



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Batimetría y percepción remota
en el lago del volcán El Chichón**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Maricela Ortiz Ruiz

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Mariana Patricia Jácome Paz



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 BATIMETRIA Y PERCEPCION REMOTA EN EL LAGO DEL VOLCAN EL CHICHON, que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOFÍSICO 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.

MARICELA ORTIZ RUIZ
Número de cuenta: 312343130

Dedicatoria

A mi familia.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a la Beca del programa “Dra. Silvia Susana Bravo Ñunez” 2022 del Instituto de Geofísica de la UNAM, por el apoyo brindado, el cual fue fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme pertenecer a su comunidad y de la cual me siento muy orgullosa. A mis profesores por todos los conocimientos transmitidos y momentos compartidos.

A mi directora de Tesis, Dra. Mariana Patricia Jácome Paz, mi más amplio agradecimiento por su paciencia y dirección de este trabajo a pesar de mi inconsistencia. Gracias por su tiempo y apoyo, por compartir sus conocimientos y experiencias que sin duda han aportado a mi formación.

Agradezco sinceramente a los sinodales, Dr. Tristian Didie Robin Andre Lucien, Dra. Ana María Lizeth Caballero García, Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato y Dr. Antonie Vale Sebastien, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, así como por sus valiosas observaciones y comentarios, los cuales contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad y claridad de esta tesis.

Al Ing. Marco Rubio por sus comentarios y conocimientos transmitidos. Al Dr. Sergio Chávez por compartir sus conocimientos, y ser tan sincero en sus comentarios, por su apoyo tanto académico como personal y sus palabras de motivación.

A Eulalia, mi mamá, le agradezco por siempre estar a mi lado y brindarme su apoyo. Gracias por tu esfuerzo para brindarme el soporte económico y emocional para continuar con mis estudios, has sido mi principal motivación y esto es una pequeña retribución por todo tu gran esfuerzo, te amo.

A Blanca, más que una tía eres una hermana para mí, gracias por todas tus aportaciones, apoyo, cariño y amor. A mis abuelos, Luisa y Epifanio, por su apoyo y sus comentarios para impulsarme a ser una mejor persona. Gracias por todo su cariño y amor, son mi fuente de inspiración (Naanico dí).

Agradezco al resto de mi familia, en particular a mis tíos Rebeca, María y Manuel, así como a mis primos.

A la Familia Velasco Segura: Georgina, Consuelo, Cuauhtémoc y Roberto, gracias por todo el cariño hacia mi familia, por inspirarme y motivarme a realizar una carrera profesional. Al Dr. Francisco Belmont y Lupita por todo su apoyo y motivación.

A mis compañeros y amigos de la FI, por todos los momentos compartidos, en especial a aquellos con los que perduro la amistad. A mi grupo de amigas por siempre apoyarnos y motivarnos entre nosotras. A mis compañeros y amigos de GTM, gracias por compartirme sus conocimientos.

A todos ustedes mi más amplio agradecimiento y gratitud.

Contenido

Resumen.....	1
Abstract	2
Introducción	3
Marco teórico.....	6
Volcanes activos	6
Riesgo volcánico	7
Lagos en volcanes.....	9
Lago de cráter.....	10
Lagos en calderas	10
Lagos maar-diatrema.....	10
Clasificación de lagos por composición química	10
Monitoreo en lagos volcánicos.....	12
Monitoreo visual: burbujas, color y tamaño del lago	13
Monitoreo geoquímico.....	13
Monitoreo geodésico	16
Monitoreo geofísico	17
Generalidades de batimetría.....	17
Percepción remota aplicada al cambio de cobertura	19
Generalidades de percepción (definición y ejemplos de aplicaciones)	19
Imágenes satelitales	21
Detección de cambios con imágenes satelitales.....	27
Métodos y análisis de detección de cambios.....	27
Área de estudio	31
Ubicación y acceso	31
Contexto geológico y tectónico.....	33
Descripción del cráter.....	37
Antecedentes: estudios previos	39
Metodología	41
Adquisición de datos	42
Equipo:.....	43

Procesamiento.....	44
Procesamiento de datos batimétricos	44
Procesamiento de imágenes satelitales	47
Estimación de volumen	62
Fórmula empírica de volumen	63
Resultados y discusión.....	66
Procesamiento batimétrico.....	66
Modelos batimétricos	66
Procesamiento de imágenes satelitales, contornos.....	70
Análisis visual, banda pancromática.....	70
Digitalización visual	72
Índice de agua de diferencia normalizada y clasificación supervisada	74
Clasificación supervisada.....	77
Estimación de área y volumen	81
Conclusiones y recomendaciones	95
Referencias	98

Resumen

El objetivo principal de este trabajo fue realizar un estudio batimétrico del lago cratérico del volcán “El Chichón”, con el fin de conocer la profundidad del lago y analizar sus variaciones temporales. La importancia de comprender de manera integral el sistema hidrotermal y el comportamiento del lago radica en la necesidad de mejorar la gestión de los riesgos asociados a este volcán, por las grandes pérdidas humanas y económicas ocurridas durante su erupción más reciente en marzo-abril de 1982, considerado el último desastre volcánico de México.

Específicamente, se desconoce el volumen del lago cratérico y sus variaciones temporales, lo cual impide comprender en su totalidad la dinámica química e hidrológica del sistema hidrotermal. Para conocer la dinámica de volumen del lago, la metodología incluyó dos levantamientos batimétricos del lago en enero y junio de 2021, registro de los contornos del lago en campo y el uso de técnicas de percepción remota mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat y Planet Labs. Todo esto permitió delimitar la superficie del lago de forma directa e indirecta, comparar metodologías y estimar el área y volumen. Los modelos batimétricos muestran que el lago cratérico presenta variaciones en su volumen que van del rango de 1432213.000 a 2007846.349 m³, lo cual sugiere un aumento en la descarga de agua de los manantiales hidrotermales y, en consecuencia, un posible incremento en la actividad hidrotermal del volcán. A partir de todos estos datos, se evaluó la evolución temporal del volumen del lago y se propusieron relaciones empíricas en función del área que describe su comportamiento en el tiempo de estudio. Finalmente, se obtuvo un ajuste polinomial de segundo orden que contempla los datos de campo y permitió refinar el modelo de volumen del lago.

Adicionalmente, el análisis de las imágenes satelitales demuestra diferencias en las respuestas espectrales del lago, lo que permite inferir variaciones en la concentración química del agua, por lo que se sugiere que estas interpretaciones deben ser confirmadas con estudios geoquímicos específicos.

El estudio del lago cratérico de "El Chichón" es clave para la gestión del riesgo volcánico, ya que las variaciones en el volumen del lago pueden indicar desde deformación del piso cráterico hasta cambios en el sistema hidrotermal que anticipen eventos eruptivos peligrosos. Con este enfoque, el monitoreo continuo del volumen y superficie del lago puede contribuir a la implementación de medidas preventivas orientadas a la protección de las comunidades cercanas.

Finalmente, este trabajo resalta la utilidad de los instrumentos de bajo costo y fácil transportación para la adquisición de modelos batimétricos, como complemento valioso del monitoreo volcánico en sistemas activos susceptibles a procesos de deformación, expansión o contracción del cráter.

Abstract

The main objective of this study was to conduct a bathymetric survey of the crater lake of "El Chichón" volcano, in order to determine the lake's depth and analyze its temporal variations. A comprehensive understanding of the hydrothermal system and the evolution of the lake is crucial for enhancing risk management associated with this volcano, particularly given the significant human and economic losses incurred during its most recent eruption in March-April 1982, regarded as Mexico's last major volcanic disaster.

Specifically, the volume of the crater lake and its temporal variations remain unknown, which limits a full understanding of the chemical and hydrological dynamics of the hydrothermal system. To assess the lake's volume dynamics, the methodology included two bathymetric surveys conducted in January and June 2021, field measurements of the lake's shoreline, and the application of remote sensing techniques through the analysis of Landsat and Planet Labs satellite imagery. This approach enabled both direct and indirect delineation of the lake's surface, comparison of methodologies, and estimation of area and volume. The bathymetric models indicate that the crater lake exhibits volume variations ranging from 1,432,213.000 to 2,007,846.349 m³, suggesting an increase in hydrothermal spring discharge and, consequently, a potential rise in the volcano's hydrothermal activity. Based on these data, the temporal evolution of the lake's volume was evaluated, and empirical relationships as a function of surface area were proposed to describe its variation over the study period. Finally, a second-order polynomial fit incorporating field data was obtained, allowing refinement of the lake volume model.

Additionally, the analysis of satellite imagery reveals differences in the lake's spectral responses, which may indicate variations in the chemical concentration of the water. Therefore, it is recommended that these interpretations be validated through specific geochemical studies.

The study of the "El Chichón" crater lake is crucial for volcanic risk management, as variations in lake volume may reflect processes ranging from deformation of the crater floor to changes in the hydrothermal system that could precede hazardous eruptive events. In this context, continuous monitoring of the lake's volume and surface area can contribute to the implementation of preventive measures aimed at protecting nearby communities.

Finally, this work highlights the usefulness of low-cost and easily transportable instruments for acquiring bathymetric models, serving as a valuable complement to volcanic monitoring in active systems prone to deformation, expansion, or contraction of the crater.

Introducción

El volcán El Chichón es un estratovolcán que se localiza en el noroeste del estado de Chiapas, dentro del Arco Volcánico Chipaneco (AVC). Se trata de un volcán poligenético que ha presentado más de 11 erupciones explosivas durante los últimos 8000 años (Espíndola et al., 2000), la más reciente y violenta sucedió en marzo-abril de 1982.

Esta actividad eruptiva consistió en 3 erupciones tipo plinianas que ocasionaron el desastre volcánico más reciente e importante de México. El volcán arrojó una gran cantidad de gases y materiales piroclásticos que destruyó poblaciones, causó pérdidas materiales y económicas, y el fallecimiento de más de 2000 personas (De la Cruz-Reyna & Martin del Pozzo, 2009; Macías, 2005).

Con la destrucción del cuerpo volcánico se generó un cráter de aproximadamente 1 Km de diámetro que en su interior alberga un lago de color verde. Actualmente, El Chichón es un volcán activo que presenta manifestaciones hidrotermales en el cráter (fumarolas, manantiales hidrotermales, pozas de lodo y en ebullición). Más aún, en los últimos años se ha detectado actividad sísmica en las cercanías del volcán; desde el 25 de diciembre de 2020 hasta el 24 de marzo de 2021 el Servicio Sismológico Nacional (SSN) reportó una secuencia de 60 sismos localizados al este del volcán en las cercanías de Pichucalco, Chiapas, el sismo de mayor magnitud fue de 4.1. Del mismo modo, del 4 al 6 de julio de 2023, el SSN registró 16 sismos en el estado de Chiapas, de los cuales 4 ocurrieron en la zona de Pichucalco; el evento de mayor magnitud fue de 4.1, y los epicentros de los tres restantes fueron localizados en el cráter de El Chichón siendo de 3.5 el de mayor magnitud.

Esta actividad sísmica parece provenir de alguno de los sistemas de fallas locales o regionales cercanas al volcán; sin embargo, no se pudo descartar su posible influencia en la reactivación del sistema volcánico. Por ello, es fundamental contar con un sistema de monitoreo multiparamétrico que permita evaluar de forma integral la evolución de la actividad del volcán.

Como consecuencia de las manifestaciones volcánicas actuales en El Chichón y de la devastadora erupción de 1982, hoy en día el monitoreo continuo multiparamétrico del cuerpo volcánico es de gran importancia para salvaguardar la integridad de sus poblaciones aledañas. Entre las técnicas de monitoreo más comunes se encuentran el monitoreo visual, geoquímico, geodésico y sísmico.

En particular, las manifestaciones termales presentes en el lago cratérico favorecen el estudio de las variaciones en la composición química del agua y de los cambios en la desgasificación difusa, ya que las erupciones volcánicas suelen ser precedidas por anomalías detectables, como modificaciones en la composición química de gases y aguas, así como el aumento en las emisiones difusas de gases, estas señales pueden ser indicadores tempranos de una posible reactivación eruptiva.

En el volcán El Chichón se han realizado diversos estudios de monitoreo volcánico, destacan los enfocados en el análisis de la composición química del agua y gases, así como el monitoreo visual enfocado en identificar cambios visualmente detectables, como variaciones en el color del agua o deformaciones del cráter. Asimismo, autores como Jácome Paz et al., (2016), Rouwet et al., (2008) y Peiffer, (2011) han

realizado diversos estudios sobre la evolución geoquímica del lago, la estimación del volumen de agua y la formulación de ecuaciones empíricas del comportamiento del lago.

En continuidad con estos trabajos, y con el objetivo de apoyar al monitoreo volcánico de El Chichón, en este trabajo se analizó la variación del volumen del lago cratérico en función de su área con el fin de comprender su dinámica en el tiempo y proponer una ecuación de su comportamiento. Para ello, se realizaron dos levantamientos batimétricos, junto con la medición del área superficial del lago, durante enero y junio de 2021. Los datos obtenidos fueron trabajados para generar modelos batimétricos y calcular valores de área y volumen del cuerpo de agua. Además, se retomaron los resultados de trabajos previos (Jácome Paz et al., 2016; Rouwet et al., 2008; Peiffer, 2011) con el propósito de comparar las estimaciones y evaluar posibles cambios en el volumen del agua y cráter.

Adicionalmente, se aplicaron técnicas de percepción remota a imágenes satelitales de Landsat 7 y 8, así como a imágenes de alta resolución de la Plataforma de Planet Labs, con el propósito de delimitar de forma indirecta el contorno del lago. Entre las técnicas aplicadas se incluyeron métodos de análisis visual y algebraico, como son: la digitalización visual, el índice de agua de diferencia normalizada y la clasificación supervisada.

A partir de los contornos obtenidos directamente en campo y los calculados a partir de imágenes satelitales, se calcularon los valores de área y volumen utilizando los modelos batimétricos generados. Los resultados fueron comparados para conocer la efectividad y diferencias entre los métodos aplicados. Finalmente, los resultados fueron analizados para detectar variaciones en el lago y con ello determinar variaciones en la actividad volcánica de El Chichón, así como aportar elementos para la evaluación de riesgos en las poblaciones cercanas al cuerpo volcánico. Asimismo, los resultados permitieron una mejor comprensión de la dinámica del lago, lo que condujo a la propuesta de relaciones empíricas y un ajuste polinomial de su comportamiento, siendo una herramienta con potencial para el monitoreo remoto continuo del sistema volcánico.

Para la presentación y organización de este trabajo, la tesis se encuentra dividida en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Marco Teórico. Se presentan los antecedentes sobre volcanes activos y los principales métodos de monitoreo volcánico, así como los conceptos fundamentales de batimetría y las técnicas de percepción remota aplicadas al monitoreo de sistema volcánicos.

Capítulo 2. Área de Estudio. Se describe la zona de estudio, ubicación geográfica, marco geológico, características del sistema volcánico El Chichón y estudios previos publicados.

Capítulo 3. Metodología. Se detalla el desarrollo de los métodos aplicados en campo, el procesamiento de los datos batimétricos y la implementación de las técnicas de percepción remota utilizadas en el trabajo.

Capítulo 4. Resultados y discusión. Se presentan, interpretan y discuten los resultados obtenidos a partir de las campañas de campo y del procesamiento de imágenes satelitales, incluyendo los cálculos de área y volumen del lago cratérico.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones. Se exponen las conclusiones principales derivadas del estudio y se dan recomendaciones basadas en los resultados de batimetría e imágenes satelitales obtenidos en el tiempo de estudio.

Por último, este trabajo aporta información relevante para la comprensión del comportamiento del volumen del lago y de sus variaciones temporales, asociadas a la descarga de las manifestaciones termales, así como de los posibles cambios en la composición química del agua vinculados al sistema hidrotermal.

Asimismo, el monitoreo del volumen del lago se propone como una técnica complementaria aplicable a volcanes activos que albergan lagos crátericos. En conjunto con otros métodos de monitoreo convencional, la batimetría puede aportar información adicional que contribuya a una mejor comprensión de los procesos volcánicos que ocurren al interior del sistema. La integración de estos resultados permite identificar comportamientos anómalos que podrían anteceder a eventos eruptivos potencialmente destructivos y, con base en ello, apoyar la planificación de estrategias de monitoreo y acciones de protección orientadas a la reducción del riesgo para las poblaciones potencialmente afectadas.

Marco teórico

Volcanes activos

Los volcanes son aperturas o grietas en la corteza terrestre a través de las cuales emergen materiales gaseosos, líquidos y sólidos derivados del magma proveniente del interior de la Tierra. Estos materiales se acumulan en la superficie de la Tierra, generalmente formando una estructura en forma de cono (De la Cruz-Reyna, 2008). Los centros eruptivos están conectados a una cámara magmática que almacena roca fundida (magma) o al sistema de conductos que transporta el magma desde el manto superior.

Existen diferentes tipos de volcanes clasificados de acuerdo con su actividad: aquellos que han tenido varias erupciones a lo largo del tiempo se les llama poligenéticos, en cambio, los volcanes que solo han presentado una erupción y no vuelven a tener actividad se les conoce como monogenéticos.

Por otro lado, cuando existe magma fundido en el interior de un volcán y puede recibir nuevas aportaciones magmáticas para mantener su potencial eruptivo se le considera un volcán activo (De la Cruz-Reyna, 2008). Además, hay otra definición de volcanes activos en función del tiempo geológico y es la más utilizada, de acuerdo con el Programa de Vulcanismo Global del Instituto Smithsonian (GVP, por sus siglas en inglés) un volcán se considera activo cuando ha desarrollado algún tipo de actividad eruptiva reciente (erupción, sismicidad inusual, manifestaciones termales, emisiones significativas de gases, deformación del terreno) durante el Holoceno o en un intervalo de tiempo comúnmente aceptado de 10,000 años (p. ej. De la Cruz-Reyna, 2008; Fulignati et al, 2018; Schmincke, 2004; Szakács, 1994; Volcanes-CENAPRED, 2021).

“Los volcanes activos no se encuentran dispersos arbitrariamente sobre la superficie de la Tierra, sino que se distribuyen por diferentes regiones definidas por los procesos tectónicos de escala global, como las interacciones de las placas tectónicas que conforman la corteza y las corrientes convectivas del manto terrestre que las mueven” (De la Cruz-Reyna, 2008).

Específicamente el vulcanismo de México es consecuencia de los movimientos de convergencia entre las placas tectónicas de Norteamérica, Cocos y de Rivera (p. ej. Nieto-Torres et al., 2021). La actividad volcánica del país está dividida en provincias geodinámicas, del norte al sur de México: Provincia de California, Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), Arco Volcánico Chiapaneco (AVC) y el Arco Volcánico de Centroamérica (AVCA).

Dentro de las zonas volcánicas el Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, reporta 48 volcanes activos en la República Mexicana (Nieto-Torres, 2017), de los cuales, la mayor cantidad del vulcanismo activo se encuentra en la parte central del país, en el Cinturón Volcánico Transmexicano que atraviesa los estados de Veracruz, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Guerrero, Jalisco, Colima y Nayarit (Figura 1) (Yarza de De la Torre, 2003).



Figura 1. Localización de los principales volcanes de México (triángulos negros), entre el paralelo 19 y 20° de latitud norte se encuentra la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) donde se encuentra la mayor concentración de vulcanismo activo del país. (Tomada de Macías, 2005).

Al mismo tiempo, los sistemas activos se encuentran cercanos a ciudades con gran densidad de población, lo que representa un alto riesgo en caso de actividad eruptiva.

Riesgo volcánico

El riesgo volcánico se define como la probabilidad de que un evento volcánico produzca un impacto negativo: pérdida humana, propiedad o capacidad productiva (Llinares, s. f.; Nieto-Torres et al., 2021). En general, el riesgo depende de tres factores: peligro, exposición y vulnerabilidad.

En este contexto, las zonas urbanas cercanas a sistemas volcánicos activos tienen mayor exposición a fenómenos volcánicos naturales. En México, volcanes activos como el Popocatepetl y el de Colima representan un riesgo volcánico para las poblaciones y aún más por su cercanía a los estados como mayor densidad poblacional del país como son: Colima, Morelos, Puebla, Estado de México y Ciudad de México (CPV-INEGI, 2020).

De manera similar, en el sur del país, dentro del Arco Volcánico Chiapaneco se encuentra el volcán El Chichón, cuyas erupciones violetas de abril de 1982 dieron lugar al desastre volcánico más reciente de México. Este evento causó pérdidas materiales y la muerte de aproximadamente 2000 personas (De la Cruz-Reyna & Martín del Pozo, 2009; Nieto-Torres, 2017).

En este sentido y con la finalidad de reducir el riesgo e identificar sistemas volcánicos que representen un alto riesgo para las poblaciones, y priorizar estrategias de mitigación, algunos autores han propuesto clasificaciones de riesgo volcánico, analizando aquellos factores que aumentan el riesgo de una actividad volcánica.

Espinasa-Pereña, realizó en 2016 una evaluación del riesgo relativo de los volcanes activos de México, considerando el Riesgo Volcánico Relativo (RVR) como el riesgo que representa la erupción de un volcán. Para el cálculo del RVR se tomaron en cuenta factores de peligro y vulnerabilidad, entre los factores de peligro se encuentran: tipo de volcán, máximo índice de explosividad volcánica, actividad explosiva, entre otros. Los factores de vulnerabilidad considerados son la cantidad de población, vivienda, educación, salud, transporte, equipamiento urbano y superficie.

Como resultado Espinasa-Pereña presenta en el siguiente mapa (Figura 2) la distribución de los 48 volcanes y campos volcánicos potencialmente activos de México, y su clasificación en el nivel del RVR, clasificado como: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.



Figura 2. Distribución de volcanes y campos volcánicos activos de México, y su nivel de riesgo asociado, riesgo muy alto (rojo), riesgo alto (naranja), riesgo medio (amarillo), riesgo bajo (verde), riesgo muy bajo (azul). (Tomada de Espinasa-Pereña, 2016).

Por su parte, Nieto-Torres et al., (2021) presenta una nueva estrategia de clasificación de riesgo volcánico relativo que se basa en el análisis de varios factores de riesgo de volcanes mexicanos. La nueva clasificación

toma en cuenta los siguientes factores: amenaza, peligro y exposición; vulnerabilidades físicas, sistemáticas, económicas y sociales; y de resiliencia como programas de prevención y mitigación (reducción del riesgo).

Dicha clasificación fue dividida en dos categorías: la primera RVR1 considera los factores de amenaza, exposición y vulnerabilidad; y el RVR2 agrega el factor de resiliencia. El análisis de la integración de los factores de riesgo dio como resultado que los volcanes Tacana y El Chichón ubicados en Chiapas presentan el mayor RVR por amenaza, exposición, vulnerabilidad y la poca prevención que tienen las poblaciones.

De acuerdo con los resultados de ambos trabajos (Espinasa-Pereña, 2016; Nieto-Torres et al., 2021) el volcán El Chichón presenta un riesgo volcánico relativo alto. En la Figura 2 se clasifica dentro del grupo de estrellas rojas, correspondiente a un riesgo muy alto. Considerando estos resultados, las clasificaciones de Riesgo Volcánico Relativo son una herramienta útil para identificar aquellos volcanes que presentan un mayor riesgo para las poblaciones asentadas en las cercanías de los cuerpos volcánicos.

En particular, la clasificación de RVR se podría utilizar para extender e implementar nuevos programas de mitigación en el volcán El Chichón, o bien, ayudar a planear nuevos programas de monitoreo para aquellas zonas volcánicas de alto riesgo que tienen poco o nula atención, con el objetivo de salvaguardar la integridad de las poblaciones, reduciendo su vulnerabilidad, el impacto y peligro de los fenómenos volcánicos.

Entre los programas de monitoreo más conocidos se encuentra el análisis visual, los estudios geoquímicos, la medición de emisiones gases, el estudio de deformación y el análisis sísmico, entre otros. De otra manera, volcanes como El Chichón que presentan cuerpos de agua pueden proporcionar más información sobre la actividad volcánica de sus sistemas, estudiando la dinámica de los cuerpos de agua.

Lagos en volcanes

Los lagos en sistemas volcánicos activos proporcionan información sobre los procesos volcánicos, hidrotermales y de desgasificación del volcán subyacente. Rouwet et al., (2015) menciona que los lagos volcánicos se utilizan para monitorear la actividad volcánica porque albergan sus propios peligros (explosiones de CO₂), ya que funcionan como filtros que disuelven o atrapan fluidos y gases de origen hidrotermal-magmático que emanan los volcanes al ambiente superficial, y en ocasiones presentan niveles de concentraciones nocivos. Las explosiones repentinas de gases pueden llegar a ser catastróficas, por ejemplo, la explosión del Lago Nyos en Camerún causó la pérdida de muchas vidas humanas por intoxicación de CO₂.

Los lagos volcánicos se clasifican de acuerdo con su génesis, tomando en cuenta la evolución tectónica en la que se encuentra el lago (sistema monogenético o poligenético), su relación con el volcanismo, el momento de la formación poco o mucho tiempo después de la erupción y la ubicación del lago con respecto al centro volcánico como lo sugiere Rouwet et al., (2015).

Desde un punto de vista genético los lagos volcánicos se clasifican como:

Lago de cráter

Los lagos de cráter son lagos volcánicos que comúnmente son asociados a volcanes poligenéticos. Este tipo de volcanes forman cráteres debido a erupciones explosivas, posteriormente a su formación por condiciones climatológicas los cráteres se rellenan de agua y llegan a albergar lagos (Rouwet et al., 2015). Un ejemplo, es el lago formado en el cráter del volcán El Chichón tras su erupción de 1982.

Los lagos cratéricos se clasifican en activos e inactivos. Los lagos activos siguen conectados a un reservorio magmático y presentan una desgasificación continua, mientras que los inactivos están vinculados a respiraderos volcánicos que han perdido su conexión con los reservorios de magma, por lo que no presentan desgasificación (Rouwet et al., 2015).

Lagos en calderas

Los lagos de calderas se forman por explosiones que destruyen la parte central del edificio volcánico y provocan el colapso de la cámara magmática. Al colapsar la cámara magmática se forma una caldera, con el tiempo se enfría y el fondo se cubre de agua. Las calderas se caracterizan por ser de gran tamaño, desde uno a varios kilómetros.

Entre algunos ejemplos se encuentran: el lago del volcán Pinatubo en Filipinas con una caldera de aprox. 2.5 km de diámetro; la caldera de Coatepeque en el Salvador tiene un lago de unos 25 km²; y el lago Monte Mazama en Estados Unidos de unos de 10 km de diámetro (p. ej. Doncel Domínguez, 2014; Rouwet et al., 2015).

Lagos maar-diatrema

Los lagos maar de cráter volcánico son formados por una erupción explosiva freatomagmática, ocurre cuando el magma asciende hacia la superficie y entra en contacto con un cuerpo de agua subterránea; son el resultado de una expansión violenta de vapor de agua y gases volcánicos magmáticos.

Los maars son cuerpos volcánicos de bajo relieve, en su mayoría se llenan de agua por medio de precipitaciones. Algunos ejemplos de maars en México son los siete lagos maars conocidos como Hoyas: Hoya Rincón de Parangueo, Hoya San Nicolás de Parangueo, Hoya Estrada, Hoya La Alberca, Hoya Blanca, Hoya Cíntora y Hoya Álvarez ubicadas en Valle de Santiago, Guanajuato; los lagos de Puebla conocidos localmente como Axalapascos, Alchichica, Quechulac, La Preciosa, San Luis Atexcac, Aljojuca y San Miguel Tecuitlapa (Arredondo-Figueroa et al., 1983; Jiménez et al., 2005).

Clasificación de lagos por composición química

Por otro lado, por la gran variedad de composiciones que existen los lagos volcánicos también se clasifican de acuerdo con la composición química del agua que albergan, y a su vez las concentraciones de aniones reflejan la composición del reservorio. Sigurdsson et al., (2000) mencionan que hay sistemas con pH neutro, aguas diluidas, o bien, aguas altamente ácidas y fuertemente mineralizadas. Además, también difieren en los componentes químicos diluidos como muestra la Tabla 1 de Sigurdsson, el Lago Kelut es rico en sodio y cloruros, el Oyunuma es rico en cloruros y sulfatos, y el Lago Nyoos es rico en dióxido de carbono.

Tabla 1. Composición química de algunos lagos volcánicos. (Modificada de Sigurdsson et al., 2000).

Nombre	Kawah Ijen	Poás	Poás	Kelut	Galunggung	Lago Cráter	Batur	Oyunuma	Bannoe	Nyos	Nyos
Prof. de muestra	0 m	0 m	0 m	0 m	0 m	200 m	0 m	0 m	0 m	0 m	205 m
Entorno ^b	a	a	a	a	a	b	b	c	c	d	d
Fecha	08/96	10-11/87	06/89	12/93	12/93	08/94	09/89	10/95	10/95	03/96	03/96
Área (X10 ³ m ²)	390	~ 42	~ 20	240	—	53,000	1.6	20	16	1580	—
Prof. máxima (m)	170	~ 32	~ 5	33	—	589	—	26	23	209	—
Volumen (X10 ⁶ m ³)	32	~ 0.5	~ 0.03	1.8	—	17,300	—	—	—	150	—
Temperatura (°C)	36	61	87	41	23	9	23	51	42	26	—
pH	0.3	0	-0.4	5.9	7	7	8.9	2.7	5.7	7.1	5.1
TDS ^c	106,950	82,340	249,500	3430	605	100	1240	1030	300	65	1470
Na	1,160	520	2,720	720	18	11	360	100	20	2.8	66
K	1,470	250	1,730	92	4	1.7	30	12	6	1.4	7
Mg	630	550	2,040	55	34	2.2	70	<1	5	3.3	90
Ca	970	2,340	650	100	110	6.6	30	60	20	3.8	55
B	53	20	83	—	—	<0.5	—	22	0.7	<0.1	<0.1
Al	5,410	2,700	13,700	<0.1	<0.1	—	—	19	<0.5	—	—
SiO ₂	160	170	440	240	30	20	30	156	105	16	81
Fe	2,060	1,300	5,770	<0.1	<0.1	n.r.	<1	4.4	<0.5	<0.1	120
Mn	40	36	130	1.7	<1	n.r.	—	0.5	<0.5	<0.1	1.7
SO ₄	71,300	48,200	167,000	660	400	8	490	440	130	<1	<1
F	1,050	1,560	8,960	7	<1	0.1	<1	—	—	—	—
Cl	22,630	24,700	46,300	1,290	6	9.8	230	221	10	<2	<1
HCO ₃	—	—	—	260	—	41	—	—	—	38	1,040
δD	0.8	-14	-33	-26	—	-79	-10	—	—	-10.8 ^d	-11.9 ^d
δ ¹⁸ O	8.7	12.3	7.3	-1.8	—	-9.8	-1.4	—	—	-2.6 ^d	-3.0 ^d
δ ³⁴ S(SO ₄)	22.3	14.4	12.3	15.1	—	—	—	2.2	11	—	—

^a Las concentraciones se dan en mg/kg; las composiciones isotópicas están en delta (δ) unidades por mil (‰)

^b a, cráter activo; b, caldera inactiva; c, área hidrotermal; d, cráter inactivo.

^c TDS: sólidos disueltos totales.

^d Valores en 10/93.

De igual modo Rouwet et al., (2015) presenta la siguiente clasificación:

- Lagos ácidos con S-CL presentan valores de pH bajos y los lagos ricos en carbonatos tienen valores de pH altos. El diagrama de composición S-Cl-C (Figura 3), muestra los lagos ácidos en el eje S-Cl, y los muy ricos en CO₂ cerca del 100 % del HCO₃. Por otro lado, muy pocos lagos tienen composiciones mixtas de S-Cl-HCO₃, y la mayoría de ellos tiene valores de pH relativamente alto.
- Lagos que se encuentran en cráteres de volcanes activos e interceptan los gases volcánicos emitidos dan lugar a fluidos muy ácidos y ricos en azufre (usualmente son lagos con pH ácidos). En este caso se pueden presentar flujos de CO₂ altos difusivos y advectivos a la atmósfera.
- Lagos que reciben fluidos hidrotermales de sistemas subyacentes en volcanes activos. Estos fluidos hidrotermales ácidos pueden estar fuertemente mineralizados, pero menos ricos en componentes volátiles vulcanogénicos. Entre estos lagos se encuentra el lago del volcán El Chichón, los pH de estos lagos van de ácidos a neutros. En este caso se pueden presentar flujos de CO₂ de medios a altos, difusivos y advectivos a la atmósfera.
- Lagos ricos en carbonatos y CO₂ con pH que va de neutro a alcalino (mayor a 7), estos tienden a fomentar ecosistemas productivos, sus aguas subterráneas pueden estar cargadas de CO₂ que podría conducir a erupciones límnicas (p. ej. Lago Nyos). Comúnmente estos lagos tienen un flujo

bajo-nulo (o muy bajo) de CO_2 difusivo a la atmósfera, en contraste tienen un alto nivel de minerales carbonatados (HCO_3^-).

