usuario (UGC) inmersivo, permitiendo a creadores y empresas construir experiencias digitales escalables.¹⁶

El entorno virtual de este trabajo se encuentra disponible en la siguiente liga: [//www.spatial.io/s/Geoexplora-Puebla-Museo-Virtual-69c46d5777252f463df9f07d?share=6522804036968613514](https://www.spatial.io/s/Geoexplora-Puebla-Museo-Virtual-69c46d5777252f463df9f07d?share=6522804036968613514)

3.1.1 Guía para el uso básico de Spatial.io

Esta guía contiene las instrucciones del paso a paso de cómo se crea la cuenta, el usuario y se insertan archivos en Spatial.io

Requisitos previos

1. Laptop propia o acceso a equipo donde se pueda tener acceso a Spatial.io
2. Conexión a internet estable.
3. Navegador web instalado.

Instrucciones

I. Crear una cuenta.

1. Abrir el "[Spatial.io](https://www.spatial.io)" en un navegador web (Figura 29).
2. Hacer clic en "+ crear gratis" (Figura 29).
3. Se abrirá una pestaña para iniciar sesión con Google, Apple o correo electrónico. En este caso se selecciona "correo electrónico" (Figura 30).
4. Se ingresa el correo electrónico que desea vincular con la aplicación y se oprime la opción "Continuar con el correo electrónico" (Figura 31).
5. A continuación, se pedirá crear una contraseña (mínimo 8 caracteres) y oprimir en "Continuar" (Figura 32).
6. Se verifica el correo electrónico accediendo al mensaje enviado por la plataforma (Figura 33).
7. Cuando se verifique, en la página de Spatial saldrá que ya se ha hecho y se podrá ingresar a la aplicación (Figura 34).
8. Una vez dentro, aparecerá una pregunta "¿Para qué utilizas Spatial?" se responde y se pulsa en "Continuar" (Figura 35).
9. En consecutivo, sale la opción para configurar la cuenta donde hay que ingresar el nombre de usuario, así como aceptar:
 - a. Utilice el nombre de usuario como nombre de pantalla (Figura 36).

- b. Aceptar términos y condiciones (Figura 36).
10. Finalmente se oprime en “Siguiente” (Figura 36).



Figura 29. Captura de pantalla para la demostración de los pasos del I. 1 y I. 2. © Spatial.io.

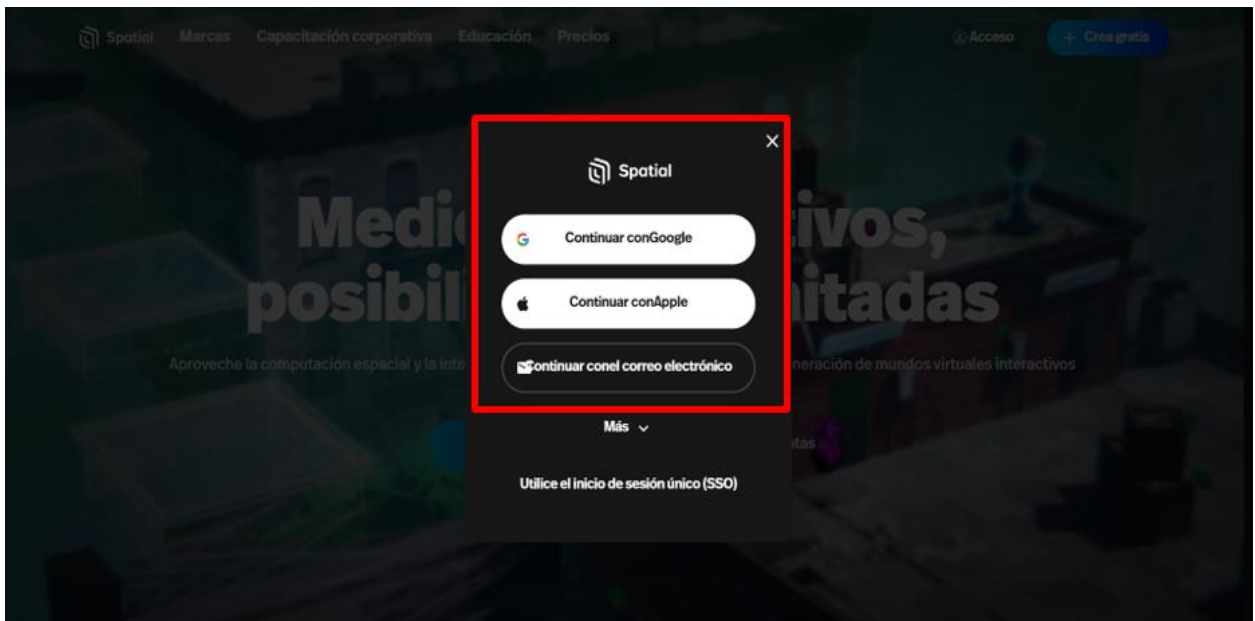


Figura 30. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 3 © Spatial.io.

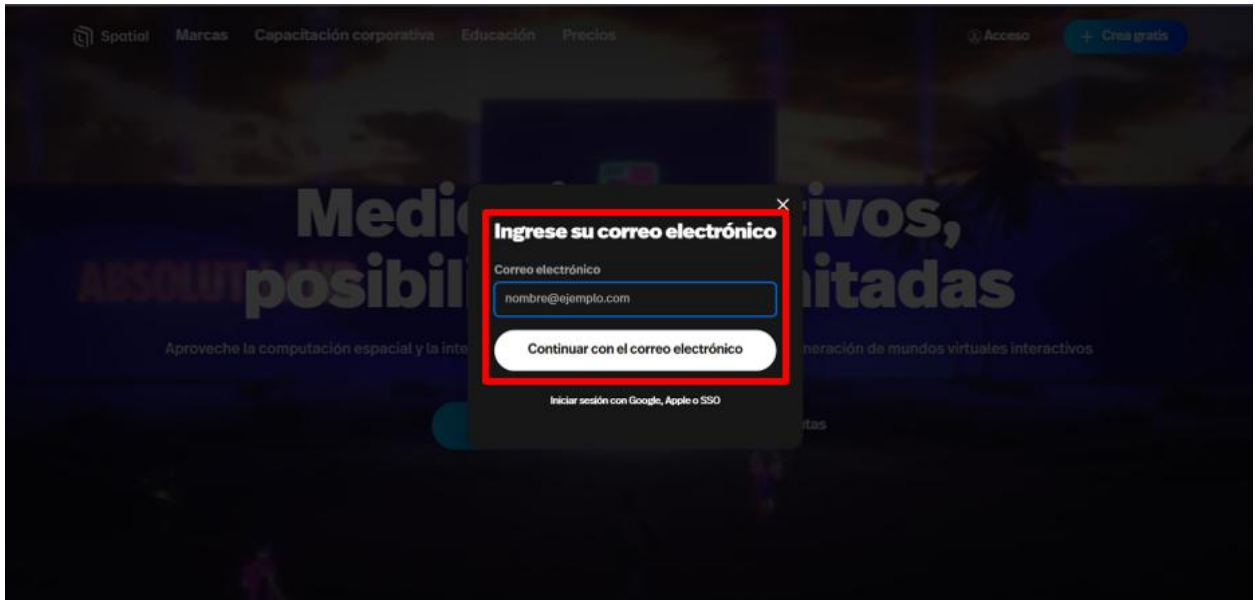


Figura 31. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 4. © Spatial.io.

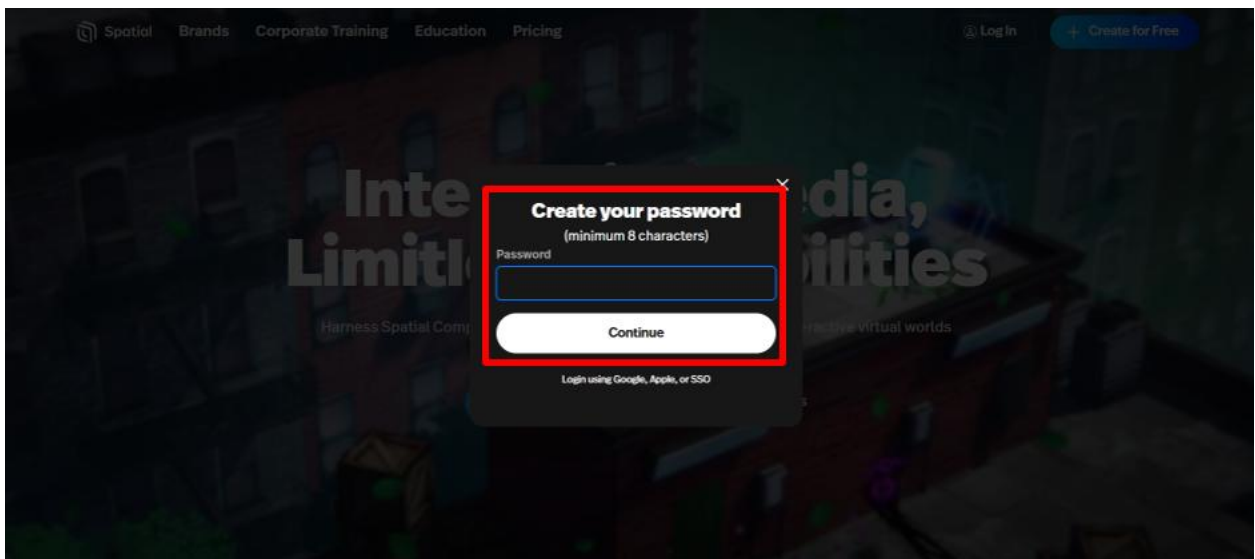


Figura 32. Captura de pantalla para la demostración del paso I.5. © Spatial.io.

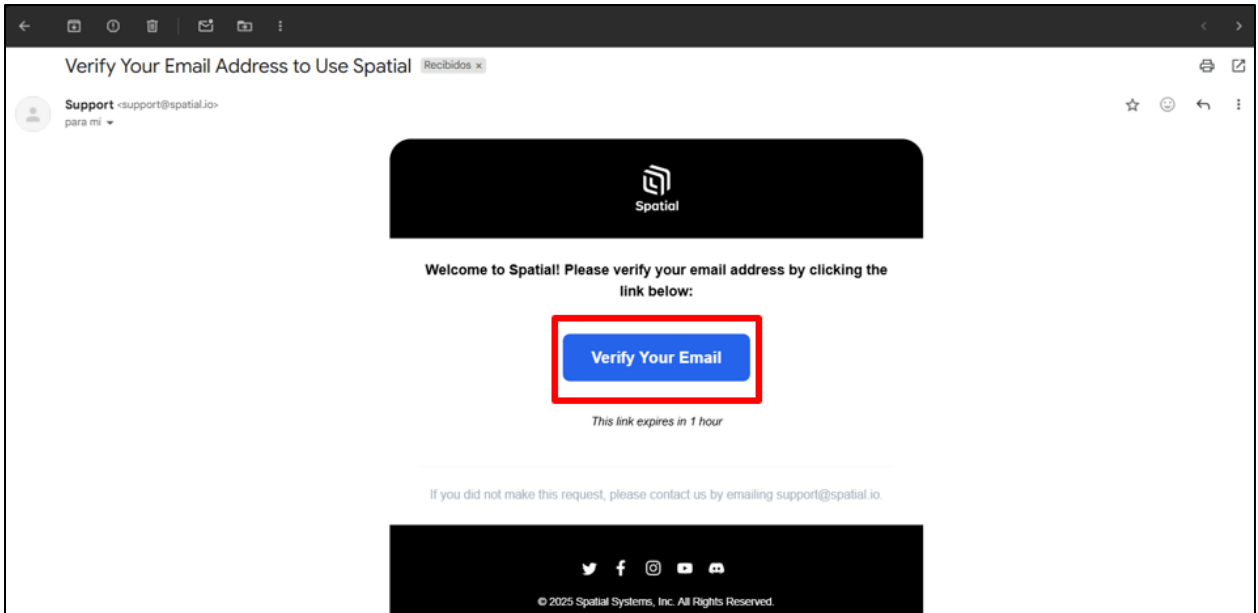


Figura 33. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 6. © Spatial.io.



Figura 34. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 7. © Spatial.io.

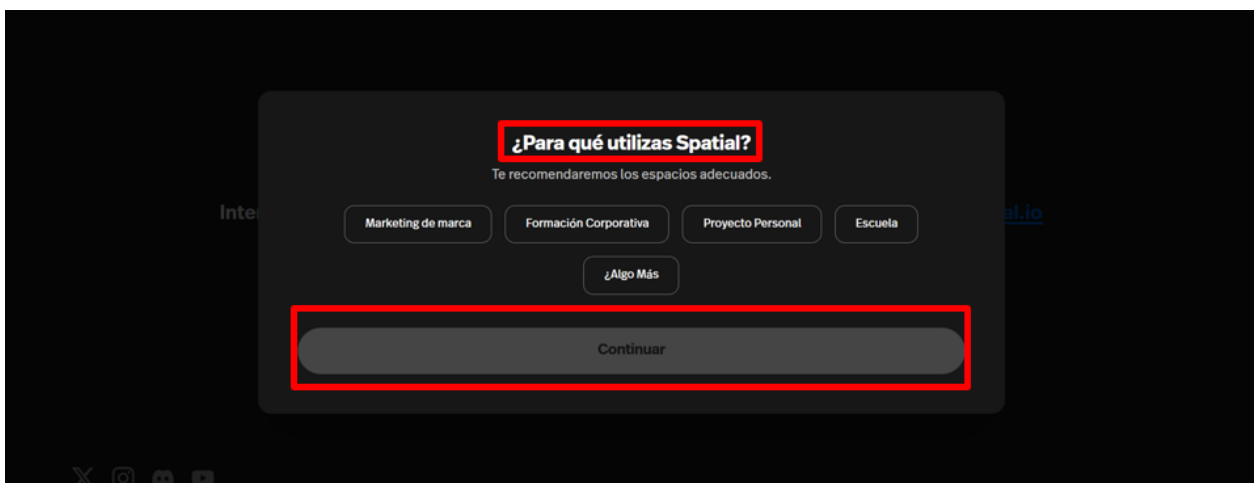


Figura 35. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 8. © Spatial.io.



Figura 36. Captura de pantalla para la demostración de los pasos del I. 9 al I.10. © Spatial.io.

II. Crear un espacio inmersivo.

1. Dar clic en el nombre de usuario en la parte superior derecha (Figura 37).
2. Seleccionar la opción “Espacios” (Figura 37).
3. Dentro de “Tus espacios” elegir alguna de las siguientes opciones:
 - a. “ + Nuevo espacio” (Figura 38).
 - b. “+Crear espacio” (Figura 38).
4. Aparecerá una ventana emergente para crear el nuevo espacio. En este caso se selecciona la opción de “Galería de Obsidiana”, un espacio que ya sale con un diseño predeterminado (Figura 39).
5. Esperar a que el espacio se cree y se conecte con los servidores (Figura 40).
6. Una vez cargado, seguir las instrucciones iniciales del personaje para desplazarse e interactuar (Figura 41).

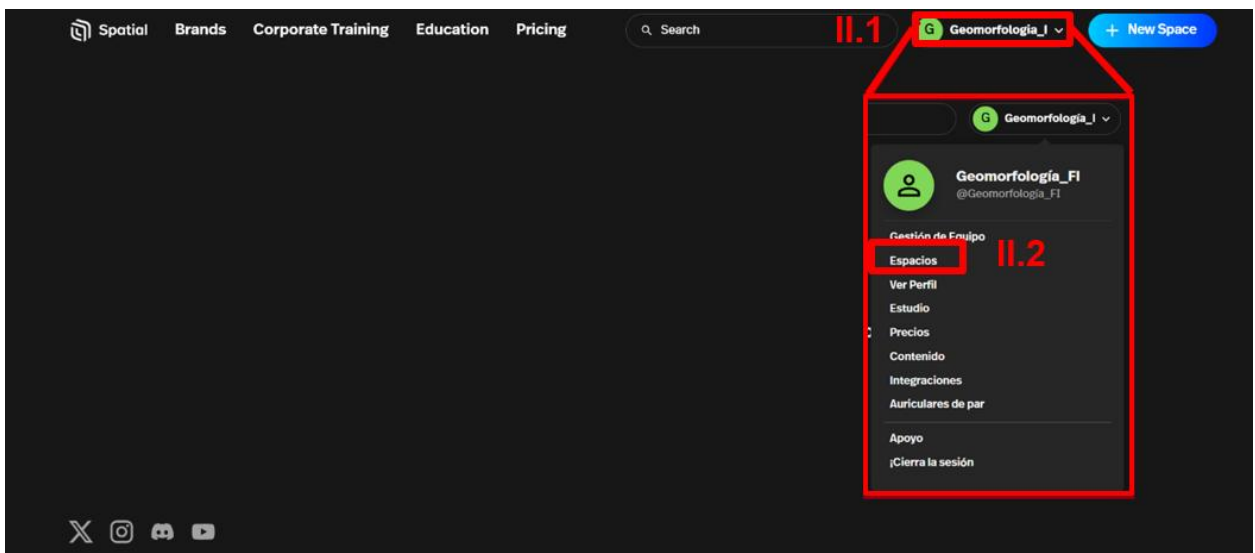


Figura 37. Captura de pantalla para la demostración de los pasos del II. 1 y II.2. © Spatial.io.

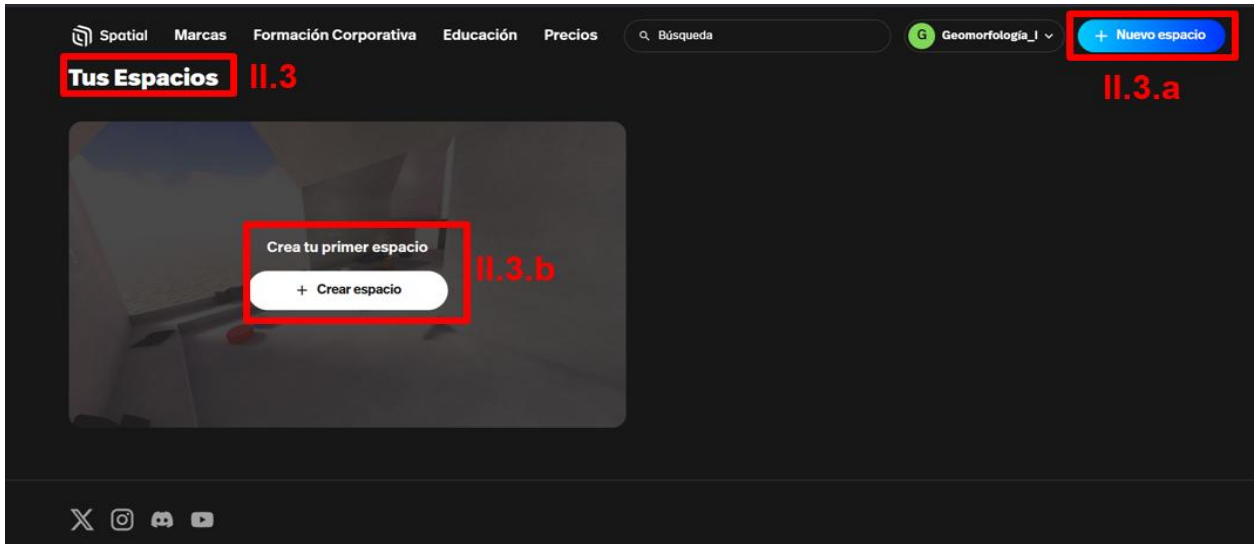


Figura 38. Captura de pantalla para la demostración de los pasos II.3, II.3.a y II.3.b © Spatial.io.

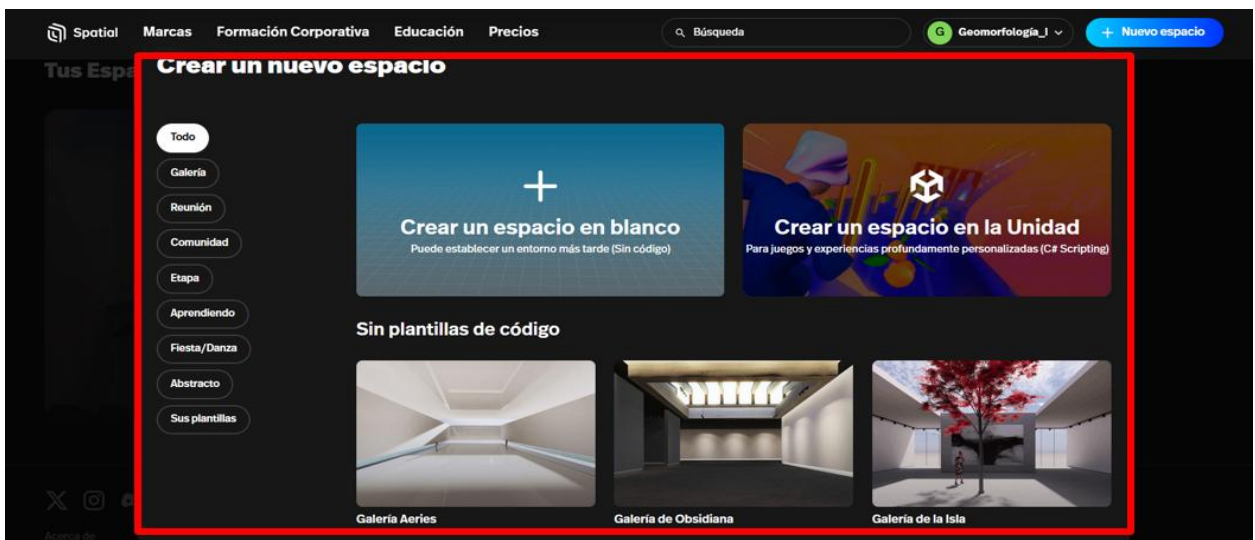


Figura 39. Captura de pantalla para la demostración del paso II.4 © Spatial.io.



Figura 40. Captura de pantalla para la demostración del paso II.5 © Spatial.io.

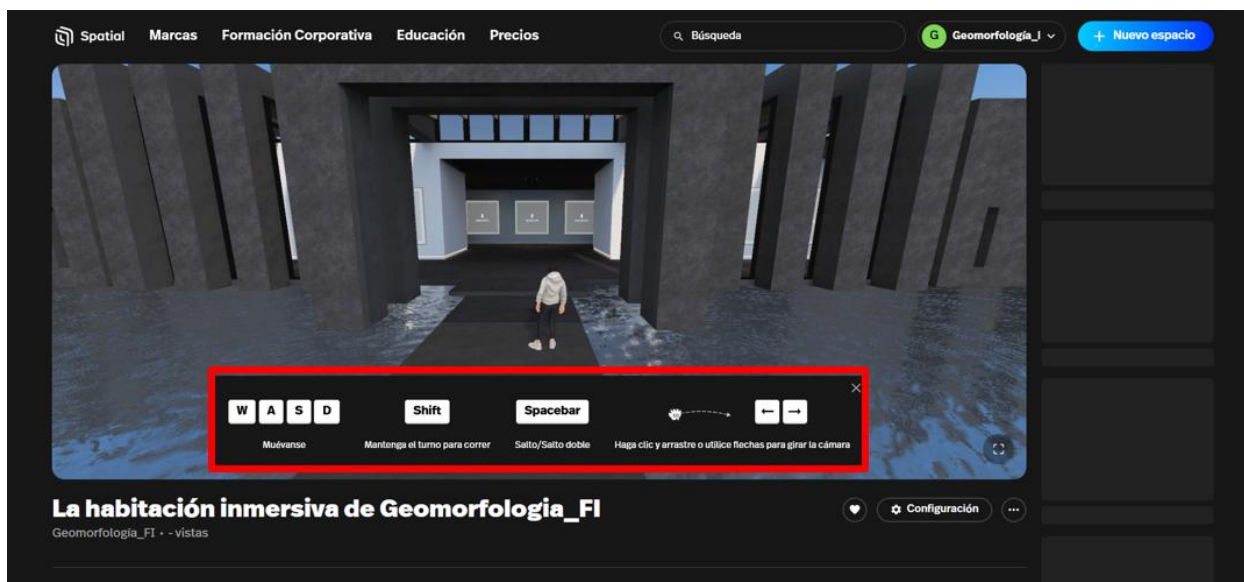



Figura 41. Captura de pantalla para la demostración del paso II.6 © Spatial.io.

III. Insertar archivos.

1. Al estar dentro de una habitación inmersiva, oprimimos la Figura de un lápiz o de una cruz para iniciar con la edición del lugar. (Figura 42)
 - a. Si se oprime la opción del lápiz “ - i. Al dar clic en alguno, abrirá una pestaña donde se encontrará la opción de un candado en el cual permite modificar la posición, rotación y escala del objeto, así como “archivos” (Figura 44).
 - ii. También aparece la opción de duplicar y eliminar (Figura 44).
 - b. Si se oprime la opción de la cruz “+”, aparecerá una nueva pestaña “Contenido” (Figura 45 y 46).
 - i. Se podrá insertar nuevos objetos, así como archivos, notas, búsqueda web y crear portal (Figura 46).
 - ii. Al darle en la opción “subir”, aparece la opción de insertar modelos 3D, imágenes, videos, documentos, etc. Ya sea arrastrando o seleccionando el archivo desde el dispositivo (Figura 47).
2. Si se coloca o ya hay un objeto que permita subir un archivo “Upload File”, se le da clic (Figura 48).
 - a. Aparece una ventana emergente, al ir en la opción “subir”, aparece nuevamente la opción de insertar modelos 3D, imágenes, videos, documentos, etc. Arrastrando o seleccionando el archivo desde el dispositivo (Figura 49).

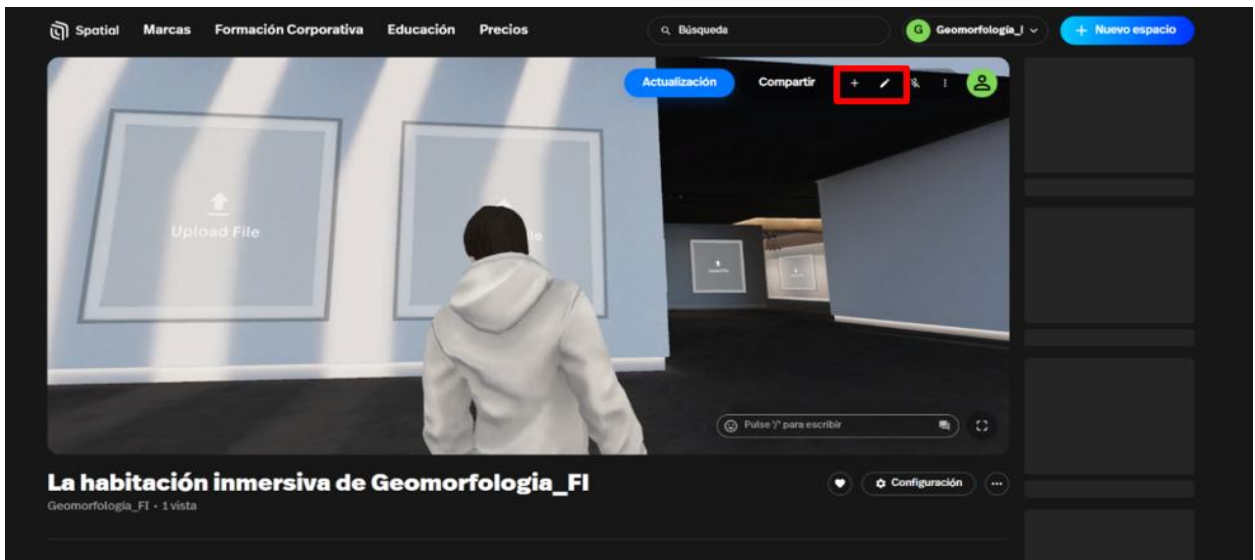


Figura 42. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1 © Spatial.io.



Figura 43. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1.a © Spatial.io.



Figura 44. Captura de pantalla para la demostración de los pasos III.1.a.i y III.1.a.ii © Spatial.io.



Figura 45. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1.b © Spatial.io.



Figura 46. Captura de pantalla para la demostración de los pasos III.1.b y III.1.b.i © Spatial.io.

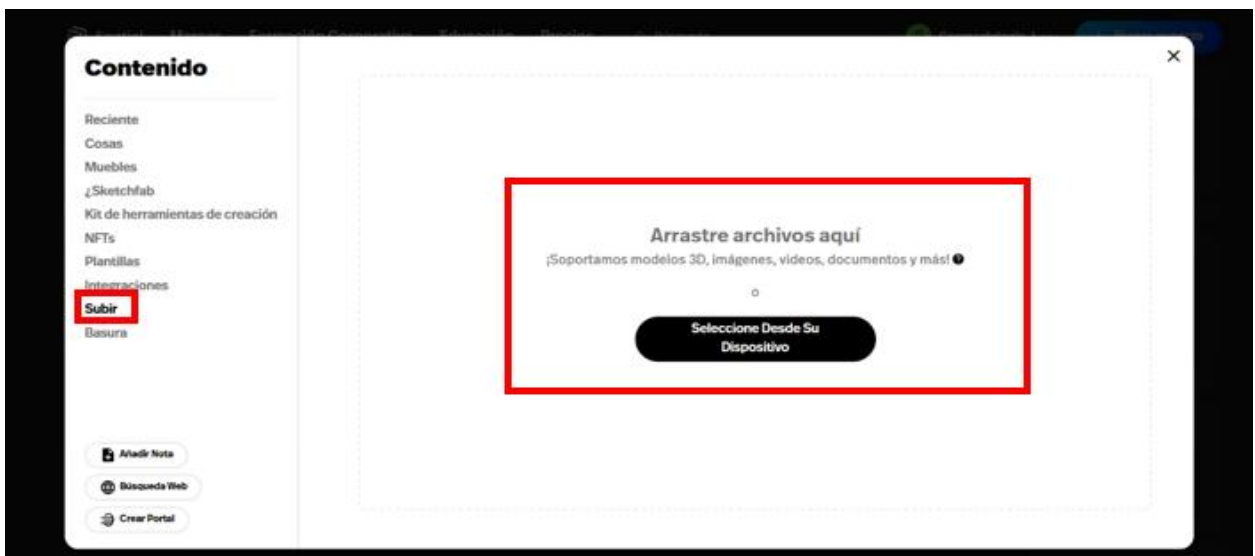


Figura 47. Captura de pantalla para la demostración del paso III.1.b.ii © Spatial.io.

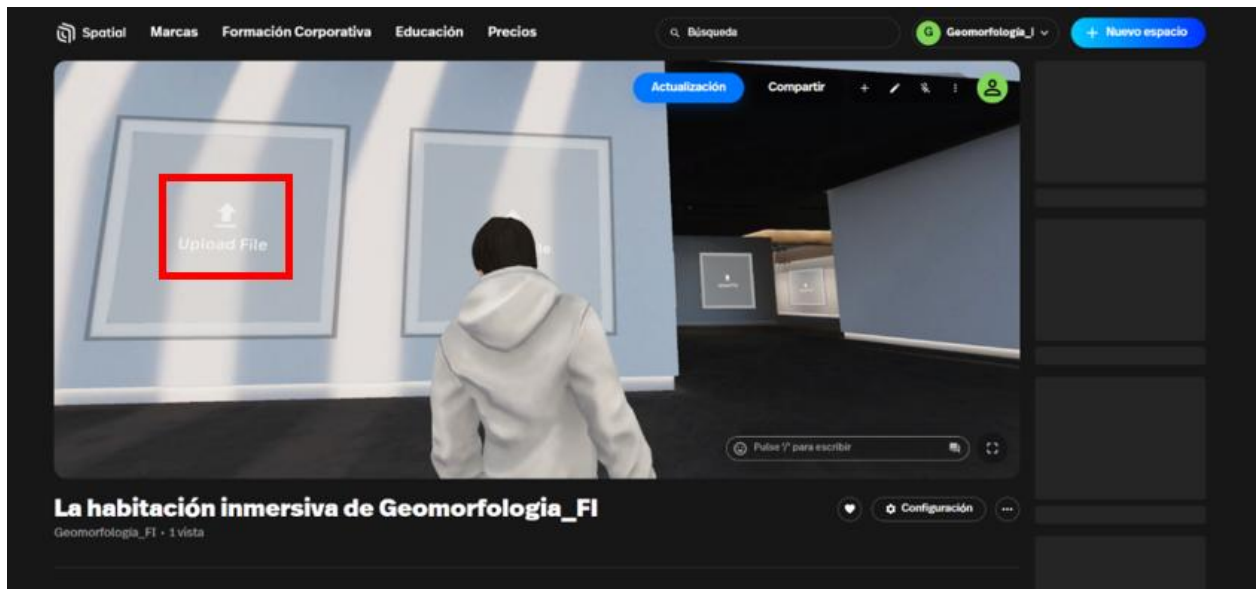


Figura 48. Captura de pantalla para la demostración del paso III.2 © Spatial.io.

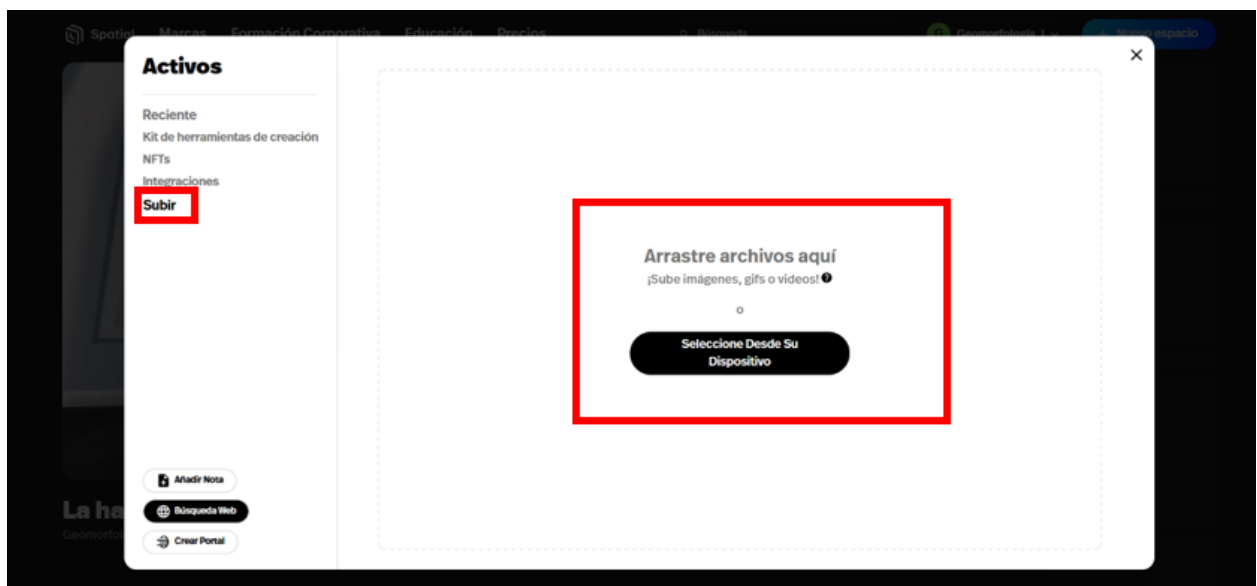


Figura 49. Captura de pantalla para la demostración del paso III.2.a © Spatial.io.

IV. Salida

1. Finalmente, para salir de la habitación. Se vuelve a dar clic en los tres puntos (Figura 50).
2. Se le da click en la opción que dice "Leave"/"Salir" (Figura 50).
3. Al salir, se vuelve al apartado principal de la aplicación (Figura 51).

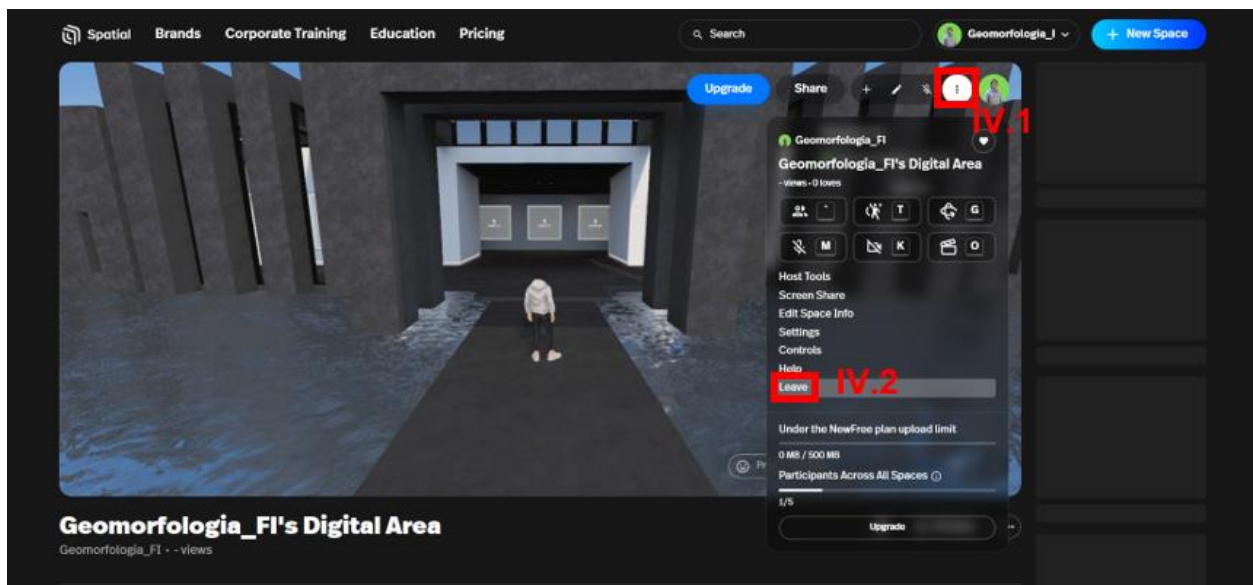


Figura 50. Captura de pantalla para la demostración de los pasos IV.1 y IV.2 © Spatial.io.

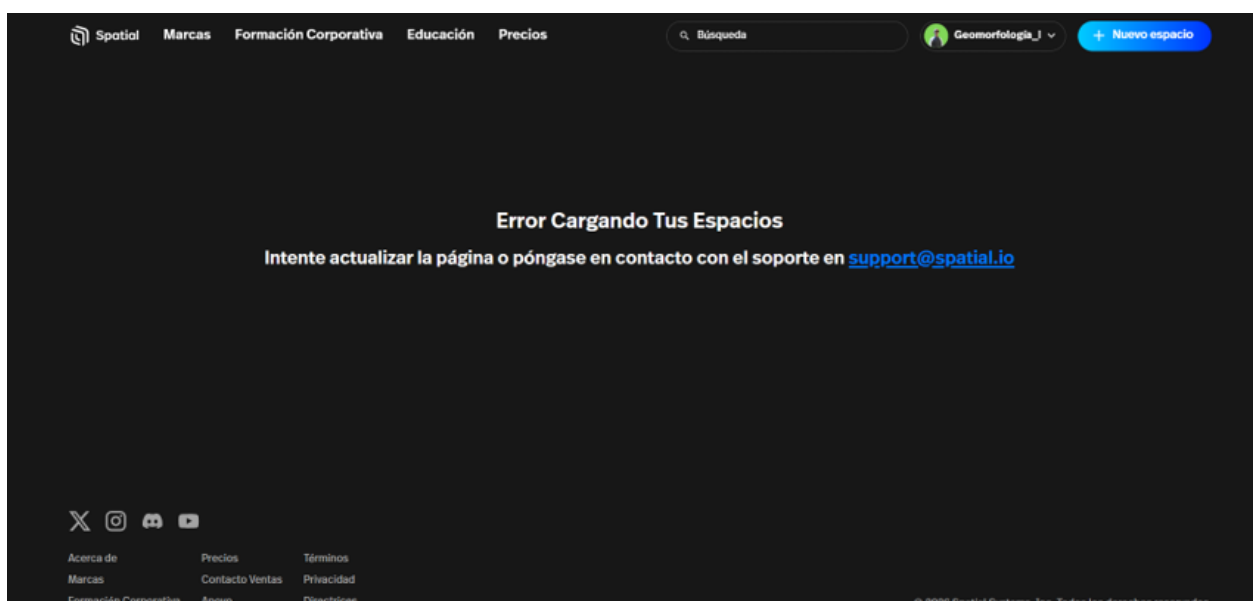


Figura 51. Captura de pantalla para la demostración del paso IV.3 © Spatial.io.