Por lo tanto, el flujo de CO_2 está relacionado con la capacidad de absorción de CO_2 del agua y su pH, en aguas ácidas ($\text{pH} < 4$) el CO_2 puede pasar a través de los lagos cratéricos sin ser absorbido aumentando el flujo de CO_2 a la atmósfera (Rouwet et al., 2015).

- Lagos en los que predominan los fluidos meteóricos, normalmente estos lagos reciben una baja cantidad de fluidos de sus sistemas volcánicos subyacentes.

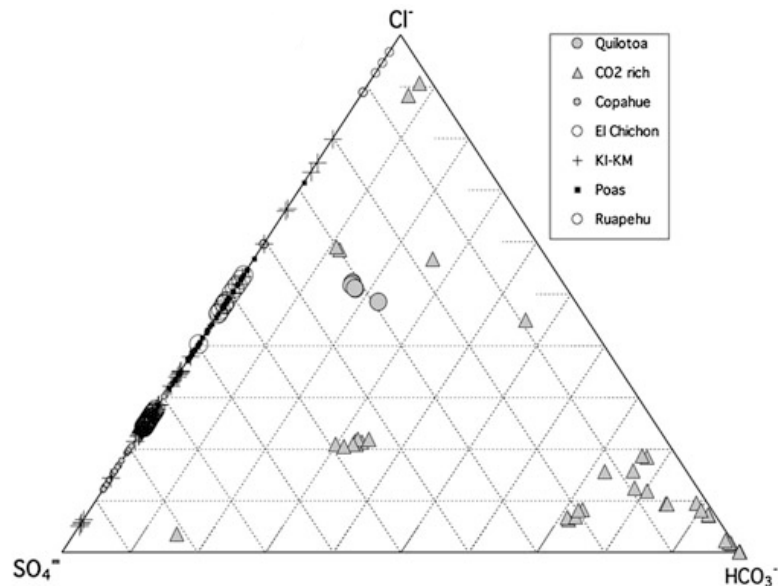


Figura 3. Diagrama ternario de composición de S-Cl-C de lagos cratéricos. (Tomada de Rouwet et al., 2015).

El monitoreo en los lagos volcánicos se puede llevar a cabo estudiando las variaciones de las características físicas y químicas del agua, sus variaciones reflejan el estado de desgasificación del magma y las interacciones entre agua-roca del sistema (Rouwet et al., 2015). Por lo tanto, el monitoreo se puede realizar estudiando la variación de la difusión de gases, deformación del cráter, entre otros.

Monitoreo en lagos volcánicos

Como se ha mencionado anteriormente, la presencia de lagos en volcanes activos representa un riesgo o peligro que debe ser estudiado. La interacción entre el agua y el magma representa una combinación sumamente explosiva que puede causar erupciones freatomagmáticas de gran magnitud. Asimismo, la liberación repentina de grandes concentraciones de gases como el dióxido de carbono y metano, sumamente tóxicos, que ascienden de las profundidades de un lago hacia la superficie ocasionan las denominadas erupciones límnicas.

Estos tipos de eventos suelen ser ocasionados por algún tipo de perturbación que modifica o altera las condiciones de los gases disueltos en el agua, Por ello, los lagos volcánicos deben ser monitoreados regularmente para vigilar sus cambios físico-químicos. En este sentido, el CENAPRED señala que, dado que

diversos manantiales asociados a volcanes han mostrado cambios en su composición química antes de una erupción es necesario el monitoreo de los lagos volcánicos y los sistemas hidrotermales que los albergan.

Las erupciones volcánicas comúnmente van precedidas por eventos anómalos que pueden indicar un evento eruptivo próximo. Para detectar estos eventos es necesario monitorear continuamente los cuerpos volcánicos activos, con la finalidad de disminuir el riesgo que corren las comunidades cercanas a estas zonas de riesgo. La aplicación de diferentes técnicas de geoquímica, geodesia y geofísica, y la conjunción de los resultados ayuda a identificar estos comportamientos anómalos de la actividad volcánica, si los resultados indican un próximo evento destructivo el monitoreo apoya en la planificación de programas de protección de la población y con ello la reducción de riesgos.

A continuación, se describen las técnicas que más destacan en el monitoreo de volcanes activos y lagos cratéricos.

Monitoreo visual: burbujas, color y tamaño del lago

El color del agua en los lagos volcánicos está determinado por su composición química. Expertos han observado que el color puede cambiar en respuesta a variaciones en la actividad volcánica. Por ello, la observación de los lagos cratéricos es una herramienta importante para el monitoreo volcánico y la evaluación de riesgos asociados. En Costa Rica, los lagos cratéricos de los volcanes activos Irazú y Poas presentan variaciones en el color del agua resultado de los cambios en su actividad volcánica. Por ejemplo, el lago del volcán Poás (Figura 4) antes de su erupción de 2017 paso de verde lechoso a gris lechoso tras el inicio de erupciones hidrovulcánicas (Sigurdsson et al., 2000; Ramírez et al., 2012; Brenes et al., 2020).



Figura 4. Lago Poás, Costa Rica. (Tomada de Andersen, 2005).

Monitoreo geoquímico

El monitoreo geoquímico en un volcán consiste en el análisis físico-químico de sus aguas hidrotermales y gases.

Espinasa-Pereña & Hernández Osoy, (2018) describen: *“El monitoreo hidrogeoquímico consiste en el seguimiento periódico de las variaciones en las concentraciones de especies químicas y de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH y conductividad) de las aguas que circulan por un edificio volcánico”*.

Además, mencionan que estas variaciones reflejan un aporte de determinados elementos químicos desde los gases magmáticos y pueden indicar una mayor actividad del volcán.

Por otro lado, en volcanes con lagos se presenta una desgasificación magmática a través de la superficie del lago, ocurre por medio de burbujeo, evaporización y difusión entre el agua-atmósfera (Rouwet et al., 2015). Debido a que la tasa de emisiones difusas de gases puede aumentar mucho antes de que ocurra una erupción volcánica, es importante monitorear las salidas de gases volcánicos para tener una mejor comprensión de los procesos volcánicos que están ocurriendo en el interior del sistema (Eleazar Padrón et al., 2008).

Actualmente, la gran mayoría de los estudios de desgasificación difusa para el monitoreo de volcanes se realizan para el CO₂, por ser el gas volcánico con mayor presencia después del vapor de agua (Melián et al., 2010). *“El CO₂ se ha convertido en un buen trazador de la desgasificación del magma superficial. A medida que el CO₂ viaja hacia arriba por mecanismos de transporte advectivo-difusivo y escapa a la superficie del suelo, los cambios a lo largo del tiempo en su patrón de flujo espacial proporcionan información importante sobre el movimiento del magma a la superficie”* (p. ej. Eleazar Padrón et al., 2008; Jácome Paz et al., 2016; Mazot & Taran, 2009; Melián et al., 2010).

Algunos casos de estudios son:

- EL volcán Kelut es un estratovolcán activo localizado en Indonesia. Es uno de los volcanes más peligrosos del país con más 15000 víctimas causados por sus erupciones, sus principales riesgos asociados son las erupciones explosivas, flujos piroclásticos, lahares, entre otros. Tras la erupción de 1919, el gobierno de Indonesia implementó un sistema artificial de drenaje en la estructura del lago Kelut compuesto por siete túneles, el objetivo fue controlar y minimizar el volumen de agua en el lago, con el fin de prevenir posibles desbordes e inundaciones de lahares ante una erupción futura (Badrudin et al., 1994; Édouard de Bélizal et al., 2012; Graeme Smart 1979; Sigurdsson et al., 2000).

Además, J. Vandemeulebrouck et al (2000) implementaron el monitoreo hidroacústico, mediante el cual se descubrió que el aumento de ruido de baja frecuencia fue el precursor más temprano de la erupción de 1990. Los cambios en estos ruidos podrían indicar la reanudación en la actividad volcánica dentro del sistema hidrotermal.

- El volcán Nyos se ubica en la porción noroeste de Camerún, conocido por su erupción de 1986. La erupción límnica del lago liberó un gran volumen de CO₂ que intoxicó a 1700 aldeanos y varios animales provocando su muerte. Científicos determinaron que fue consecuencia de la estratificación de CO₂ en las profundidades del lago, provocando la acumulación de CO₂ y con ello el aumento de la presión interna que posteriormente dio origen a una devastadora liberación de gas. Una de las hipótesis es que existe una recarga a largo plazo de CO₂. *“Si el gas se estaba acumulando lentamente dentro del lago en el momento de la explosión de gas, la afluencia de gas desde abajo debe continuar después de la explosión”* (Evans et al., 1993).

Por las consecuencias de esta catástrofe y las hipótesis del momento un grupo de expertos empezó a realizar muestreo geoquímico en el lago, además, de la medición de concentraciones de CO₂ en

la columna de agua y en la horizontal, finalizando con la instalación de tuberías para un programa de desgasificación controlada del lago Nyos. El programa consistió en la colocación de tubos que funcionan como fuentes de salida del CO_2 , provocando una desgasificación artificial con el objetivo de reducir la acumulación de CO_2 en el agua, además de disminuir el riesgo de nuevas erupciones y la vulnerabilidad de las comunidades aledañas (Halbwachs et al., 2020). Por otro lado, se han observado variaciones en su pH por la variación del contenido de CO_2 (Sigurdsson et al., 2000).

- En el lago del volcán El Chichón en México se han realizado diversas campañas de monitoreo, entre ellas la que reporta Rouwet et al., (2008) en el que realizaron campañas de muestreo geoquímico en el cráter, de las cuales obtuvieron que los cationes con mayor presencia en el agua del lago son el Na, Ca y K. Además, observaron que en los períodos de bajo contenido de Cl el agua es de tipo Ca-SO_4 , en cambio, durante los períodos de alto contenido de Cl el lago es predominantemente de tipo Na-Cl y la principal fuente de Cl del lago son los manantiales Soup Pool (Piscina de Jabón en español).

Por otro lado, Jácome Paz et al., (2016) realizó campañas de desgasificación difusa de CO_2 por el método de cámara de acumulación dinámica flotante sobre el lago cratérico (Figura 5), en la cual reporta un aumento de las emisiones de flujo de CO_2 .



Figura 5. Campaña de adquisición de emisiones difusas en el volcán El Chichón durante enero del 2021. (Campion, 2021).

Monitoreo geodésico

La geodesia es uno de los métodos más utilizados en el monitoreo volcánico para la determinación anticipada de los cambios que puedan ocasionar un evento eruptivo. El objetivo principal del monitoreo geodésico es la medición de las deformaciones del suelo en los edificios volcánicos (Taipe et al., 2010).

Las deformaciones del terreno se producen por cambios en la actividad volcánica que pueden ser provocadas por diferentes causas, como la intrusión o desplazamiento de magma, cambio de la presión interna ejercida por el ascenso del magma, expansión o contracción debido al calentamiento o enfriamiento del magma, desgasificación de gases magmáticos, y redistribución de cuerpos de agua o productos geotermales (De la Cruz-Reyna et al., 1998; Taipe et al., 2010).

Para medir las deformaciones provocadas por actividad volcánica existen diferentes métodos de la geodesia de alta precisión que miden los cambios de la posición espacial de los puntos de control establecidos en los edificios volcánicos. Entre los métodos más destacados se encuentran técnicas de topografía, entre las que se encuentran triangulación, poligonación, Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (GPS, por sus siglas en inglés), inclinómetros o Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés) (Figura 6).

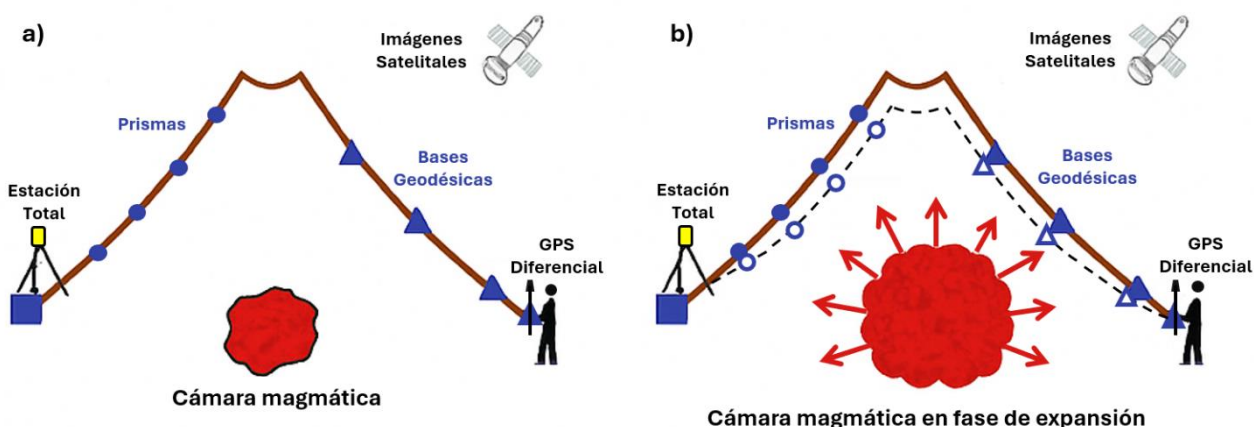


Figura 6. a) Superficie volcánica antes del incremento de la cámara magmática y ubicación de estaciones geodésicas. b) Expansión y ascenso de la cámara magmática provocando deformación de la superficie volcánica, y cambio de la posición de las estaciones geodésicas. (Modificada de Taipe et al., 2010).

Con el GPS diferencial se obtiene la posición espacial de las estaciones base de referencia, posteriormente son post-procesadas para obtener coordenadas con precisión milimétrica que permiten estudiar las variaciones y con ello realizar la detección de deformaciones en tres dimensiones. Por otro lado, la técnica de InSAR consiste en determinar la deformación del terreno utilizando imágenes captadas por sensores a bordo de satélites, las deformaciones se obtienen aplicando diferencias de imágenes con las mismas características (misma banda, espectro, geometría, ángulo de inclinación, etc.), misma área y diferentes épocas (IGN, s. f.).

Monitoreo geofísico

Entre los métodos de monitoreo volcánico se encuentran los métodos geofísicos que ayudan a registrar las variaciones de las propiedades físicas de los sistemas, los métodos geofísicos que destacan en el monitoreo volcánico son: sismología, gravimetría y geomagnetismo (IGN, s. f.).

La sismología permite registrar las distintas señales sísmicas asociadas a las variaciones de la actividad volcánica ocasionadas por rupturas de la corteza debido a una intrusión magmática, apertura de nuevos conductos o actividad explosiva que ocasionalmente preceden una erupción. Entre unos de los instrumentos que utiliza la sismología son acelerómetros y sismógrafos.

Sigurdsson et al., (2000) menciona que geofísicos han realizado mediciones de ruido subacuático en lagos volcánicos para observar cambios en el suelo del cráter, por ejemplo: en el lago del volcán Kelud en Indonesia han utilizado hidrófonos de alta sensibilidad durante fases intereruptivas y eruptivas, durante una crisis sísmica después de la actividad de 1989 a 1990 los hidrófonos registraron fuertes señales de burbujas originadas a partir de actividad fumarólica, estas señales fueron aumentando hasta una erupción que destruyó el instrumento.

Otro caso que reporta Sigurdsson es el del lago Ruapehu en Nueva Zelanda, donde los registros acústicos y sísmicos registraron el aumento de la transferencia de calor al lago varios días antes de que se pudiera detectar el aumento de temperatura. Las señales de alta frecuencia se registraron durante varias semanas las cuales precedieron a la erupción del 29 de junio de 1995.

Por otro lado, la gravimetría mide con gravímetros la aceleración vertical de la gravedad de los cuerpos en la superficie del terreno que está directamente relacionada con la densidad de los cuerpos presentes en el subsuelo. En el monitoreo de volcanes la gravimetría ayuda a caracterizar esos fuertes contrastes de densidad ocasionados por procesos magmáticos, los resultados son analizados para encontrar variaciones inusuales de densidad en diferentes épocas.

Generalidades de batimetría

La batimetría es una herramienta que podría completar el monitoreo de volcanes activos con presencia de lagos, a través del estudio de la dinámica de volumen de los cuerpos de agua (p. ej. Arredondo-Figueroa et al., 1983; Reyes Morales et al., 2018). Técnicamente, la batimetría se define como un método geofísico que obtiene la geometría dada por la topografía de las superficies cubiertas por agua, midiendo profundidades (p. ej. Danesh-Yazdi et al., 2021; NOAA, 2022).

El principio físico de la batimetría es la propagación de la onda de sonido en el agua, este método acústico mide profundidades con un instrumento llamado sonar o ecosonda. El sonar ecosonda es un aparato que emite ondas de sonido y mide el tiempo transcurrido en que la onda acústica es emitida desde la fuente hasta que su eco es registrado después de reflejarse en el fondo del agua, Figura 7 (Michaud et al., 2009).

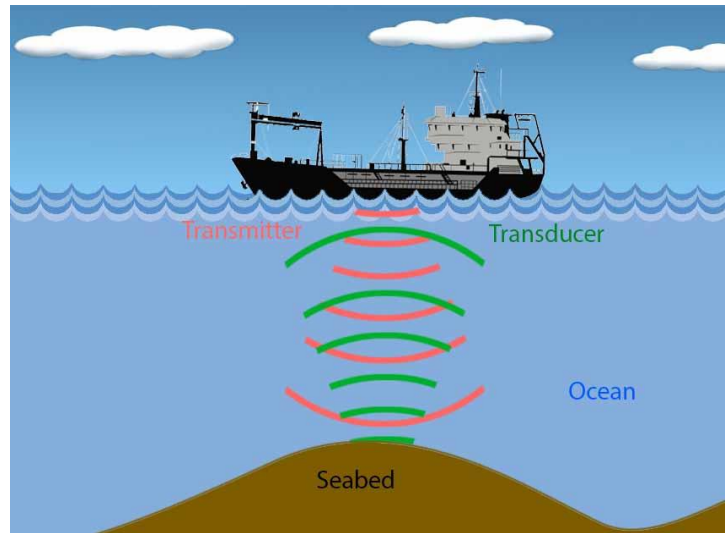


Figura 7. Esquema del funcionamiento de un sonar. (Tomada de ComoFunciona, 2022).

Debido al gran interés de mapear áreas cubiertas por agua, a lo largo del tiempo se han desarrollado dos tipos de ecosonda; la monohaz es un ecosonda que emite un solo pulso acústico y obtiene un solo valor de medición por cada punto de la línea de adquisición, en cambio, la ecosonda multihaz emite una mayor cantidad de pulsos y otorga una mayor cantidad de valores de profundidad, Figura 8.

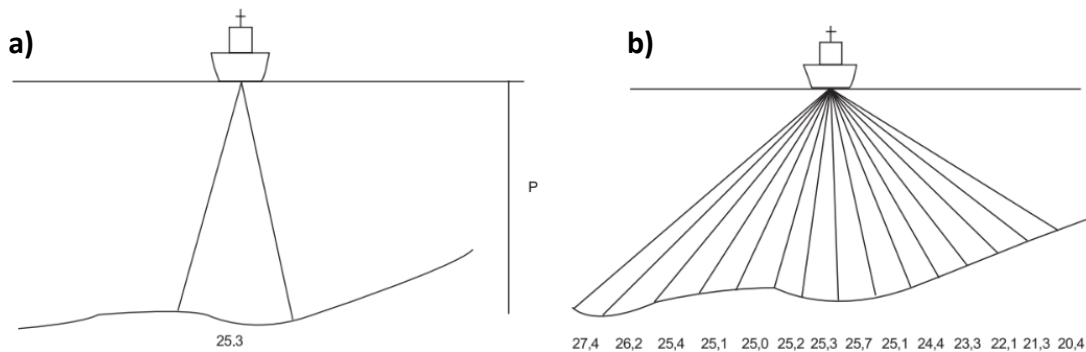


Figura 8. a) Ecosonda con barrido monohaz (mediciones puntuales). b) Ecosonda con barrido multihaz (mediciones con mayor cobertura). (Tomada de Michaud et al., 2009).

La Figura 8 muestra que el rango de medición del ecosonda multihaz es de mayor cobertura a diferencia del tipo monohaz, por lo tanto, la ecosonda multihaz otorga mayor resolución en el mapeo de profundidades porque sus señales emitidas forman un abanico perpendicular a la trayectoria del transporte (buque, lancha, etc).

Por otro lado, una vez que se emite la señal acústica y que la información regresa al dispositivo, la información del tiempo es transformada en distancia (profundidad) tomando en cuenta la velocidad de propagación del sonido en el agua que es aproximadamente de 1500 m/s.

De este modo se obtiene la batimetría o representación gráfica de los relieves oceánicos y lagunas, estas representaciones son de gran utilidad para la investigación científica, exploración de recursos naturales, entre otros. Con respecto al monitoreo de volcanes activos con presencia de lagos cratéricos como El Chichón, la batimetría podría ser de utilidad en el estudio de la dinámica del lago y a su vez de la deformación del suelo cratérico.

En México existen algunos trabajos de batimetría realizados en lagos cratéricos: Arredondo-Figueroa et al., (1983) realizó batimetría y morfometría en los lagos maars de la Cuenca Oriental de Puebla; Jácome Paz et al., (2016) realizó mediciones batimétricas en el lago del volcán El Chichón en Chiapas y obtuvo el volumen cubierto por el agua. Además, se ha realizado batimetría en el lago cratérico Nyos, uno de los volcanes más catastróficos (p. ej. Evans et al., 1993).

Finalmente, de acuerdo con el objetivo de estudio se debe considerar las siguientes características del equipo (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre el rango de frecuencias y la profundidad a medir en un ecosonda. (Michaud et al., 2009).

Ecosonda	Profundidad [m]	Frecuencia [kHz]
Grandes profundidades	100 – 12000	10 – 15
Medianas profundidades	30 – 3000	30 – 50
Pequeñas profundidades	5 – 500	80 – 120
Muy somero	0 – 100	200 – 400

Percepción remota aplicada al cambio de cobertura

Actualmente, la percepción remota (PR) es cada vez más escuchada por sus aplicaciones en diversas áreas de la industria e investigación, ya que es una técnica que permite monitorear y conocer características de los materiales a grandes distancias sin la necesidad de observación directa.

Generalidades de percepción (definición y ejemplos de aplicaciones)

La percepción remota es un conjunto de técnicas que permiten adquirir información, procesar e interpretar imágenes de áreas de la superficie terrestre, obtenidos de forma indirecta, usando la radiación electromagnética reflejada o emitida desde la superficie de la Tierra (Campbell & Wynne, 2011; Sabins, 1999).

La fuente principal de la PR pasiva es la energía natural proveniente del Sol, la respuesta de los materiales a la energía electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético es medida y registrada por sensores remotos que son colocados en satelitales, aviones o drones.

Por la capacidad de cubrir grandes distancias y áreas las técnicas de PR se utilizan en diversas áreas, entre sus aplicaciones se encuentran: monitoreo del clima y recursos naturales, agricultura, análisis de uso de suelo, geología, exploración minera, monitoreo de incendios y desastres naturales, monitoreo volcánico, entre otras (p. ej. Ahumada-Mexía et al., 2021; Jiménez-Moreno, 2011; Kokaly et al., 2007; Pineda Pastrana, 2011).

Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las longitudes de onda de la energía electromagnética, Figura 9. El espectro se subdivide en regiones espectrales, basándose en la frecuencia y la longitud de la onda que presentan. Dentro del rango del espectro solo una pequeña parte es utilizada en el área de la Percepción Remota, los sistemas de sensores utilizados operan en las regiones del visible, infrarrojo y microondas.

- Espectro del visible (0.4 – 0.7 μm): Rango de longitudes que puede ser detectada por el ojo humano, subdividido en tres bandas: rojo (0.6 – 0.7 μm), verde (0.5 – 0.6 μm) y azul (0.4 -0.5 μm).
- Infrarrojo cercano, (0.7 – 1.1 μm). Conocido como NIR, tiene un comportamiento similar al espectro del visible pero no es detectado por ojo humano.
- Infrarrojo medio (1.1 – 8 μm): Radiación solar y emisión.
- Infrarrojo térmico (8 – 14 μm): Son radiaciones emitidas por los cuerpos y se utiliza para determinar su temperatura.
- Microondas (1 mm – 1 m): Son de gran interés en el área de las telecomunicaciones porque atraviesan fácilmente la atmósfera.

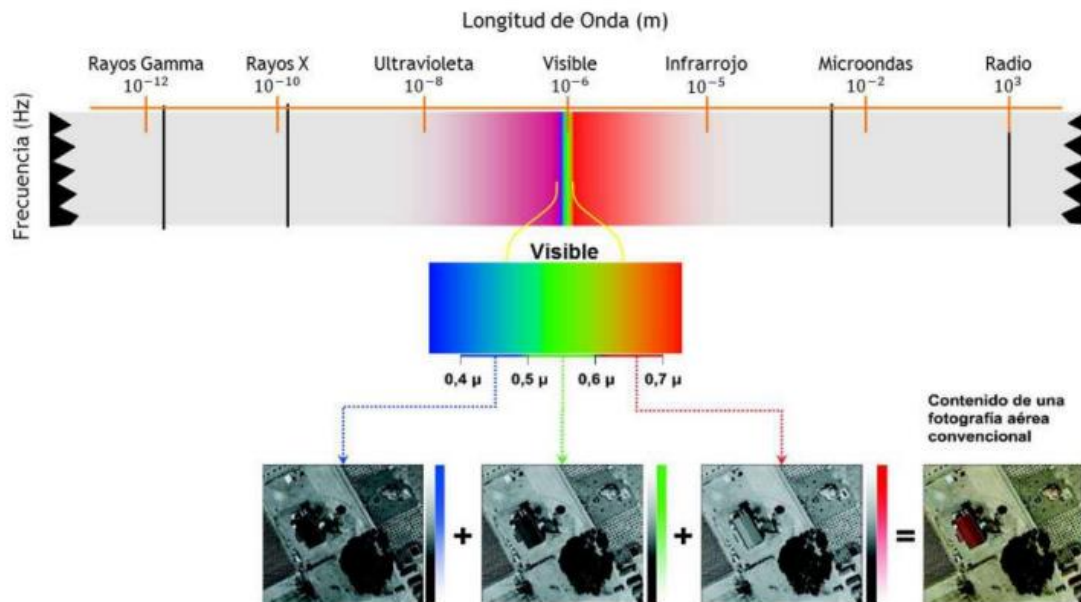


Figura 9. Espectro Electromagnético. (Tomada de Bravo Morales, 2017).

Interacción de energía electromagnética – superficie

Todos los materiales o cuerpos presentes en la superficie de la Tierra interactúan con la energía electromagnética, cuando las ondas electromagnéticas inciden en las superficies de los cuerpos, dentro del rango de energía algunas longitudes pueden ser reflejadas, absorbidas y otras transmitidas.

Más de uno de los procesos anteriores se presentan cuando la energía del Sol interactúa con un objeto, el comportamiento de cada proceso depende de la naturaleza del objeto, de las longitudes de las ondas radiadas y del ángulo de incidencia.

Los sensores ópticos enfocados en PR captan la cantidad de energía reflejada y emitida por la superficie de los objetos de la Tierra. Cada objeto refleja un único rango de longitudes de onda con intensidades distintas en las diferentes regiones del espectro, este comportamiento se denomina firma espectral, y es único para cada material en función de su estructura atómica (Bravo Morales, 2017; Jiménez-Moreno, 2011).

Las diferencias entre los rangos reflejados permiten distinguir y clasificar a un objeto de otro. Por ejemplo, en la Figura 10, se encuentra la reflectancia característica en la región del espectro electromagnético del visible al infrarrojo medio de los materiales más frecuentes en imágenes satelitales: agua limpia, vegetación verde o sana y suelo desnudo.

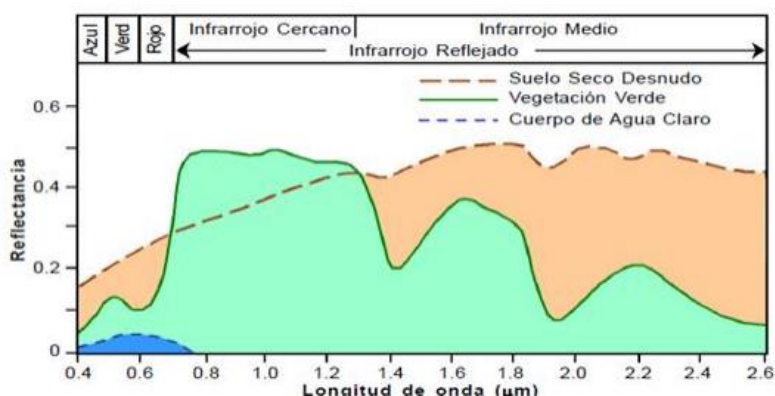


Figura 10. Firma espectral o reflectancia característica del suelo desnudo, vegetación sana y agua limpia en la región del espectro visible al infrarrojo medio. (Tomada de Canto Torres, 2016).

Imágenes satelitales

Existen dos sistemas de sensores que otorgan imágenes para la percepción remota: activos y pasivos. El primero genera una señal a través de una fuente artificial de radiación y mide las características de la señal reflejada, por el contrario, el sensor pasivo recibe señales emitidas de forma natural por el Sol y reflejadas por los objetos percibidos.

Del registro de reflectancia que realizan los sensores pasivos se obtiene una representación visual del comportamiento de la energía electromagnética de la superficie observada, esta representación es una imagen satelital. Las imágenes están conformadas por un gran número de píxeles, un píxel es la unidad mínima de una imagen satelital y representa la reflectancia de una porción de la superficie cubierta por el sensor (EOS, 2022).

Por otro lado, el valor de la radiación medida es convertido por un convertidor digital-analógico del sensor en un valor numérico que se denomina número digital. Los números digitales en un píxel representan la intensidad visual de reflectancia en un nivel de gris (Jiménez-Moreno, 2011; Pineda Pastrana, 2011).

El tamaño de píxel es un factor muy importante para la calidad y resolución de una imagen, mientras menor sea su tamaño la resolución espacial es mayor. Las imágenes con mayor resolución espacial permiten diferenciar de forma más precisa los objetos más pequeños y por ende ayudan a obtener mejores resultados en las aplicaciones (monitoreo de recursos, clasificación, etc.).

Además del tamaño de píxel existen otros factores que determinan la resolución de una imagen, de acuerdo con el objetivo de estudio se deben considerar las siguientes características de los sensores para determinar una baja, media o alta resolución.

- Resolución espectral. Indica el número y el rango de valores (nm) de las bandas espectrales por sensor. En la Figura 11, se muestran los rangos espectrales de Landsat 7 y 8.

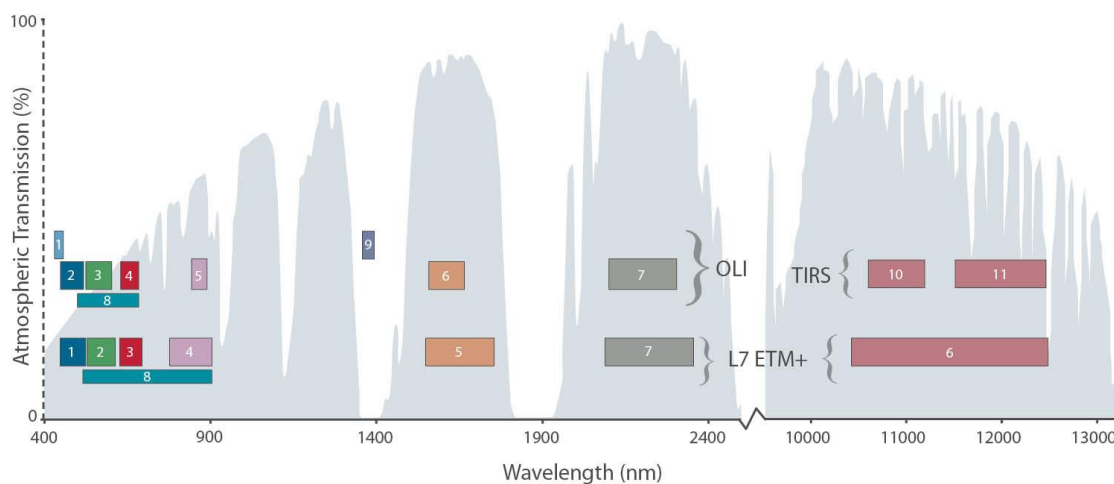


Figura 11. Comparación entre el número y distribución de bandas de los sistemas Landsat 7 y 8. La curva gris representa los valores de transmisión atmosférica, se refieren a la fracción de radiación que atraviesa la atmósfera sin ser absorbida o dispersada por gases. (Tomada de NASA, 2022).