3.1.1.1 Tiempos de elaboración del recorrido en Spatial io

La organización temporal de las actividades desarrolladas durante el recorrido se presenta a continuación, con base en estimaciones del tiempo empleado:

- Búsqueda y redacción de información para las fichas: 1 mes por cada una.
- Elaboración de señalamientos: 5hrs.
- Registro de usuario y vinculación con plataformas digitales externas: 40min
- Elaboración de mapa: 3 días
- Selección de espacio virtual: 10min
- Proceso de modelos 3D: 15 horas por modelo (Sin optimizar).
- Integración de archivos digitales: 1 semana
- Organización y ajuste del espacio virtual para mejorar su diseño y funcionalidad: 3 semanas.

3. 2 Kuula

De acuerdo con la página oficial de Kuula¹⁷, este es un Software fundado en 2016 en los Ángeles, California. Permite crear recorridos virtuales 3D en 360°. Tiene un editor sencillo que incluye funciones avanzadas especialmente en sus planes PRO y Business. El software se caracteriza por ofrecer reproductores de tours 3D 360° más fluidos y eficientes, permitiendo brindar experiencias inmersivas.

Kuula facilita la difusión de los recorridos mediante opciones para compartir o insertar en sitios web, permitiendo ajustar los parámetros del reproductor desde un editor de exportación. Asimismo, el software optimiza la visualización en dispositivos móviles, asegurando que el público que accede desde pantallas pequeñas tenga una experiencia completa como los equipos de un tamaño mayor.

Por otra parte, Kuula ofrece soporte para la visualización en realidad virtual a través de WebXR, lo que permite que los tours puedan explorarse con diversos visores sin necesidad de instalar aplicaciones adicionales. En cuanto al contenido, la plataforma admite cualquier tipo de imagen panorámica tomada con cámaras 360°, DSLR o generadas mediante software 3D, e incluso es compatible con imágenes que no sean panorámicas.

Para la integración del material visual en la plataforma, se sigue un procedimiento básico de carga de imágenes panorámicas dentro de Kuula:

1. Dirigirse a la opción “Subir” y darle clic en la opción “Crear recorrido” (Figura 52).

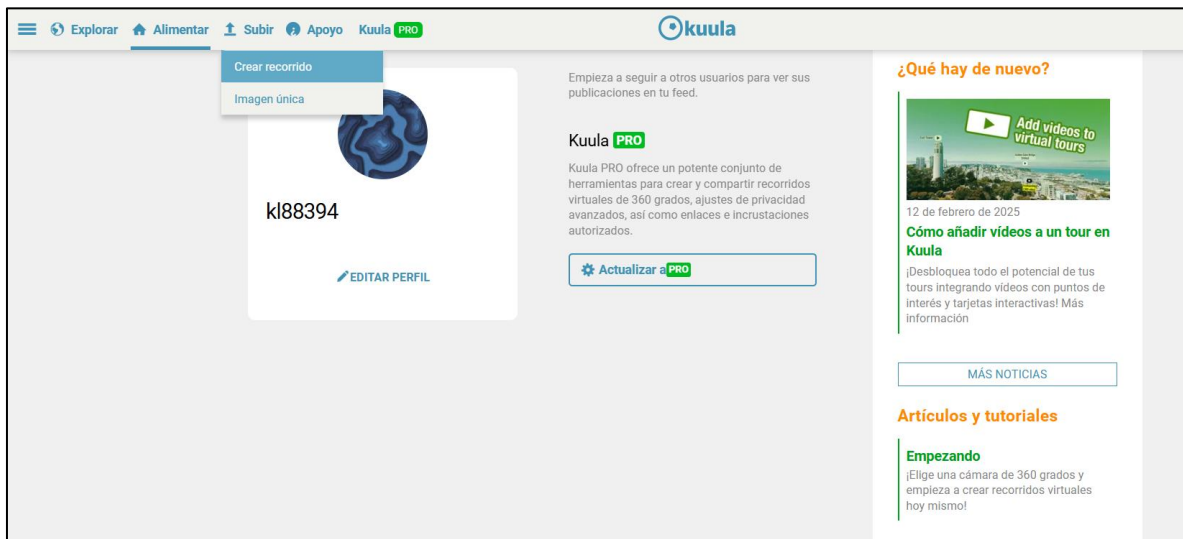


Figura 52. Captura de pantalla para la demostración del paso 1. © Kuula

2. Una vez en “Crear recorrido”:
 - a. Introducir un nombre para el recorrido y de manera opcional se puede añadir una descripción (Figura 53).
 - b. Para añadir las fotos:
 - i. Arrastrar y soltar los archivos desde una carpeta en el ordenador (Figura 53).

- ii. Seleccionarlos desde la unidad local mediante la opción “EXPLORAR ARCHIVOS” (Figura 53).

Nota: Durante el proceso de carga, se pueden ir añadiendo más fotos, ya sea desde la opción “Añade más fotos” o arrastrando y soltando los archivos.

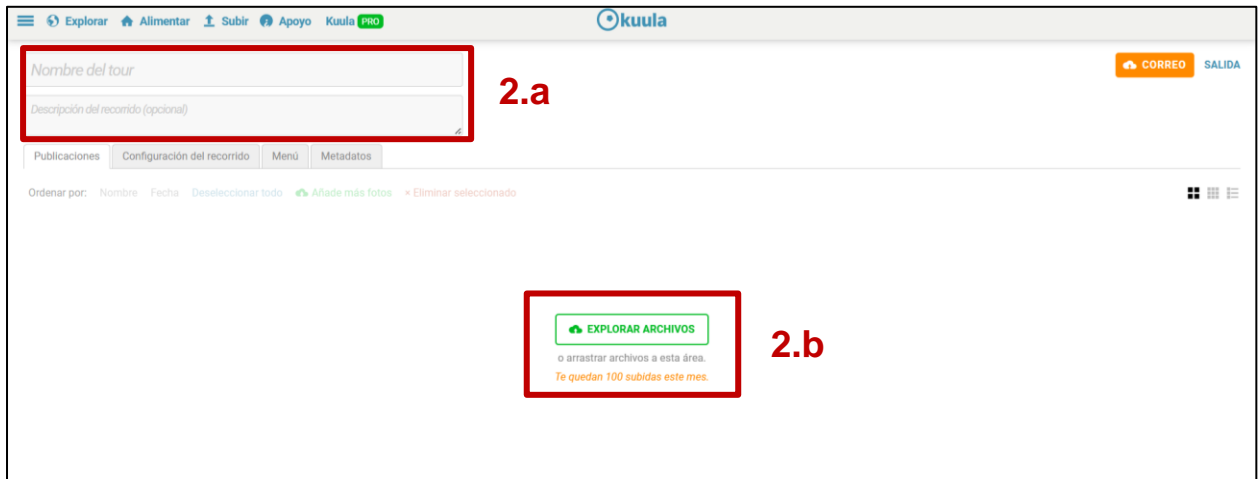


Figura 53. Captura de pantalla para la demostración de los pasos 2.a y 2.b © Kuula

3. En la pestaña “Configuración del recorrido”, se puede seleccionar el tipo de transición animada que se puede usar en el recorrido, activar el modo recorrido guiado, así como agregar un audio de fondo (Figura 54).



Figura 54. Captura de pantalla para la demostración del paso 3 © Kuula

4. Una vez realizadas las configuraciones necesarias, se da clic en “POST” donde las imágenes se cargarán y se agruparán en un recorrido. Una vez cargado, se puede compartir (Figura 55).

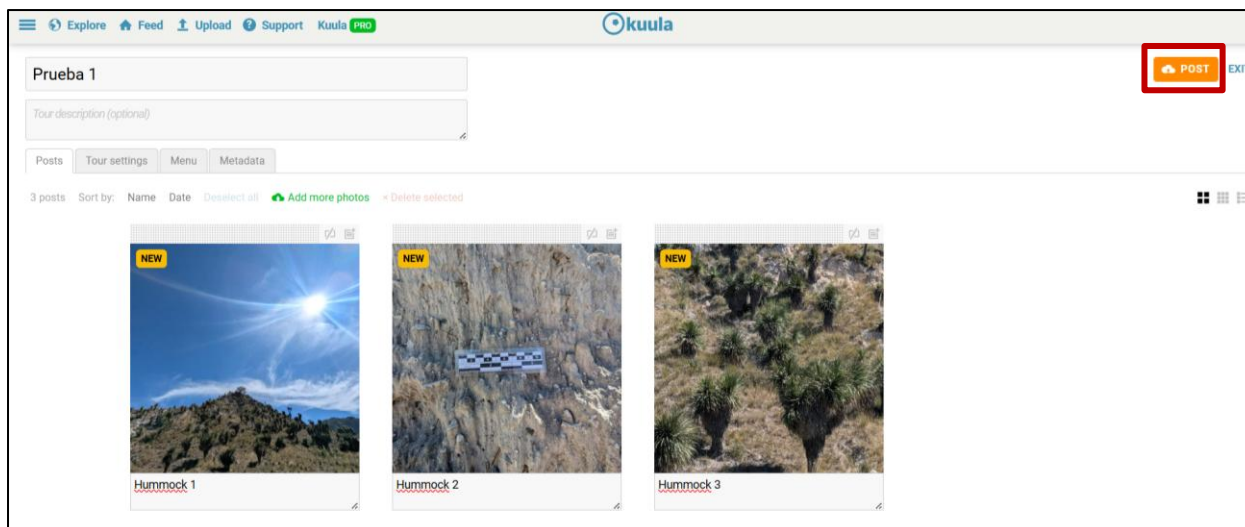


Figura 55. Captura de pantalla para la demostración del paso 4 © Kuula

En consecuencia, Kuula se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada, acumulando más de 500,000 usuarios que han subido más de 15 millones de fotografías panorámicas y generado más de 1.5 millones de tours, los cuales suman más de 2 mil millones de visualizaciones. A manera de visualización, se incluyen fotografías esféricas de 360° que fueron integradas en la plataforma Kuula para su exploración interactiva (Figuras 56-63).¹⁷

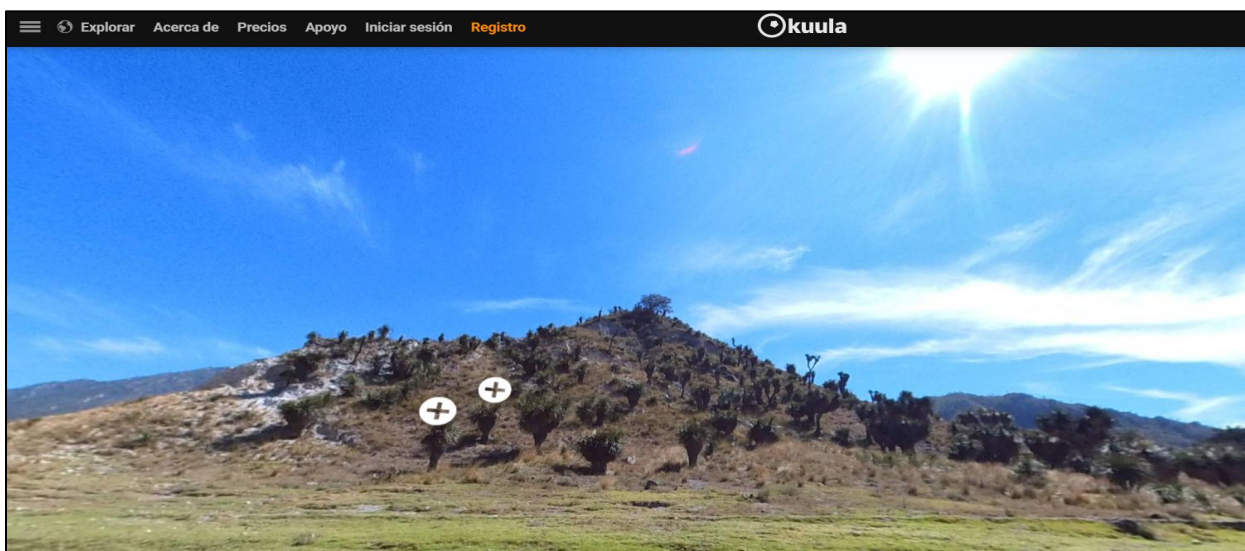


Figura 56. Captura de pantalla de la fotografía en 360° del Hummock, Puebla Recuperado de: <https://kuula.co/post/hQtTx> © Kuula

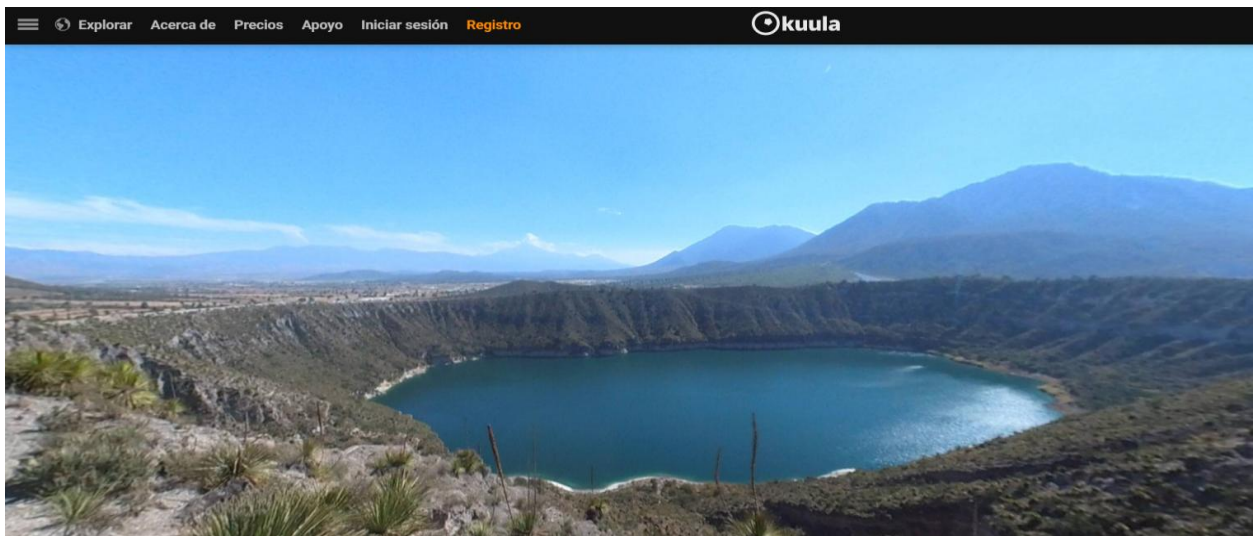


Figura 57. Captura de pantalla de la fotografía en 360° de Atexcac, Puebla Recuperado de: <https://kuula.co/post/hQtqY> © Kuula

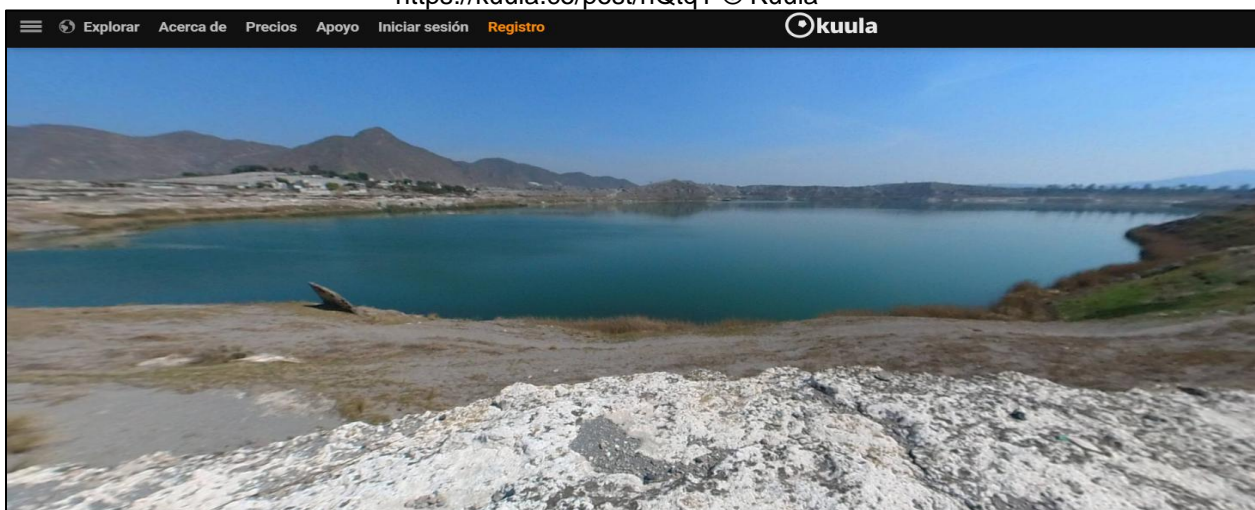


Figura 58. Captura de pantalla de la fotografía en 360° de la Laguna la Preciosa, Puebla Recuperado de: <https://kuula.co/post/n1/collection/7HZfn> © Kuula

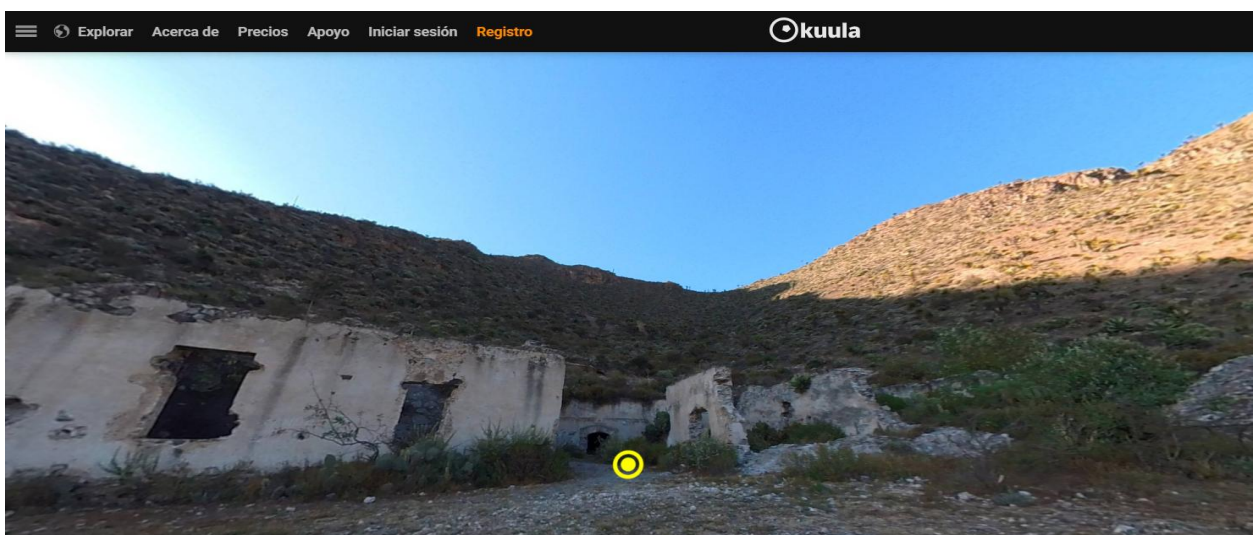


Figura 59. Captura de pantalla de la fotografía en 360° de la mina abandona, La preciosa, Puebla Recuperado de: <https://kuula.co/post/n1/collection/7HK6b> © Kuula