- Resolución radiométrica. Indica la medida en dígitos binarios (bits) de los valores de brillo o niveles de gris que puede detectar un sensor, mientras mayor sea el valor de bits más detalles se pueden captar en las diferencias de intensidad.

Por ejemplo, en una imagen con resolución radiométrica de 8 bits el valor de píxel puede asumir un valor entre 0 a 255 en tonalidades de gris. El número de bits es dado por la sig. fórmula.

$$2^{(\text{número de bits})} = \text{Niveles de gris} \quad (1)$$

Además, la resolución radiométrica depende del ruido radiométrico, interferencia que afecta la claridad de la señal captada por el sensor. El ruido puede venir del propio sensor o de factores externos como la atmósfera.

- Resolución temporal. Se refiere al tiempo o periodo en días que tarda un satélite en adquirir información de una misma zona de la superficie de la Tierra, es decir, es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie.

En la Figura 12, se encuentra la representación de cada una de las resoluciones que caracterizan a un sensor, de baja, media o alta resolución de acuerdo con sus características.

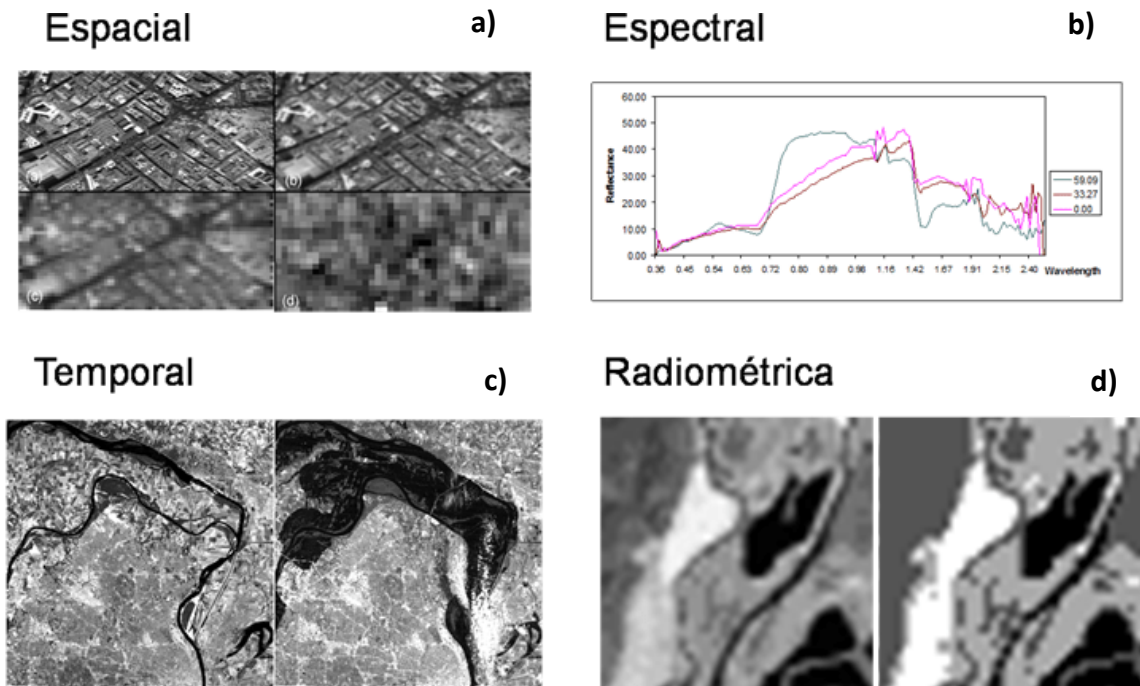


Figura 12. a) Resolución espacial, el tamaño de píxel varía de una imagen a otra, siendo la primera con mayor definición y resolución. b) Resolución espectral, la imagen muestra la capacidad de discriminar entre longitudes de onda vecinas en el espectro. c) Resolución temporal, hace énfasis en la época del año de adquisición (sequía, lluvia). d) Resolución radiométrica, muestra las diferencias de intensidad que puede captar un sensor. (Tomada de IngeOexpert, s. f.).

Plataformas y sensores remotos

Actualmente, existen muchas plataformas que permiten visualizar y descargar imágenes satelitales de forma gratuita, entre ellas se encuentran las siguientes:

- Sentinel Playground
- EO Browser
- USGS Earth Explorer
- World View
- Earth Data
- Google Earth Engine

Plataformas como Sentinel Playground y EO Browser cuentan con imágenes satélites de Sentinel y Landsat, dichas plataformas permiten visualizar e interactuar de forma online con composiciones a color, índices de agua y vegetación, entre otras. Además, permiten descargar composiciones en formato JPG para ilustraciones.

De la misma forma, plataformas como USGS Earth Explorer y Earth Data tienen una amplia colección de imágenes, igualmente permiten visualizar y descargar imágenes en diferentes formatos, por ejemplo, archivos .tiff de bandas espectrales disponibles para manejarlas en softwares de procesamiento especializado como ENVI, QGIS y ArcGIS.

Por otro lado, recordemos que existen dos tipos de sensores que registran la información representada en imágenes satelitales, activos y pasivos, los de mayor utilidad en la PR son los pasivos. Un ejemplo de sensores pasivos es Landsat, programa de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio en colaboración con el Servicio Geológico de Estados Unidos (NASA y USGS, por sus siglas en inglés) que proporciona el registro espacial continuo más largo que existe de la Tierra (NASA, 2022).

El programa de Landsat está conformado por nueve satélites de los cuales solo tres se encuentran activos (Figura 13). Landsat 1 se colocó en órbita el 23 de Julio de 1972, fue el primer satélite de observación de la Tierra con el objetivo de estudiar y monitorear las masas terrestres de nuestro planeta.

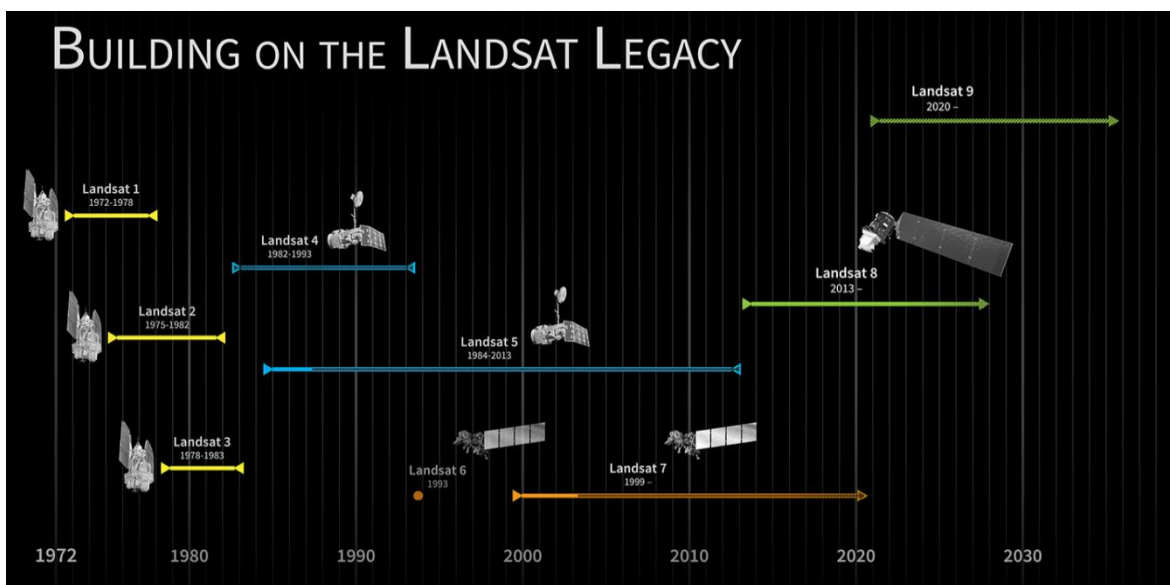


Figura 13. Cronología del programa Landsat, comenzando con el lanzamiento de Landsat 1. Landsat 9, lanzado el 27 de septiembre de 2021. (Tomada de NASA, 2022).

Actualmente, solo se encuentran activos los últimos tres satélites puestos en órbita: Landsat 7 fue lanzado el 15 de abril de 1999, Landsat 8 se lanzó el 11 de febrero de 2013 y, por último, Landsat 9 se colocó en órbita el 27 de septiembre de 2021.

Los sensores con los que cuentan estas tres misiones son (NASA, 2022):

- Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +). Este sensor se encuentra presente en Landsat 7, brinda imágenes de 30 m de resolución espacial en el espectro del visible, NIR y SWIR; 60 m en el térmico y 15 m en la banda Pancromática.
- Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS). Estos dos instrumentos se encuentran en Landsat 8, brindan imágenes de 30 m de resolución espacial en el espectro del visible, NIR y SWIR; 100 m en el térmico; y 15 m en la pancromática. Además, proporcionan tres bandas nuevas: la banda ultra azul es útil para estudios costeros y aerosoles; la banda 9 se utiliza para detectar nubes cirrus; y las bandas térmicas para obtener las temperaturas de la superficie terrestre.
- Operational Land Imager 2 (OLI-2) y Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2). Los dos sensores de Landsat 9 presentan las mismas características que el sensor OLI y TIRS de Landsat 8, sin embargo, su resolución radiométrica pasa de 12 a 14 bits.

En resumen, en la Tabla 3 se presentan las características de las imágenes proporcionadas por los sensores de Landsat 7, 8 y 9.

Tabla 3: Comparación de la resolución espacial y espectral de las imágenes satelitales Landsat 7, 8 y 9.

Landsat 7, ETM+			Landsat 8 y 9, OLI y TIRS		Landsat 8 y 9, OLI + y TIRS +	
Banda	Resolución espacial [m]	Longitud de onda [μm]	Banda	Resolución espacial [m]	Longitud de onda [μm]	Longitud de onda [μm]
			1: Ultra blue	30	0.435 - 0.451	0.435 - 0.451
1: Blue	30	0.441 - 0.514	2: Azul	30	0.452 - 0.512	0.452 - 0.512
2: Green	30	0.519 - 0.601	3: Green	30	0.533 - 0.590	0.533 - 0.590
3: Red	30	0.631 - 0.692	4: Red	30	0.636 - 0.673	0.636 - 0.673
4: NIR	30	0.772 - 0.898	5: NIR	30	0.851 - 0.879	0.851 - 0.879
5: SWIR 1	30	1.547 - 1.749	6: SWIR 1	30	1.566 - 1.651	1.566 - 1.651
7: SWIR 2	30	2.064 - 2.345	7: SWIR 2	30	2.107 - 2.294	2.107 - 2.294
			8: Pan	30	0.503 - 0.676	0.503 - 0.676
8: Pan	15	0.515 - 0.896	9: Cirrus	15	1.363 - 1.384	1.363 - 1.384
6: TIR	60	10.31 - 12.36	10: TIR 1	100/ 30	10.60 - 11.19	10.60 - 11.19
			11: TIR 2	100/ 30	11.50 -12.51	11.50 -12.51

Por otro lado, existen plataformas de acceso limitado como Planet Labs, la cual opera una serie de satélites con alta resolución espacial y temporal para la observación de la superficie terrestre. Esta plataforma se caracteriza por emplear métodos de captura de imágenes activos.

Fundada en 2010, Planet Labs es una de las plataformas líderes en la observación satelital de la tierra, operando tres de las constelaciones más grandes del mundo: PlanetScope, SkySat y la ya retirada RapidEye (Planet Labs PBC, 2023).

- PlanetScope (PS): Es una constelación que consta de aproximadamente 130 satélites individuales colocados en órbita entre 2014 y 2023. Se caracteriza por ser una constelación que ofrece una cobertura continua con alta resolución. La generación más reciente está conformada por los satélites SuperDoves (PSB.SD), lanzados a principios de 2020, los cuales adquieren imágenes con 8 bandas espectrales.
- SkySat (SS). Es la constelación de satélites de muy alta resolución de Planet, en operación desde 2014. Actualmente cuenta con 14 satélites en órbita de la generación SkySat-C. Estos satélites otorgan imágenes en las bandas del visible, infrarrojo cercano y pancromático.
- RapidEye (RE): Fue una constelación conformada por cinco satélites que opero entre 2009 y 2020. Sus productos de RapidEye están conformados por 5 bandas multiespectrales: azul, verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano. Aunque actualmente la constelación no está activa, sus imágenes están disponibles en la plataforma de Planet Labs.

A continuación, se presenta la Tabla 4 que resume las características principales y las longitudes de onda de las bandas espectrales para las constelaciones de satélites PlanetScope, SkySat y RapidEye.

Tabla 4: Comparación de las principales características espaciales y espectrales de las imágenes de Planet Labs: PlanetScope, SkySat y RapidEye (Planet Labs PBC, 2023).

Característica	PlanetScope	SkySat	RapidEye
Bandas Espectrales y Longitud de Onda [μm]	<p>Sensor PS2 Azul: 455-515 Verde: 500-590 Rojo: 590 -670 NIR: 780 – 860</p> <p>Sensor PS2.SD Azul: 464 – 517 Verde: 547 – 585 Rojo: 650 – 682 NIR: 846 – 888</p> <p>Sensor PSB.SD Azul Costero: 431 – 452 Azul: 465 – 515 Verde I: 513 – 549 Verde: 547 – 583 Amarillo: 600 – 620 Rojo: 650 – 680 Borde Rojo: 697 – 713 NIR: 845 – 885</p>	<p>Azul: 450 – 515 Verde: 515 – 595 Rojo: 605 – 695 NIR: 740 – 900 Pancromático: 450 – 900</p>	<p>Azul: 440 – 510 Verde: 520 – 590 Rojo: 630 – 685 Borde Rojo: 690 – 730 NIR: 760 – 850</p>
Distancia de muestreo sobre el terreno (nadir)	<p>PS2/PS2.SD: 3.0m-4.1m PSB.SD: 3.7m-4.2m</p>	<p>Pancromático: 0.86m-0.58m Multiespectral: 1.0m-0.72m</p>	6.5 m
Píxel (ortorectificado)	3.0 m	0.50	5 m

DetECCIÓN DE CAMBIOS CON IMÁGENES SATELITALES

Una de las aplicaciones más importantes de la percepción remota es la detección de cambios de cobertura o uso de suelo con imágenes satelitales multitemporales, para estudiar la dinámica de los recursos naturales u otros fenómenos.

La detección de cambios consiste en identificar diferencias de estado de un objeto o fenómeno, mediante observaciones que se hacen en diferentes momentos, analizando datos multispectrales con respecto a los datos temporales (Riaño Melo, 2002). Gracias a la gran disponibilidad y acceso libre de imágenes de casi toda la cobertura terrestre se pueden realizar estudios enfocados en la detección de cambios de la superficie de la Tierra.

La cuantificación de los cambios a través de la percepción remota y el análisis con sistemas de información geográfica otorgan grandes resultados para comprender la dinámica de cambio de un área. En vulcanología se utiliza la PR en el monitoreo de volcanes activos, ya que ayuda a detectar cambios de la actividad volcánica para alertar y prevenir desastres naturales como pérdidas materiales y humanas (Zaragoza, 2019). Por ejemplo, la Plataforma Mounts es un proyecto que inicio en el 2017 cuyo objetivo es desarrollar un sistema de monitoreo de volcanes activos de todo el mundo, a partir de imágenes satelitales de las plataformas Sentinel-1, Sentinel-2 y Sentinel-5P (Valade, S., Ley, A., Massimetti, F., D'Hondt, O., Laiolo, M., Coppola, D., Loibl, D., Hellwich, O., Walter, T.R. Towards Global Volcano Monitoring Using Multisensor Sentinel Missions and Artificial Intelligence: The MOUNTS Monitoring System, Remote Sens).

Asimismo, el análisis de cambio se puede aplicar en diferentes aspectos, principalmente en los siguientes fenómenos: (Zaragoza, 2019):

- Monitoreo de gases
- Energía térmica emitida
- Morfología del cuerpo volcánico
- Deformación antes y después de una erupción
- Detección de columnas eruptivas
- Evaluación de daños
- Estudio de depósitos volcánicos

Por otro lado, aquellos volcanes activos que presentan lagos cratéricos como el volcán El Chichón pueden ser monitoreados estudiando la dinámica del volumen del lago. Se sabe que la fuente principal del lago depende en gran medida de las manifestaciones hidrotermales presentes, por lo que estudiar los cambios en el volumen del lago ayudaría a identificar cambios en la actividad volcánica de El Chichón.

MÉTODOS Y ANÁLISIS DE DETECCIÓN DE CAMBIOS

Actualmente se han desarrollado varias técnicas para estudio y análisis de detección de cambios con imágenes satelitales multitemporales.

La detección de cambios en imágenes es considerada cuando los objetos de interés presentan diferencias en sus valores de reflectancia; usar imágenes satelitales de la misma época del año, así como de la misma resolución espectral, radiométrica, espacial y temporal garantiza mejores resultados.

Entre algunos de los métodos de detección de cambios existentes se encuentran los siguientes (Pineda Pastrana, 2011):

Análisis visual.

El análisis visual se refiere a la interpretación visual de imágenes satelitales multi-temporales, y digitalización en pantalla de áreas con cambio de cobertura (textura, forma), una buena digitalización digital depende del tamaño del objeto, de la calidad y resolución de las imágenes (Pineda Pastrana, 2011).

Análisis algebraico

El análisis algebraico consiste en el uso de operaciones aritméticas básicas: sumas, diferencias, multiplicaciones y cocientes entre bandas o imágenes para manipular y analizar datos espaciales (Jiménez Moreno et al., 2011). Además, incluye técnicas de diferenciación y regresión entre imágenes, diferencias y análisis de Índice de Agua de Diferencia Normalizada, NDWI, por sus siglas en inglés (Martínez Izquierdo et al., 2015).

El NDWI es un índice que se utiliza para delimitar y resaltar cuerpos de agua de una imagen satelital. Utiliza la radiación infrarroja cercana (NIR) y la luz verde del visible para mejorar la respuesta espectral de los cuerpos de agua, mientras reduce la reflectancia del suelo y vegetación, Figura 14 (EOS, 2022).

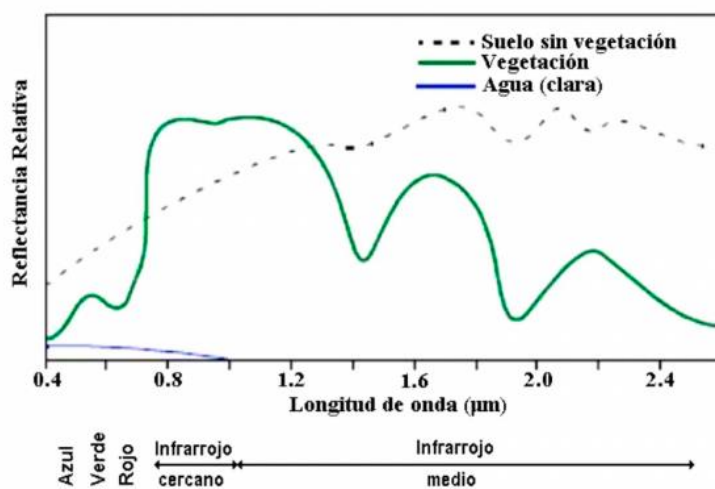


Figura 14. Firmas espectrales del suelo sin vegetación, vegetación y agua. (Tomada de González & Cancela, 2018).

El NDWI se calcula utilizando las bandas: verde del visible e infrarrojo cercano (NIR).

$$NDWI = \frac{(Verde - NIR)}{(Verde + NIR)} \tag{2}$$

Los resultados del NDWI tienen un rango de valores de -1 a 1, donde los valores positivos corresponden a cuerpos de agua y los negativos o cero a suelo y vegetación.

Por otro lado, debemos recordar que para este y otros tipos de análisis es fundamental seleccionar imágenes que presenten las mismas resoluciones, espectral, espacial, radiométrica y temporal.

Clasificación de imágenes

La clasificación de imágenes es fundamental en el análisis digital de imágenes, ya que permite el reconocimiento de patrones y con ello extraer información de objetos. El objetivo de la clasificación espectral es el reconocimiento de clases o patrones cuyos miembros comparten características espectrales en común. Entre sus aplicaciones se encuentran, identificar zonas urbanas, rasgos estructurales, tipos de vegetación, ríos y lagos.

Los métodos para clasificar una imagen son los supervisados y no supervisados.

- Clasificación supervisada, este tipo de clasificación se basa en el conocimiento del área, su objetivo es reconocer clases que comparten características en común a partir de un archivo de entrenamiento.

El analista se encarga de generar los datos de entrenamiento que representen cada tipo de cobertura o clase, especificando al algoritmo las diferentes coberturas de interés. Los datos de entrenamiento son muestras representativas de las coberturas presentes en la imagen, describen las características espectrales de cada clase. De modo que el algoritmo se encarga de comparar cada píxel con las categorías o clases de entrenamiento, y de asignarle la categoría con la que comparte más características espectrales.

Uno de los algoritmos más utilizados en la clasificación supervisada es el de máxima verosimilitud, un modelo estadístico que supone que los datos de cada clase siguen una distribución normal multivariante. Sus parámetros estadísticos como el vector de medias y matriz de covarianza se estiman a partir de las clases de entrenamiento. Cada píxel se asigna a la clase de mayor probabilidad de pertenencia tomando en cuenta la covarianza de las clases al asignar la clase al píxel desconocido (Ahmad y Quegan, 2012; ESRI, 2024).

El cálculo de probabilidad de pertenencia a una clase está dado por la siguiente función 3 de densidad de probabilidad.

$$P(X|C_i) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma_i|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (X-\mu_i)} \quad (3)$$

Donde:

$P(X|C_i)$ es la probabilidad de que el píxel X pertenezca a la clase C_i

d es el número de bandas espectrales

μ_i y Σ_i son la media y la matriz de covarianza de la clase C_i

- Clasificación no supervisada, consta de la búsqueda automatizada de grupos de valores de píxel similares. Esta metodología utiliza algoritmos que examinan los valores de píxel de una imagen y los agrupa en función de la similitud de sus valores espectrales de píxel, el número de clases se basa en los grupos presentes en los valores de la imagen.

Aquí el usuario solo se enfoca en analizar los resultados obtenidos, sin la necesidad de conocer el área de estudio, identificando el objetivo.

El análisis de cambio de cobertura se realiza analizando los resultados de las metodologías aplicadas; la cuantificación de resultados de cada una de las imágenes se obtiene calculando áreas de la digitalización visual o de las clases obtenidas por clasificación supervisada. Los resultados de cada imagen son comparados para determinar los cambios en la reflectancia de una imagen a otra, y con ellos se obtienen valores para entender la dinámica de cambio.

Área de estudio

Ubicación y acceso

El volcán El Chichón es un estratovolcán ubicado en el noroeste del estado de Chiapas, al sur de México, y abarca los municipios de Pichucalco, Francisco de León y Chapultenango. La localización geográfica del centro del cráter corresponde a las coordenadas WG84 UTM Zona 15 Norte: 475637.00 m E y 1919443.00 m N, a una altitud aproximada de 1100 msnm.

El Chichón, también conocido como El Chichonal, ocupa el lugar 341120 en el catálogo de volcanes del mundo del Global Volcanism Program del Instituto de Smithsonian, el cual incluye volcanes que han registrado erupciones en los últimos 12000 años. En este catálogo, el volcán es denominado El Chichón y el termino Chichonal es utilizado como sinónimo, de igual manera otros autores utilizan ambos nombres, sin embargo, en este proyecto nos referimos al volcán como El Chichón (p. ej. De la Cruz-Reyna & Martin del Pozzo, 2009; Hiriart Le Bert, 2011; Jácome Paz et al., 2016).

Por otro lado, geológicamente El Chichón es el único volcán activo y el más joven del Arco Volcánico Chiapaneco (AVC). Este arco es una cadena irregular de volcanes de aproximadamente 150 km de longitud, se encuentra entre el Cinturón Volcánico Transmexicano y el Arco Volcánico de Centroamérica (Jácome Paz et al., 2016; Figura 15).

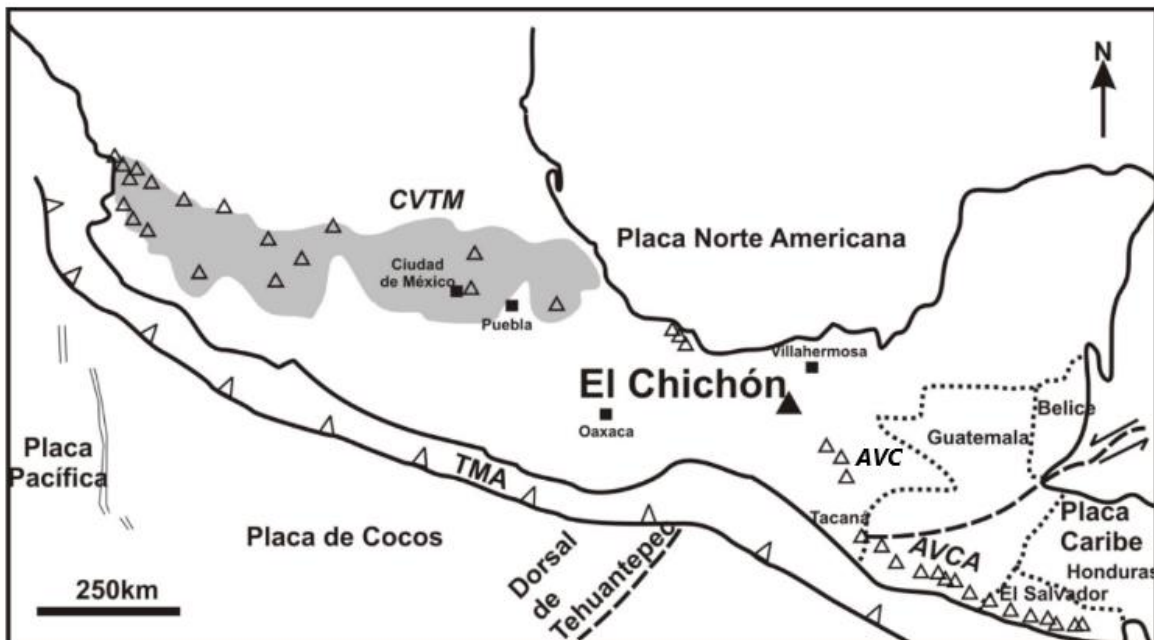


Figura 15. Ubicación del volcán El Chichón y su contexto tectónico. CVTM: Cinturón Volcánico Transmexicano, TMA: Trinchera Mesoamericana, AVC: Arco Volcánico Chiapaneco y AVCA: Arco Volcánico Centroamericano. (Tomada de Peiffer, 2011).

Los volcanes del AVC han presentado erupciones de rocas andesíticas alcalinas. En particular El Chichón es un volcán poligenético que ha producido magmas alcalinos ricos en K, sus erupciones han sido altamente explosivas, consideradas entre las más violentas y peligrosas debido a la liberación a gran velocidad de materiales piroclásticos y gases a altas temperaturas. Estudios como el de Espíndola et al., (2000) han identificado que durante los últimos 8000 años ha presentado 11 erupciones explosivas distintas, con edades de 7700, 3700, 3100, 2500, 2000, 1900, 1600, 1500, 1250, 900 y 550 años antes del presente. Además de estos eventos explosivos, se han presentado erupciones extrusivas, evidenciadas por estudios de las paredes del cráter y la topografía previa a la erupción de 1982, que revelaban la presencia de al menos dos domos excéntricos (Macías et al., 2008).

El evento más reciente presentó varias explosiones en marzo-abril de 1982, destacando la erupción de la noche del 3 de abril, la explosión más violenta. Esta erupción destruyó por completo el domo central, generando columnas eruptivas de más de 15 km de altura, flujos y oleadas piroclásticas que arrasaron con todo lo que encontraban a su paso, incluyendo la vida de más de 2000 personas y la destrucción de nueve poblaciones (De la Cruz-Reyna & Martin del Pozzo, 2009; Macías, 2005).

Como resultado de esta explosión se formó un cráter de un 1 km de diámetro y una profundidad de aprox. 200 m. Posteriormente, con las lluvias estacionales de ese mismo año, el cráter comenzó a llenarse de agua, formando un lago que prevalece a la fecha con dimensiones aproximadas de 400 m de ancho y 600 m de largo.

El acceso al cráter es por vía terrestre a través de la carretera federal 195, desde Villahermosa Tabasco y San Cristóbal de las Casas, Chiapas, hasta el municipio de Ixtacomitán. Posteriormente, se toma el trayecto al municipio de Chapultenango, y un camino de terracería al poblado de Volcán Viejo. A partir de este punto, el acceso al cráter es a través de una caminata de aproximadamente 7 km, de 2 a 3 horas dependiendo de las condiciones físicas (14 km de ascenso y descenso).

Finalmente, debido a la magnitud de la erupción de 1982 Macías et al., (2008) elaboraron un mapa de riesgo (Figura 16), donde se muestran las áreas y comunidades que podrían verse afectadas por oleadas piroclásticas en caso de una futura erupción similar a la de 1982.

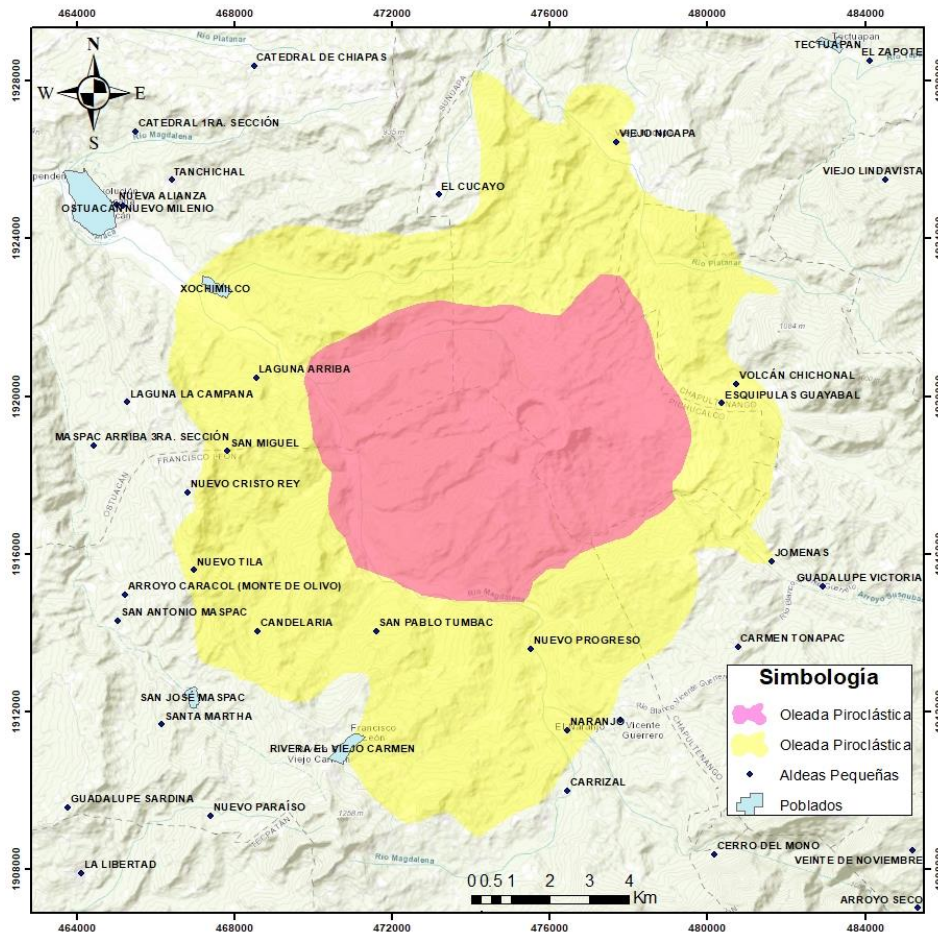


Figura 16. Mapa de riesgo del volcán El Chichón que muestran las áreas y comunidades que podrían verse afectadas por oleadas piroclásticas. Oleada amarilla para eventos intensos y rosa para eventos de menor intensidad. (Modificada de Macías et al., 2008).

Contexto geológico y tectónico

El Chichón se encuentra sobre un basamento de dos secuencias principales de rocas sedimentarias del Cretácico que están superpuestas de manera discordante por una secuencia de rocas terciarias terrígenas (García Palomo et al., 2004).

La secuencia del Cretácico inferior, Formación Cobán, consiste en evaporitas intercaladas con calizas dolomitizadas, brechas, halitas y helechos, cubiertas por la Formación Sierra Madre de calizas grises masivas dolomitizadas con nódulos de pedernal negro formando capas de hasta 1 m de espesor. Esta unidad tiene un espesor total de 2500 m, y una edad del Cretácico medio a tardío (García Palomo et al., 2004). Además, es el basamento que conforma prácticamente toda la región.

Por otro lado, la secuencia del Terciario, Formación Todos Santos, está integrada por cinco unidades (inferior a superior):

Por otro lado, El Chichón pertenece a un complejo volcánico compuesto por cuatro estructuras volcánicas: la más antigua es el cono de toba de Guayabal, el cráter Somma, dos domos periféricos y un cráter formado por la erupción de 1982 (García Palomo et al., 2004). Actualmente, las estructuras visibles son los cráteres Somma y el formado en 1982 (Figura 19). El cráter Somma es un anillo de domos de composición traquiandesítica, tiene 1.5 x 2 km de diámetro, y es cortado por estructuras más jóvenes: al sureste, por el cono de tobas Guayabal, al SW y NW por domos traquiandesíticos (Macías, 2005).

“El cráter Somma consiste en depósitos piroclásticos intercalados y lahares en los que el drenaje radial y sub-paralelo domina sobre el drenaje dendrítico menor. Las porciones central y sur del volcán tienen drenaje rectangular, predominantemente controlado por fallas y fracturas, como las marcadas por los arroyos Moba, Arroyo La Cal, Susnubac y San Pablo” (García Palomo et al., 2004).

Rose et al., (1984) realizaron una cartografía minuciosa en el cráter formado en las erupciones de marzo-abril de 1982. Alcántara Ayala et al., (2013) retoma esta cartografía en un mapa editado 1: 650, mostrando trece unidades litológicas correspondientes al Holoceno, Figura 18.

- S: Depósitos aluviales del cráter
- Is: Depósitos de deslizamientos
- U: Depósitos de oleadas piroclásticas húmedas
- UP: Depósitos piroclásticos no diferenciados de 1982
- db: Brechas estratificadas en el talud del domo
- bm: Brechas estratificadas en el talud del domo
- b2: Depósitos superiores de flujos piroclásticos de grano fino
- a: Unidad alterada de edad no diferenciada
- d2: Brechas no estratificadas del domo
- b1: Flujo piroclástico de grano fino
- d1: Brechas granulares no estratificadas del domo
- m: Lava masiva del domo
- mr: Lava masiva del domo en la fractura del borde

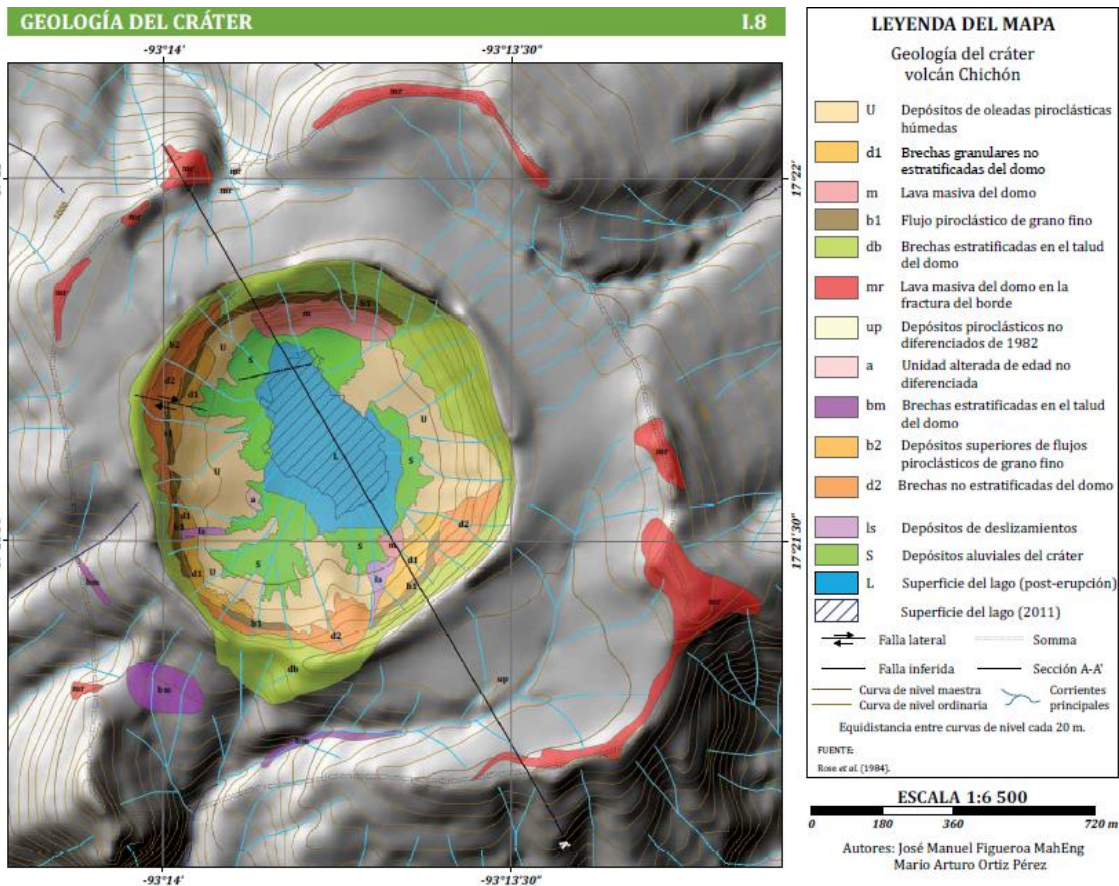


Figura 18. Mapa geológico del cráter de El Chichón, en el modelo de terreno se observa que el cráter formado en 1982 es rodeado por el cráter Somma. (Tomada de Alcántara Ayala et al., 2013).

El mapa geológico del cráter muestra el lago cratérico que se formó después de las erupciones de 1982. Las principales coberturas que se encuentran en el área del lago son depósitos de oleadas piroclásticas húmedas (U) y depósitos aluviales del cráter (S) (Alcántara Ayala et al., 2023). Además, resaltan dos elementos estructurales: una falla de desplazamiento lateral y una falla inferida con dirección SE-NW del cráter.

Tectónicamente hablando la zona de estudio es influenciada por la interacción de esfuerzos a distintas velocidades y ángulos de tres placas tectónicas: Placa de Norteamérica, Placa del Caribe y Placa de Cocos, conocida como junta triple. En consecuencia, esta región presenta actividad sísmica y volcánica, debido a la evolución tectónica la Sierra de Chiapas está dividida en varios sistemas tectónicos (De la Rosa et al., 1989).

Regionalmente, El Chichón se encuentra en el sistema tectónico de fallas de transurrencia, este sistema se caracteriza por una serie de bloques ascendentes y descendentes delimitados por fallas. Localmente, las rocas del basamento de El Chichón están plegadas dando lugar al anticlinal de Caimba al este, anticlinal La Unión al oeste y el sinclinal Buena Vista al norte de El Chichón (García Palomo et al., 2004; Macías, 2005).

Por otro lado, estas secuencias se ven afectadas por varios conjuntos de fallas con diferentes orientaciones. Entre las principales se encuentran las fallas laterales derechas con desplazamiento E-W: falla Caimba, falla Arroyo de Cal y falla San Juan. La falla San Juan es una de las estructuras más importantes del área porque atraviesa El Chichón y tiene una longitud de 16 km. Además, se encuentra un conjunto de fallas normales con rumbo N45°E conocidas como las fallas de Chapultenago (García Palomo et al., 2004).

Recientemente Macías et al., (2010) y Mazot et al., (2011) descubrieron una nueva falla normal llamada “Chichón-Catedral”, orientación NW-SE, considerada como la estructura principal que controla la actividad volcánica e hidrotermal de El Chichón. En la Figura 19, Peiffer, (2011) sintetiza las unidades y estructuras principales de El Chichón.

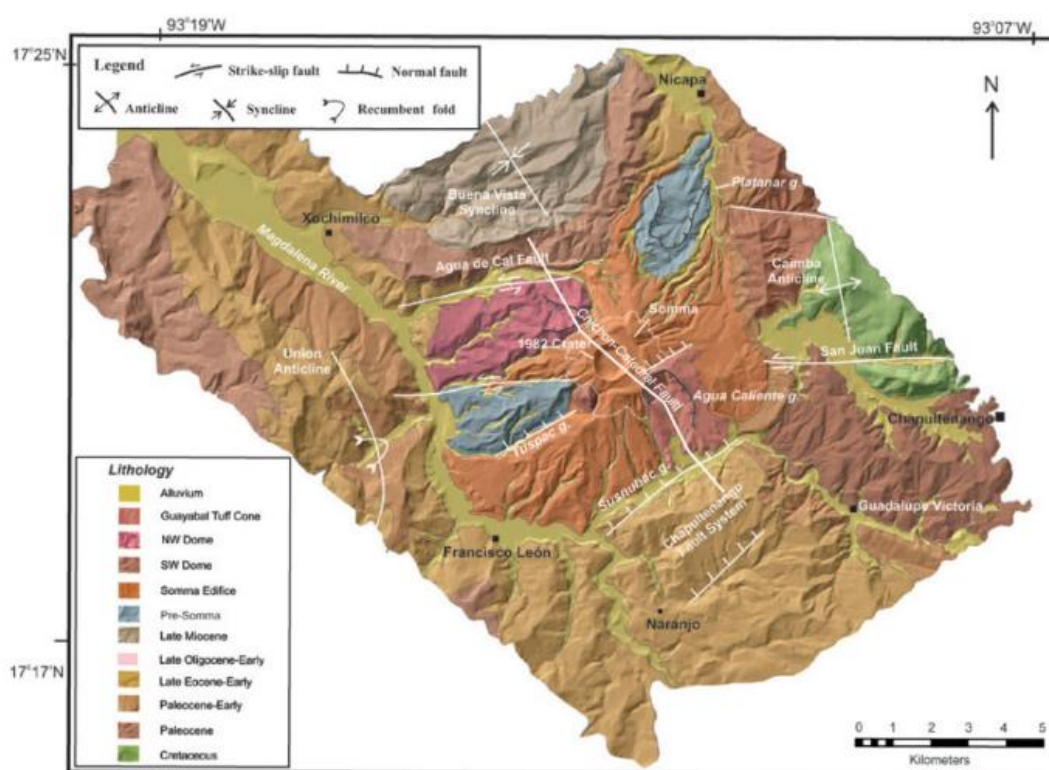


Figura 19. Mapa geológico con estructuras principales en los alrededores de El Chichón. (Tomada de Peiffer, 2011).

Descripción del cráter

La erupción de 1982 destruyó las cúpulas centrales del volcán El Chichón, formando el cráter de un 1 km de diámetro y 200 m de profundidad. Desde entonces este cráter alberga un lago cratérico de composición química y volumen variable, temperaturas estables [29-32 °C] y pH ácido [2.3-2.5]. Su acidez se debe a la oxidación de H₂S a SO₄ (Rouwet et al., 2008 y Jácome Paz et al., 2016).

Por otro lado, el cráter de El Chichón presenta una variedad de manifestaciones hidrotermales: fumarolas de baja temperatura menor a 100 °C, piscinas de ebullición sin contenido de Cl, y un grupo de manantiales de ebullición al NE que descargan agua neutra con Na-Ca-Cl-SO₄ conocidos como Piscina de Jabón o Soap Pool en inglés (SP) (Jácome Paz et al., 2016).

Rouwet et al., (2008) presenta en la Figura 20 la distribución de las manifestaciones hidrotermales presentes en el cráter posterior a la erupción de 1982: manantiales de agua hirviente, pozas termales tipo jabonosas (soap pool en inglés, SP), pozas de lodo (mud pool en inglés, MP), suelo vaporizantes (steaming ground en inglés, SG), campo de fumarolas oriental (FE), campo de fumarolas del norte (FN), campo de fumarolas del sur (FS), fumarola occidental (FW) y el lago cráterico (L).

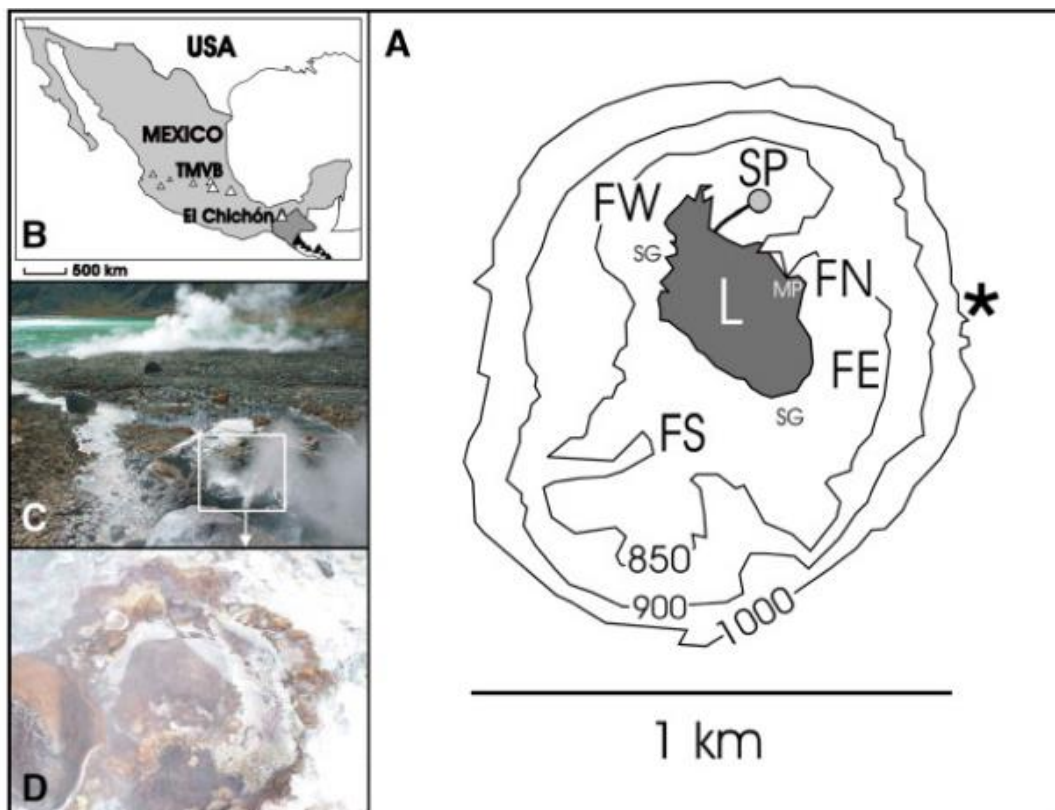


Figura 20. A) Ubicación de las manifestaciones volcánicas hidrotermales en el cráter de El Chichón. L = lago del cráter (traza de GPS, marzo 2003), SP = manantiales hirvientes (Soap Pool), MP = pozas de lodo (Mud Pool), SG = terreno humeante, FE = fumarola oriental, FN = campo de fumarolas del norte, FS = campo de fumarolas del sur, FW = fumarola occidental. B) Localización de El Chichón. C) Descarga de agua de los manantiales SP. D) Exhalaciones de vapor del manantial principal SP. (Tomada de Rouwet et al., 2008).

En algunos trabajos de hidrología e hidrogeoquímica del lago (Taran & Peiffer 2009; Rouwet et al., 2008) mencionan que los manantiales de ebullición SP tienen un comportamiento intermitente, con periodos de descarga de agua ricos en Cl intercalados con etapas de exhalación de vapor. Cuando los manantiales SP descargan agua, el agua del lago es más salina y predomina el contenido de Na-Cl, en cambio, cuando los manantiales descargan vapor puro el lago se enriquece de SO_4 y su contenido de Cl disminuye.

Estos manantiales SP son los más influyentes en la composición química del agua y son la única fuente de Cl para el lago, los autores mencionan que este sistema es alimentado por un lago profundo en ebullición que fue sepultado en la erupción de 1982. Este lago profundo es recargado por agua meteórica gracias a la

permeabilidad de la roca y, a través de fracturas asciende el vapor y agua que mantiene al sistema SP (Rouwet, 2002). Debido a esto el sistema SP es el responsable de la variabilidad del volumen del lago y de su composición química, ya que no se ha observado que el volumen dependa de las precipitaciones anuales, si fuera el caso el lago ya hubiera desaparecido (Jácome Paz et al., 2016; Rouwet, 2002; Rouwet et al., 2008).

Antecedentes: estudios previos

En su mayoría los trabajos realizados en El Chichón son enfocados a estudiar: la actividad volcánica, caracterización geológica, génesis, composición química de los sistemas hidrotermales y monitoreo volcánico. Por el contrario, son muy pocos los trabajos de batimetría o estudios del volumen del lago que han sido publicados.

La batimetría realizada ha tenido la finalidad de contribuir con el estudio y comprensión de la dinámica de los manantiales y el lago presente en el cráter. Rouwet, (2006) y Rouwet et al., (2008) obtuvieron fotografías del lago en cada una de sus visitas a El Chichón, desde un mismo punto en el borde del cráter para obtener los contornos de la superficie cubierta por el agua. Además, realizaban mediciones de las profundidades del lago.

Después de varias visitas y mediciones plantearon una relación empírica entre la profundidad del lago y el tamaño de la superficie. Las relaciones empíricas fueron expresadas de la siguiente manera:

$$d(m) = -0.913 + 0.0097 \sqrt{S} \quad (4)$$

Donde S es el área estimada del lago en m^2 y d la profundidad del lago en m.

$$V = -1.29 + 0.9S + 0.039S^2 \quad (5)$$

Utilizando las fórmulas anteriores, se estimó un área de 69,600 m^2 y un volumen de 115,000 m^3 para agosto de 1985, y para diciembre de 2005, el área fue de 61,000 m^2 y el volumen de 90,000 m^3 , asumiendo que el lago presenta una morfología cónica plana (Rouwet et al., 2008).

Por otro lado, Peiffer en 2011 adquiere nuevas fotografías para calcular el área de la superficie cubierta por el agua, y registra con una sonda profundidades del lago.

Además, retomó las ecuaciones de Rouwet aplicando las profundidades adquiridas en la ecuación 4, los resultados fueron mayores a los registrados en campo, por lo cual, el autor menciona que la diferencia podría deberse a un cambio en la morfología del piso cratérico (menciona posible subsidencia). Para relacionar las profundidades registradas en campo y el área de la superficie, Peiffer aplicó un factor corrección de 1.9 a la ecuación 4.

La ecuación modificada quedo de la siguiente forma.

$$d(m) = -1.735 + 1.84 \sqrt{S} \quad (6)$$

Donde S es el área estimada del lago en m^2 y d la profundidad del lago en m.

Jácome Paz et al., (2016) presentan adquisiciones batimétricas del lago durante abril de 2013, 2014 y 2015. El trabajo consistió en medir la profundidad en puntos aleatorios con un sonar portátil Lucky-Fish Finder, el área y el volumen del lago se calcularon utilizando la batimetría, fotografías, datos de GPS y el software ArcGIS.

Finalmente, los resultados de este trabajo demuestran que en abril de 2014 el lago presentaba la superficie y volumen más grande desde su formación con un área y volumen reportados de 183760 m^2 y 1306270 m^3 (Jácome Paz et al., 2016).

Metodología

La metodología se dividió en dos grandes etapas: la recolección de datos en campo y el posterior procesamiento y análisis de la información obtenida.

De manera general la primera etapa consistió en el diseño y distribución de las actividades a realizar durante las visitas al volcán El Chichón, así como en la ejecución de las labores de batimetría programadas en el cráter.

La segunda etapa correspondió al trabajo de gabinete, enfocado en el procesamiento y análisis de los datos recolectados durante las campañas en campo. Además, se llevó a cabo la búsqueda, recopilación y procesamiento de imágenes satelitales correspondientes a las fechas de dichas campañas, con el fin de determinar el área superficial del lago. Finalmente, se compararon los resultados obtenidos a partir de los datos de campo con los generados a partir de imágenes satelitales y estudios previos publicados.

En la Figura 21, se aprecian las diferentes subetapas de la metodología desarrollada.

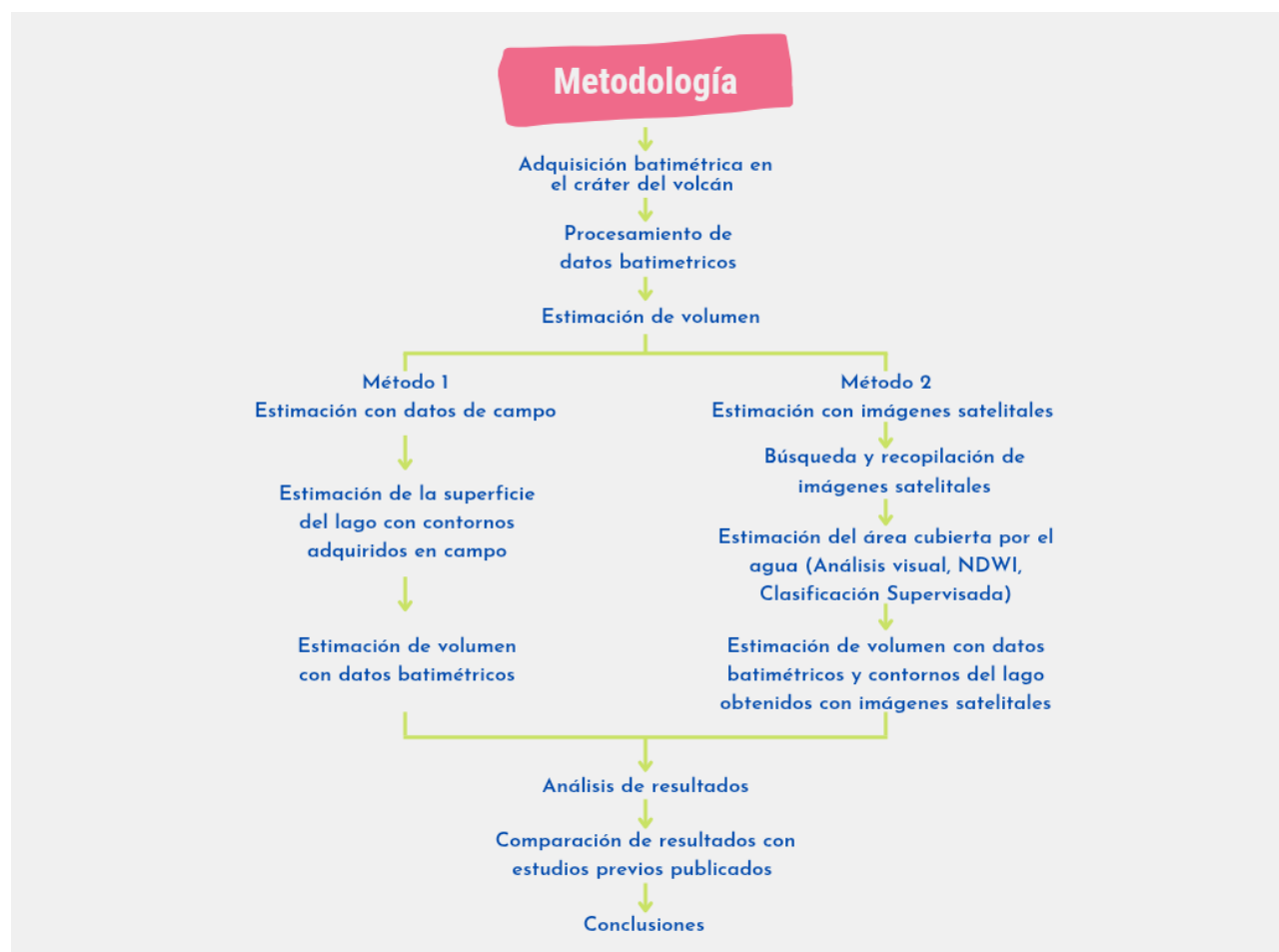


Figura 21. Esquema general de metodología desarrollada en este trabajo.

Adquisición de datos

Se retomó el trabajo de batimetría realizado por Jácome Paz et al., (2016) en abril de 2014, y, durante el desarrollo de este trabajo se llevaron a cabo dos campañas adicionales de batimetría en el lago cratérico del volcán El Chichón, en enero y junio de 2021.

El levantamiento batimétrico consistió en medir la profundidad del lago en distintos puntos, utilizando el sonar portátil Lucky Fish Finder, junto con un GPS de mano para registrar la ubicación espacial (X, Y) de cada estación de muestreo.

En términos operativos, el primer trabajo en campo implicó la instalación del equipo en una lancha, la cual fue utilizada para desplazarse de una estación a otra sobre la superficie del lago (Figura 22).



Figura 22. Fotografías de la campaña de adquisición en el Volcán El Chichón durante enero de 2021. (Robin Campion, 2021).

Una vez transportándose a la ubicación deseada, se introducía el sonar de forma perpendicular a la superficie del lago. La Figura 23, muestra un esquema que representa la forma correcta de posicionar el equipo antes de realizar las mediciones. Con la finalidad de obtener lecturas confiables de profundidad, se esperaba un momento para permitir la estabilización del equipo antes de tomar los registros, además, se registraba la ubicación geográfica de cada estación.

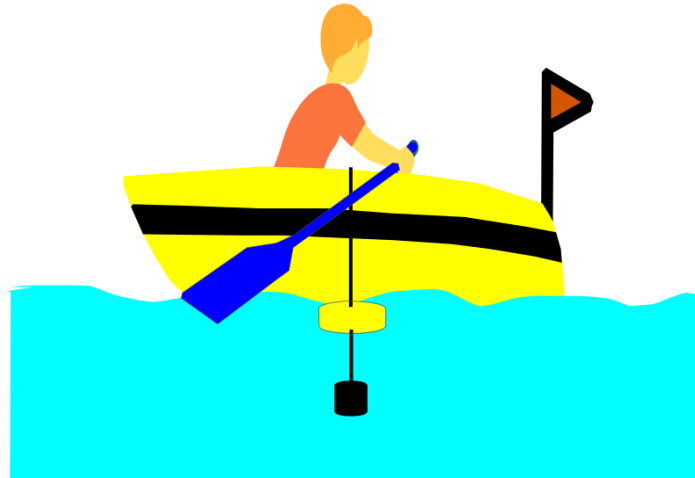


Figura 23. Esquema de la disposición adecuada del uso de un sonar durante el registro de profundidad.

Otro elemento que se adquirió en las campañas de campo de enero y junio de 2021 son los contornos de la superficie cubierta por el agua, los cuales se obtuvieron a partir de dos fuentes: la primera con una serie de puntos GPS en torno al lago, y la segunda fue el resultado de vuelos de dron cortesía del Dr. Ángel Gómez.¹

Equipo:

Sonar Lucky Fish

El sonar portátil Lucky Fish Finder FF1108-1 (Figura 24) es un instrumento de bajo costo que fue diseñado para detectar peces y determinar la profundidad del agua de 1 a 100 metros por debajo del sensor, enviando ondas acústicas o de sonido a través del agua. Su funcionamiento se basa en medir el tiempo que tarda una onda acústica en recorrer la distancia del emisor hacia un objeto y de vuelta al receptor (Figura 24), para calcular la profundidad a la que se encuentra el objeto.



Figura 24. Sonar portátil Fish Finder FF1108-1.

¹ Dr. Ángel Gómez Vázquez. CENAPRED; Correo: agomez@geofisica.unam.mx

GPS

El receptor de Sistema de Posicionamiento Global, GPS por sus siglas en inglés es un dispositivo que permite localizar cualquier objeto en la superficie de la Tierra, consta de un sistema de satélites en órbita que mandan señales a los receptores y éste a su vez proporciona la posición x, y, z del usuario. En este caso se utilizó un GPS de la marca Garmin modelo Etrex 30, con una precisión espacial garantizada por el fabricante de +-15 m en espacios abiertos.

Procesamiento

Procesamiento de datos batimétricos

El procesamiento de los datos batimétricos consistió principalmente en revisar los valores registrados durante las campañas de medición e interpolar la información para estimar la profundidad en las zonas donde no se contaba con datos directos.

La metodología incluyó el filtrado de la información y la determinación de posibles errores durante las adquisiciones. En particular, se prestó más atención a la campaña de junio de 2021, por las particularidades de sus resultados. Durante el análisis se identificaron tres principales fuentes de error: burbujeo, instrumental e inclinación del equipo.

Los valores de profundidad registrados en campo se integraron en una base de datos con sus respectivas coordenadas geográficas en el sistema WGS84 UTM zona 15 Norte. Posteriormente, se revisaron para verificar la calidad del levantamiento, identificar valores anómalos o fuera de rango, determinar posibles errores y corregirlos, procurando conservar la mayor cantidad de información válida. Se eliminaron los registros que superaban en más de dos metros el promedio y se definieron puntos de control para mejorar la aproximación al fondo del cráter.

Las principales fuentes de error se describen a continuación:

Burbujeo

El burbujeo observado en el lago cratérico se debe a manifestaciones volcánicas hidrotermales, tales como manantiales hirvientes y fumarolas. Estas burbujas constituyen una fuente significativa de error, ya que interfieren con el paso de las ondas acústicas emitidas por el sonar. Como resultado, el equipo puede registrar el retorno de las ondas reflejadas por las burbujas en lugar del fondo, generando mediciones de profundidad erróneas.

Instrumental

Este error se asocia con la incertidumbre inherente al equipo de medición. Sin embargo, el fabricante del sonar Fish Finder FF1108-1 no proporciona un valor explícito de precisión.

Inclinación del equipo

Durante la toma de datos, la inclinación del sonar puede variar por dos causas principales: el movimiento de la embarcación o la colocación incorrecta del transductor. Si no se corrigen estos factores antes de realizar las mediciones, y el equipo se encuentra inclinado respecto a la vertical diferente a 90°, las profundidades registradas resultan erróneas. Este tipo de error se clasifica como humano, derivado de la falta de verificación del alineamiento del sonar con respecto a la superficie del agua. Creación de modelos batimétricos

Una vez revisados y depurados los datos, se generaron los modelos batimétricos mediante interpolación, con el fin de estimar profundidades en las zonas no cubiertas durante los levantamientos. Este proceso permite inferir valores en ubicaciones no muestreadas a partir de las observaciones existentes.

Con el software Surfer se elaboraron tres modelos batimétricos con la misma extensión espacial: abril de 2014 (Jácome Paz et al., 2016), enero de 2021 y junio de 2021, siguiendo la siguiente metodología.

1. Importar base de datos a Surfer. En la ventana principal del programa se encuentra la herramienta *Grid Data* con la cual se importan los valores registrados de un archivo Excel para generar mallas. La Figura 25, muestra la configuración de esta herramienta. En este punto también se ingresan los puntos de control para las mallas de 2021.

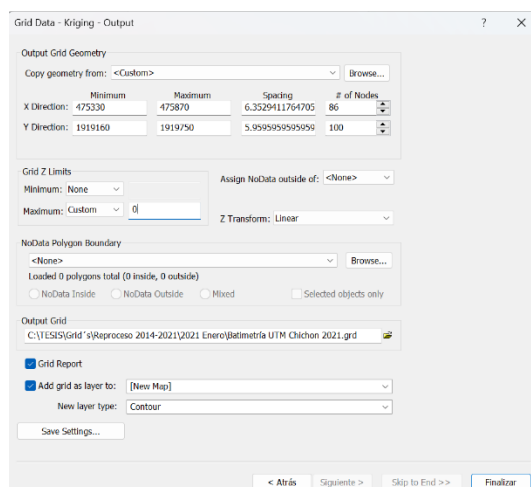


Figura 25. Ventana de *Grid Data*, configuración de parámetros para generar un mallado en Surfer.

En la ventana de *Grid Data* se seleccionan las columnas a importar: coordenadas UTM (X, Y) y el valor de profundidad en Z. Además, se elige el método de interpolación y se configuran los límites de interpolación en Z, considerando valores negativos en profundidad.

El método de interpolación elegido fue el de Kriging, este es un método de inferencia espacial que permite estimar los valores de una variable en lugares no muestreados. El procesamiento con Kriging da una estimación lineal insesgada de los valores con una varianza mínima.

2. En segundo lugar, una vez generada la malla de batimetría (Figura 26) se asigna una escala de colores en propiedades del contorno (*Levels*→ *Fill colors*).