Figura 60. Captura de pantalla de la fotografía en 360° de la Laguna Aljojuca, Puebla Recuperado de: <https://kuula.co/post/hQtqt/collection/7HZ0w> © Kuula

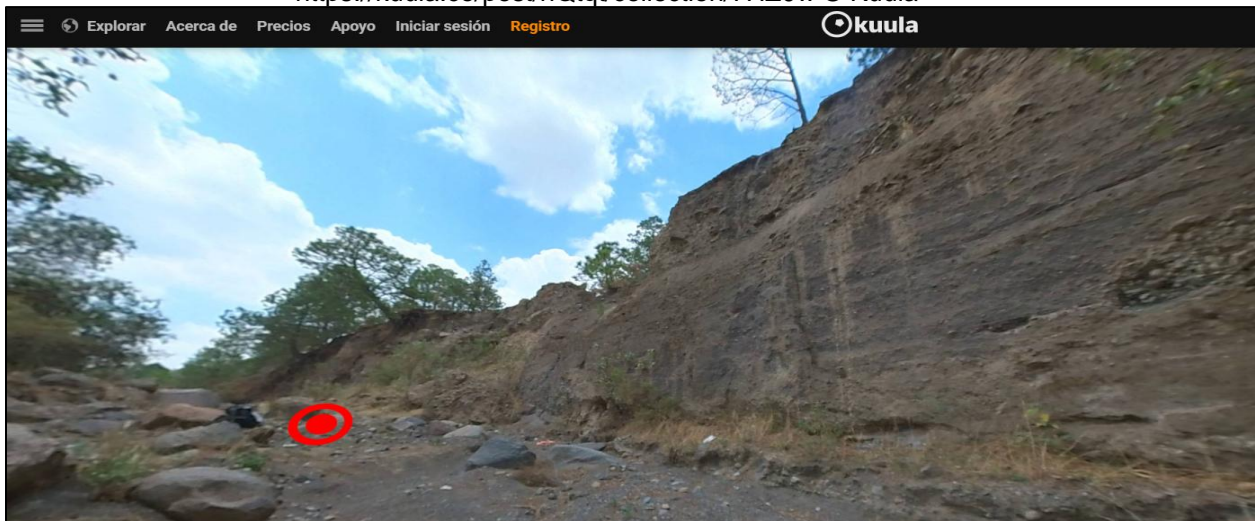


Figura 61. Captura de pantalla de la fotografía en 360° del lahar San Isidro, Puebla en el mes de mayo 2025. Recuperado de: <https://kuula.co/post/hyHSp/collection/7HIBz> © Kuula

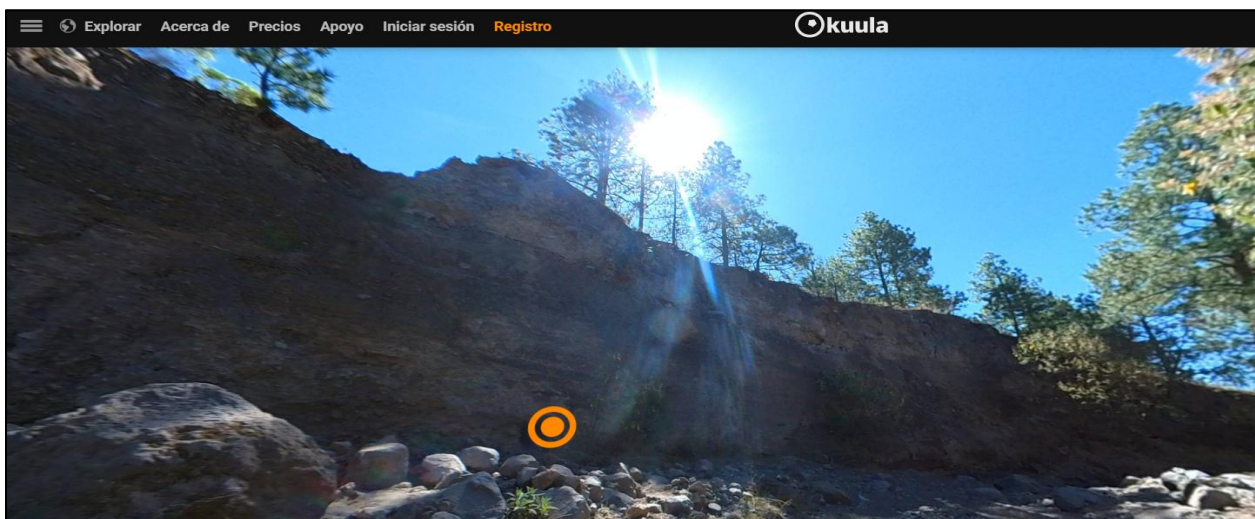


Figura 62. Captura de pantalla de la fotografía en 360° del lahar San Isidro, Puebla en el mes de noviembre 2025. Recuperado de: <https://kuula.co/post/hQtZc/collection/7HZGX> © Kuula

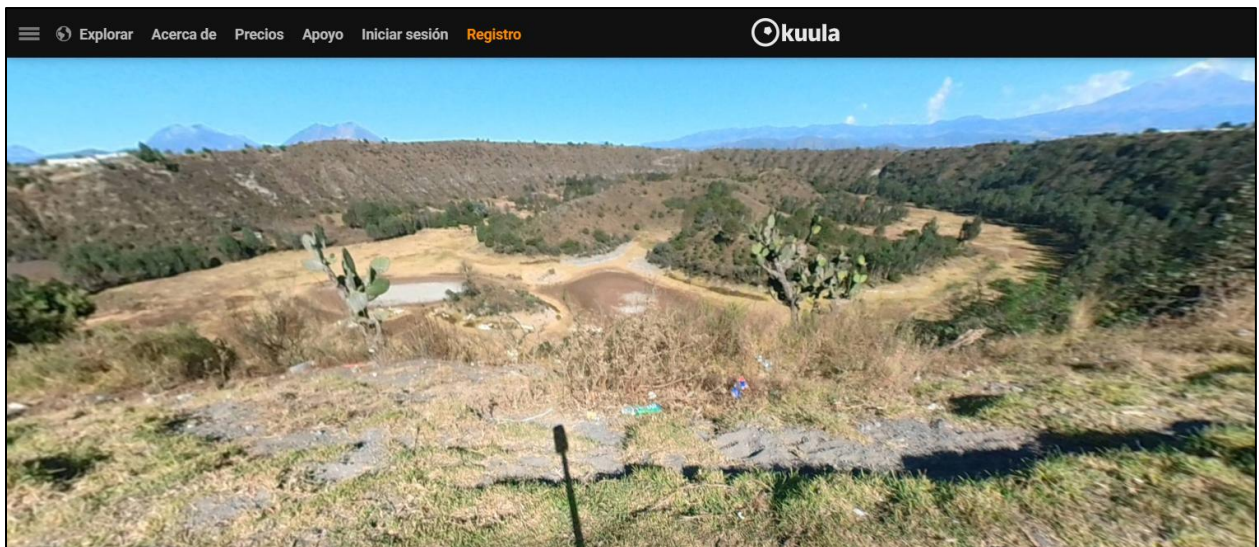


Figura 63. Captura de pantalla de la fotografía en 360° del cráter Tecuítlapa, Puebla. Recuperado de: <https://kuula.co/post/hQtq8> © Kuula

3.3 Sketchfab

Plataforma líder para 3D y realidad aumentada (AR) en la web, diseñada para que los usuarios puedan gestionar, mostrar, compartir y colaborar en proyectos tridimensionales ofreciendo herramientas de Renderizado Basado en la Física (PBR) que permiten configurar directamente en el navegador la iluminación, los materiales, la animación, el audio, las anotaciones y el posicionamiento para realidad virtual (VR) además de contar con un reproductor 3D interactivo y editable que es compatible con realidad virtual y realidad aumentada (AR).¹⁸

Para meter o subir modelos a Sketchfab:

1. Hacer clic en el botón “Upload” que se encuentra en la esquina superior derecha de la página de Sketchfab (Figura 64).

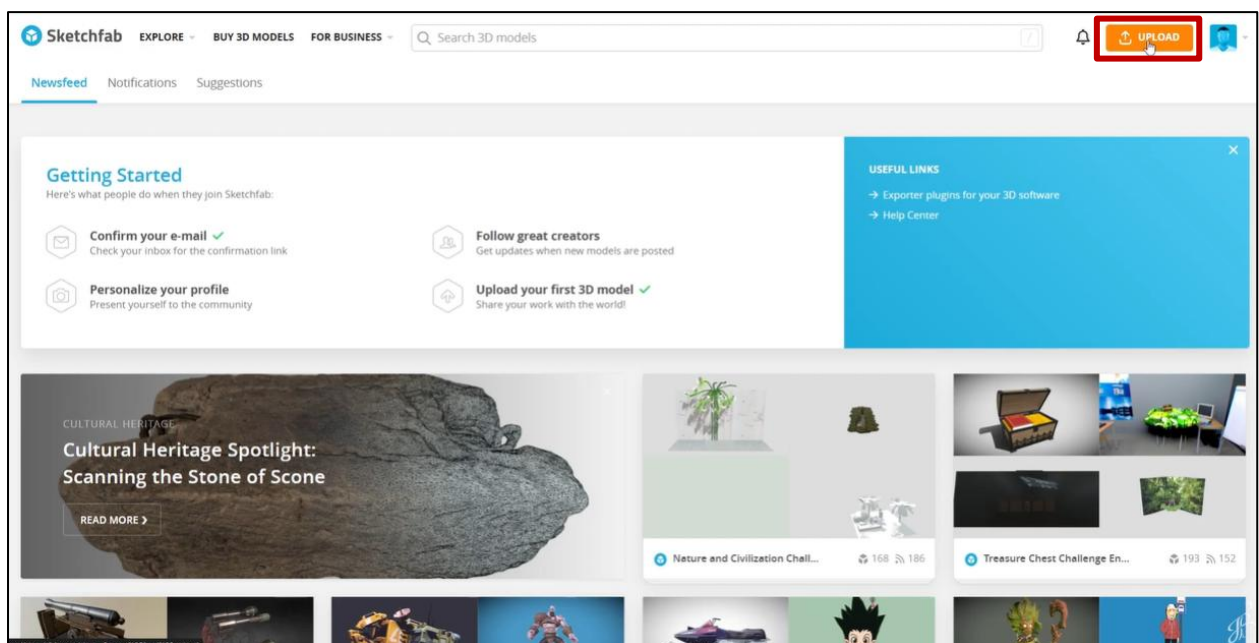


Figura 64. Captura de pantalla para la demostración del paso 1. © Sketchfab.

2. Seleccionar los archivos que se desea subir dando clic en “browse”. Como alternativa también se puede arrastrar y soltar los archivos (Figura 65).

Nota: Hay que asegurarse de utilizar los formatos compatibles.

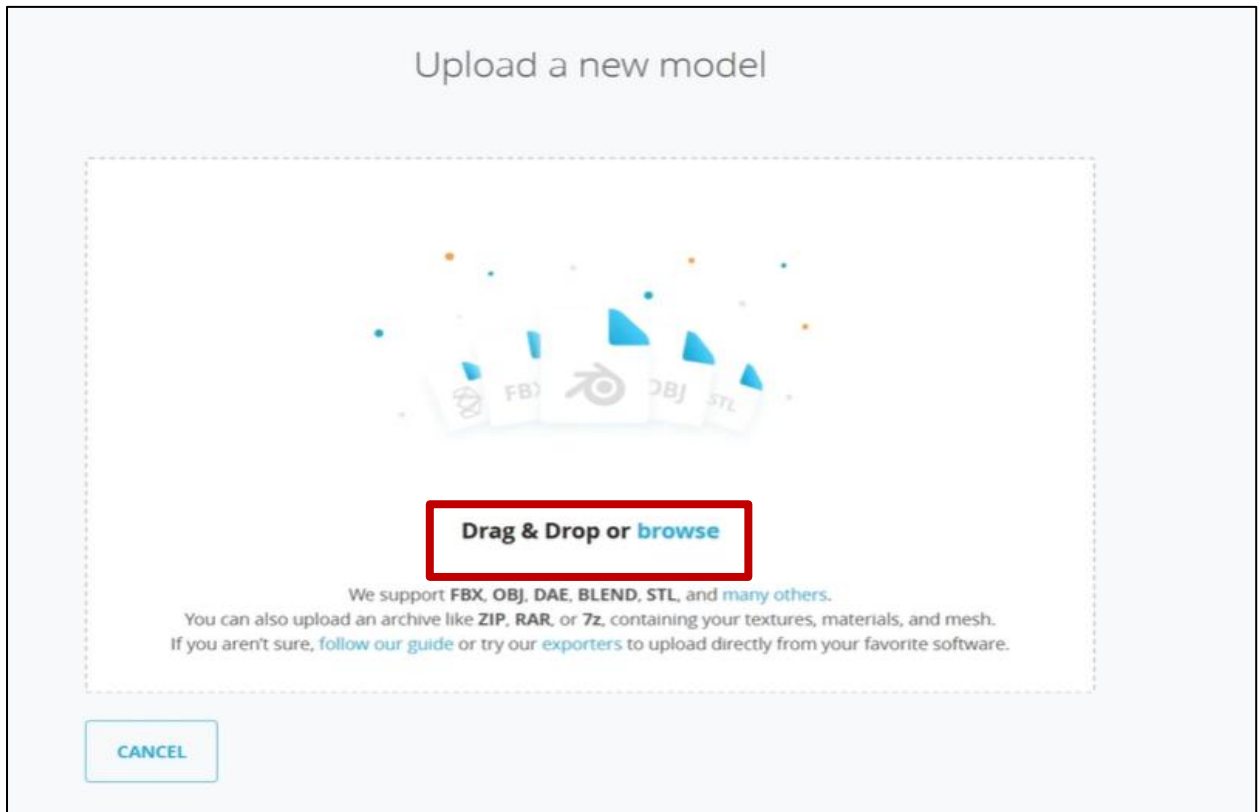


Figura 65. Captura de pantalla para la demostración del paso 2. © Sketchfab.

3. Una vez cargado el archivo o archivos, hacer clic en el botón “UPLOAD FILES” (Figura 66).

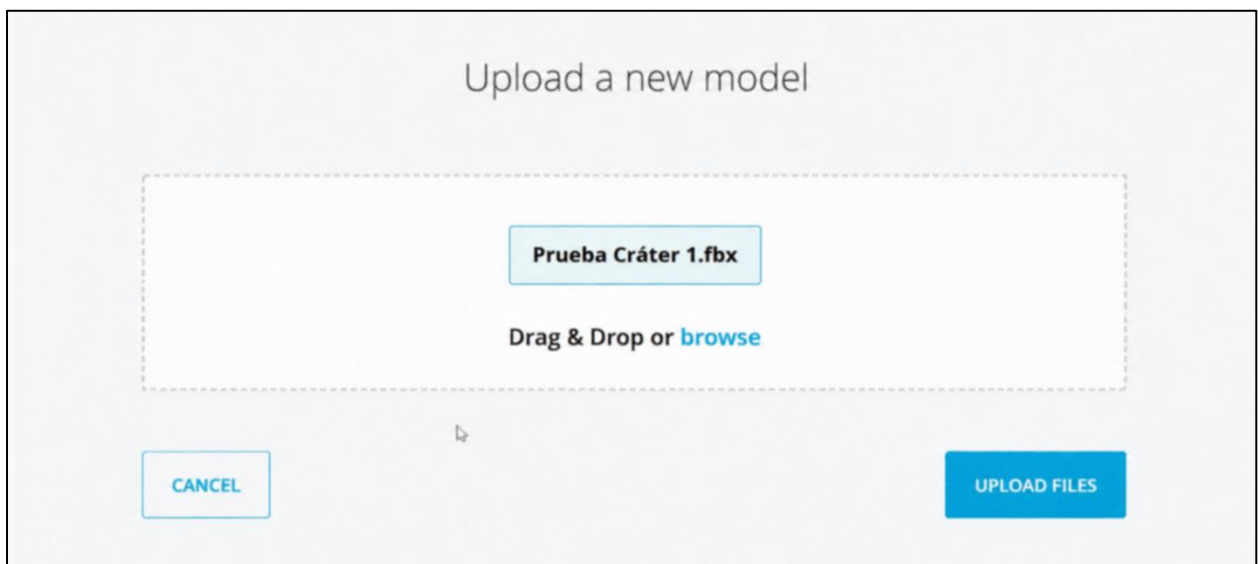


Figura 66. Captura de pantalla para la demostración del paso 3. © Sketchfab

- Una vez que inicie el proceso de carga, aparecerá una ventana donde hay que completar la información sobre el modelo: Título, descripción, categorías, etiquetas, etc. Una vez finalizada la carga, hacer clic en el botón “PUBLISH” (Figura 67).

Nota: Se puede previsualizar como quedará el modelo dando clic en “VIEW MY MODEL”

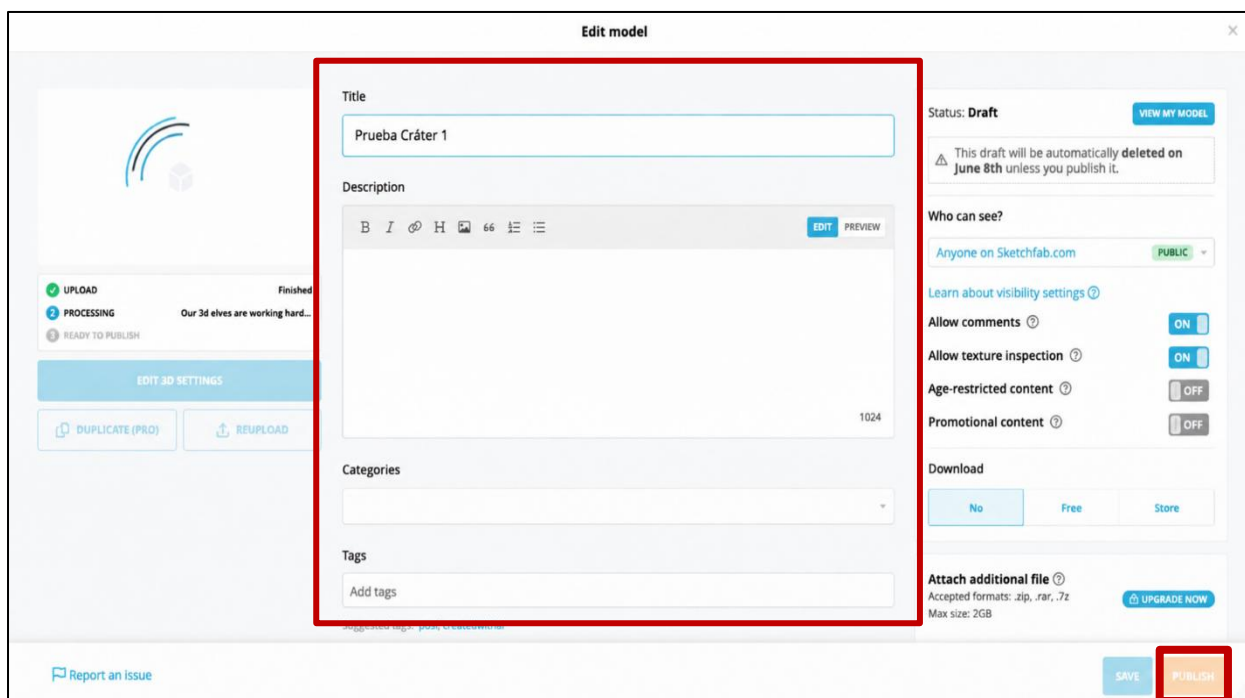


Figura 67. Captura de pantalla para la demostración del paso 4. © Sketchfab.

- Una vez que el modelo se haya terminado de cargar y procesar, se podrá verlo en la sección “MODELS” del perfil.