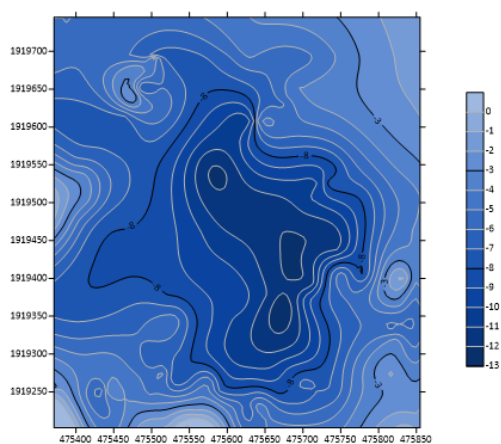


Figura 26. Malla generada a partir de los registros de profundidad.

Y a su vez para una mejor visualización con la malla generada se creó un modelo 3D de batimetría, utilizando la herramienta *New 3D Surface Map*, Figura 27.

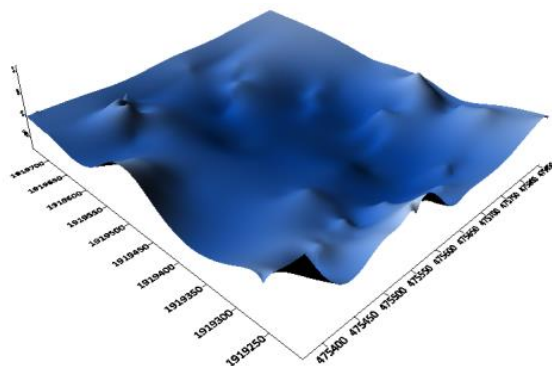


Figura 27. Modelo 3D de batimetría.

3. Posteriormente, a partir de este punto las mallas generadas en Surfer son trabajadas en QGIS. En esta plataforma SIG se calculan el área y volumen de los modelos batimétricos generados a partir de las mediciones de profundidad.

El área del contorno se obtiene en la *Tabla de Atributos* asociada al archivo, en el cual se debe activar el modo edición y, crear una nueva columna “Área” con la herramienta *Campo nuevo*. Una vez creada la nueva columna, utilizando la herramienta *Calculadora de campos* y la función *\$area* del apartado de Geometría se obtiene el área correspondiente al contorno, siguiendo los parámetros de la Figura 28.

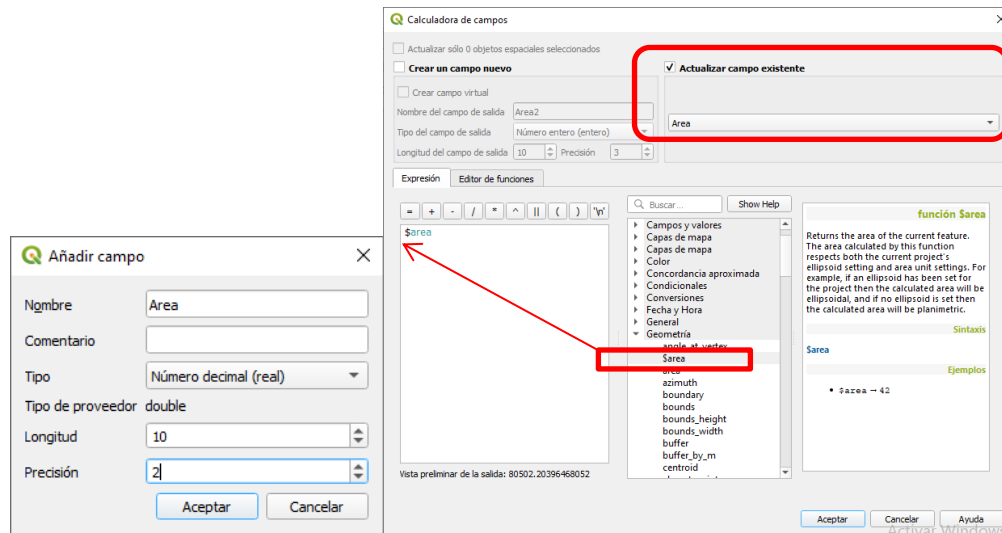


Figura 28. Configuración de la herramienta *Calculadora de campos* para estimación de áreas.

El procedimiento anterior se utilizó para calcular el área con cada uno de los contornos del lago obtenidos en campo.

Procesamiento de imágenes satelitales

En las últimas décadas, el desarrollo e implementación de técnicas avanzadas de percepción remota han permitido el monitoreo de objetos y fenómenos a grandes distancias (p. ej. Alonzo et al., 2021; Kokaly et al., 2007; Pineda Pastrana, 2011; Sandoval Espinoza et al., 2020). En el presente proyecto, se plantea la aplicación de dichas técnicas para cuantificar la variación en la extensión superficial del lago cratérico de El Chichón, con el fin de analizar su dinámica espacial a lo largo del tiempo mediante el uso de imágenes satelitales provenientes de los sensores Landsat 7, Landsat 8 y RapidEye.

Estas técnicas forman parte de un nuevo planteamiento de monitoreo volcánico en volcanes activos con lagos cratéricos. Los resultados se utilizarán para realizar comparaciones entre los valores calculados indirectamente y los obtenidos con material que se adquirió en campo. Además, se usarán imágenes posteriores a las campañas de batimetría para continuar con el monitoreo indirecto del lago, con esta información se obtendrán ecuaciones empíricas del comportamiento del área y volumen del lago para continuar con el planteamiento de las ecuaciones propuestas en estudios previos de Rouwet et al., (2008) y Peiffer, (2011).

Dado que el objetivo principal del proyecto es discriminar el cuerpo de agua del volcán El Chichón, los métodos elegidos se caracterizan por resaltar las propiedades espectrales del agua. Las cuatro metodologías por utilizar son las siguientes:

1. Análisis de la Banda Pancromática 8 (escala de grises), y digitalización visual del contorno del lago a partir de la imagen en pseudocolores de los archivos MTL de Landsat y combinación RGB de RapidEye.

2. Digitalización de cuerpos de agua, a partir del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).
3. Clasificación supervisada para detectar cambios de superficie del cráter de El Chichón utilizando la composición a falso color RGB432 para Landsat 7 y RGB543 para Landsat 8.

Búsqueda y recopilación de imágenes

La búsqueda de imágenes se realizó considerando el planteamiento y objetivo de la metodología propuesta de monitoreo remoto. En primer lugar, se buscó un satélite que cubriera la zona de interés y cumpliera con la temporalidad deseada para contar con imágenes que coincidieran con las fechas de las campañas realizadas en El Chichón, abril 2014 (Jácome Paz et al., 2016), enero y junio de 2021.

El contar con imágenes de estas fechas garantiza realizar la comparativa de los datos adquiridos directamente en campo con los resultados que arrojan las técnicas de PR. De igual manera, el satélite debe presentar registros de imágenes posteriores a las fechas de las campañas de campo para continuar con el planteamiento del monitoreo volcánico indirecto del lago cratérico.

Por su buena resolución espacial, espectral y temporal (16 días) se eligió el programa de satélites Landsat, específicamente las misiones de Landsat 7 y 8. Las imágenes de Landsat se pueden adquirir de forma gratuita en el explorador Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), con previo registro en la plataforma.

En Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) se descargaron imágenes de la siguiente manera:

1. Criterios de búsqueda
 - Selección del área de estudio. La selección de la zona de interés se puede realizar creando un polígono o cargando un archivo en formato .shp que contenga el área (Figura 29).
 - Intervalo de fechas (mm/dd/aa). Se elige un rango de fechas, cada satélite tiene una temporalidad, por ejemplo, los Landsat tienen una temporalidad de 16 días lo que quiere decir que pasa por un mismo punto cada 16 días.

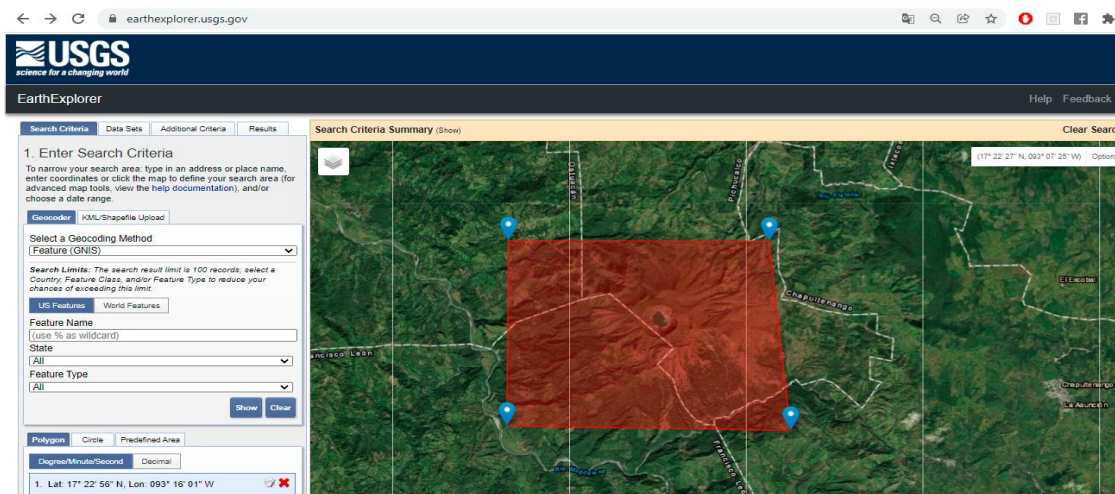


Figura 29. Plataforma Earth Explorer, polígono de la zona de interés dibujado con la opción de selección de coordenadas.

2. Conjunto de datos

- Selección de satélites o sensores. Se eligen de acuerdo con la zona de interés, ya que los satélites tienen diferente órbita y temporalidad, para este caso se eligió Landsat 7 y 8, Figura 30.

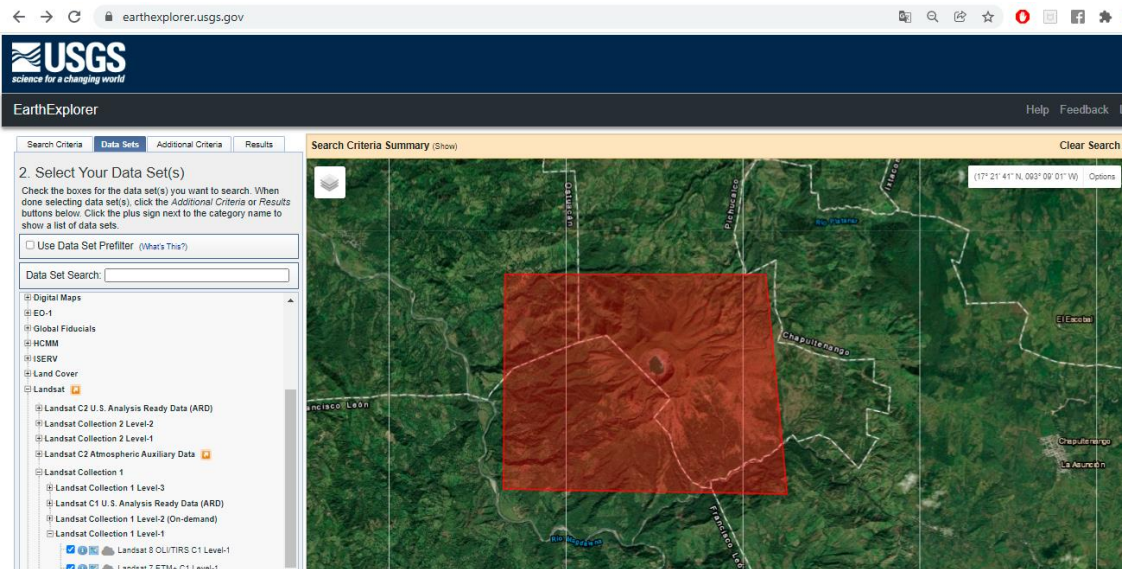


Figura 30. Plataforma Earth Explorer, selección de satélites o conjunto de datos.

3. Criterios adicionales

- En esta sección se pueden elegir otros criterios como el nivel de corrección de los datos, porcentaje de nubosidad, entre otros.
- Una vez que se aplican todos los criterios de búsqueda y de ser necesario los criterios adicionales, se continúa a la siguiente sección.

4. Resultados de búsqueda

- En los resultados se obtendrán las imágenes que se encuentren dentro de los criterios establecidos. En este caso, dentro del grupo de imágenes que resultaron se eligieron las que no presentaban nubosidad sobre la superficie del cráter. Una vez realizada la selección en las opciones de descarga se elige la opción "Productos de datos GeoTIFF", Figura 31.

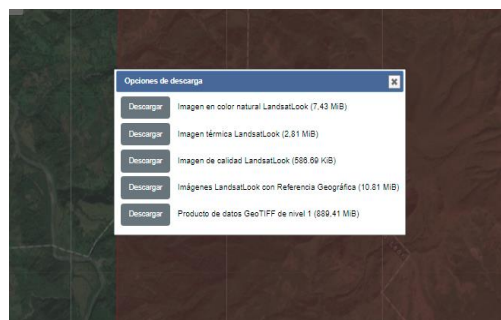


Figura 31. Plataforma Earth Explorer, opciones de descarga.

Los puntos anteriores se aplicaron para descargar todas las imágenes que corresponden con las fechas de las campañas en campo, y las posteriores para el planteamiento de monitoreo remoto.

Adicionalmente, gracias a una colaboración artística de Tania Ximena Ruiz Santos con la compañía Planet (<https://www.planet.com/>), proveedora de imágenes satelitales de alta resolución. Se obtuvieron tres productos Mosaic, que consisten en la combinación de varias imágenes adyacentes que han sido previamente ortorrectificadas y balanceadas radiométricamente para generar un mosaico en color verdadero (rojo-verde-azul, RGB).

A continuación, la Tabla 5 contiene la fecha y satélite correspondiente a cada una de las imágenes que se emplearán en el desarrollo de este trabajo.

Tabla 5. Resumen de las imágenes descargadas en Earth Explorer y Planet Labs.

Fecha	Satélite	Sensor	Resolución Espacial
14-04-2013	Landsat 7	ETM	15
07-04-2013	RapidEye-2	MSI	5
25-04-2014	Landsat 8	OLI-TIRS	15
03-01-2014	RapidEye-1	MSI	5
22-01-2021	Landsat 8	OLI-TIRS	15
26-01-2021	Super Dove	PSB.SD-MSI	3
17-07-2021	Landsat 8	OLI-TIRS	15
22-06-2021	Super Dove	PSB.SD-MSI	3
25-01-2022	Landsat 8	OLI-TIRS	15

Procesamiento de imágenes satelitales

De cada fecha se descargó una imagen que incluye bandas en los espectros del visible e infrarrojo. La carpeta de Landsat contiene un archivo en formato MTL, donde se encuentra toda la información de la adquisición, modelo de satélite, fecha y hora de captura, y el número de bandas. Además, se incluyen las bandas del visible RGB (B1, B2, B3), infrarrojo cercano y de onda corta, así como una banda pancromática.

Por otro lado, las imágenes de RapidEye incluyen un archivo de metadatos que contiene información detallada sobre la imagen, como el satélite que la capturo, la fecha de adquisición, coordenadas, entre otros datos. En este caso, el mosaico de la imagen proporcionada incluye las bandas multiespectrales correspondientes al RGB y al infrarrojo cercano.

Para determinar el área del lago se desarrollaron las siguientes cuatro metodologías (Figura 32): dos visuales y dos algebraicas, realce por índice de agua de diferencia normalizada y clasificación supervisada, estas dos últimas basadas en la respuesta espectral del agua. La aplicación estas metodologías tiene como finalidad comparar los diferentes resultados con los datos obtenidos directamente en campo, con el propósito de determinar el método más eficiente para el monitoreo indirecto del lago cráterico.

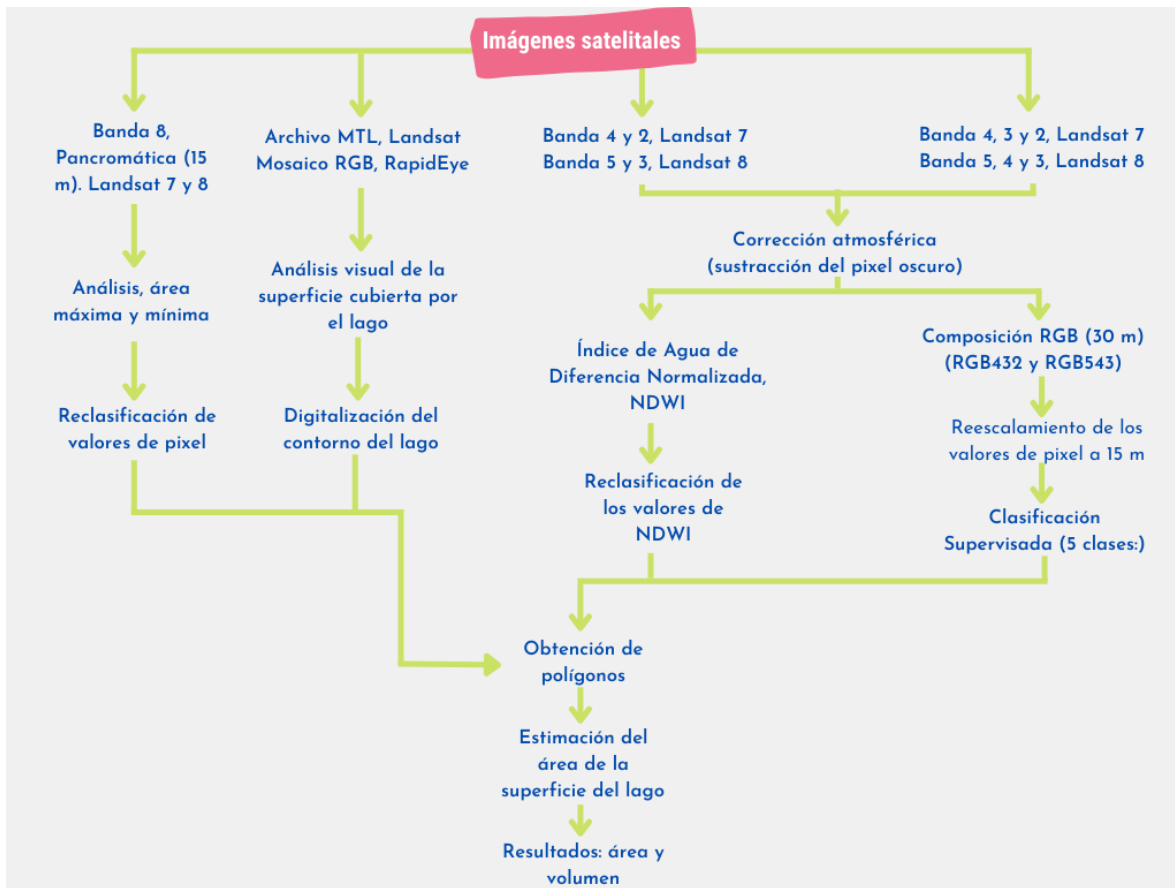


Figura 32. Diagrama del procesamiento de imágenes satelitales.

En los siguientes procedimientos las imágenes fueron trabajadas con valores de números digitales.

Análisis visual

Digitalización de contornos en la banda pancromática

En la digitalización de los contornos se utilizaron dos Sistemas de Información Geográfica (SIG), QGIS y ArcMap. Este método consiste en clasificar los píxeles según su tonalidad en escala de grises, para su demostración se utilizó la imagen de abril 2013.

Para clasificar el área del lago se eligió la banda 8 pancromática con 15 m de resolución espacial. En primera instancia se recortó la banda 8, con un polígono en formato .shp que delimita el área de interés, dibujado lo más cercano posible a los píxeles que potencialmente forman parte del cuerpo de agua (Figura 33). El objetivo de este recorte es evitar el ruido generado por píxeles externos con valores similares, y así reducir el margen de error en la posterior clasificación de los píxeles dentro del lago.

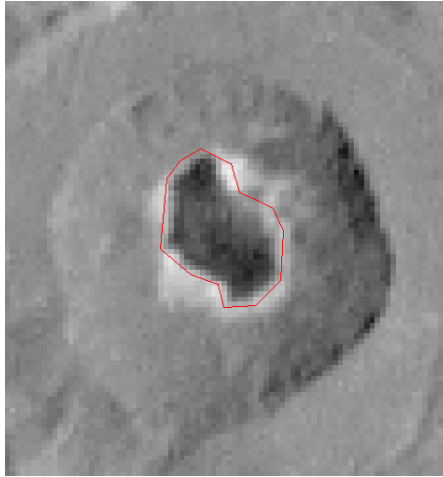


Figura 33. Acercamiento al cráter de El Chichón, banda 8. En rojo se observa el polígono de la posible zona del lago.

El recorte se realizó con el archivo creado en el punto anterior, utilizando la herramienta *Clip raster with polygon*, (Figura 34). De esta forma, se reduce el margen de error en la clasificación de píxeles, al excluir aquellos que se encuentran fuera del área de interés.

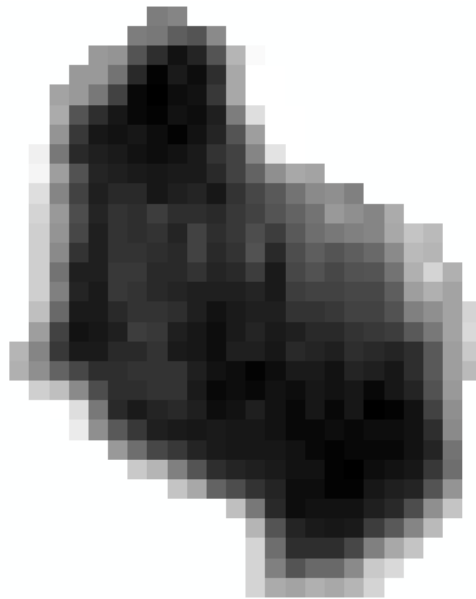


Figura 34. Banda 8 recortada con el polígono del lago.

El proceso de digitalización de este nuevo archivo continúa en el SIG ArcMap. Inicialmente, el desarrollo de las metodologías se planteó en el software ArcMap, sin embargo, se decidió cambiar a QGIS, principalmente porque ofreció mejores resultados en el recorte de archivos ráster, y es un programa de acceso libre.

Retomando el desarrollo, el principal desafío de la metodología es delimitar con precisión el contorno del lago. Aunque la imagen ya ha sido recortada a la zona de interés, el contorno sigue representando la zona

de mayor incertidumbre. Por ello, el análisis de los valores de los píxeles ayudara a determinar dos limites, área máxima y mínima.

Con base en los valores y tonos de píxel se realizó la clasificación de la imagen recortada; en el área mínima se consideraron valores de píxel cercanos a cero y/o tonos negros a grises oscuros, esta zona corresponde a la parte central del lago, destacando significativamente en las imágenes. Por otro lado, el área máxima es representada por píxeles que presentan tonos negros a grises claros, considerada como el área máxima de la superficie, incluyendo la orilla, la zona de mayor incertidumbre. En ambas zonas se observan tonos oscuros, ya que ambas delimitaciones incluyen la parte central del lago, donde hay mayor certeza de presencia de agua y solo difieren en el límite agua-suelo. Esto se debe a que el agua suele aparecer en tonos oscuros como el negro, debido a su alta capacidad de absorción de la radiación visible y del infrarrojo cercano, lo que provoca una baja reflectancia.

Posteriormente, el comando *Identify* ayuda a observar el valor de cada píxel, con esto se determinaron los intervalos de la clasificación, y se aplicó en las propiedades de simbología de los archivos raster, Figura 35.

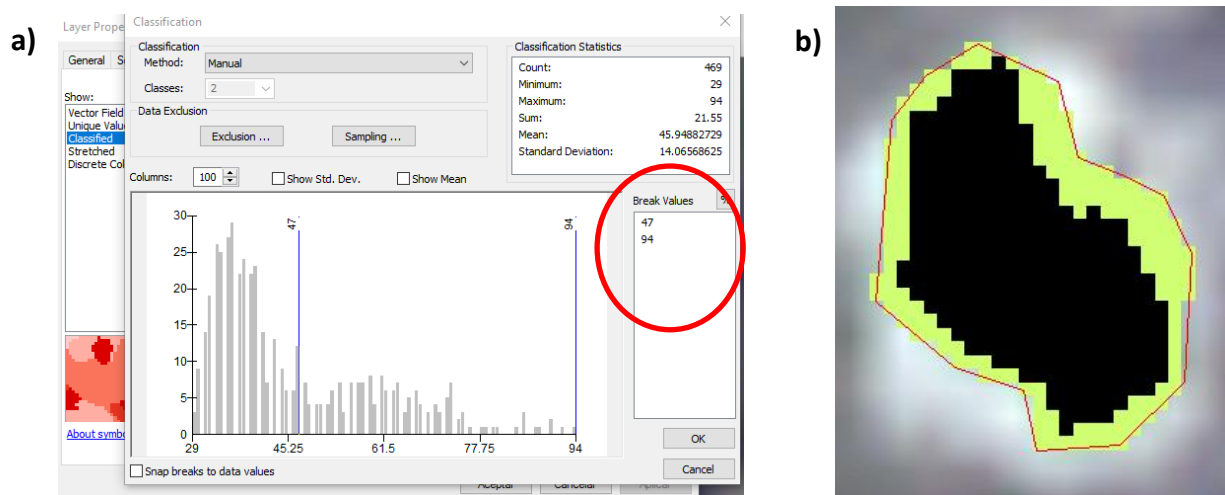


Figura 35. a) Ventana de las propiedades del ráster. El histograma muestra el rango de números digitales (eje X) y frecuencia de los valores (eje Y) de píxel de la Banda 8, el círculo en rojo y líneas verticales del histograma señalan los intervalos aplicados a la clasificación visual configurada para el área mínima. b) Resultado de aplicar la clasificación visual a la Banda 8, en negro resalta el área mínima.

La clasificación se realizó de manera manual y visual, por lo tanto, los límites aplicados a una misma imagen pueden variar de un usuario a otro, ya que depende del criterio y la incertidumbre sistemática de cada uno.

Una vez que el usuario confirme el límite aplicado, se procede a reclasificar los valores de los píxeles utilizando la herramienta **Reclassify** (Figura 36). Al área considerada como mínima se le asigna un valor de 1.

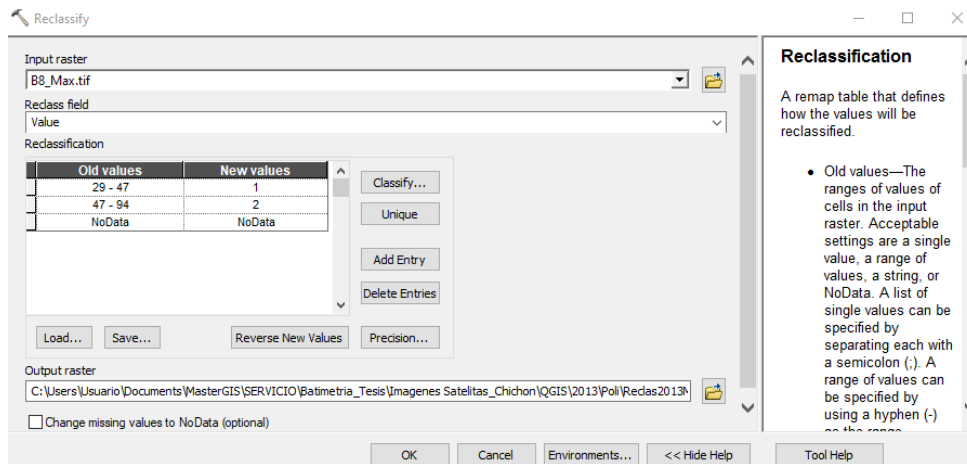


Figura 36. Ventana de la herramienta *Reclassify*, configurada para reclasificar la clasificación visual del área mínima de abril 2013.

Del proceso anterior se obtiene un archivo tipo raster, el cual se convierte en archivo tipo shape utilizando el comando *Raster to Polygon*. En este nuevo archivo .shp se generan dos o más polígonos por los dos intervalos de clasificación que se aplicaron, el de interés es el polígono central, identificado en la columna *grid code* de la tabla de atributos con un valor igual a 1, Figura 37.

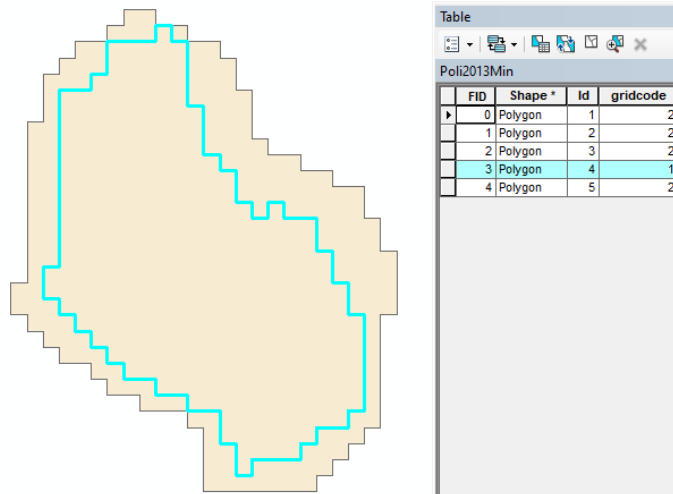


Figura 37. Archivo shape de la clasificación visual con reclasificación y su tabla de atributos, abril 2013.

Lo siguiente es extraer el polígono de interés (*gridcode=1*). Este último archivo sólo contiene el polígono del área mínima de la superficie del lago (colores oscuros), del cual se obtuvo el área ocupada en m² (Figura 38).

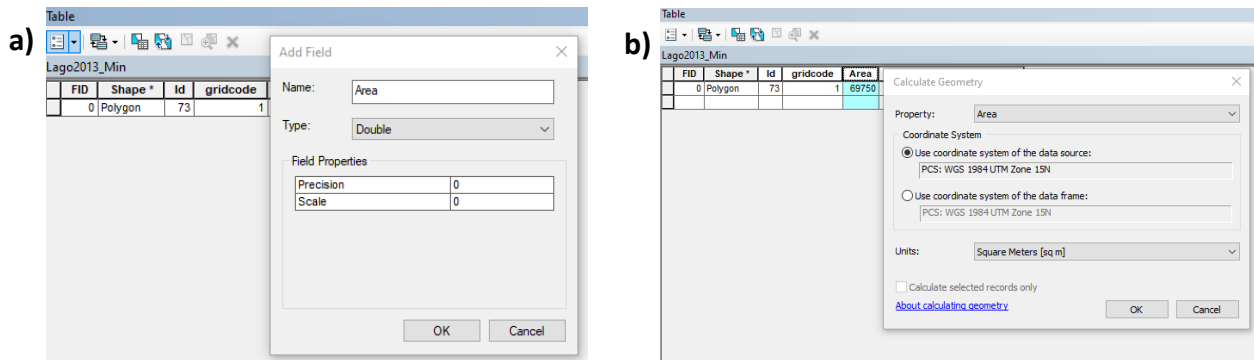


Figura 38. a) Ventana para crear el campo o columna en la tabla de atributos. b) Ventana *Calculate Geometry* configurada para calcular áreas en el sistema de coordenadas WGS84 UTM Zona 15N.

Finalmente, en la siguiente imagen se observan los dos contornos calculados. El contorno en color morado es considerado como el área mínima posible del lago, utilizando el límite de color negro a grises oscuros (29 a 47 valor de píxel).

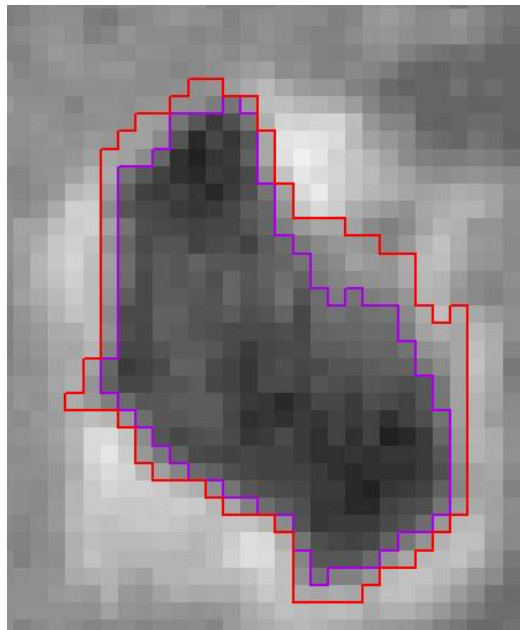


Figura 39: Contornos del área mínima (morado) y máxima (rojo) de abril 2013 obtenidos con la clasificación visual. Sobrepuestos sobre la imagen de la Banda 8.

El contorno de color rojo se obtuvo aplicando esta misma metodología, utilizando la clasificación visual en un rango de colores negros a grises claros, con valores de píxel de 29 a 66. Este contorno toma en cuenta el área de mayor incertidumbre, la orilla del lago, denominada como el área máxima.

Visualización y Digitalización de imagen compuesta en pseudocolores (RGB)

La digitalización visual consistió en dibujar el contorno del lago en un archivo tipo *shape* a partir de imágenes compuestas en color real. Para cada fecha de estudio, se dibujó el área del lago en dos imágenes: la primera, imagen compuesta en pseudocolores RGB generada a partir de la información del archivo MTL de Landsat; y la segunda, un mosaico de RapidEye en composición a color real. En ambos casos, se aplicó el mismo procedimiento y se calculó el área correspondiente (Figura 40).

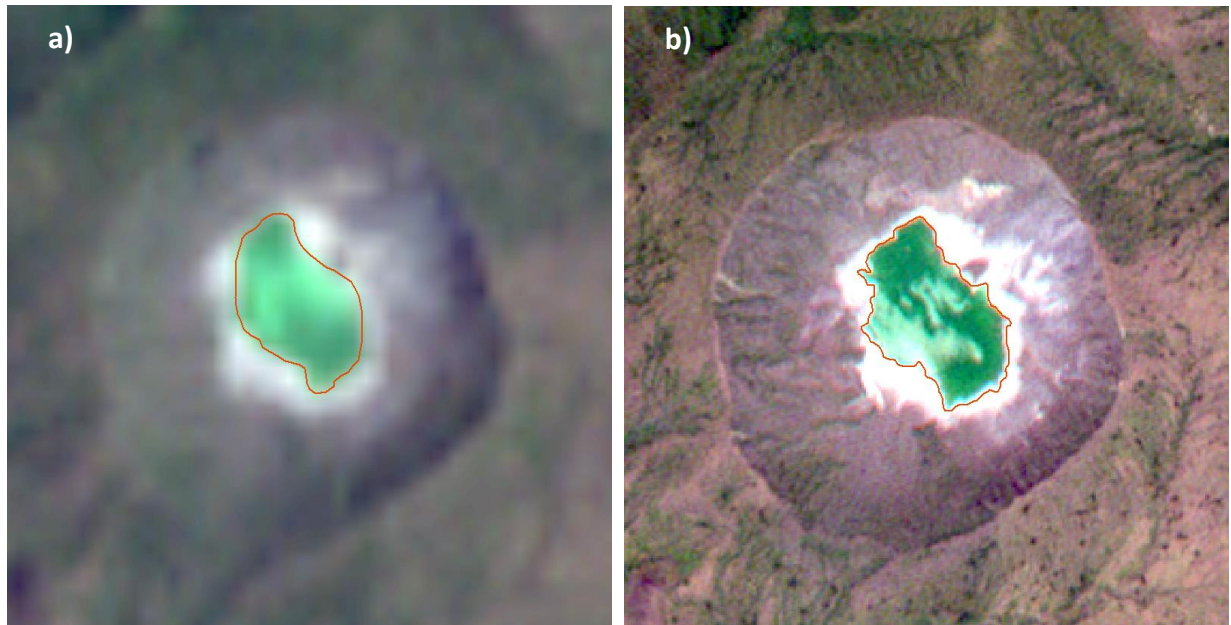


Figura 40. Contorno digitalizado en color rojo sobre imagen en pseudocolores RGB, archivo MTL de Landsat 7 (a) y mosaico de RapidEye (b).

Índice de agua de diferencia normalizada, NDWI

El NDWI es una herramienta utilizada para resaltar cuerpos de agua en imágenes satelitales. Se calcula a partir de la banda verde del espectro visible e infrarrojo cercano (NIR). Para este análisis, se recortó el área de interés a partir de los dos archivos ráster correspondientes, abarcando únicamente la zona del cráter del área total de la imagen satelital original (Figura 41).

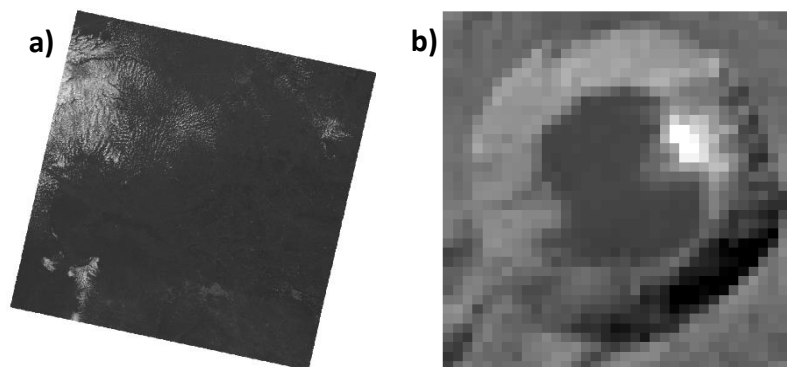


Figura 41: a) Banda 3, área total de la imagen de Landsat 8, enero 2021. b) Recorte de la Banda 3 del área de interés, cráter El Chichón.

En el software IDRISI Selva se aplicó la corrección atmosférica por sustracción de píxel oscuro. Esta corrección es una técnica utilizada para eliminar la dispersión atmosférica en las imágenes satelitales, se basa en la suposición de que áreas con cuerpos de agua profundos o sombras deberían tener una reflectancia igual o cercano a cero (Chávez, 1996; Song et al., 2001). Sin embargo, por la dispersión de la luz presentan valores mayores a cero. Para eliminar estos efectos y mejorar el realce de los valores de píxel, la técnica consiste en identificar los píxeles más oscuros de la imagen y restar a cada banda su valor mínimo, con la finalidad de que los valores de píxel comiencen en cero en cada banda, Figura 42. Para realizar esta diferencia se utilizó la herramienta *Image Calculator*.

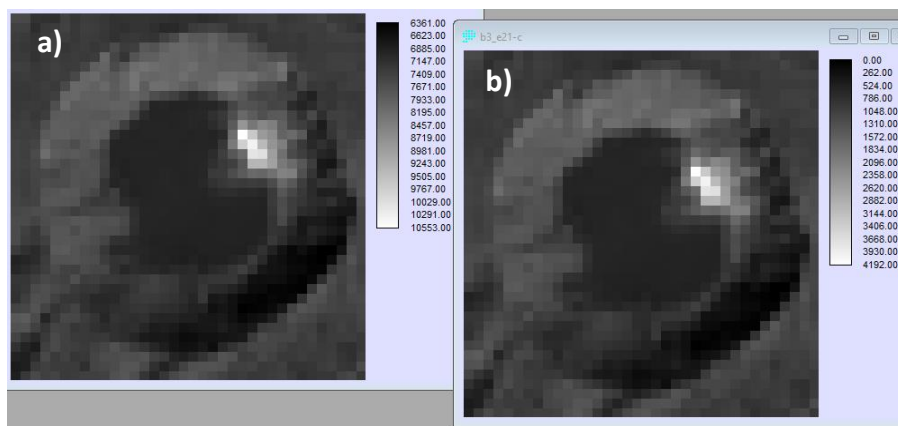


Figura 42: a) Banda 3 del área de interés. b) Banda 3 con corrección por sustracción de píxel oscuro. Enero 2021

Una vez que se aplicó los pasos anteriores a la Banda 2 y 4 de Landsat 7, o bien, 3 y 5 para Landsat 8 se calculó el NDWI con la herramienta de cálculo *Overlay*. El NDWI resultante, Figura 43, tiene un rango de valores de -1 a 1. Con el objetivo de discriminar las áreas cubiertas por agua, se analizó el rango de valores y se determinó que los píxeles de interés se encuentran dentro del intervalo de -0.026 a 1.

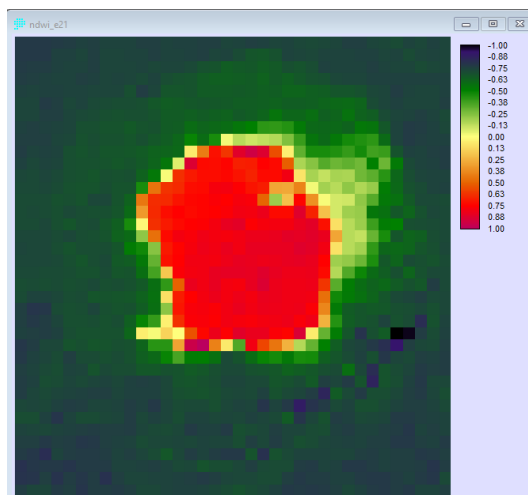


Figura 43. NDWI, enero 2021, calculado con las Bandas 3 y 5 de Landsat 8. En tonos naranjas a rojos se denota el área ocupada por agua.

El umbral se estableció con base en la distribución espectral de los valores del NDWI, donde se observó que las superficies con presencia de agua reflejan valores cercanos o mayores a cero. El límite inferior -0.026 se determinó tras evaluar que corresponden a zonas de baja profundidad con mayor presencia de sedimentos, corroborado con las visitas a campo. Considerando este intervalo se utilizó la herramienta *Reclass* para la reclasificación del archivo ráster de NDWI, asignándole el valor de 1 al intervalo -0.026 a 1, y al resto de los valores 0 (Figura 44).

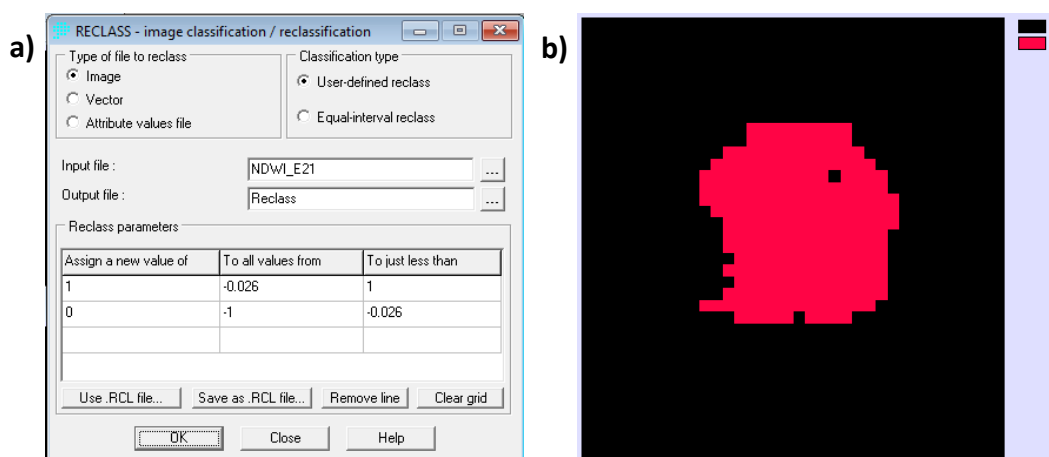


Figura 44. a) Ventana de la herramienta *Reclass* configurada para la reclasificación del NDWI de 2021. b) Reclasificación del NDWI, en rosa se observa el área de interés con ID= 1.

Finalmente, con la imagen reclasificada se calculó el área correspondiente en m², Figura 45.



Figura 45. Imagen de la reclasificación con sus respectivas áreas.

Clasificación supervisada

La clasificación supervisada de una imagen satelital es un procedimiento estadístico que utiliza las firmas espectrales de una muestra de materiales para categorizar los píxeles en clases o clusters.

En esta metodología también se realizó el recorte de las bandas espectrales en QGIS del área de interés, y se aplicó la corrección atmosférica por sustracción del píxel oscuro en ArcMap, Figura 46 (*Raster Calculator*).

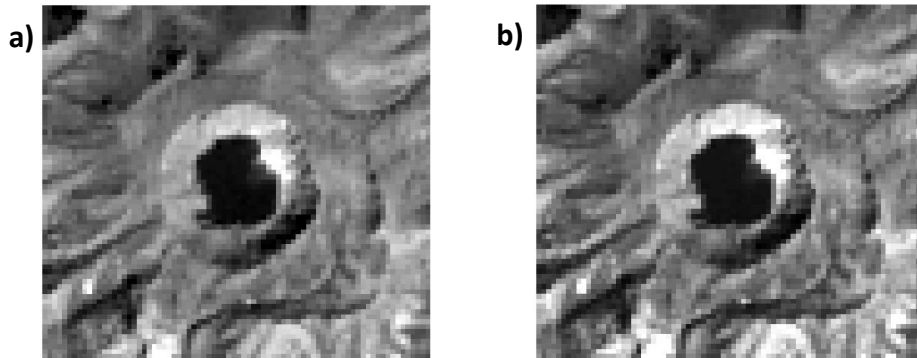


Figura 46. a) Banda 4 recortada de la imagen original, cráter de El Chichón, Landsat 8-Enero 2021. b) Banda 4, con corrección por sustracción de píxel oscuro.

Una vez que se obtuvieron las imágenes corregidas se plantearon composiciones RGB de la zona de estudio. La primera fue una composición a color real con las bandas del visible RGB321 para Landsat 7, o bien, RGB432 para Landsat 8. De igual modo, se planteó una composición RGB a falso color con bandas del visible e infrarrojo (RGB432, Landsat 7: RGB543, Landsat 8), Figura 47.

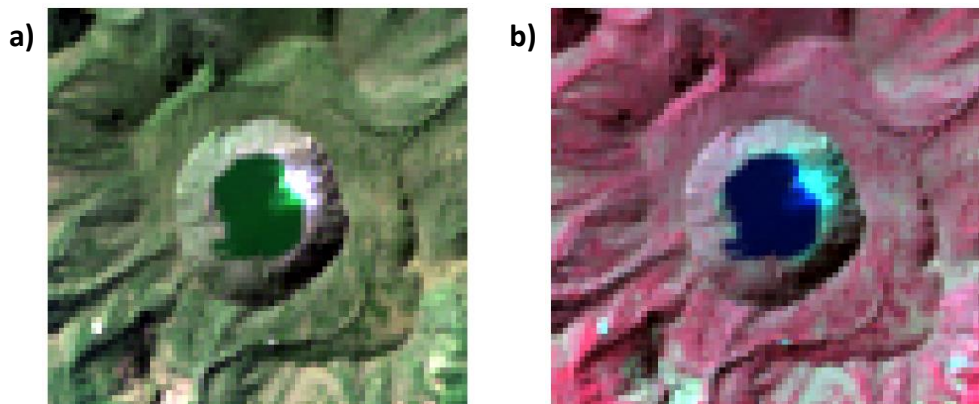


Figura 47. a) Composición a color real, combinación RGB432. Se observa en tonos café claros el suelo desnudo, en color verde la vegetación y el lago. b) Composición a falso color, combinación RGB543. En esta composición resalta en tonos cian grisáceos el suelo desnudo, en tonos rosas la vegetación y en azul oscuro la superficie del lago.

Las composiciones se realizaron con bandas de 30 m de resolución espacial. No obstante, el paquete de imágenes de Landsat 7 y 8 incluye la banda 8 pancromática con resolución espacial de 15 m por píxel. La banda pancromática se caracteriza por capturar un rango amplio del espectro electromagnético en un solo canal.

Dado que el objetivo de este trabajo es obtener un contorno preciso, se utilizó la banda pancromática para mejorar la resolución espacial de las composiciones RGB a 15 metros por píxel. Este método conocido como refinado pancromático, consiste en la fusión de bandas multiespectrales de baja resolución con la banda pancromática de mayor resolución. Su principal ventaja es que permite mejorar la nitidez y resolución de las bandas multiespectrales, manteniendo su información radiométrica original

En esta parte del proceso, se optó por continuar el procesamiento utilizando las bandas correspondientes a la composición en falso color (verde, azul e infrarrojo cercano), combinación RGB432 para Landsat 7 y RGB543 para Landsat 8. Esta configuración ofrece un mayor contraste en las repuestas espectrales de las superficies, permitiendo una mejor definición del contorno del lago.

Para mejorar la resolución espacial de las imágenes, se utilizó la herramienta *Create Pansharpened Raster Dataset*, la cual fusiona la composición RGB543 con la banda pancromática. El resultado se muestra en la Figura 48. b).

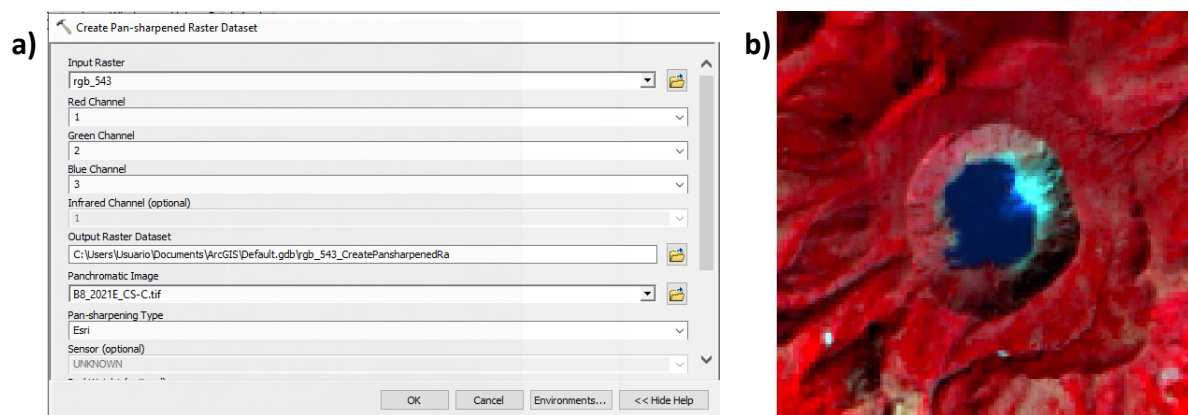


Figura 48. a) Ventana de la herramienta Create Pansharpened configurada para aumentar la resolución espacial de la composición RGB543, enero 2021. b) Composición RGB543 a falso color con una resolución de 15 m por píxel.

A partir de este último resultado se obtendrá la clasificación supervisada, esta composición es la base para obtener la respuesta espectral de los materiales presentes, para ello es necesario crear un archivo *Entrenador.shp*. Dicho archivo contiene muestras representativas de cada una de las clases a clasificar, para este caso se consideraron las siguientes, Tabla 6.

Tabla 6. Clases con su respectivo ID para la generación de puntos utilizados en la clasificación supervisada.

ID	Superficie
1	Lago
2	Suelo desnudo
3	Vegetación
4	Sombras
5	Suelo alrededor del lago
6	Nubes

En el archivo de entrenamiento se generó un mínimo de 30 puntos por clase, de manera ordenada y sistemática, cada punto fue asignado a su respectiva clase mediante su ID en la tabla de atributos (Figura 49). Mantener un orden en este archivo es esencial para garantizar la correcta identificación de patrones espectrales, lo que garantiza la calidad y confiabilidad del proceso de clasificación supervisada. Para cada imagen multibanda clasificada se generó su respectivo archivo entrenador.

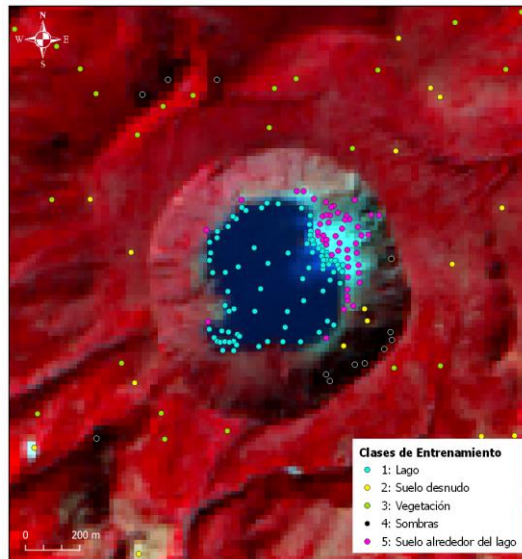


Figura 49. Composición RGB543 (enero 2021) y distribución de puntos del archivo Entrenador.

A partir del archivo de entrenamiento y la composición RGB543, se creó la firma espectral característica de cada clase (ID) utilizando la herramienta *Create Signatures*. Este archivo de firmas espectrales, junto con la composición RGB543, se utiliza en el proceso de clasificación supervisada. Durante este proceso, el algoritmo compara cada píxel de la composición RGB con las clases de entrenamiento y le asigna aquella con la que comparte mayor similitud espectral, garantizando una clasificación precisa basada en probabilidades estadísticas. La Figura 50, muestra el resultado de aplicar el algoritmo de clasificación supervisada *Maximum Likelihood Classification*.

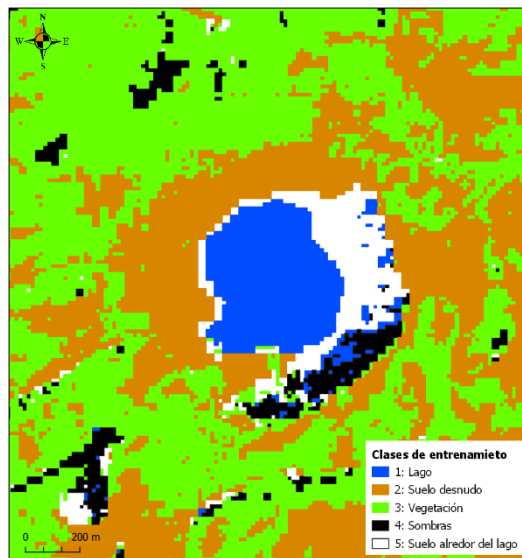


Figura 50. Clasificación supervisada enero 2021 con sus respectivos ID.

Posteriormente, el archivo resultante de la clasificación es transformado a tipo *shape* para extraer y generar los polígonos de cada uno de los ID, y se calcula el área de la superficie ocupada por el lago en m².

Finalmente, la Figura 51 muestra el contorno resultante de la superficie del lago aplicando el método de clasificación supervisada.



Figura 51. Composición RGB543 y el contorno en color amarillo de la superficie del lago obtenido por clasificación supervisada.

En resumen, la metodología expuesta se aplicó en las cuatro imágenes multibandas, generando para cada una su correspondiente archivo de entrenamiento.

Estimación de volumen

Las áreas de la superficie del lago, calculados a partir de los contornos obtenidos mediante los métodos previamente descritos, se usaron junto con el modelo batimétrico para estimar el volumen ocupado por el lago. Este procedimiento se realizó en el software QGIS siguiendo los pasos que se describen a continuación.

1. En el cálculo de volumen es necesario recortar el mallado batimétrico con cada uno de los contornos adquiridos, para ello se utilizó la herramienta *Cortar raster por capa de máscara*. Esta herramienta utiliza la malla a recortar y el polígono con el que se aplicará el recorte, Figura 52.

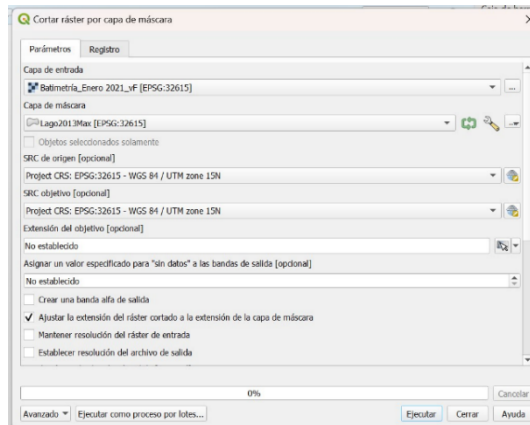


Figura 52. Configuración de la herramienta *Cortar raster por capa de máscara*.

2. Posteriormente, se calcula el volumen del agua empleando el contorno del lago, la malla de batimetría y una base de referencia de nivel cero, utilizando la herramienta *Raster Surface volumen* (Figura 53).

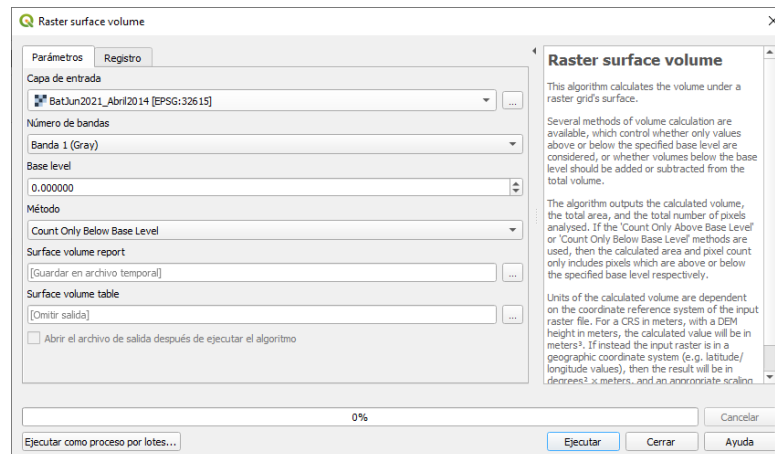


Figura 53. Configuración de la herramienta *Raster Surface volumen*.

El procedimiento anterior se utilizó para calcular el volumen con cada uno de los contornos y mallas batimétricas, de forma que para cada contorno se obtuvieron tres volúmenes distintos utilizando cada una de las mallas generadas.

Además, estos cálculos forman parte del monitoreo remoto del lago y del planteamiento de fórmulas empíricas para conocer el comportamiento del volumen ocupado por el lago.

Fórmula empírica de volumen

Rouwet et al., (2008) y Peiffer, (2011) presentaron en sus trabajos formulas empíricas para estimar el volumen del lago de El Chichón a partir de su área y profundidad. Retomando sus trabajos y con el objetivo

de monitorear el lago de forma indirecta, se pretende plantear fórmulas empíricas de volumen basadas en la información actualmente disponible.

Esta formulación se desarrolló a partir de las áreas estimadas con cada uno de los métodos directos (trabajo de campo) e indirectos

(análisis de imágenes satelitales), así como de las profundidades registradas durante las visitas realizadas a El Chichón en abril de 2014, enero y junio de 2021.

Con el objetivo de encontrar una relación entre el área y la profundidad del lago, en una primera etapa se estimó su volumen asumiendo que el cuerpo de agua adopta tres formas geométricas ideales, todas con base elíptica: casquete esférico, cono y cono truncado. Para ello se utilizaron las siguientes formulas:

- Casquete esférico

$$V \approx \frac{\pi h(3ab+h^2)}{6} \quad (7)$$

Donde:

a : semi eje mayor de la elipse

b : semi eje menor de la elipse

h : altura desde la base elíptica hasta el punto más alto del casquete esférico

- Cono

$$V \approx \frac{1}{3} \pi a b h \quad (8)$$

Donde:

a : semi eje mayor de la elipse

b : semi eje menor de la elipse

h : altura del cono, desde la base elíptica hasta el punto más alto del cono

- Cono truncado

$$V \approx \frac{2}{3} \pi h (a_1 b_1 + a_2 b_2 + \sqrt{a_1 b_1 + a_2 b_2}) \quad (9)$$

Donde:

$a_1 b_1$: semiejes mayor y menor de la base elíptica mayor

$a_2 b_2$: semiejes mayor y menor de la base elíptica menor

h : altura perpendicular entre ambas bases

Dado que las fórmulas utilizadas requieren como entrada las dimensiones de la superficie o plano superior del lago, se propuso que esta superficie tiene forma elíptica. Esta suposición se fundamenta en los contornos estimados, los cuales tienden a asemejar a una elipse, con un eje mayor orientado preferencialmente en dirección NW-SE y un eje menor en dirección NE-SW.

A partir de esta base, se midieron los radios máximos (Radio) y mínimos (radio) de los polígonos obtenidos mediante las diferentes técnicas. Posteriormente, estos valores, junto con la profundidad máxima registrada en cada modelo batimétrico, fueron utilizados para calcular el volumen del lago según cada área y las tres formas geométricas propuestas.

Finalmente, se compararon los volúmenes obtenidos con cada modelo, con el propósito de determinar cuál de las tres formas geométricas representa con mayor precisión las condiciones reales del cuerpo de agua

Resultados y discusión

Procesamiento batimétrico

Los resultados obtenidos a partir del procesamiento y análisis de los datos batimétricos permiten conocer la morfología del fondo del lago cratérico, así como evaluar las variaciones espaciales y temporales. La comparación entre los modelos generados para los distintos periodos de medición facilita identificar cambios en la topografía del fondo, así como posibles evidencias de actividad volcánica o procesos sedimentarios. En esta sección se presentan los principales hallazgos derivados de las mediciones de profundidad, generación y análisis de los modelos batimétricos correspondientes a los años 2014, enero de 2021 y junio de 2021. En la Figura 54 se observa la distribución espacial de las tres campañas de mediciones de profundidad en El Chichón.

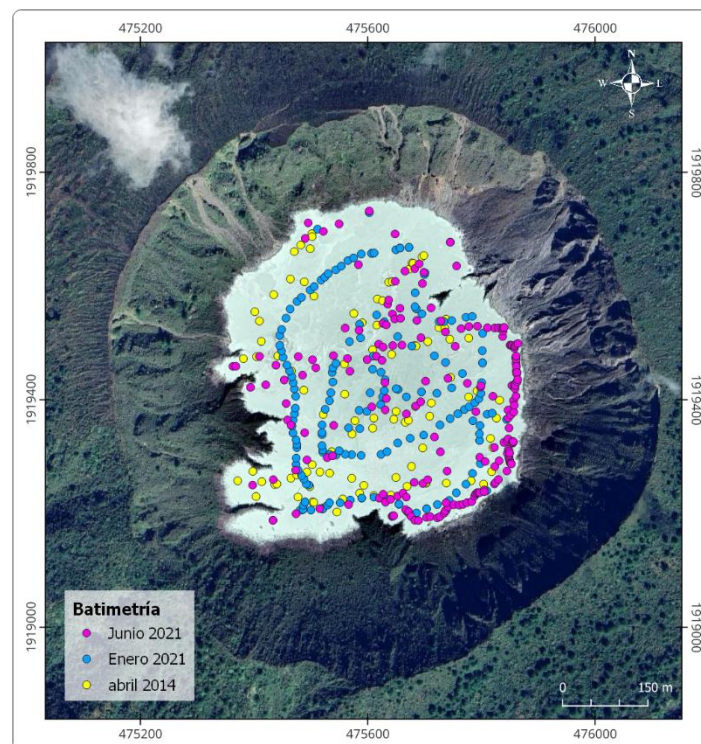


Figura 54. Ubicación de estaciones batimétricas de las diferentes campañas en el volcán El Chichón, Chiapas.

Modelos batimétricos

Con base en los datos procesados y depurados, se generaron modelos batimétricos en formato malla para representar de manera continua la distribución de profundidades en el lago. Estos modelos permiten visualizar con detalle la morfología del fondo y realizar comparaciones entre las diferentes campañas de adquisición.

A continuación, se describen las principales características observadas en cada modelo.

- Abril 2014

El modelo batimétrico de abril 2014 (Figura 55) fue elaborado con la información presentada en Jácome Paz et al., (2016), obtenida con el sonar portátil Lucky-Fish Finder, el mismo que se utilizó durante las campañas de medición realizadas durante este trabajo.

El modelo 2D y 3D, generado a partir de 96 valores de profundidad, muestra una profundidad máxima de 13 m, localizada en la porción central del lago. Los valores de profundidad se concentran principalmente en el intervalo de 10.5 a 13 m, mientras que las zonas someras (menor a 5 m) se distribuyen hacia los extremos del lago.

La morfología general presenta una depresión central bien definida con dirección preferencial NW–SE y un relieve que se suaviza gradualmente hacia las orillas, aunque con un mayor gradiente en el sector sureste. En la parte noreste se observan pequeñas irregularidades topográficas que podrían asociarse con emanaciones hidrotermales o zonas de burbujeo registradas superficialmente.