Una vez que el modelo está en la plataforma, Sketchfab permite compartirlo e incrustarlo (embed) en cualquier lugar en línea, incluyendo redes sociales, sitios de comercio electrónico y blogs.¹⁸

3.4 Google Earth.

Plataforma interactiva y completa que permite visualizar, analizar y explorar el planeta mediante la combinación de fotografías aéreas, imágenes satelitales, topografía 3D, datos geográficos y Street View en un lienzo del mundo real. Asimismo, permite crear mapas sin código para contar historias, planificar trabajos y visualizar información.¹⁹

El recorrido virtual de este trabajo se encuentra disponible en la siguiente liga: https://earth.google.com/earth/d/1Ks8yIPFhYUagg_nW4uRuRWcV9jZqYi?usp=sharing

Nota: Se recomienda el uso de un aparato de escritorio o laptop para mejor visualización, aunque, si se desea visualizar en un dispositivo móvil, es necesario descargar la aplicación de Google Earth.

3.4.1 Guía básica para un recorrido virtual en Google Earth.

Esta guía contiene las instrucciones detalladas de cómo hacer un recorrido virtual desde Google Earth Web basado en el trabajo de Ortiz-Guerrero, C., & Loizzo, J. ²⁰

Requisitos previos

1. Laptop propia o acceso a equipo que permita el acceso a Google Earth.
2. Conexión a internet estable.
3. Cuenta de Google (para guardar proyectos en la nube-opcional).

Instrucciones

I. Crear un proyecto

1. Abrir Google Earth Web y ejecutarlo.
2. Ir al apartado de “Proyectos” (Figura 68).
3. Hacer clic en “Nuevo” (Figura 68).
4. Elegir “Nuevo mapa” (esto guardará automáticamente el proyecto en Drive) (Figura 68).
5. Asignar un nombre (en este caso: “Geoexplora Puebla: Viaje virtual por el paisaje volcánico del oriente poblano.”) Presionar Enter para confirmar (Figura 69).

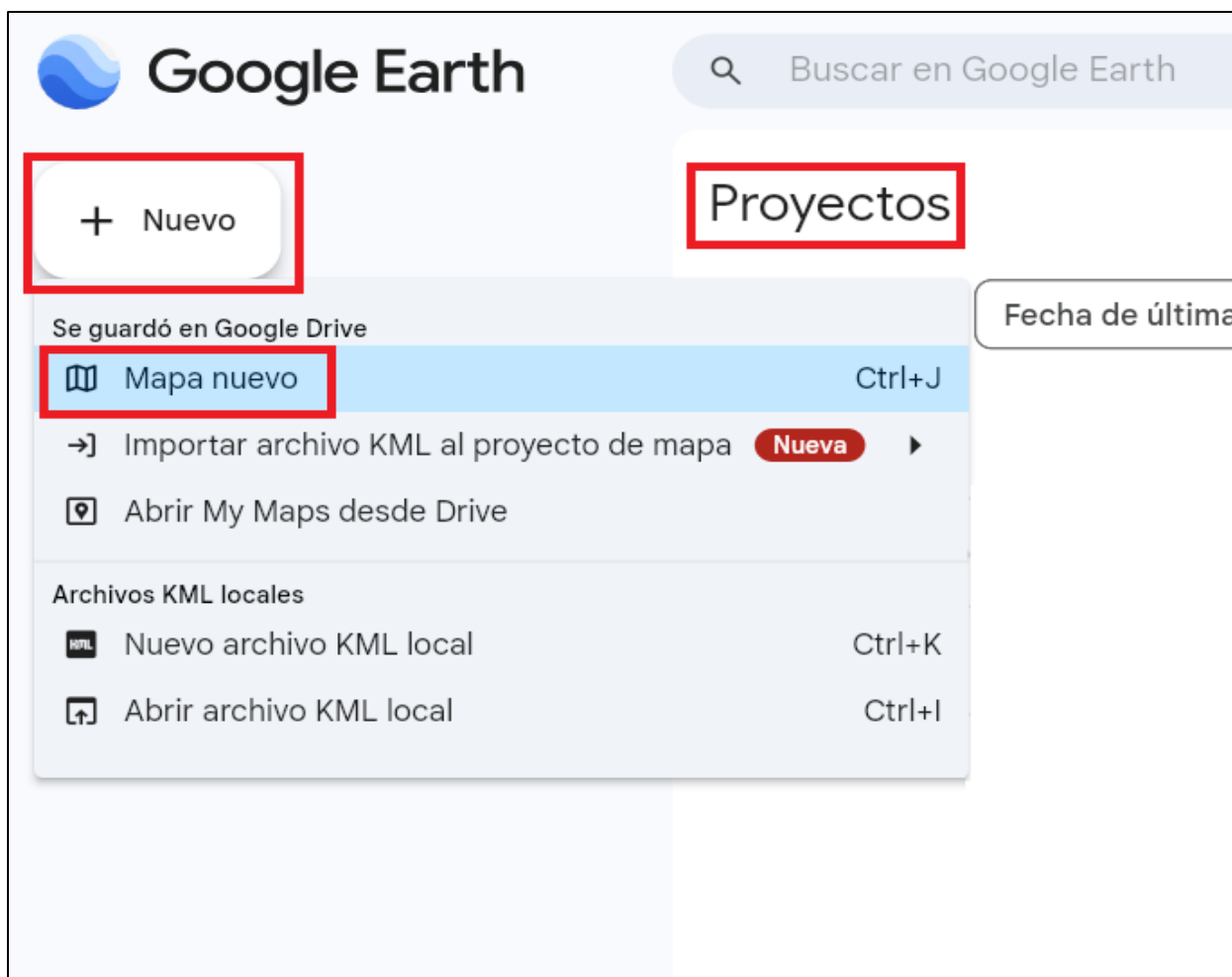


Figura 68. Captura de pantalla para la demostración de los pasos del I. 2 al I. 4. © Google Earth.

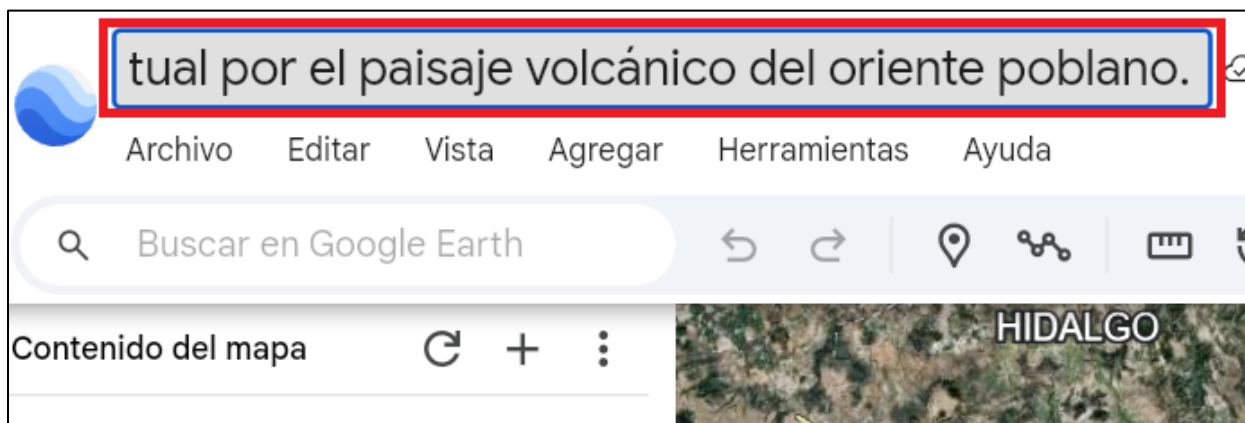


Figura 69. Captura de pantalla para la demostración del paso I. 5. © Google Earth.

II. Agregar la Bienvenida

1. Con el proyecto abierto, hacer clic en “Añadir” (botón '+') (Figura 70).
2. Seleccionar “agregar diapositiva” (Figura 70).
3. Una vez insertada la diapositiva, agrega un título (en este caso, “Bienvenida”) (Figura 71).
4. En la caja de descripción agrega un texto para dar la bienvenida (Figura 71).

5. (Opcional) Añadir una foto o un video (pegar el enlace de YouTube) en la caja de contenido multimedia (Figura 71).
6. Guardar el marcador (clic en “Listo” o fuera del cuadro) (Figura 71).



Figura 70. Captura de pantalla para la demostración de los pasos: II. 1, II. 2. © Google Earth.

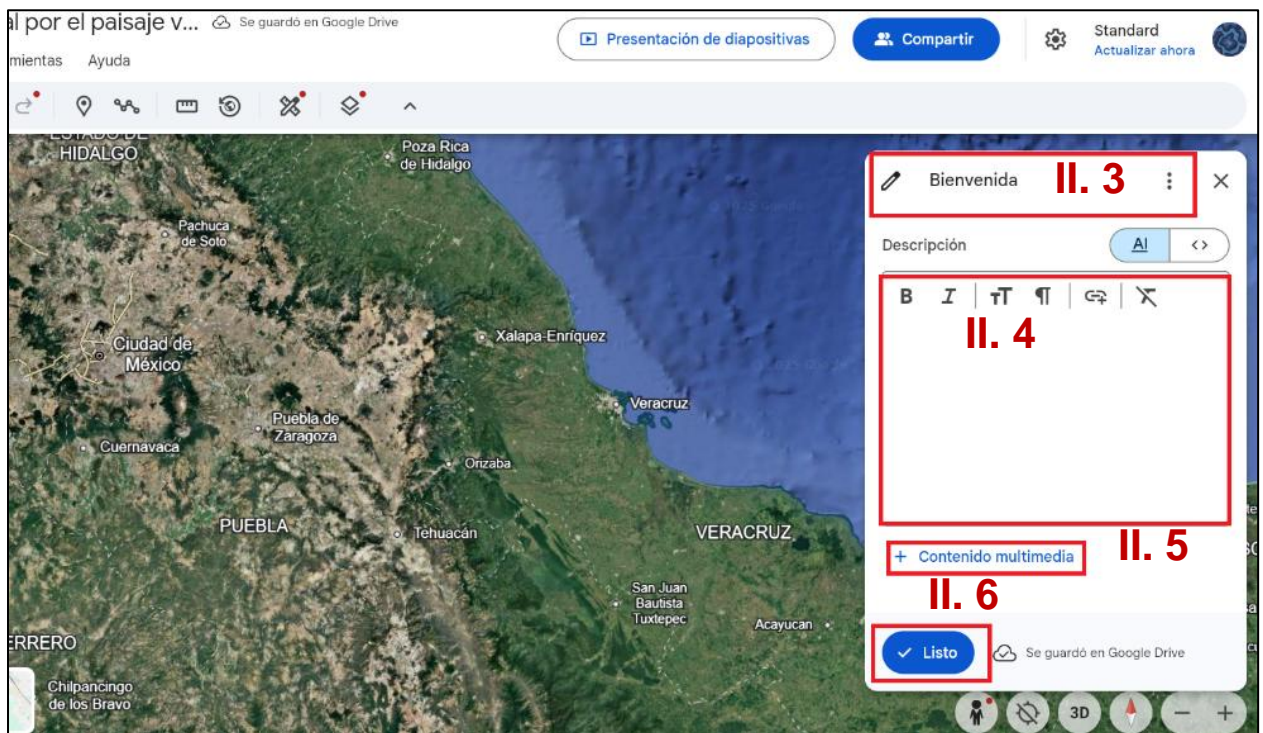


Figura 71. Captura de pantalla para la demostración de los pasos II. 3 al II. 6. © Google Earth.

III. Preparar las paradas (estructura).

1. Decidir el orden del recorrido.
2. Para cada parada seleccionar “Añadir marcador” en cada uno de los sitios (Figura 72).
3. En “Título” escribir el nombre de la parada (en este caso “Punto de salida”) (Figura 72).
4. En la caja de “Descripción”, agregar una descripción de la parada (Figura 72).
5. En la caja de “Medios” agregar un enlace a vídeo (YouTube), una foto o un enlace a Google Docs con la hoja de trabajo de la zona (Figura 72).
6. (Opcional) Para darle un diseño, se puede modificar el ícono, el tamaño y el color (Figura 72).
7. Oprimir en “Listo” para guardar los cambios y repetir los pasos anteriores tantas veces sean necesarias hasta completar las paradas deseadas.
8. (Opcional) En caso de querer delimitar el área de estudio:
 - a. Para mayor precisión, colocar marcadores en cada vértice del área en que se trabajó (en este caso, nuestra área será de un cuadrado) (Figura 73).
 - b. Con los marcadores bien posicionados, seleccionar “Añadir trayectoria o polígono” (Figura 74).
 - c. Hacer clic de manera ordenada en cada uno de los marcadores, cuando se llegue al último punto aparecerá “cerrar la forma” y automáticamente se delimitará la zona (Figura 74).
 - d. Una vez delimitado, oprimir “Guardar en el proyecto” para que el área se mantenga (Figura 75).
 - e. En “Título” escribir un nombre para tu área (en este caso “área de estudio”) (Figura 76).
 - f. En la caja de “Descripción”, se puede agregar una descripción del área de trabajo. De manera opcional, se puede modificar el ancho y color del contorno, así como la opacidad y el color del relleno (Figura 76).
 - g. Al finalizar, seleccionar “Listo” para guardar (Figura 76).
 - h. Una vez guardado, se pueden eliminar los marcadores. (Seleccionar el marcador con botón derecho y oprimir la opción “Borrar”).
9. Al terminar, se puede colocar nuevamente una diapositiva (“Añadir diapositiva”) para colocar un agradecimiento o darle un final al recorrido.

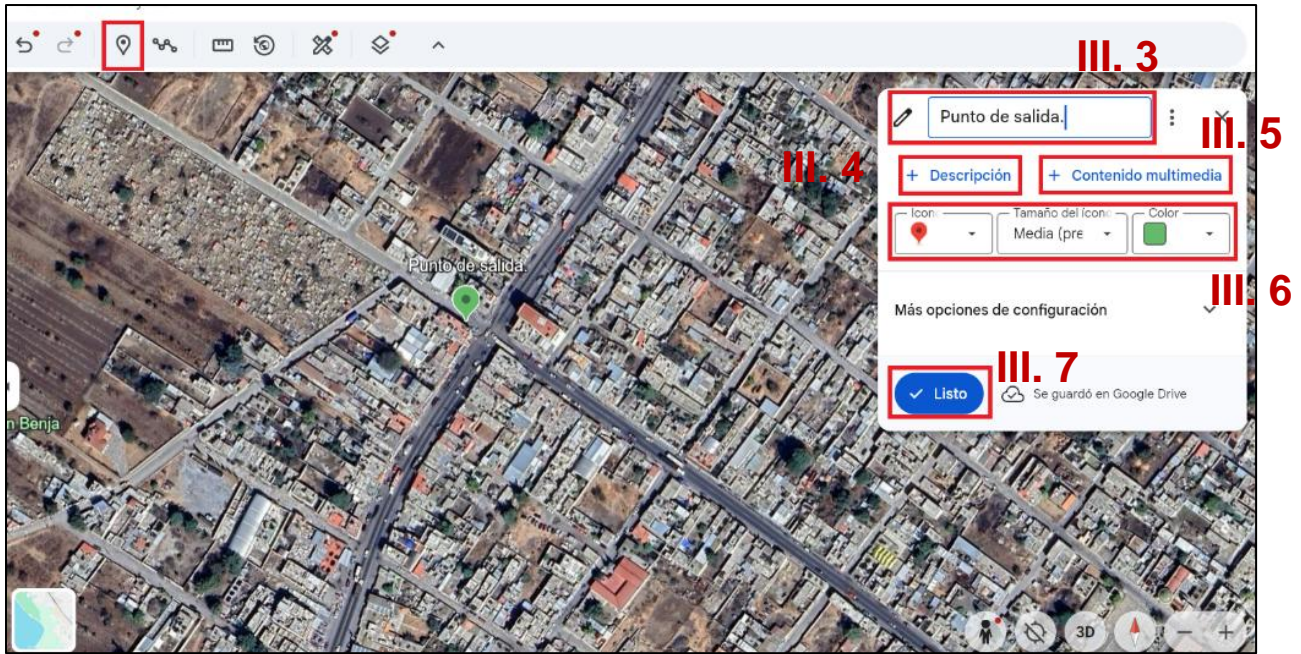


Figura 72. Captura de pantalla para la demostración de los pasos III. 2 al III. 7. © Google Earth.

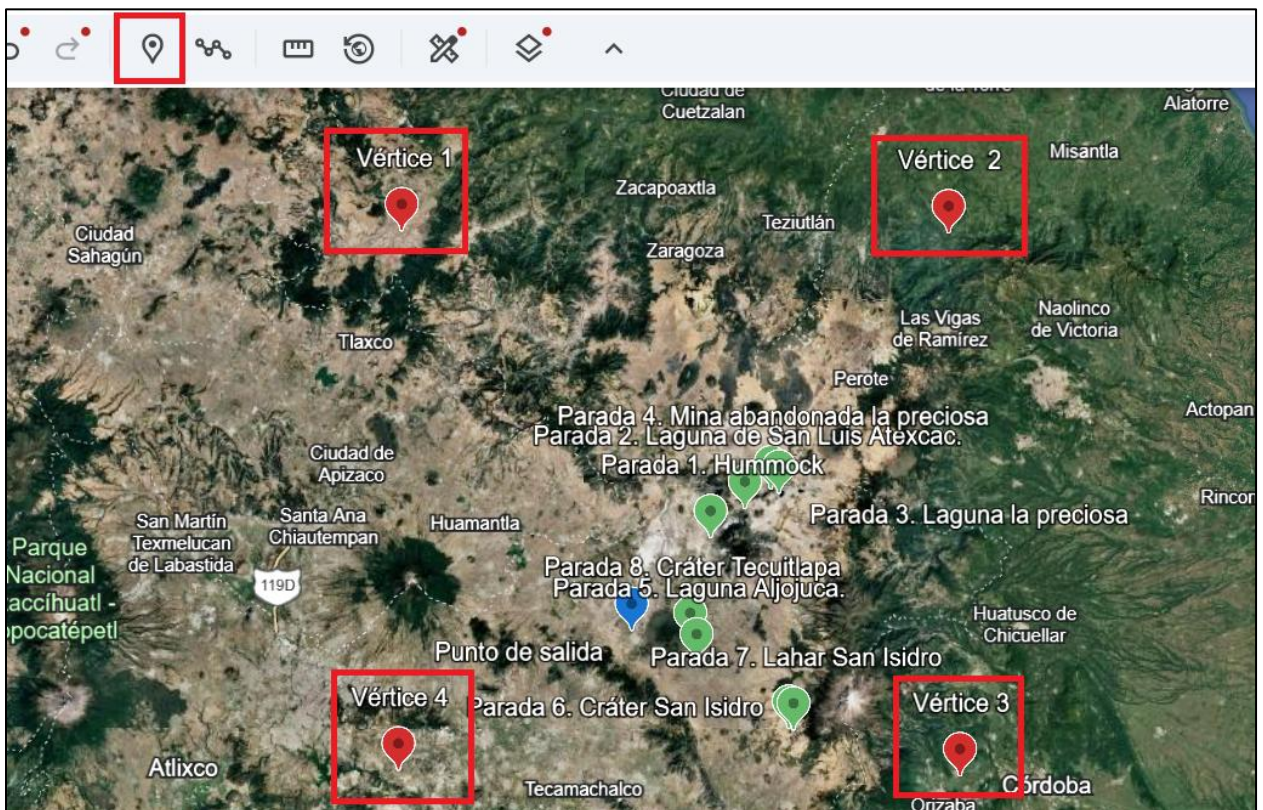


Figura 73. Captura de pantalla para la demostración del paso III. 8. a. © Google Earth.

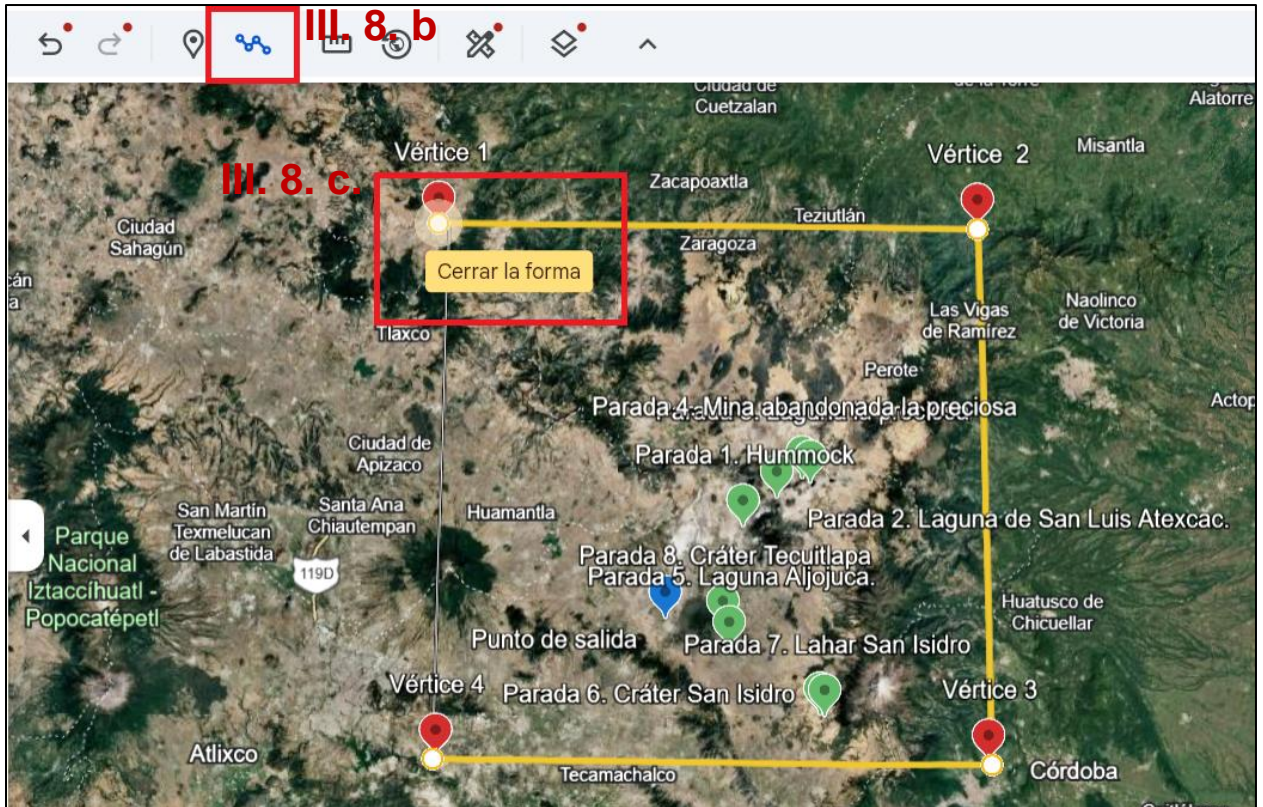


Figura 74. Captura de pantalla para la demostración de los pasos III. 8. b. y III. 8. c. © Google Earth.



Figura 75. Captura de pantalla para la demostración del paso III.8. d. © Google Earth.

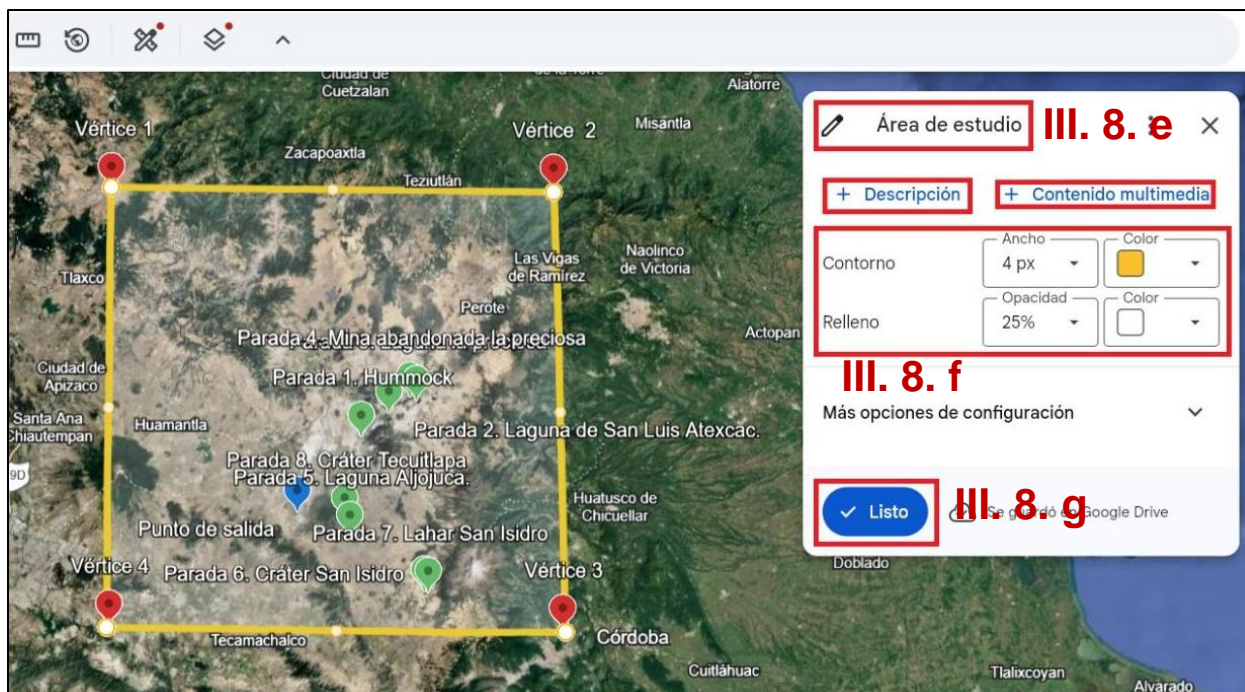


Figura 76. Captura de pantalla para la demostración de los pasos III. 8. e. al III. 8. g. © Google Earth.

IV. Organización:

1. Rectificar que las paradas estén en orden, en caso de que no:
 - a. Dar doble clic el elemento que desee mover, sin soltar, se arrastra en el orden en que debe de ir.
 - b. Una vez en su posición, soltar el elemento.
 - c. Repetir las veces que sean necesarias hasta tener el orden deseado, en este caso es el siguiente:
 - i. Bienvenida
 - ii. Área de estudio
 - iii. Punto de salida
 - iv. Parada 1. Hummock
 - v. Parada 2. Laguna de San Luis Atexcac
 - vi. Parada 3. Laguna la preciosa
 - vii. Parada 4. Mina abandonada la preciosa
 - viii. Parada 5. Laguna Aljojuca.
 - ix. Parada 6. Cráter San Isidro.
 - x. Parada 7. Lahar San Isidro.
 - xi. Parada 8. Cráter Tecuitlapa.
 - xii. Agradecimientos.

V. Comprobar y probar el recorrido.

1. Reproduce el recorrido en modo presentación: haz clic en “Iniciar presentación” y usar las flechas que se encuentran en la parte inferior para avanzar (Figura 77).
2. Verifica que los videos se reproduzcan (si están en YouTube) y que las fotos se vean (Figura 78).
3. Comprueba audio y subtítulos. Si un video no se reproduce, verificar la privacidad.

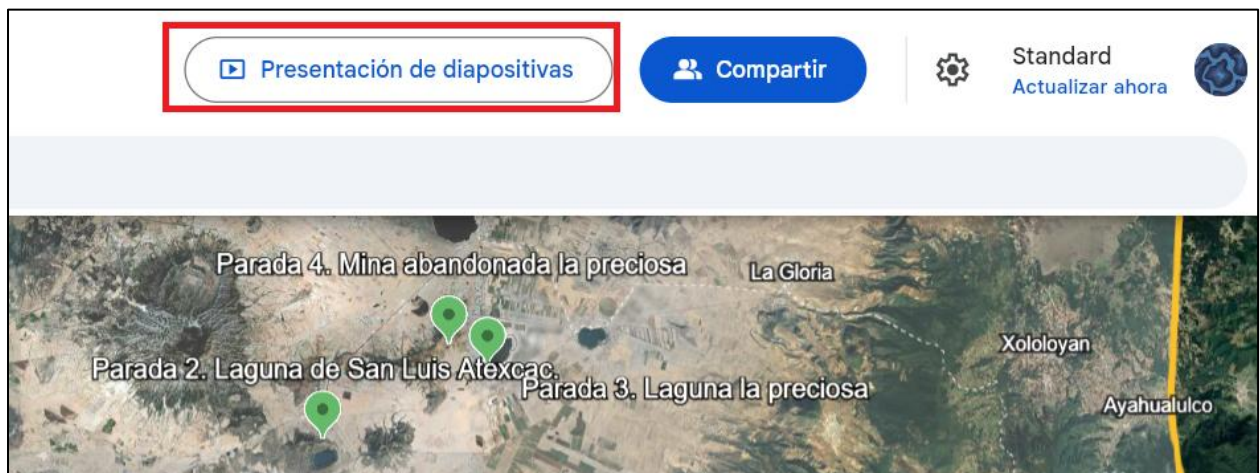


Figura 77. Captura de pantalla para la demostración del paso V. 1. © Google Earth.



Figura 78. Captura de pantalla para la demostración del paso V. 2. © Google Earth.

VI. Compartir el proyecto

1. En el panel del proyecto haz clic en “Compartir” (Figura 79).

2. Se abre la ventana de permisos: elige “Cualquier persona con el enlace” (si quieres público) y selecciona el rol de “Observador” (Figura 80) o “Restringido” y añade correos de tu profesor/compañeros (Figura 81).
3. Copiar el enlace y enviarlo ya sea por correo o mediante un sistema de tu universidad (Figura 80 y 81).
4. Una vez establecido, seleccionar “Hecho” para guardar los cambios (Figura 80 y 81).
5. Para finalizar, si se comparte el enlace de manera pública, verificar que los videos y documentos enlazados sean accesibles para cualquiera con el enlace.

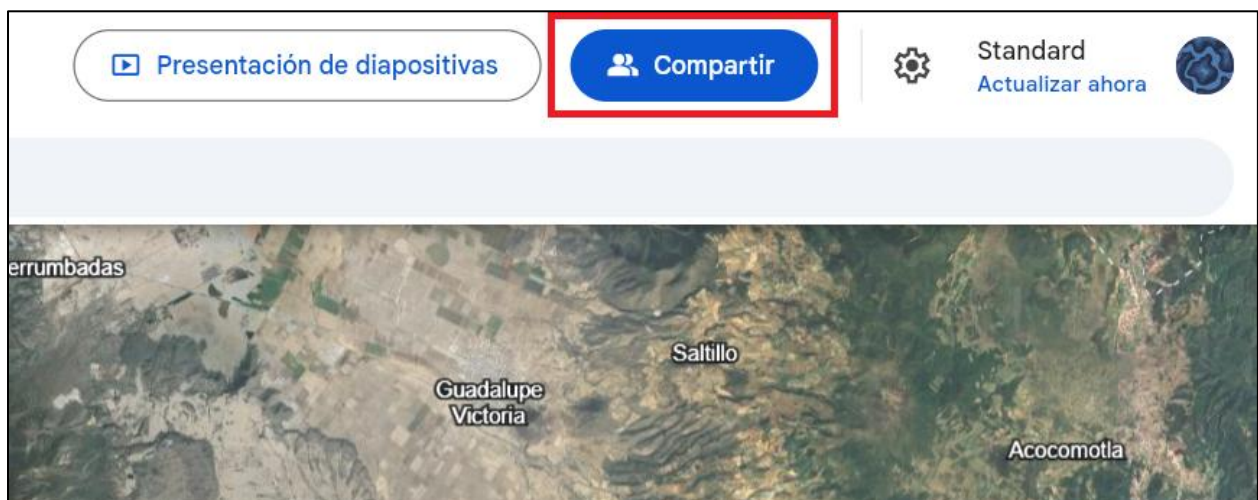


Figura 79. Captura de pantalla para la demostración del paso VI. 1. © Google Earth.

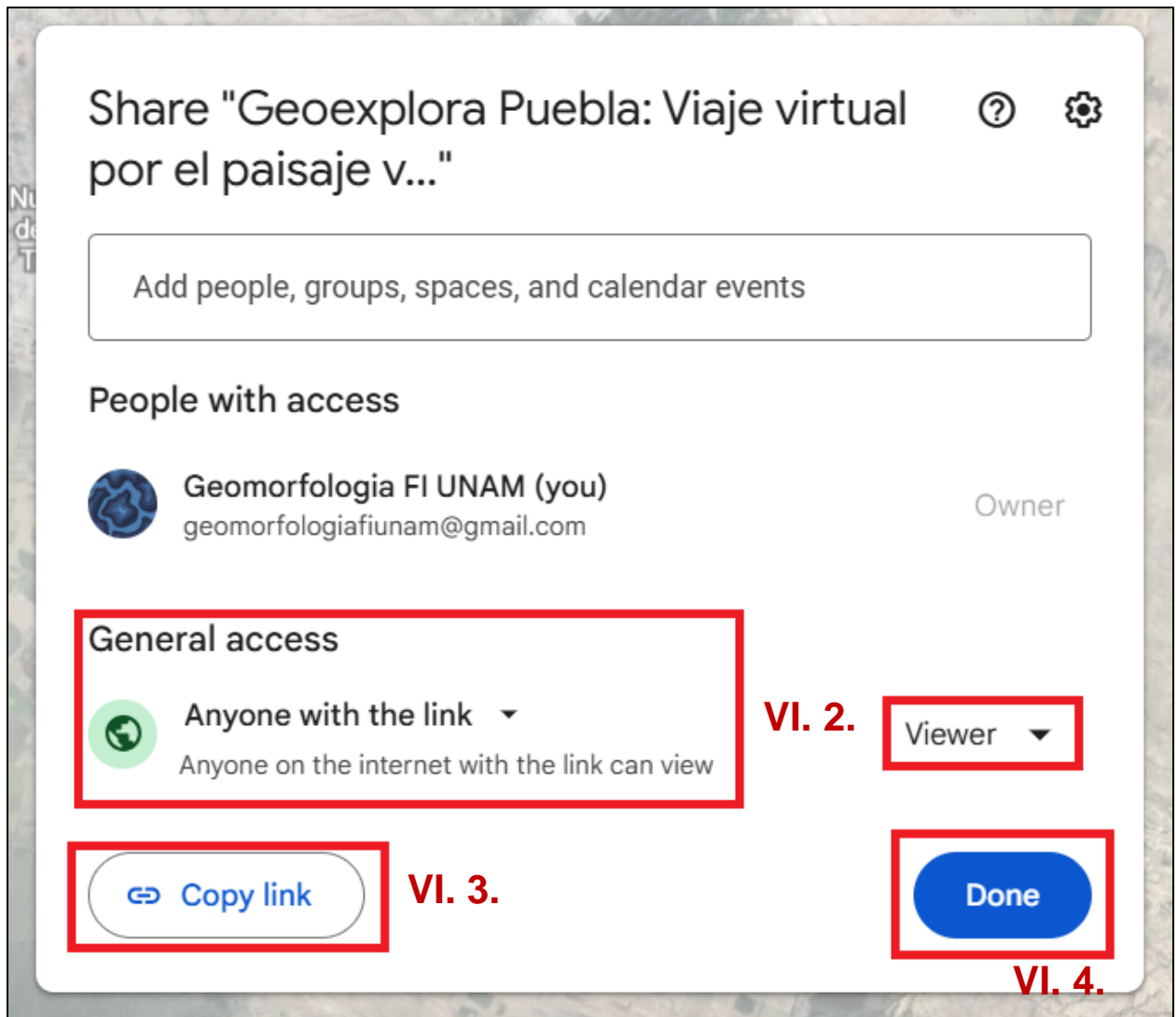


Figura 80. Captura de pantalla para la demostración de los pasos VI. 2 al VI. 4 © Google Earth.

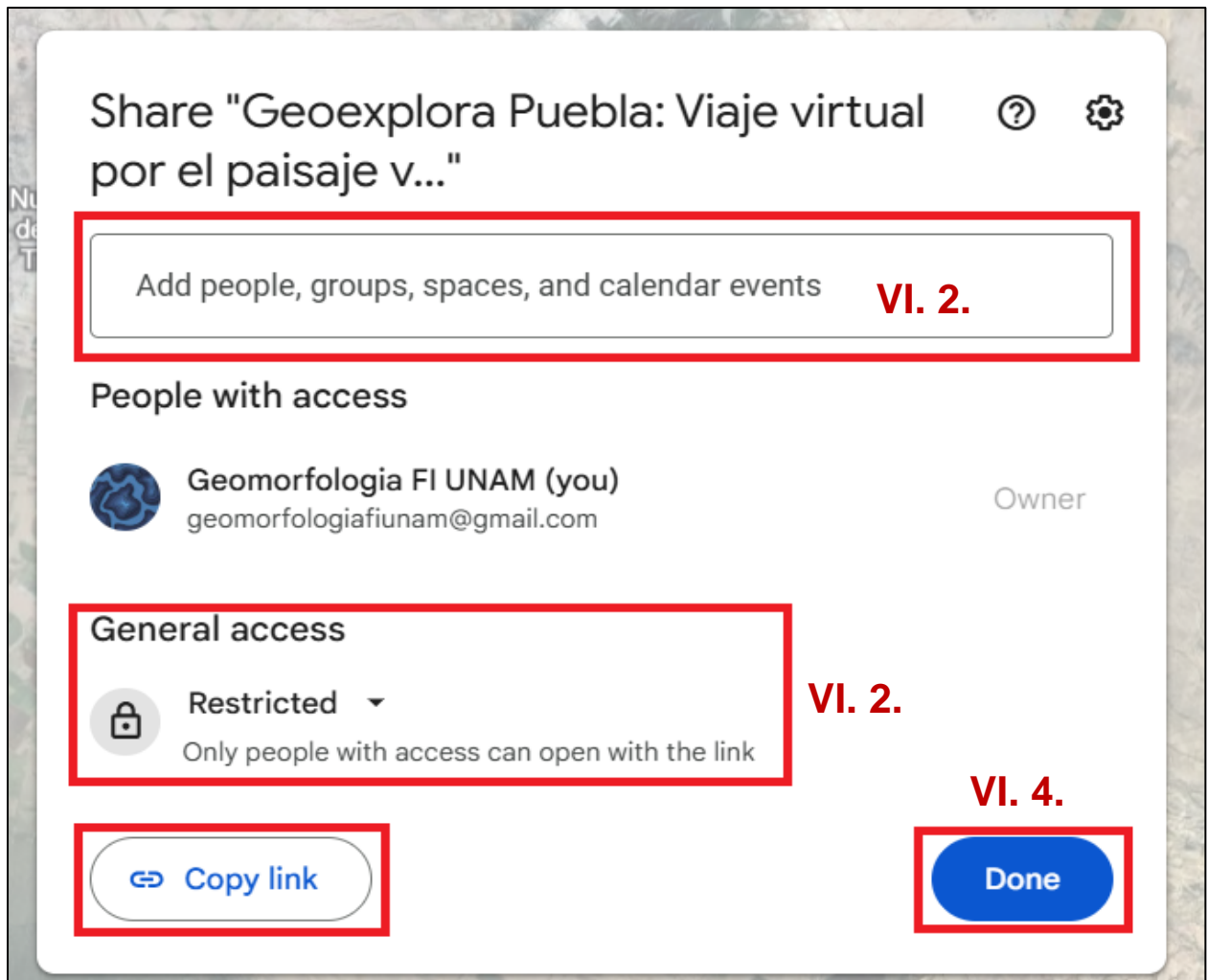


Figura 81. Captura de pantalla para la demostración de los pasos VI. 2 al VI. 4 © Google Earth

3.4.1.1 Tiempos de elaboración del recorrido en Google Earth

La organización temporal de las actividades desarrolladas durante el recorrido se presenta a continuación, con base en estimaciones del tiempo empleado:

- Generar un nuevo proyecto y agregar diapositivas: 30 min.
- Localización de puntos y área de muestreo: 8 hrs.
- Elaboración de guiones: 1 día por cada uno.
- Toma de fotografías y material In Situ: 30 minutos por lugar de muestreo.
- Elaboración de videos por parte de Juan Benjamin Baysse: 3 semanas.
- Integración de archivos digitales a las diferentes plataformas: 1 semana.
- Diseño y organización: 2 semana.