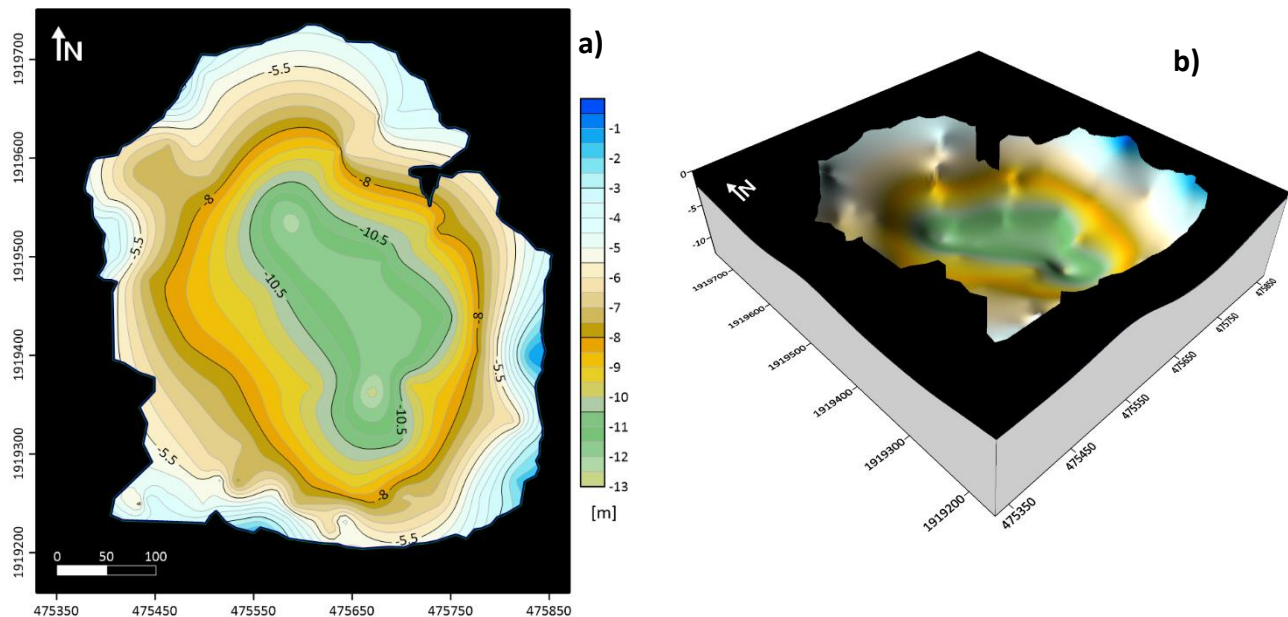


Figura 55. a) Mapa batimétrico abril 2014. b) Visualización 3D de mapa batimétrico.

- Enero 2021.

El modelo generado de la Figura 56 con los 164 puntos de medición correspondientes a enero de 2021 presenta una profundidad máxima de 15 m, lo que representa un ligero incremento respecto a los valores registrados en 2014.

La morfología general mantiene la depresión central del fondo, aunque se observan variaciones en la forma y extensión de las zonas profundas, principalmente hacia el sector oeste. Las áreas someras (menor a 5 m) se concentran en el suroeste, mientras que la zona de mayor gradiente se localiza hacia el norte.

Asimismo, se identifican pequeñas irregularidades topográficas que podrían relacionarse con actividad hidrotermal difusa en el fondo del lago, lo que sugiere una persistencia de procesos volcánicos activos.

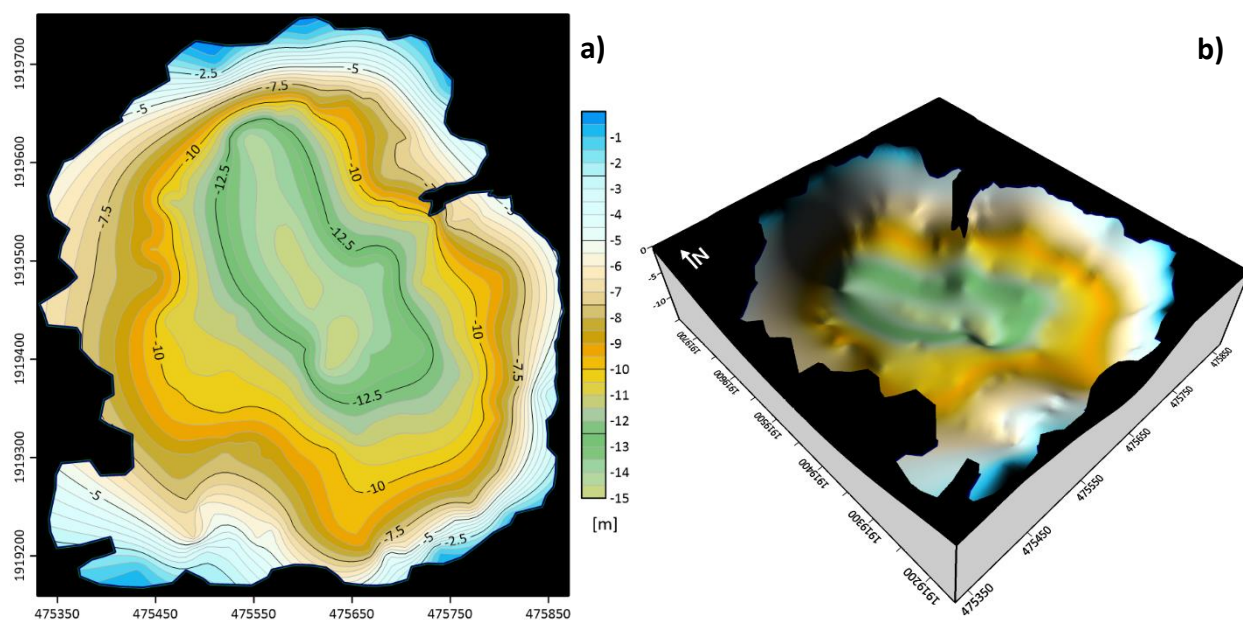


Figura 56. a) Mapa batimétrico enero 2021. b) Visualización 3D de mapa batimétrico.

- Junio 2021.

El modelo correspondiente a junio de 2021 (Figura 57) revela una profundidad máxima de 20 m, ubicada nuevamente en la parte central del lago. Las zonas someras (menores a 5 m) se distribuyen alrededor de las orillas, mientras que el fondo presenta una depresión central asimétrica, con las mayores profundidades desplazadas hacia el suroeste.

A diferencia de los modelos de abril de 2014 y enero de 2021, donde la profundidad aumenta gradualmente, el modelo de junio de 2021 muestra variaciones abruptas entre puntos cercanos y un incremento notable en las profundidades del sector suroeste con una dirección preferencial NE-SW.

Estas diferencias se pueden asociar tanto a factores operativos durante la adquisición como a zonas burbujeantes del lago, las condiciones de actividad hidrotermal probablemente influyeron en la alteración de la señal acústica del sonar, generando dispersión o sobreestimación de la información.

En particular, durante la campaña de junio de 2021 participaron dos operadores, lo que pudo introducir errores por inclinación incorrecta del sonar en ciertos puntos.

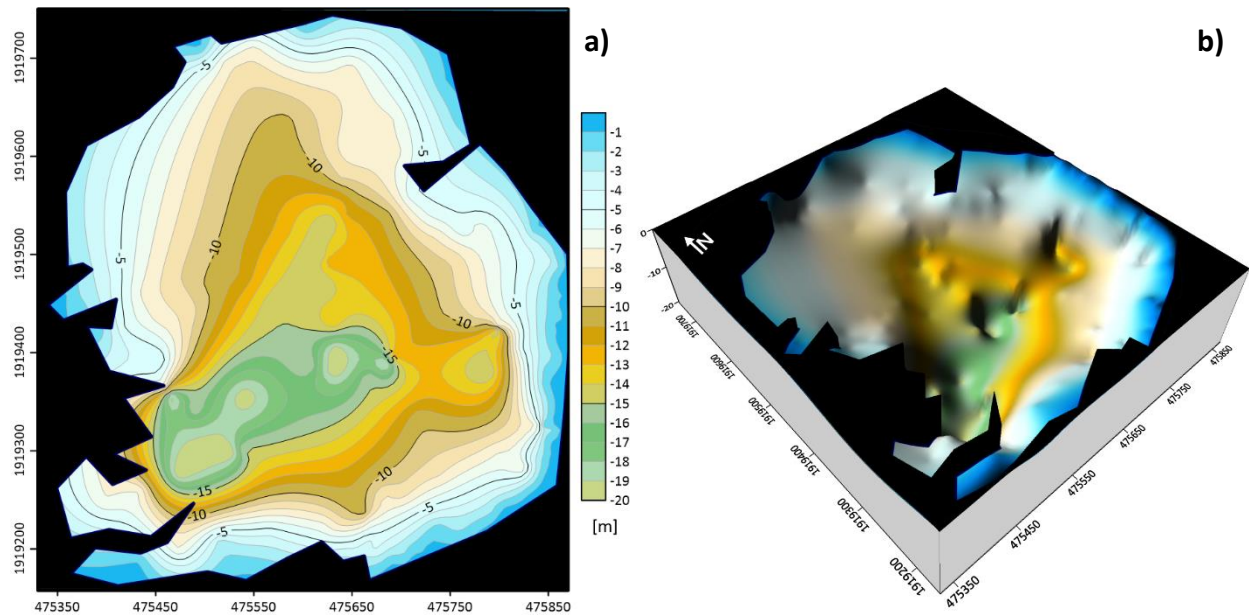


Figura 57. a) Mapa batimétrico junio 2021. b) Visualización 3D de mapa batimétrico.

En conjunto, la comparación de los modelos batimétricos de abril de 2014, enero de 2021 y junio de 2021 permite observar cambios en la morfología del fondo del lago cratérico del volcán El Chichón. Entre 2014 y 2021 se aprecia un incremento gradual de la profundidad máxima, que paso de 13 m a 20 m, acompañado de una marcada asimetría hacia el suroeste, donde las profundidades tienden a concentrarse

Por otra parte, las irregularidades topográficas y los gradientes abruptos detectados en el modelo de junio de 2021 contrastan con la superficie más uniforme observada en los modelos anteriores. Estas anomalías topográficas registradas en junio de 2021 podrían asociarse a factores operativos (variación de operadores o inclinación del sonar), instrumentales y a la distribución espacial de la adquisición de datos.

En términos generales, la secuencia temporal de los modelos permite conocer cambios morfológicos y variaciones en la profundidad del lago. Sin embargo, estos tres levantamientos resultan insuficientes para conocer su comportamiento evolutivo. La dinámica del lago está controlada por procesos hidrotermales activos, generando una evolución muy variable en el tiempo que este estudio, por sí solo, no logra conocer.

Procesamiento de imágenes satelitales, contornos

El procesamiento de imágenes satelitales permitió delimitar la superficie del lago cratérico en las fechas de interés (abril de 2014, enero y junio de 2021), con el fin de comparar los resultados obtenidos directamente en campo con aquellos derivados de los métodos de percepción remota. Además, se incorporó una imagen correspondiente a enero de 2022 como parte de la propuesta de monitoreo continuo, con el propósito de conocer la dinámica del cuerpo de agua en el tiempo.

Para cada una de las imágenes se aplicaron cuatro técnicas, visuales y algebraica que incluyen: digitalización manual de contornos, NDWI y clasificación supervisada, con el objetivo de determinar la extensión del espejo de agua y analizar sus variaciones espaciales entre campañas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de estas metodologías.

Análisis visual, banda pancromática

El análisis se llevó a cabo mediante una clasificación visual considerando la resolución espacial de las bandas. Se utilizó la banda pancromática de Landsat 7 y 8 debido a su mayor resolución espacial (15 m), lo que permitió analizar con mayor detalle el tono de cada píxel en escala de grises y su valor en números digitales (ND).

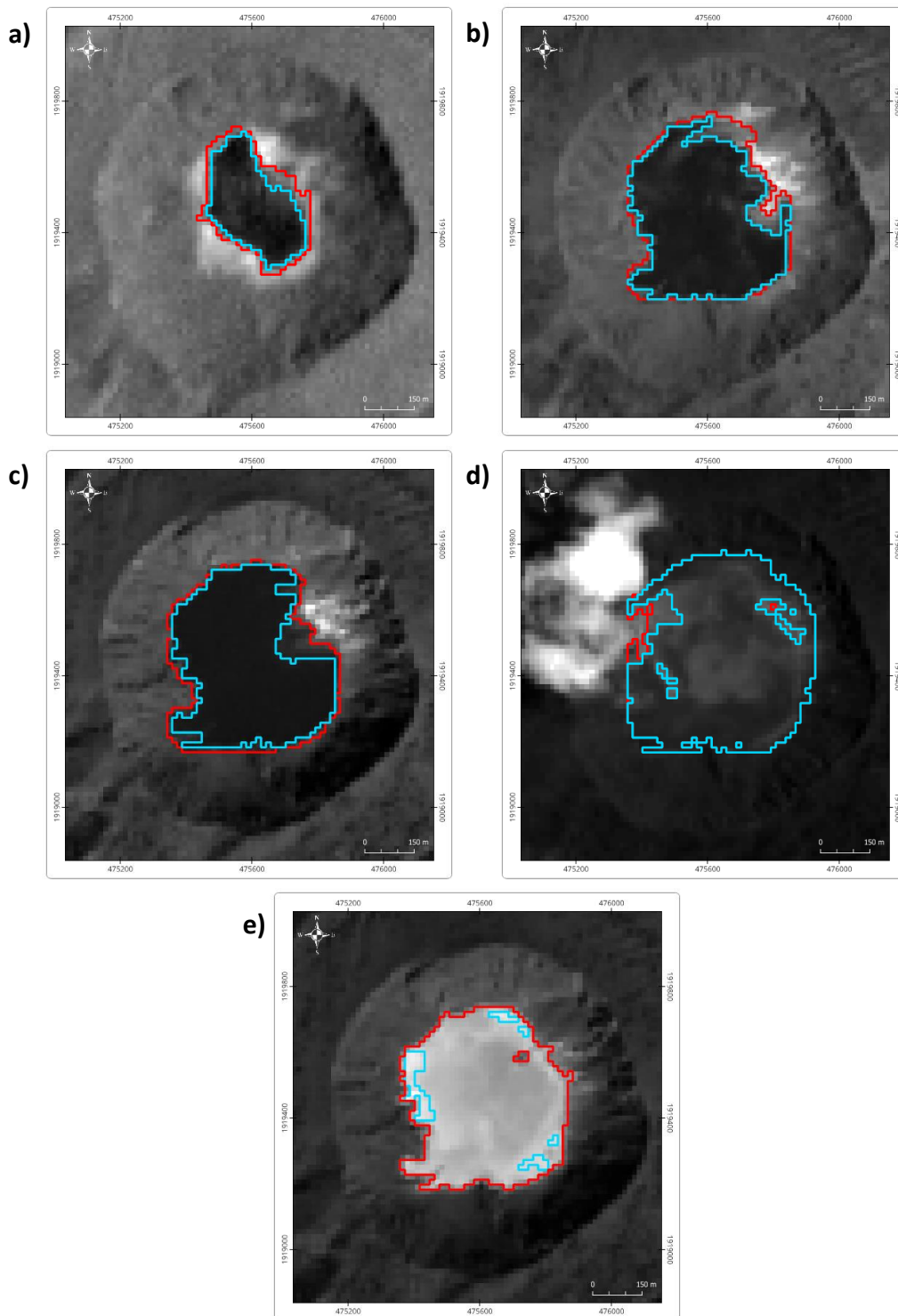
Considerando que la superficie es complicada de discriminar y que la zona de mayor incertidumbre es el límite entre lago-suelo, se consideraron dos rangos para determinar el contorno del lago, área mínima y máxima: el área mínima tomó en cuenta los ND con las tonalidades más oscuras del lago, y el área máxima abarcó de tonalidades oscuras a claras. Con esta información se determinaron los rangos de la Tabla 7 que permitieron diferenciar la superficie del lago del resto de la imagen.

Tabla 7. Valores máximos y mínimos de ND para determinar el área mínima y máxima de la superficie del lago.

Fecha Banda Pancromática	Área mínima		Área máxima	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
14-04-2013	0	18	0	37
25-04-2014	0	633	0	2236
22-01-2021	0	267	0	906
17-07-2021	558	2659	558	3621
25-01-2022	2612	4336	2612	5375

Como resultado de la clasificación visual de la banda pancromática se obtuvieron dos contornos de la superficie del lago para cada una de las fechas consideradas: contornos de área mínima y máxima. En la siguiente Tabla se muestran los contornos resultantes sobrepuestos en la respectiva banda pancromática de la fecha correspondiente.

Tabla 8. Resultados de la clasificación visual de la banda pancromática de abril 2013 (a) y 2014 (b), enero 2021 (c), junio de 2021 (d) y enero 2022 (e), respectivamente. En azul el contorno del área mínima y en rojo el área máxima.



En el centro de las imágenes pancromáticas de cada fecha se denota en tonos más oscuros la superficie cubierta por el lago, sin embargo, la imagen de enero 2022 tiene un comportamiento distinto, la reflectancia del agua es mayor, esta diferencia puede ser atribuida a un cambio en la concentración y composición química de las partículas en suspensión en el agua.

Por otro lado, el rango de valores de la Tabla 7 utilizados en la clasificación de las últimas dos imágenes difieren en gran medida de las primeras tres, esto se debe a la diferencia que hay en la resolución radiométrica de los satélites utilizados. Para Landsat 7 y 8 la resolución radiométrica es de 8 y 16 bits, respectivamente, este dígito es asociado a la cantidad de valores que puede asumir un píxel, mientras más grande sea la resolución mayor es el rango de valores de píxel en escala de grises que puede tener una imagen.

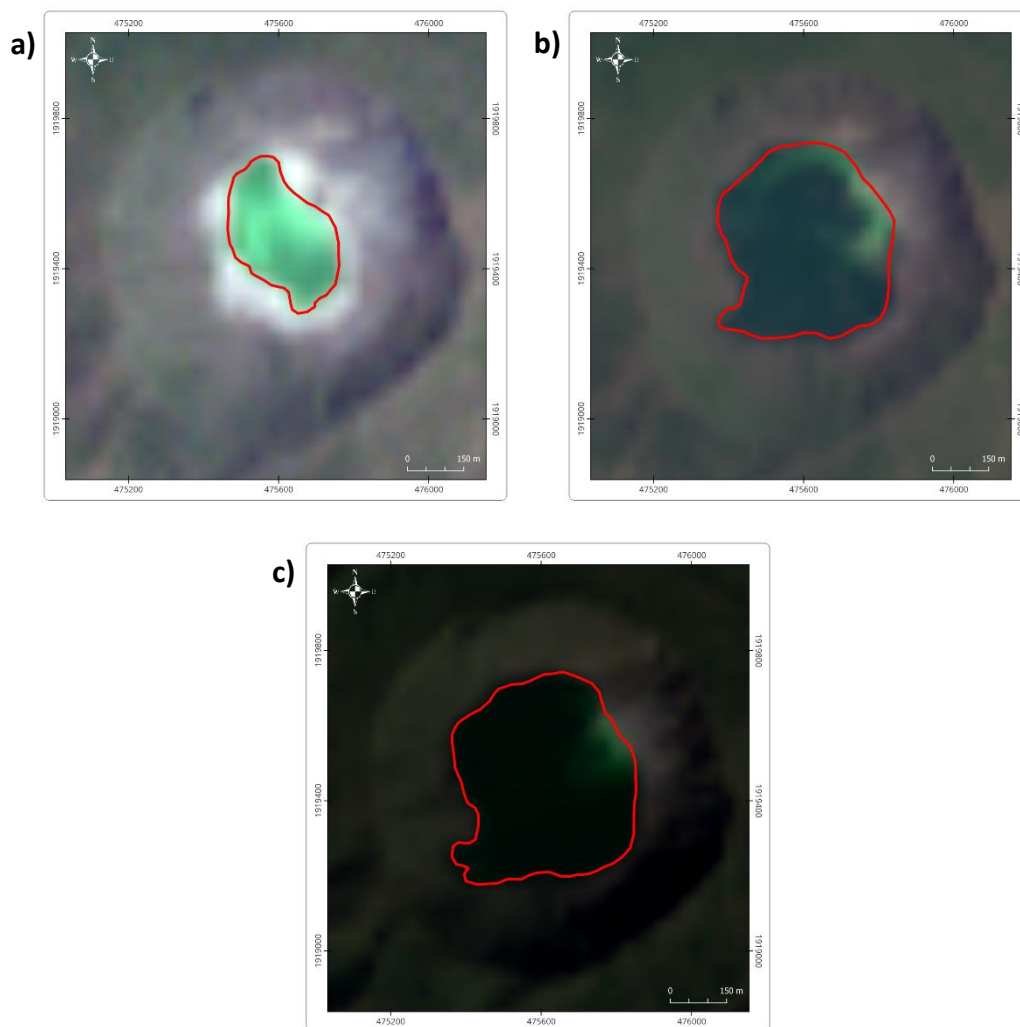
De acuerdo con la Tabla 8, los resultados visuales muestran que para 2013 y 2014, la mejor aproximación de la superficie del lago corresponde al área mínima (color azul). Mientras que para las imágenes de 2021 y 2022, la aproximación más cercana se obtuvo con el área máxima (color rojo).

Digitalización visual

A partir de la visualización de los archivos MTL disponibles de cada una de las imágenes se realizó una digitalización manual del área cubierta por el agua, la cual consistió en dibujar el contorno del lago sobre la composición en color real del archivo MTL. Como resultado, se obtuvieron los contornos mostrados en color rojo en la Tabla 9.

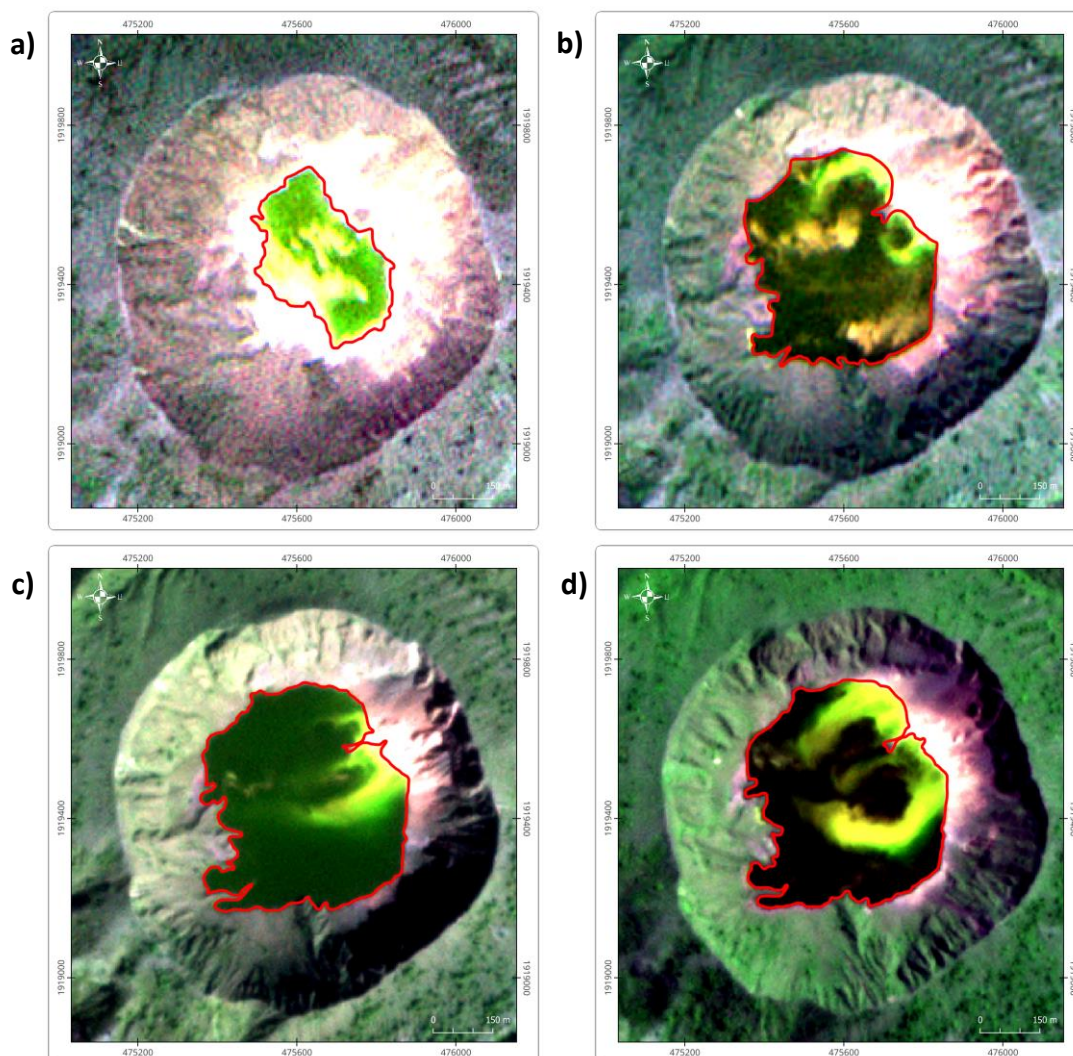
Esta técnica proporciona una representación adecuada de la extensión del lago, debido a la alta correspondencia entre el contorno digitalizado y el área cubierta por el agua. Sin embargo, no fue posible contar con los archivos MTL para todas las fechas de interés, por lo que no se generaron contornos para enero y junio de 2022 mediante esta metodología.

Tabla 9. Contornos en color rojo obtenidos a partir de digitalización visual en archivo MTL de abril 2013 (a), abril 2014 (b) y enero 2021 (c).



Del mismo modo, se realizó una digitalización visual utilizando composiciones RGB en color real de imágenes de alta resolución espacial de la Plataforma Planet Labs. Gracias a la alta resolución de las imágenes, los contornos resultantes mostradas en color rojo en la Tabla 10, presentan una mayor aproximación a la forma del lago.

Tabla 10. Contornos en color rojo obtenidos a partir de digitalización visual de composición en color real de imágenes de Planet Labs, abril 2013 (a), abril 2014 (b), enero (c) y junio 2021 (d).



En conjunto, ambas técnicas de digitalización visual proporcionaron buenos resultados; sin embargo, la metodología basada en imágenes de Planet Labs proporcionó una delimitación más precisa, gracias a su mayor resolución espacial y a la mejor definición del límite agua–tierra. Además, en ambos resultados es apreciable el incremento de área de 2013 a 2014, de 2014 a junio 2021 el área incrementa con pequeñas variaciones asociadas al cambio de la actividad volcánica interna.

Índice de agua de diferencia normalizada y clasificación supervisada

El NDWI es una técnica que sirve para resaltar y delimitar superficies cubiertas por agua mediante el uso de bandas multiespectrales (NIR y banda verde). La aplicación de esta metodología en las cinco imágenes analizadas permitió distinguir de manera eficiente la superficie del lago respecto al resto del cuerpo volcánico de El Chichón.

Los NDWI resultantes presentan valores que oscilan entre -1 y 1. En general, los valores positivos se asocian con cuerpos de agua; valores cercanos a cero indican poca cobertura vegetal o estrés hídrico; mientras que los valores negativos corresponden a superficies sin agua o con presencia de vegetación. No obstante, aunque estos intervalos son una referencia estándar, su comportamiento puede variar dependiendo de las características particulares de cada zona de estudio. Por ello, el análisis fue realizado de manera independiente para cada fecha, determinando los rangos de valores (Tabla 11) más adecuados para representar con precisión el área del lago.

Tabla 11. Rango de valores utilizados en clasificación de los NDWI para delimitar la superficie ocupada por el lago.

Fecha NDWI	Valor mínimo	Valor máximo
14-04-2013	0.278	1
25-04-2014	-0.01107	1
22-01-2021	-0.023	1
17-07-2021	-0.03	1
25-01-2022	0.27	0.9

Con base en estos intervalos y en la clasificación de píxeles obtenida a partir del NDWI de cada fecha, se generaron los contornos en color azul cian mostrados en la Tabla 12. Los resultados evidencian que el método empleado proporciona una aproximación confiable de la superficie cubierta por agua. Asimismo, las variaciones espaciales y temporales observadas a lo largo del periodo de estudio sugieren cambios relacionados con la actividad interna del volcán.

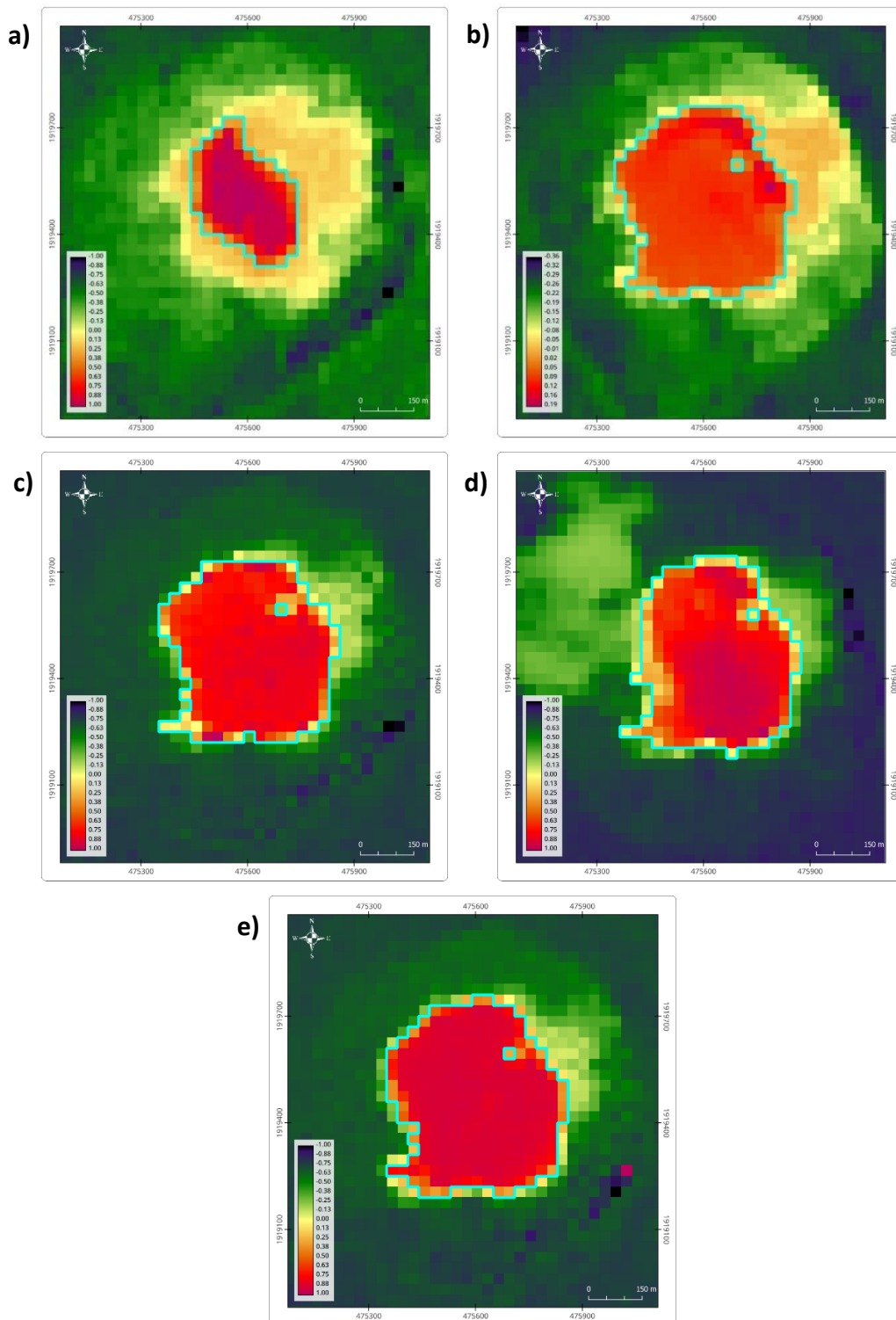
En 2013, el lago presentó una extensión menor y una distribución del NDWI menos homogénea. La zona central mostró valores altos, mientras que los bordes muestran una transición hacia valores moderados, indicando un cuerpo de agua más reducido y con menor saturación en zonas externas.

Para 2014, se observó un incremento notable en la extensión del lago. El NDWI muestra áreas más amplias con valores positivos, y la coincidencia entre las zonas de mayor índice y el contorno digitalizado confirma un crecimiento real del espejo de agua respecto a 2013.

En enero de 2021, el lago alcanzó una mayor homogeneidad en los valores altos del NDWI y una ampliación significativa del contorno. La delimitación es más continua y regular, mostrando un aumento en el volumen y estabilidad del cuerpo de agua durante esta temporada.

Sin embargo, en junio de 2021 se identificó una ligera disminución en los valores del NDWI, especialmente al noroeste del lago. Aunque el contorno general se mantuvo similar al de enero, la reducción en la intensidad del índice en ese sector se debe a la presencia de nubosidad que provocó la subestimación del área.

Tabla 12: Índices de agua de diferencia normalizada (NDWI), los valores positivos en color magenta representan la presencia de agua, y el contorno cian son las áreas obtenidas por reclasificación de valores positivos; abril 2013 (a), abril 2014 (b), enero 2021 (c), junio 2021 (d) y enero 2022 (e).



Finalmente, en enero de 2022 el lago recuperó e incluso superó la extensión observada en años anteriores. El NDWI vuelve a presentar altos valores de manera uniforme alrededor del cuerpo de agua y la delimitación del contorno muestra la mayor superficie registrada en todo el periodo analizado.