4. Recorrido de campo.

4.1 Fichas de información de estaciones de práctica virtual.

4.1.1 Hummock



Hummock



Ubicación:
En las coordenadas 19,2890596, -97,5094296, en Puebla, México. principalmente dentro del municipio de Guadalupe Victoria, se encuentra un hummock relacionado con una avalancha de escombros de primera generación del domo NW de las derrumbadas el cual está integrado por una mezcla de sedimentos lacustres, depósitos piroclásticos, calizas y obsidiana.





Modelo 3D  Foto 360° 

Definición:
Un hummock se define como una forma de relieve caracterizada por presentarse como un montículo, loma o cresta, la cual aparece en diversos contextos geológicos, principalmente en glaciares, avalanchas de escombros y registro sedimentario. De acuerdo con el contexto científico y geológico en el que se estudie, la definición del hummock puede variar, ya que sus características morfológicas y su origen están directamente relacionados con el entorno donde se desarrolla. .

Contextos geológicos:
En ambientes volcánicos, los hummocks son rasgos característicos de depósitos de avalanchas de escombros y grandes deslizamientos asociados al colapso de edificios volcánicos o domos. Se forman cuando la masa en movimiento experimenta fallas extensionales, generando bloques rotados y desplazados que producen una topografía irregular compuesta por montículos y depresiones. Estos bloques pueden fragmentarse o fusionarse durante el transporte. Un ejemplo representativo se observa en Las Derrumbadas, en Puebla.
En ambientes glaciares, los hummocks se forman sobre glaciares cubiertos por detritos debido a la ablación diferencial y a la dinámica del hielo, generando una superficie ondulada. Estos rasgos han sido documentados en glaciares del Himalaya central, en la región del Monte Everest, como el Glaciar Ngozumpa.
En sedimentología, el término se asocia a la estratificación cruzada hummocky (HCS), presente en ambientes marinos someros afectados por tormentas. Se caracteriza por montículos convexos y depresiones (swales) generados por la acción combinada de olas y corrientes. Un ejemplo representativo de este tipo de estructuras se observa en la Formación Swift, en el sureste de Alberta, Canadá.

Fuentes de consulta:

- Bartlett, O. T., Ng, F. S. L., & Rowan, A. V. (2020). Morphology and evolution of supraglacial hummocks on debris-covered glaciers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(8), 1841–1858. https://www.researchgate.net/publication/346789260_Morphology_and_evolution_of_supraglacial_hummocks_on_debris-covered_Himalayan_glaciers
- Dott, R. H., & Bourgeois, J. (1982). Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 93(8), 663–680. https://www.researchgate.net/publication/249525475_Hummocky_stratification_Significance_of_its_variable_bedding_sequences
- Lagmay, A. M. (2014). "Hummocks: how they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches." *Landslides*. Springer Nature. doi: 10.1007/S10346-012-0368-Y. https://www.researchgate.net/publication/257497116_Hummocks_How_they_form_and_how_they_evolve_in_rockslide-debris_avalanches
- Molina Guadarrama, A. N. (2018). Oleadas piroclásticas de Las Derrumbadas (Puebla, México): Estructuras, componentes y procesos de formación (Tesis de licenciatura. Ingeniería Geológica). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/15897>

Figura 82. Ficha de información en relación al Hummock visitado en los lugares de muestreo.

4.1.2 Laguna de Atexcac



Laguna de Atexcac



Ubicación:
La laguna de Atexcac se localiza en el municipio de Guadalupe Victoria, en el oriental del estado de Puebla, dentro de la Cuenca Serdán-Oriental, y forma parte de un conjunto regional de maares que incluye a Alchichica, Quechulac, Aljojuca y La Preciosa. La zona se sitúa a altitudes de 2,300 a 2,400 m s.n.m., lo que favorece un clima semiárido con precipitaciones concentradas en verano y elevada evaporación durante gran parte del año.





Foto 360° Modelo 3D



Geología:
Se desarrolla sobre un basamento mesozoico compuesto principalmente por calizas, localmente intercaladas con chert, sobre el cual se emplazan rocas volcánicas cuaternarias, incluyendo coladas basálticas y depósitos piroclásticos. Esta combinación litológica favoreció la circulación de agua subterránea y su interacción directa con el magma ascendente, dando lugar a un evento eruptivo freatomagmático de alta energía. Durante la formación del cráter, el basamento carbonatado fue intensamente fragmentado e incorporado a los depósitos piroclásticos, lo que se evidencia por la presencia de bloques angulosos de caliza dentro de capas de ceniza y lapilli. Los sedimentos lacustres que rellenan el cráter presentan una mineralogía mixta, con componentes detríticos y autigénicos, en la que predominan calcita y aragonito, junto con fases evaporíticas como halita e hidromagnesita, además de cristobalita y magnetita asociadas a aportes volcánicos finos.

Geomorfología:
corresponde a un maar originado por la interacción explosiva entre magma ascendente y agua subterránea. El cráter presenta una morfología elíptica, con diámetros que varían entre 850 y 1,150 m, lo que indica que el proceso eruptivo no fue completamente simétrico. El borde del cráter está definido por un anillo de tobas piroclásticas depositadas durante la explosión, mientras que las pendientes internas son relativamente abruptas, especialmente en sectores donde los depósitos muestran poco retrabajo. Estas características reflejan variaciones en la energía eruptiva y en la disponibilidad de agua subterránea a lo largo del tiempo eruptivo. La laguna alcanza una profundidad cercana a 39 m, aunque se infiere que la cavidad eruptiva original pudo alcanzar hasta 160 m, por lo que gran parte del cráter se encuentra relleno por depósitos piroclásticos, colapsos internos y sedimentos lacustres acumulados con el tiempo.

Fuentes de consulta:
Carrasco-Núñez, G., Ort, M. H., & Romero, C. (2007). Evolution and hydrological conditions of a maar volcano (Atexcac crater, eastern Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159(1-3), 179-197. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.001>
Mancilla Villa, O. R., Bautista Olivas, A. L., Ortega Escobar, H. M., Sánchez Bernal, E. I., Can Chulim, Á., Guevara Gutiérrez, R. D., & Ortega Mikolaev, Y. M. (2014). Hidrogeoquímica de salinas Zapotitlán y los lagos-cráter Alchichica y Atexcac, Puebla. *IDESIA (Chile)*, 32(1), 55-69. Obtenido de: <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v32n1/art07.pdf>
Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial (SDRSOT). (2018). Estudio Técnico Justificado para la declaratoria del Parque Estatal "Lagos de Tepeyahualco y Guadalupe Victoria", Puebla. Gobierno del Estado de Puebla. Obtenido de: https://smadsot.puebla.gob.mx/images/ETJ_LAGOS_DE_TEPEYAHUALCO_Y_GUADALUPE_VICTORIA_JUL_18_2_compressed_2-1-70_compressed.pdf

Figura 83. Ficha de información de la laguna de Atexcac visitada en los lugares de muestreo.

4.1.3 Laguna “La Preciosa”



Laguna “La preciosa” Guadalupe Victoria, Puebla.





Modelo 3D



Foto 360°



Ubicación:
La Laguna “La Preciosa” también conocida como Laguna “La Mina”, se localiza en Chichicutla, municipio de Guadalupe Victoria, Puebla. Esta laguna forma parte del grupo de cuerpos lacustres conocidos como “lagos-cráter” del Altiplano Oriental, situados dentro de la cuenca endorreica de Libres-Oriental. Ocupa una depresión volcánica generada por una erupción freatomagmática explosiva, es decir, un maar.

Geología:
La laguna La Preciosa se originó en el Pleistoceno por erupciones freatomagmáticas explosivas, causadas por la interacción entre magma ascendente y agua subterránea, generando un cráter amplio y poco profundo. Se encuentra en una zona de fracturamiento activo asociada a fallas normales con orientación NE-SW y NW-SE. La evidencia de su origen hidromagmático se refleja en depósitos piroclásticos, escorias y tobas que conforman los bordes del cráter. Su estratigrafía está compuesta por depósitos piroclásticos de ceniza, pómez y fragmentos líticos, además de tobas y escorias volcánicas con tonos rojizos y grisáceos, sedimentos lacustres finos con evaporitas incipientes y un basamento volcánico cuaternario sobre calizas mesozoicas inferidas en profundidad. Forma parte del sistema monogenético de la Cuenca Oriental, junto con otros mares asentados sobre rocas volcánicas intermedias a ácidas como andesitas, dacitas y basaltos alcalinos. El entorno se caracteriza por la alta porosidad y la baja consolidación de los depósitos volcánicos, lo que permite una fuerte interacción entre la laguna y los flujos subterráneos, influyendo en su dinámica hidrogeológica y en la conservación del ecosistema.

Geomorfología:
corresponde a un cráter de forma subcircular con una superficie aproximada de 1.3 km² y una altitud cercana a los 2,300 m s.n.m. Sus bordes están elevados y compuestos por acumulaciones de escoria, toba y ceniza volcánica. La configuración del relieve es heterogénea: los márgenes occidental y norte presentan pendientes abruptas, mientras que las laderas sur y oriental son más suaves y erosionadas, posiblemente modificadas por procesos de escurrimiento y sedimentación secundaria. El cráter es endorreico, por lo que no existe salida superficial, y depende casi en su totalidad de la recarga hídrica subterránea, condición que lo hace vulnerable a variaciones hidroclimáticas. Esta morfología cerrada ha favorecido procesos de evaporación continua, concentración de sales y sedimentación química en sus márgenes, donde se observan costras salinas y depósitos carbonatados, aunque menos desarrollados que en el lago Alchichica.

Fuentes de consulta:
Alcocer, J. (2019). Lago Alchichica: Una joya de biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 244 p. ISBN: 978-607-30-2278-1. https://www.academia.edu/download/62013702/Lago_Alchichica_Una_joya_de_biodiversidad20200206-11702-wcckq6.pdf
Moya Sánchez, J. C. (1987). Análisis geomorfológico de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, México [Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/analisis-geomorfoloico-de-la-cuenca-de-oriental-estados-de-puebla-tlaxcala-y-veracruz-mexico-325200>
Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial de Puebla (SMADSOT). Estudio técnico justificativo para declarar como Área Natural Protegida la zona denominada “Lagos de Tepeyahualco y Guadalupe Victoria” (2018): https://smadsot.puebla.gob.mx/images/ETJ_LAGOS_DE_TEPEYAHUALCO_Y_GUADALUPE_VICTORIA_JUL_18_2_compressed_2-1-70_compressed.pdf



Figura 84. Ficha de información de la laguna “La preciosa”, visitado en los lugares de muestreo.

4.1.4 Mina “La preciosa”



Mina “La preciosa” Guadalupe Victoria, Puebla.





Ubicación:
La mina abandonada “La preciosa” se ubica en el municipio de Guadalupe, Victoria, Puebla. Construida en las tierras de la hacienda de Chichicuautla.
Se ubica en coordenadas aproximadas 19.367°N y -97.409° W dentro de la franja volcánica del Eje Neovolcánico.

Modelo 3D



Foto 360°





Antecedentes mineros:
La mina está registrada en inventarios de ocurrencias minerales como un yacimiento con presencia de Au, Ag, Pb, Zn y Cu. Conforme a reportes locales, se menciona que la mina fue explotada mediante labores de pequeña escala artesanal, asociadas a vetas someras de oro y plata, pero con el tiempo las galerías fueron abandonadas debido a la dificultad de mantenerlas libres de agua y a la baja rentabilidad de la extracción. Dichos antecedentes provocaron la presencia de leyendas regionales sobre “tesoros ocultos” bajo la tierra y la existencia de socavones abandonados. En la literatura técnica, La Preciosa aparece listada como ocurrencia polimetálica en catálogos de prospección, lo que confirma su reconocimiento como sitio mineralizado dentro de estudios geológicos regionales sin embargo, hasta la fecha no existen estudios publicados que detallen su profundidad exacta, planos de galerías ni producción histórica.

Infraestructura:
La infraestructura minera documentada en notas y videos de YouTube incluye: bocaminas, galerías y restos de sistemas de bombeo para drenar agua, además de tuberías que servían para mantener en operación las labores subterráneas. Actualmente, dichos elementos se encuentran en ruinas y forman parte del paisaje de minas abandonadas de la zona. Hoy en día, las bocaminas y túneles abandonados sirven de refugio para fauna como murciélagos. Al mismo tiempo, por su cercanía a cuerpos de agua, especialistas advierten de un riesgo de dispersión de metales hacia la laguna vecina si permanecen escombreras expuestas.

Fuentes de consulta:
De la Cruz Guarneros, N. (2020). Distribución y composición de residuos por minería metálica en la región centro de México: revisión bibliográfica de los últimos 15 años [Tesina, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Repositorio Institucional de Acceso Abierto (RIAA), UAEM. Obtenido de: <https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/2312/NACRGU01T.pdf>
El Universal Puebla. (2022, 8 de agosto). Laguna La Preciosa, el lugar donde se dice que hay oro escondido. El Universal Puebla. Obtenido de: <https://www.eluniversalpuebla.com.mx/que-hacer/laguna-la-preciosa-el-lugar-donde-se-dice-que-hay-oro-escondido/>
Los Pueblos de México. (2018, 23 de marzo). La mina de oro La Preciosa se encuentra en el municipio de Guadalupe Victoria, en el estado de Puebla. Facebook. Obtenido de: <https://www.facebook.com/lospueblosdelMexico/posts/la-mina-de-oro-la-preciosa-se-encuentra-en-el-municipio-de-guadalupe-victoria-en/1144265426072219>
Milenio. (2022, 18 de octubre). Laguna de Las Minas: leyenda del oro escondido en Puebla. Grupo Milenio. Obtenido de: <https://www.milenio.com/estados/puebla-laguna-minas-leyenda-oro-escondido>
Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL). (2018, agosto). Recomendaciones sobre minas abandonadas en Puebla. OCMAL. Obtenido de: <https://www.ocmal.org/2018/08/>

Figura 85. Ficha de información de la mina “La preciosa”, visitada en los lugares de muestreo.

4.1.5 Laguna de Aljojuca



Laguna de Aljojuca Municipio de Aljojuca, Puebla.

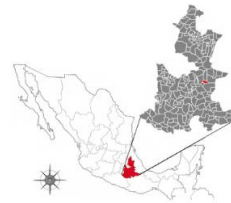


Foto 360°



Ubicación:
La laguna de Aljojuca, también denominada maar de Aljojuca, se localiza en el municipio de Aljojuca, en el estado de Puebla, México, entre los paralelos 19° 03' y 19° 09' de latitud norte y los meridianos 97° 27' y 97° 35' de longitud oeste. El municipio se sitúa a una altitud media cercana a 2,340 m s.n.m., en una región donde coinciden condiciones tectónicas extensionales y un régimen volcánico activo durante el Neógeno tardío y el Cuaternario.

Geología:

El cráter se desarrolló sobre una corteza de más de 45 km de espesor y a una distancia mayor a 360 km de la trinchera mesoamericana, dentro de un contexto controlado por un régimen volcánico activo durante el Neógeno tardío y el Cuaternario. La secuencia estratigráfica del maar ha sido dividida en diferentes unidades principales, donde la unidad basal corresponde a un depósito de caída bien seleccionado de escoria negra, en el que se desarrollan niveles de ceniza fina con estratificación cruzada y abundantes lapilli acrecionales. Las unidades inferiores reflejan pulsos eruptivos húmedos de alta fragmentación, mientras que las unidades superiores muestran una alternancia entre brechas mal seleccionadas y capas estratificadas de ceniza y lapilli, indicando una transición progresiva entre condiciones eruptivas más secas y fases nuevamente influenciadas por la presencia de agua subterránea. Esta variación vertical entre depósitos húmedos y más secos sugiere cambios en las condiciones eruptivas a lo largo de la formación del maar.

Geomorfología:

El cráter de Aljojuca presenta una morfología elíptica bien definida, con un eje mayor cercano a 1.6 km, un eje menor de 0.9 km y una profundidad máxima de 50 m, lo que refleja una estructura volcánica bien desarrollada. Las paredes internas muestran pendientes empinadas donde afloran de manera continua las secuencias piroclásticas, lo que permite reconocer con claridad las distintas fases eruptivas registradas durante la formación del maar. El relieve es marcadamente asimétrico, con sectores que presentan mejor preservación y otros más degradados por la acción de procesos de erosión y remoción de masa posteriores a la erupción. En el sector occidental, las paredes internas conservan secciones más continuas de los depósitos piroclásticos, mientras que en los sectores oriental y sur se observa una mayor degradación del relieve asociada a escurrimientos superficiales y deslizamientos locales. La ausencia de drenaje superficial permanente favoreció la acumulación de agua en el interior del cráter y permitió el establecimiento de un lago estable desde etapas tempranas de la evolución post-eruptiva.


Fuentes de consulta:

De León-Barragán, L. (2016). Estratigrafía y evolución del volcán tipo maar (Axalapazco) Aljojuca, Puebla (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio UNAM.
De León-Barragán, L., & Carrasco-Núñez, G. (2014). Stratigraphy of the Aljojuca Maar Volcano (Puebla, México). In Proceedings of the IAVCEI – 51MC Conference, Querétaro, México. Centro de Geociencias, UNAM.
Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal: Aljojuca, Puebla. INEGI. Obtenido de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21012.pdf





Figura 86. Ficha de información de la laguna de Aljojuca, visitada en los lugares de muestreo.

4.1.6 Lahar San Isidro

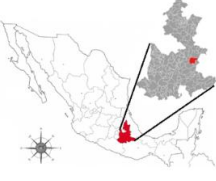


Lahar San Isidro, Chalchicomula de Sesma





Ubicación: El afloramiento de lahar se encuentra cercano a la comunidad de San Isidro Canoas Altas, dentro del municipio de Chalchicomula de Sesma, Puebla.



Modelo 3D




Foto 360° Mayo 2025





Foto 360° Noviembre 2025



Definición:
Un lahar es un flujo volcánico húmedo impulsado por la gravedad, compuesto por una mezcla de agua y detritos rocosos que se desplaza rápidamente desde las laderas de un volcán. Se considera un fenómeno propiamente volcánico debido a su magnitud y potencial destructivo. Físicamente, corresponde a un flujo de dos fases: una fluida (agua) y una sólida (fragmentos de roca o hielo, pudiendo incorporar otros escombros durante el transporte).

Clasificación:
De acuerdo con la concentración de sólidos, los lahares se dividen en dos tipos principales. Los Flujos de Escombros Volcánicos (VDF) son mezclas muy viscosas y concentradas capaces de transportar bloques de gran tamaño, mientras que los Flujos Hiperconcentrados Volcánicos (VHF) son más diluidos y contienen menor proporción de partículas sólidas.

Depósitos:
El lahar es un flujo impulsado por la gravedad que puede ocurrir antes, durante o incluso años después de una erupción. Sus depósitos constituyen el registro sedimentario del flujo y se localizan en el volcán fuente o aguas abajo, generalmente a lo largo de valles y sistemas de drenaje.

Caso de estudio:
Entre el mes de mayo y noviembre de 2025, se identificó una remoción significativa de materiales. En el área se reconocieron clastos con tamaños desde 1 cm hasta 1/256 mm, así como bloques de gran dimensión entre 1.90 y 2 m.
La remoción se asocia, por una parte, al derrumbe de un depósito masivo no consolidado y mal seleccionado, compuesto por clastos subangulares de 1 a 8 cm dispersos en una matriz fina, probablemente formada por ceniza volcánica (1/256 mm) y partículas limo-arenosas (1/16 mm). Por otra parte, las lluvias intensas registradas entre junio y octubre de 2025 favorecieron la movilización de corrientes de agua cargadas de sedimentos provenientes de las pendientes del sector norte, lo que generó la acumulación de bloques de 1.9 a 2 m y fragmentos entre 1 cm y 50 cm.
La combinación de laderas escarpadas, materiales volcánicos poco consolidados (piroclastos y cenizas), lluvias intensas y pendientes entre 70° y 90° favorece la remoción en masa, por lo que San Isidro Canoas Altas representa una zona de peligro alto ante estos fenómenos.

Fuentes de consulta:
Legorreta Paulín, G., Bursik, M., Zamorano Orozco, J. J., Hubp, J. L., Martínez-Hackert, B., & Bajo Sánchez, J. V. (2017). Estimación del volumen de los depósitos asociados a deslizamientos a través de geoformas, en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. *Investigaciones Geográficas*, (92). <https://www.redalyc.org/pdf/569/56950566003.pdf>
Pierson, T. C., Siebert, L., & Scott, K. M. (2025). Deposits of volcanic wet flows: Identifying deposits of lahars, debris avalanches, and water floods in volcanic terrain. *Advances in Volcanology*. Springer. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-24342509-20341271da.pdf>

Figura 87. Ficha de información del lahar de San Isidro, visitado en los lugares de muestreo.

4.1.7 Cráter San Isidro



Cráter San Isidro, Chalchicomula de Sesma



Ubicación: El Cráter de San Isidro se localiza en las proximidades de la comunidad de San Isidro Canoas Altas, dentro del municipio de Chalchicomula de Sesma, en el estado de Puebla.





Modelo 3D



Contexto social:
La comunidad de San Isidro Canoas Altas se sitúa en el punto donde finaliza el descenso pronunciado del Citlaltépetl (Pico de Orizaba) y comienza una meseta que se extiende hacia el poniente. Esta posición geográfica lo convierte en la población de Chalchicomula de Sesma más cercana a los sistemas de fallas y fracturas ubicados en el municipio colindante de Atzitzintla. Está clasificada como una localidad rural activa con un grado de rezago social considerado alto, ya que su economía depende principalmente de la agricultura y la cría de animales. Además, presenta un nivel de peligro medio ante nevadas y tormentas eléctricas, debido a su ubicación en un ambiente de alta montaña donde estos fenómenos impactan con mayor intensidad.

Geología regional:
Aunque no se dispone de registros publicados específicamente para el cráter, la información geológica de la localidad permite establecer el marco regional en el que se inserta. El área forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, particularmente de la subprovincia Lagos y Volcanes del Anáhuac, región caracterizada por una intensa actividad volcánica a lo largo del tiempo geológico. Desde el punto de vista estratigráfico y litológico, el sustrato está constituido principalmente por roca ígnea extrusiva intermedia del Terciario superior, unidad que conforma la base del paquete volcánico regional y que integra gran parte de las estructuras volcánicas del área. Asociados a este marco se identifican derrames basálticos del Cuaternario vinculados al volcanismo básico del Eje Neovolcánico, los cuales comprenden lavas, ceniza fina, escoria y bombas volcánicas. De manera complementaria, se presentan depósitos aluviales compuestos por arcillas, limos, arenas y gravas que rellenan valles y generan superficies planas. De manera complementaria, se presentan depósitos aluviales compuestos por arcillas, limos, arenas y gravas que rellenan valles y generan superficies planas. Debido a su ubicación dentro de este marco geológico, el cráter se considera parte de esta unidad volcánica regional. En el entorno inmediato predominan suelos derivados de cenizas volcánicas, los cuales se distinguen por ser ligeros, esponjosos y ricos en materia orgánica. Estos suelos presentan alta porosidad y permeabilidad, con un drenaje que varía de rápido a moderado, condiciones que favorecen la infiltración pero también incrementan su susceptibilidad a la erosión. Estas características edáficas son propias del ambiente volcánico de alta montaña donde se localiza el cráter, y reflejan la influencia directa de los materiales piroclásticos y volcánicos que dominan el sustrato regional.

Fuentes de consulta:
Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2011). Atlas de riesgos del municipio de Chalchicomula de Sesma, Puebla. Obtenido de: https://rmgjr.proyectomesoamerica.org/AtlasMunPDF/2011/21045_CHALCHICOMULA_SESMA_2011.PDF

Figura 88. Ficha de información del cráter de San Isidro, visitado en los lugares de muestreo.

4.1.8 Cráter de Tecuitlapa



Cráter de Tecuitlapa Guadalupe Victoria, Puebla.



Ubicación:
El cráter de Tecuitlapa se localiza en la comunidad de San Miguel Tecuitlapa, municipio de Guadalupe Victoria, Puebla. Forma parte del sector sur de la Cuenca Oriental, dentro de la porción oriental del Eje Neovolcánico Mexicano. Este maar forma parte de un campo monogenético integrado por diversas depresiones volcánicas explosivas como Aljojuca, Atexcac, Alchichica y Quechulac.





Modelo 3D Foto 360°



Geología:
El basamento en el que se emplaza el cráter se encuentra compuesto por lavas y depósitos piroclásticos de andesitas y dacitas los cuales son intercalados con sedimentos lacustres y materiales epiclásticos; estos materiales son el resultado de una intensa actividad volcánica que se asocia a campos monogenéticos. La presencia de depósitos hidromagmáticos en los alrededores del cráter de Tecuitlapa ha sido interpretada como evidencia de una actividad eruptiva de tipo freatomagmático resultado de la interacción, entre el magma ascendente y cuerpos someros de agua subterránea. El cráter de Tecuitlapa forma parte de una serie de depresiones volcánicas monogenéticas alineadas en dirección ENE-WSW, controladas por fracturas regionales. Estas alineaciones estructurales reflejan la presencia de diques.

Geomorfología:
Corresponde a un maar seco con un borde anular cerrado pero con una notable asimetría hacia el norte, donde el reborde es más bajo y abierto en comparación con los otros flancos. Esta característica se interpreta como resultado de la migración lateral del conducto eruptivo durante la fase freatomagmática, lo que originó una excavación desigual y una acumulación diferenciada de materiales volcánicos. El cráter es elíptico, con un diámetro de ~1080 m en el eje mayor y ~850 m en el menor, y una profundidad relativa de 55 m desde el borde más alto hasta el fondo. Su entorno está compuesto por lomeríos volcánicos bajos con depósitos piroclásticos y flujos de lava andesítica a dacítica, propios del vulcanismo monogenético de la Cuenca Oriental. Además, en las inmediaciones existen pequeños conos de escoria formados tras la creación del maar.

Fuentes de consulta:
Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., Cavazos-Álvarez, J. A., et al. (2021). Volcanic geology of the easternmost sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 17(2), 474–484. <https://doi.org/10.1080/17445647.2021.1970037>
Gaytán Ruiz, A. (2023). Análisis y cartografía geomorfológica de los lagos cráter de Aljojuca y Tecuitlapa, Cuenca Oriental, Puebla (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000846484/3/0846484.pdf>
Ort, M. H., & Carrasco-Núñez, G. (2009). Lateral vent migration during phreatomagmatic and magmatic eruptions at Tecuitlapa maar, east-central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 181(1–2), 67–77. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027309000092?via%3Dihub>

Figura 89. Ficha de información del cráter de Tecuitlapa, visitado en los lugares de muestreo.

4.2 Recorrido virtual en Google Earth

Basado en el trabajo de Ortiz-Guerrero, C., & Loizzo, J.²⁰ se creó un recorrido virtual en Google Earth, a partir de la captura y el procesamiento de datos visuales, espaciales e informativos de cada sitio de muestreo, con el fin de que, el usuario pueda interactuar con la información en distintos modos (Figura 90). Liga del recorrido:

https://earth.google.com/earth/d/1Ks8yIPFIhbYuagg_nW4uRuRWcV9jZqYi?usp=



Figura 90. Captura de pantalla del recorrido virtual, “Geoexplora Puebla: Viaje virtual por el paisaje volcánico del oriente poblano”. © Google Earth.

4.3 Recorrido virtual en Spatial io

Este entorno fue enriquecido mediante la integración de modelos 3D de Sketchfab, fichas informativas elaboradas a partir de investigación documental y material fotográfico de campo, lo que permite al usuario explorar e interactuar con la información de diversas formas (Figura 91). Liga del recorrido:

[//www.spatial.io/s/Geoexplora-Puebla-Museo-Virtual-69c46d5777252f463df9f07d?share=6522804036968613514](https://www.spatial.io/s/Geoexplora-Puebla-Museo-Virtual-69c46d5777252f463df9f07d?share=6522804036968613514)

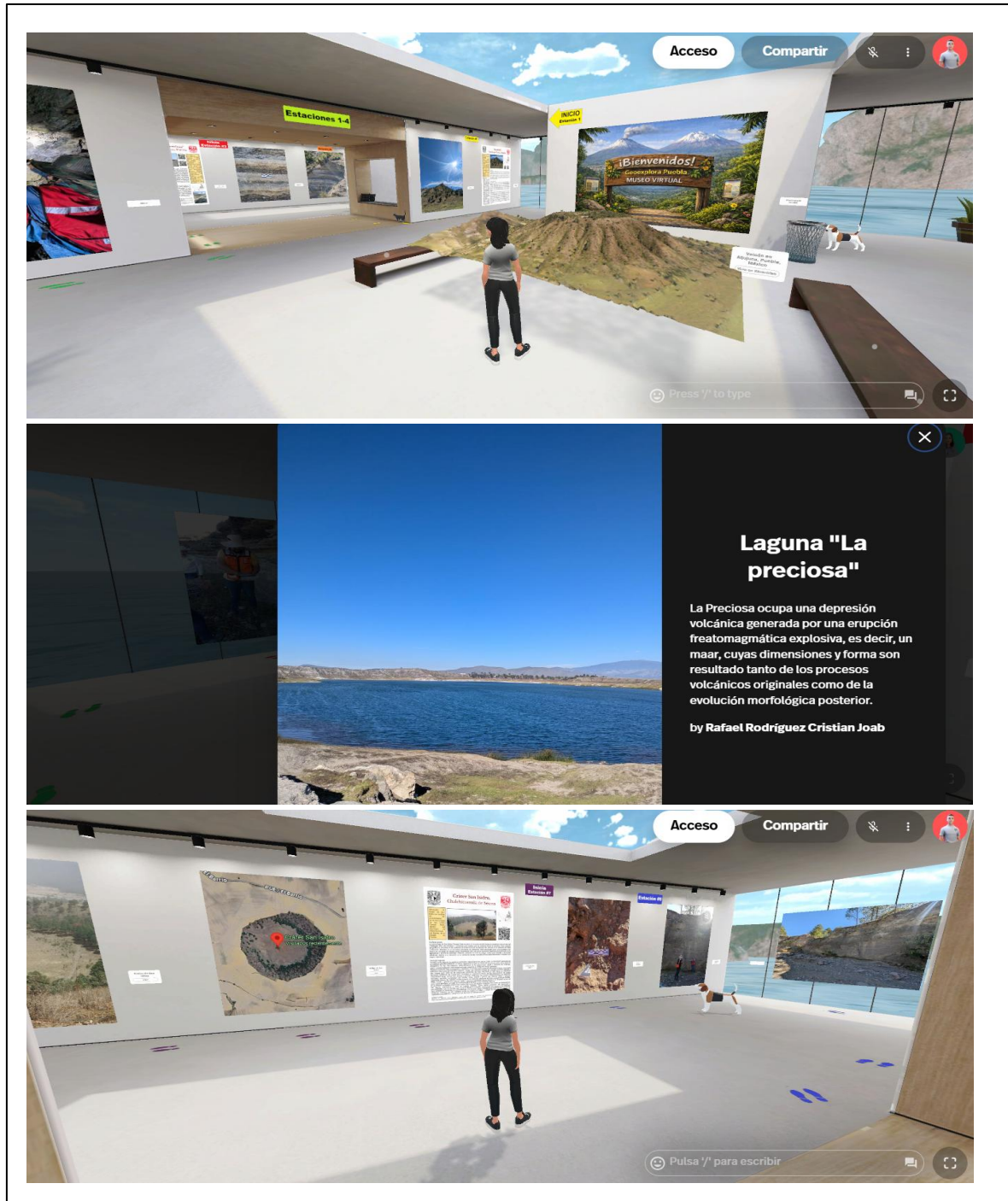


Figura 91. Captura de pantalla del recorrido virtual “Geoexplora Puebla-Museo virtual”. Imagen de bienvenida creada por Openla.²¹ © Spatial io

5. Conclusiones.

El presente trabajo permitió desarrollar un material didáctico mediante un recorrido virtual interactivo a través de la integración de modelos tridimensionales de formas terrestres en plataformas digitales como Google Earth y Spatial.io, a partir de información obtenida durante un recorrido de campo en los alrededores de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Con ello, se logró trasladar elementos geomorfológicos a un entorno digital, manteniendo una representación visual y espacial congruente con las condiciones observadas en campo.

El proceso metodológico incluyó la selección y clasificación de formas terrestres representativas, lo cual permitió estructurar un conjunto de elementos geomorfológicos pertinentes para su modelado. Posteriormente, la generación de modelos tridimensionales mediante técnicas de fotogrametría y modelado digital dio lugar a obtener representaciones con un grado adecuado de fidelidad geométrica y visual, aunque condicionado por factores como la calidad del levantamiento fotográfico y las limitaciones propias del procesamiento digital.

La incorporación de estos modelos en plataformas como Sketchfab y Kuula permitió construir un recorrido virtual que reproduce de manera aproximada la experiencia del trabajo de campo. No obstante, es importante señalar que dicha representación no sustituye completamente la observación directa, particularmente en aspectos relacionados con la escala, textura y percepción espacial real del terreno.

Desde el punto de vista didáctico, la inclusión de recursos interactivos como imágenes, textos, audios y videos contribuyó a fortalecer la comprensión de los procesos geomorfológicos, evidenciando que el uso de herramientas digitales inmersivas puede funcionar como un recurso complementario en la formación de estudiantes de Ingeniería Geológica.

En términos de alcance, el trabajo demuestra la viabilidad de integrar técnicas de levantamiento de campo, modelado tridimensional y plataformas digitales en una misma estrategia de enseñanza. Sin embargo, sus resultados están limitados a las condiciones específicas del área de estudio y a la disponibilidad de recursos tecnológicos, por lo que futuras investigaciones podrían ampliar la cobertura espacial, mejorar la resolución de los modelos y evaluar de manera cuantitativa el impacto de estas herramientas en el aprendizaje.

6. Referencias

¹ Colomo Magaña, E., Cívico Ariza, A., Ruiz-Palmero, J., & Guillén-Gámez, F. D. (2025). Virtual, augmented, and mixed reality in the university environment: An analysis of scientific production. *Journal of New Approaches in Educational Research*, 14(8). <https://doi.org/10.1007/s44322-025-00027-y>

² Arrowsmith, C., Counihan, A., & McGreevy, D. (2022). How academics and the public experienced immersive virtual reality for geoeeducation. *Geosciences*, 12(1), 9. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/1/9>

³ The Guardian. (2025, 12 de marzo). La startup que lleva la realidad virtual a las aulas australianas. The Guardian. Recuperado de: <https://www.theguardian.com/nab-innovative-businesses/2025/mar/12/the-startup-bringing-virtual-reality-into-australian-classrooms>

⁴ Mayer, R. E. (2005). Teoría cognitiva del aprendizaje multimedia. En R. E. Mayer (Ed.), Manual Cambridge de Aprendizaje Multimedia (pp. 31-48). Cambridge University Press. Obtenido de: <https://es.scribd.com/document/633810034/1-Teoria-Cognitiva-del-aprendizaje-Multimedia-MAYER-ESPANOL-docx>

⁵ Huggett, R. J. (2011). Fundamentals of Geomorphology (3ª ed.). London: Routledge. Recuperado de: https://sudartomas.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/fundamentalsofgeomorphology_routledgefundamentalsofphysicalgeography.pdf

⁶ Paguican, Engielle Mae & van Wyk de Vries, Benjamin & Lagmay, Alfredo Mahar. (2014). Hummocks: How they form and how they evolve in rockslide-debris avalanches. Landslides. 11. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/257497116_Hummocks_How_they_form_and_how_they_evolve_in_rockslide-debris_avalanches

⁷ Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Riggs, N. R., Ort, M. H., Zimmer, B. W., Willcox, C. P., y Branney, M. J. (2012). Recent explosive volcanism at the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. En J. J. Aranda-Gómez, G. Tolson, y R. S. Molina-Garza (Eds.), The Southern Cordillera and Beyond (Geological Society of America Field Guide 25, pp. 83–113). Recuperado de: <https://share.google/PBmImCE41JNgSWpLJ>

⁸ Molina Guadarrama, A. N. (2018). Oleadas piroclásticas de Las Derrumbadas (Puebla, México): estructuras, componentes y procesos de formación (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Recuperado de: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/15897>

⁹ Gaytán Ruiz, A. (2023). Análisis y cartografía geomorfológica de los lagos cráter de Aljojuca y Tecuitlapa, Cuenca de Oriental, Puebla (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Recuperado de: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/analisis-y-cartografia-geomorfologica-de-los-lagos-crater-de-aljojuca-y-tecuitlapa-cuenca-de-oriental-puebla-3706065>

¹⁰ Herrera Herbert, J. (2017). Introducción a la minería. Vol. I: Conceptos, tecnologías y procesos (2.ª ed.). Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf

- ¹¹ Siebe, C., & Verma, S. P. (1988). Major element geochemistry and tectonic setting of Las Derrumbadas rhyolitic domes, Puebla, Mexico. *Chemie der Erde*, 48, 177-189. https://www.researchgate.net/publication/260125947_Major_element_Geochemistry_and_tectonic_setting_of_Las_Derrumbadas_rhyolitic_domes_Puebla_Mexico
- ¹² Bascur, A., López, M., & Robledo, S. (2021). Utilización de drones en la creación de modelos 3D aplicados a la geología de yacimientos. *Petrotecnia*, (3), 44-48. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=SIIhcSga5vQ&t=289s>
- ¹³ DJI. (2020). Mavic 2 Pro/Zoom user manual (Versión 2.2). Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2/Mavic_2_Pro_Zoom_User_Manual_v2.2_en.pdf
- ¹⁴ DJI. (2021). Serie Phantom 4 Pro/Pro+ User manual (Versión 2.2). Recuperado de: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4_pro/20211129/UM/Phantom_4_Pro_Pro_Plus_Series_User_Manual_ES.pdf
- ¹⁵ MetaShape. (2024). Agisoft. Recuperado de: [Metashape.https://www.metashape-la.com/agisoft-metashape/](https://www.metashape-la.com/agisoft-metashape/)
- ¹⁶ Spatial Systems, Inc. (2026). Spatial - Create Immersive UGC, Virtual Classrooms, Experiential Marketing. Spatial. <https://www.spatial.io>
- ¹⁷ Kuula. (2016). Kuula: #1 Virtual Tour Software for any business. Recuperado el 27 de noviembre de 2025, de: <https://kuula.co/>
- ¹⁸ Sketchfab, Inc. (2026). Sketchfab - The best 3D viewer on the web. Recuperado de: <https://sketchfab.com>
- ¹⁹ Google. (2026). Google Earth - analyze, build, and collaborate. Google Maps Platform. Recuperado de: <https://mapsplatform.google.com>
- ²⁰ Ortiz-Guerrero, C., & Loizzo, J. (2024). Rocks really rock: Electronic field trips via web Google Earth. *Geoscience Communication*, 7*(1), 101-115. Recuperado de: <https://doi.org/10.5194/gc-7-101-2024>
- ²¹ OpenAI. (2026). ChatGPT (modelo de inteligencia artificial). <https://chatgpt.com/>