Clasificación supervisada

La clasificación supervisada es un método estadístico que agrupa píxeles con firmas espectrales similares. Con el fin de identificar la superficie cubierta por el agua del lago cratérico, se utilizó una composición en falso color (Infrarrojo cercano–Verde–Azul), la cual permitió maximizar el contraste espectral entre el agua y los depósitos volcánicos del cráter. Esta combinación resalta eficazmente la absorción del infrarrojo por el agua, facilitando su diferenciación respecto a otros tipos de cobertura.

Para la identificación de clases se seleccionaron muestras correspondientes a seis tipos de cobertura presentes en todas las imágenes (Tabla 13). Estas muestras fueron respaldadas en un archivo de entrenamiento, a partir del cual el método de clasificación supervisada comparó las firmas espectrales de cada píxel y le asignó la categoría con la que presentó mayor similitud espectral.

Tabla 13: Clases de la cobertura con su respectivo ID para el archivo de entrenamiento utilizado en la clasificación supervisada.

ID	Clase / Superficie	Color
1	Lago	Azul intenso, azul
2	Suelo desnudo	Café claro, gris, verde claro
3	Vegetación	Rojo brillante, rosa
4	Sombras	Negro
5	Suelo alrededor del lago	Cian, azul aqua
6	Nubes	Blanco

Como resultado del proceso, de cada combinación RGB se generó seis polígonos correspondientes a las clases definidas. Dado el objetivo del estudio, únicamente se conservaron los polígonos asociados a la clase “Lago”, que se presentan en la Tabla 14.

Los contornos en color amarillo, sobrepuestos sobre las composiciones en falso color de imágenes (Tabla 14), muestran que la clasificación supervisada proporciona una delimitación adecuada del lago cratérico. De igual manera que las metodologías previas este método permite identificar las variaciones espaciales observadas en campo entre 2013 y 2022.

En la imagen de 2013 (Landsat 7), también se presenta la menor extensión registrada del lago en el periodo de estudio. La fuerte absorción del infrarrojo por el agua generó un contraste espectral claro con las laderas internas del cráter, permitiendo una aproximación confiable.

Para abril de 2014 (Landsat 8), la mejora en la resolución radiométrica del sensor permitió una delimitación más precisa y continua del cuerpo de agua, evidenciándose el incremento en la superficie del lago respecto

a 2013. La variabilidad espectral identificada en la porción noreste podría estar asociada a diferencias en turbidez o composición química, posiblemente vinculadas a la actividad del campo fumarólico norte.

En enero de 2021, el lago presentó una mayor extensión y un alto contraste entre el agua y los depósitos volcánicos del cráter. El tono más oscuro en la porción central puede asociarse con mayor profundidad o menor turbidez, reflejando una menor actividad en las aportaciones hidrotermales durante esa fecha.

Para junio de 2021, la nubosidad en el sector noroeste afectó la reflectancia del agua y generó incertidumbre en la delimitación del lago, especialmente en los bordes. Este resultado evidencia la sensibilidad de la clasificación supervisada a las condiciones atmosféricas y resalta la importancia de utilizar imágenes libres de nubes, aunque a veces las condiciones climáticas no lo permiten.

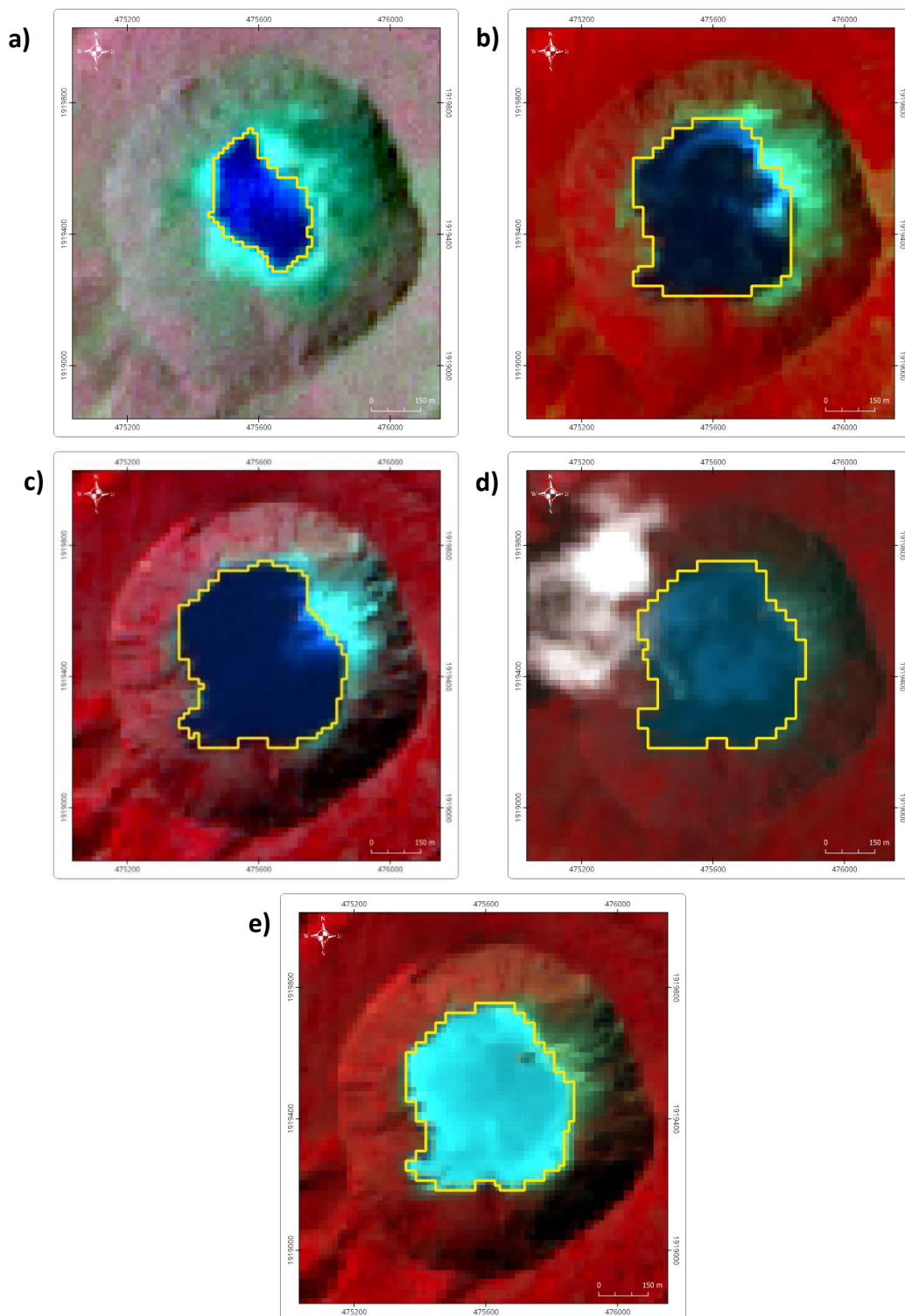
En enero de 2022, se observa un lago de mayor extensión con un incremento en la reflectancia del agua, este aumento podría estar relacionado a mayor turbidez o cambios en la composición y concentración de partículas en suspensión, asociados con variaciones en la actividad hidrotermal del cráter. La delimitación fue más homogénea, lo cual indica que las condiciones ambientales y de iluminación fueron favorables para la detección del límite agua–tierra.

En conjunto, los resultados muestran un crecimiento progresivo de la superficie del cuerpo de agua entre 2013 y 2022, con variaciones asociadas a la descarga de los manantiales internos, presencia de nubosidad o cambios en la transparencia del agua. Asimismo, en todas las imágenes se observa un color cian en áreas circundantes al lago. Esta tonalidad podría corresponder a sedimentos o depósitos minerales derivados de la composición química del agua del lago, que al bajar el nivel quedan expuestos sobre el suelo desnudo. En la imagen de 2022, la mayor reflectancia muestra que dicho elemento podría encontrarse en mayor concentración, suspensión y disuelto dentro del cuerpo de agua, mientras que en años previos parece haberse depositado sobre las orillas del cráter. Esto explicaría la mayor presencia de reflectancia en color azul cian y el aumento en la respuesta espectral en la superficie circundante.

El seguimiento multitemporal del lago craterico a través de la digitalización visual, el índice NDWI y clasificación supervisada facilitaron la identificación del cuerpo de agua. El análisis de la banda pancromática permitió discriminar con detalle el límite agua-suelo, con las áreas máximas y mínimas determinadas. Con la digitalización visual de los archivos MTL de imágenes Landsat y el uso de composiciones en color real de Planet Labs proporcionaron las mejores aproximaciones de los contornos, debido a la mayor resolución espacial de estas imágenes.

Por su parte, el NDWI y la clasificación supervisada, además de permitir la estimación del área del lago, contribuyeron en la identificación de otros factores, como la presencia de turbidez, partículas en suspensión y respuestas espectrales asociadas a concentraciones de elementos en el suelo desnudo localizado en las orillas del lago.

Tabla 14. Composiciones RGB a falso color (RGB432-Landsat 7, RGB543-Landsat 8) en el que sobresale el contorno del lago en color amarillo, resultado de la clasificación supervisada; abril 2013 (a), abril 2014 (b), enero 2021 (c), junio 2021 (d) y enero 2022 (e).



Estas observaciones respaldan la interpretación de que el lago cratérico mantiene una dinámica activa, vinculada a procesos hidrotermales que modifican su área, volumen y concentración química, y sus propiedades espectrales en escalas temporales cortas. En conjunto, los resultados de las cuatro metodologías evidencian variaciones en la extensión superficial del lago, con una tendencia general de incremento desde 2013 hasta los años más recientes, posiblemente relacionada a una mayor descarga de las fumarolas y manantiales hidrotermales del volcán.

Si bien el análisis superficial mediante imágenes satelitales es una herramienta útil para estimar el área y el crecimiento del lago a lo largo del tiempo, la ventana temporal de diez años considerada en este estudio, así como el carácter puntual de las cinco imágenes analizadas, limitan conocer de manera integral su evolución. Sabemos que la dinámica del lago es altamente influenciada por los procesos hidrotermales activos, lo que limita la capacidad de capturar toda su complejidad temporal a corto tiempo. Sin embargo, este análisis proporciona información valiosa para estimar cambios en el área superficial y realizar aproximaciones al volumen del lago como complemento de monitoreo volcánico.

Estimación de área y volumen

Una vez analizados y comparados los resultados obtenidos mediante las cuatro metodologías de delimitación del lago cratérico, se procede al cálculo cuantitativo del área superficial y el volumen del cuerpo de agua. Estos cálculos se realizaron a partir de los contornos obtenidos directamente en campo como de la información del procesamiento de imágenes satelitales, así como de los modelos batimétricos de profundidad. Esta información conforma la base para la estimación y análisis numérico de la evolución del lago.

En primer lugar, en la Tabla 15 se presentan los valores de área calculados para cada uno de los contornos analizados. Las dos primeras columnas corresponden a las estimaciones obtenidas directamente en campo, principalmente mediante puntos GPS levantados alrededor del lago, fotografías terrestres y, en menor medida, a partir de fotografías aéreas adquiridas mediante vuelos de dron. Las columnas restantes muestran las áreas calculadas a partir de los contornos derivados del procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

Tabla 15. Área estimada [m²] a partir de contornos del lago cratérico de El Chichón: las dos primeras columnas corresponden a datos obtenidos directamente en campo y las restantes a estimaciones derivadas del procesamiento de imágenes satelitales.

Contorno Fecha	Campo 1 GPS	Campo 2	Digitalización visual MTL. Landsat	Digitalización visual. Planet Labs	Contorno NDWI. Landsat	Contorno Banda 8, Max. Landsat	Clasificación Supervisada. Landsat
abril 2013	80498.7		78891.0	93952.1	85567.2	93898.7	82189.5
abril 2014	190201.7	180912.4	193816.3	195536.2	209864.8	222024.3	212341.7
enero 2021	239298.6	230561.4*	217592.2	227607.0	205361.2	239362.9	223150.2
junio 2021	232346.1*			220682.3	202659.1	288901.8	230130.7
enero 2022					217971.1	220898.4	226077.5

*Contornos obtenidos por vuelo de Dron

La tabla anterior contiene renglones sin información debido a la ausencia de datos satelitales en la fecha correspondiente, o bien, no hubo visita de campo durante ese periodo de tiempo. En consecuencia, también faltará información durante esos periodos en cálculos de volumen. A partir de la tabla, se generó el siguiente gráfico que muestra la relación entre el tiempo y área.

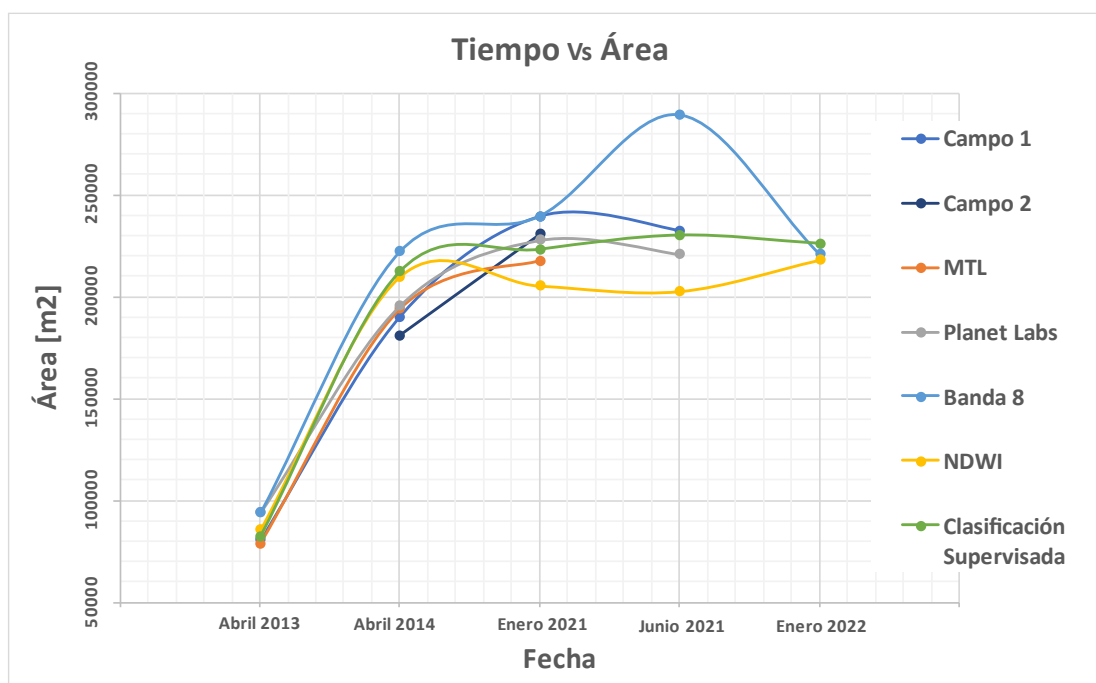


Figura 58. Gráfico de Tiempo vs Área de cada una de las estimaciones de área por los diferentes métodos de obtención de contorno. El eje temporal comprende un periodo total de 10 años, de los cuales entre 2014 y 2021 se presenta un intervalo de 7 años sin información.

El gráfico muestra que todas las técnicas de extracción de contornos evidencian un aumento gradual del área entre abril de 2013 y 2014. De igual forma, en su mayoría los contornos muestran que el área del lago aumento entre abril de 2014 y enero de 2021, con excepción del contorno obtenido mediante el cálculo de NDWI. Por el contrario, entre enero y junio 2021, las técnicas indican una disminución del lago, a excepción del método de clasificación supervisada y el de banda 8, que muestran incremento.

Con el propósito de contrastar el área registrada en campo con los resultados obtenidos mediante métodos indirectos aplicados a imágenes satelitales se realizaron gráficos comparativos, en total se aplicaron cinco técnicas de análisis satelital. Sin embargo, los resultados derivados del índice NDWI y de la Banda 8 fueron descartados para este análisis, debido a que mostraron una subestimación y sobrestimación significativa del área, respectivamente, en relación con los valores registrados en campo.

Los tres métodos restantes se presentan en los siguientes tres gráficos comparativos. En cada uno, la curva Campo 1 (color azul) corresponde al área estimada en campo entre los años 2013 y 2021, y se utiliza como referencia base, mientras que la curva 2 representa el área calculada con uno de los métodos de estimación indirecta.

De esta forma, la siguiente comparación entre las curvas permite determinar cuáles técnicas ofrecen estimaciones más consistentes respecto a las mediciones reales y, en consecuencia, definir cuál es la más confiable para futuros estudios.

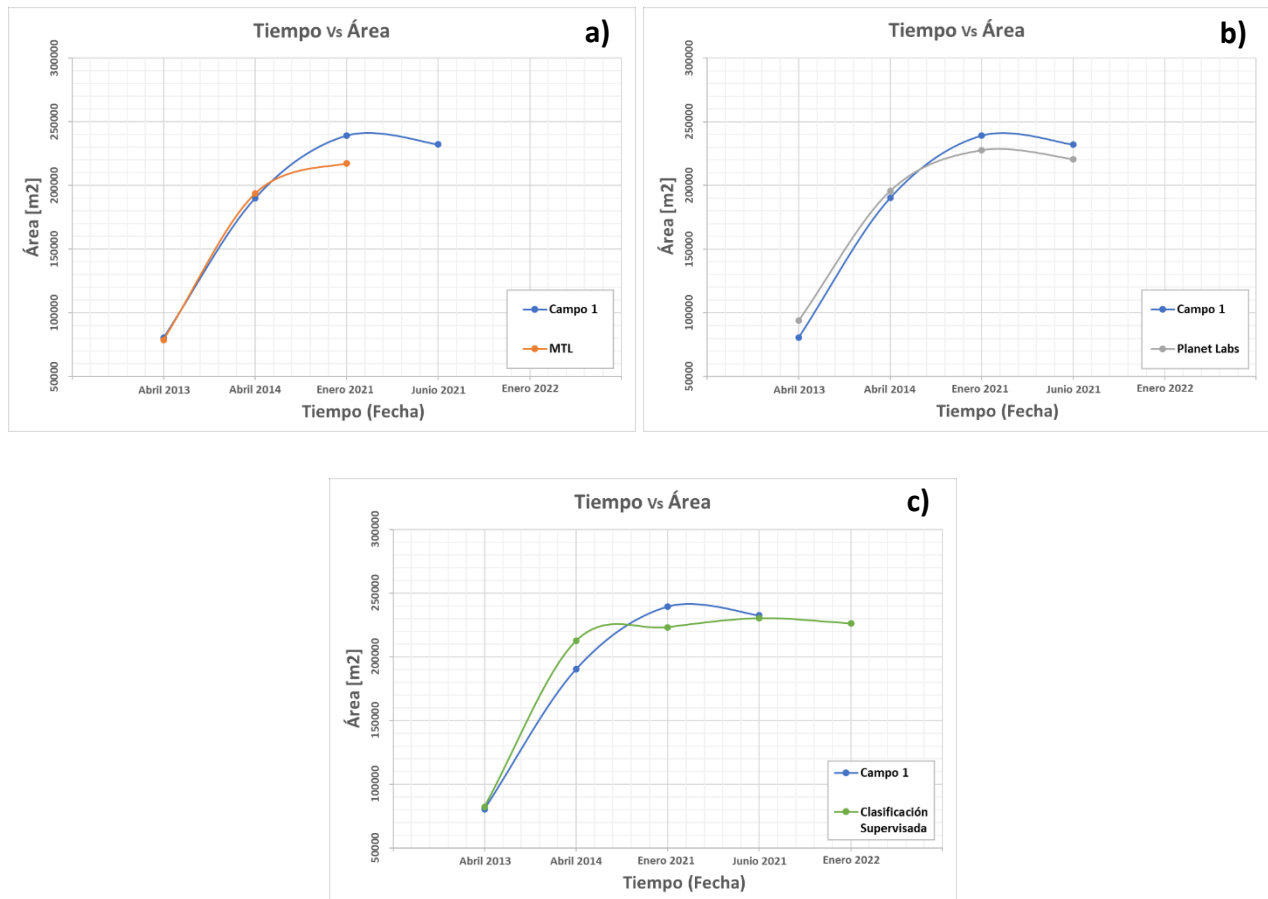


Figura 59. Gráficos comparativos de fecha contra área estimada por cada uno de los métodos de obtención de contornos, en cada grafico se presenta la curva Campo 1 con fines comparativos. a) MTL, b) Planet Labs, c) Clasificación supervisada.

- Gráfico MTL. La curva MTL presenta menor amplitud en enero 2021 en comparación con la curva 1, sin embargo, en el resto del periodo el comportamiento es similar.
- Gráfico Planet Labs. En los dos primeros puntos la curva Planet Labs presenta valores mayores que la curva 1, mientras que en los dos últimos puntos los valores son menores. A pesar de estas diferencias, ambas curvas mantienen una tendencia similar.
- Gráfico Clasificación Supervisada, CS. A diferencia de los gráficos 1 y 2, la Curva de CS presenta un mayor acercamiento a la curva 1. Sin embargo, en los años 2014 y enero de 2021 se observan diferencias notables en la amplitud de los valores.

En términos generales, los tres métodos muestran cierto grado de correspondencia con el área registrada en campo, aunque con variaciones en magnitud y tendencia. En algunos periodos en específicos, ciertos métodos tienden a sobreestimar o subestimar el área, lo que refleja las diferencias relacionadas con la resolución espacial y espectral o procesamiento de cada técnica de percepción remota.

De forma particular, el método MTL (gráfico a) presenta un comportamiento general similar al de campo, aunque con una subestimación notable en enero de 2021. En contraste, los métodos que muestran mayor similitud respecto a la curva de campo son los presentados en los gráficos b (Planet Labs) y c (clasificación supervisada), ya que mantienen una trayectoria cercana a la curva de campo durante casi todo el periodo de estudio. Estos resultados sugieren que Planet Labs y la clasificación supervisada presentan una mayor capacidad para reproducir los valores observados en campo, por lo que podrían considerarse como los métodos más adecuados para la estimación remota de área en futuros proyectos.

Volumen

El cálculo de volumen se realizó con las áreas de los contornos previamente descritas y con los modelos batimétricos de profundidad. Se trabajó con los modelos de abril 2014, enero y junio de 2021. Con cada una de las batimetrías se estimó el volumen (Tabla 16) utilizando los contornos registrados en campo y los obtenidos con las técnicas de análisis satelital.

Tabla 16. Estimaciones de volumen del lago cratérico con modelos batimétricos de profundidad. Cada renglón corresponde a un contorno calculado, en columnas se presenta el área y volumen estimado con cada contorno en la fecha de estudio.

Malla Contorno	Área 2014 [m ²]	Malla 2014 Volumen [m ³]	Área Enero 2021 [m ²]	Malla Enero 2021 Volumen [m ³]	Área Junio 2021 [m ²]	Malla Junio 2021 Volumen [m ³]
Campo 1	190201.685	1432213.996	239298.617	2061987.791	232346.100*	2007846.349
Campo 2	180912.362	1399927.572	230561.400*	2017566.043		
MTL	193816.311	1454396.910	217592.215	1960415.849		
Planet Labs	195536.166	1451223.208	227607.036	1979053.086	220682.317	1992471.070
Banda 8	222024.314	1537189.179	239362.927	2039003.652	288901.837	
NDWI	209864.770	1503968.432	205361.235	1873700.785	202659.120	1891253.332
Clasif Super	212341.714	1512659.114	223150.201	1982990.608	230130.686	2001572.708

*Contornos obtenidos por vuelo de Dron

La Tabla 16 y Figura 60 muestran los resultados obtenidos con cada uno de los métodos aplicados en la delimitación del contorno y la estimación de volumen del lago por año. En el gráfico se observa que todos los métodos muestran un incremento en la extensión superficial del cuerpo de agua entre abril de 2014 y enero de 2021. Los puntos azules correspondientes a 2014 fueron calculados a partir de un modelo batimétrico con una profundidad máxima de 13 m. Siete años después, en enero de 2021, los valores representados con puntos verdes se determinaron con una profundidad máxima registrada de 15 m, lo que evidencia un aumento en el área y volumen del lago durante ese intervalo de tiempo.

Sin embargo, entre enero y junio de 2021 los resultados son inconsistentes. Para junio de 2021 representado en colores naranja, el volumen calculado a partir del área registrada en campo indica una disminución del lago, mientras que los otros tres métodos reflejan un incremento en el volumen.

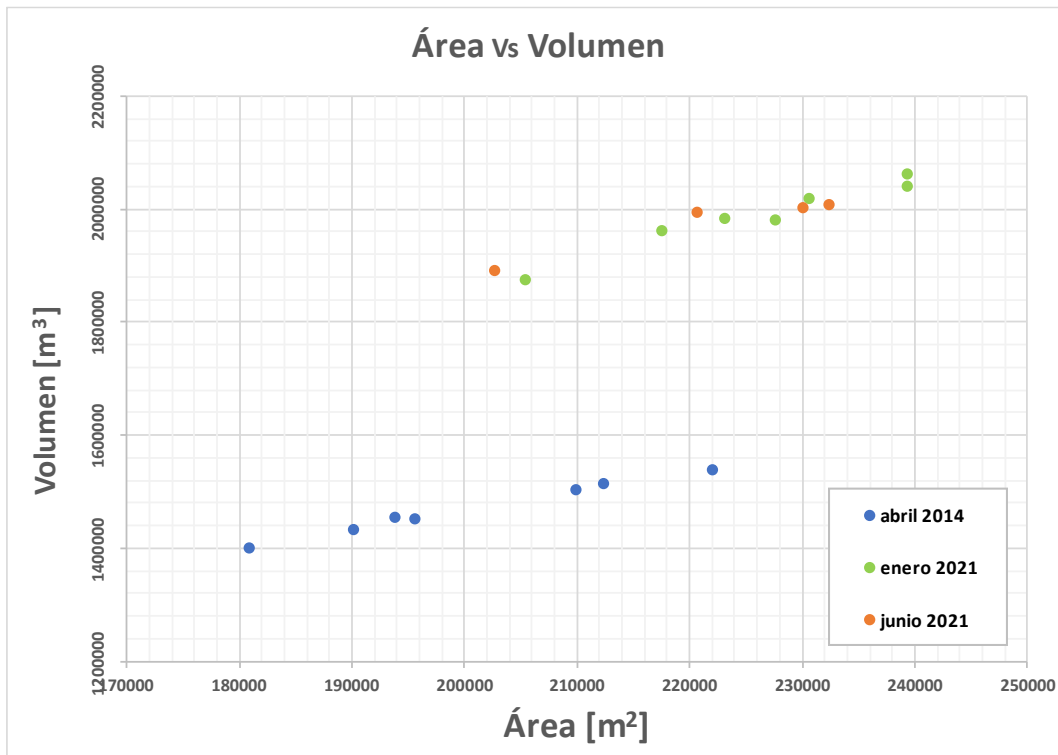


Figura 60. Gráfico de área contra volumen durante el periodo de 2014 a 2021. En el eje X los círculos corresponden a cada una de las áreas obtenidas por los diferentes métodos contra su volumen (eje Y) estimado con cada modelo batimétrico (azul-abril 2014, verde-enero 2021, naranja-junio 2021).

Para el análisis individual por fecha, se elaboraron gráficos anuales que muestran los métodos aplicados (Figura 61). De acuerdo con el análisis previo, también en esta sección se descartaron los resultados de área y volumen obtenidos mediante los métodos satelitales de índice NDWI y banda 8, debido a su tendencia de subestimar o sobreestimar significativamente las áreas.

Cada gráfico presenta los métodos analizados, en ellos se compara el valor de área calculado con el volumen correspondiente.

La imagen a) de la Figura 61 muestra que las estimaciones de área difieren entre sí respecto al área registrada en campo. Sin embargo, los métodos que presentan valores más cercanos al volumen real representado en azul claro y calculado a partir del contorno registrado en campo son los correspondientes a los métodos MTL y Planet Labs. Por su parte, en la imagen b), los métodos más próximos al volumen real se obtuvieron con los contornos de Planet Labs y clasificación supervisada. Por último, la imagen c) demuestra que el método de clasificación supervisada resulta el de mayor confiabilidad, seguido por Planet Labs.

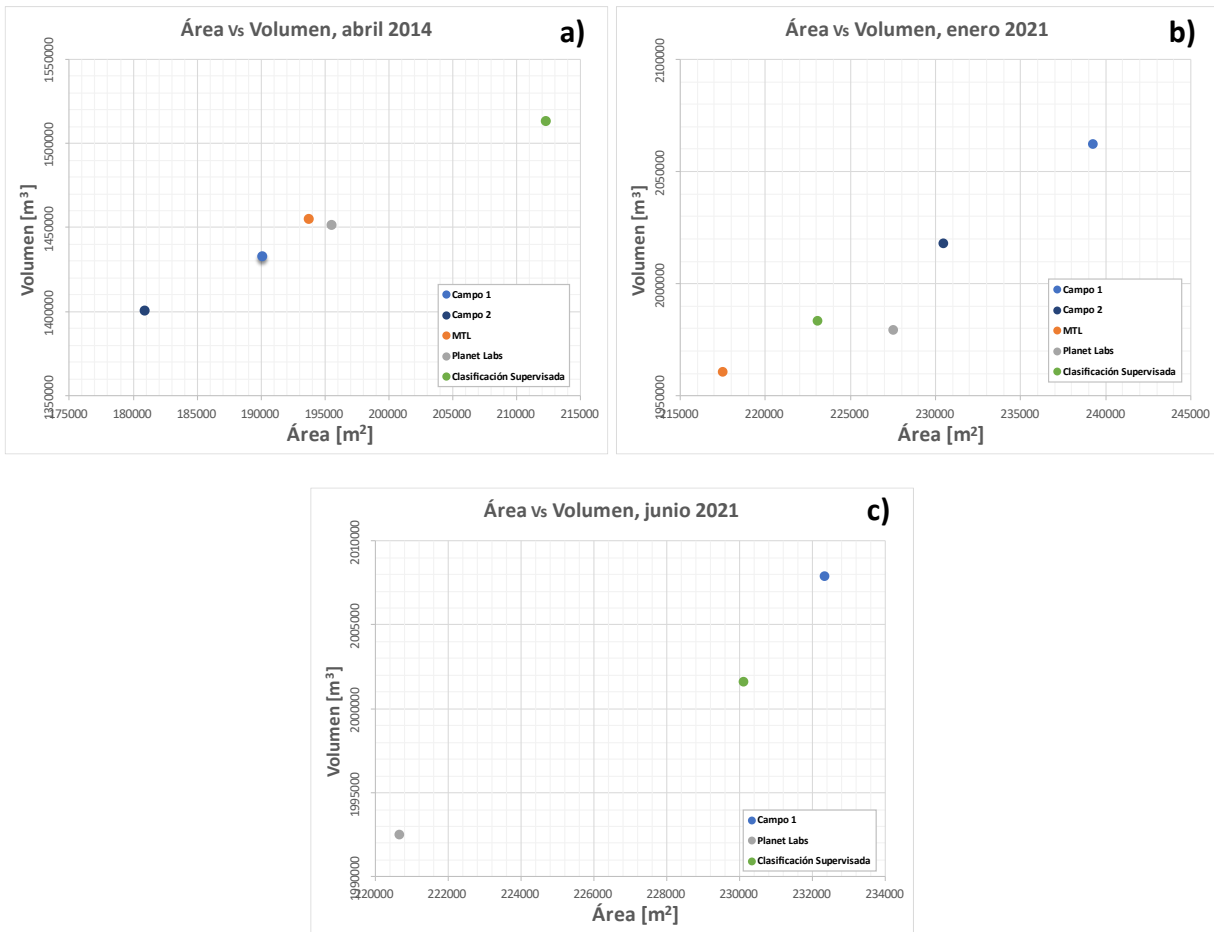


Figura 61. Gráficos de área contra volumen, el eje X corresponde a cada una de las áreas obtenidas por los diferentes métodos satelitales contra su volumen en el eje Y estimado con cada modelo batimétrico. a) abril 2014, b) enero 2021, c) junio 2021.

En general, al comparar las estimaciones de área y volumen con los datos de referencia obtenidos en campo, el método basado en imágenes de Planet Labs demostró mayor precisión y consistencia en los escenarios analizados. Sus estimaciones se mantuvieron cercanas a los valores reales tanto en la comparación general como en el análisis individual por fecha, superando a otros métodos como clasificación supervisada, que, si bien también mostró buenos resultados, presentó mayor variabilidad en abril de 2014. Por lo tanto, las imágenes de Planet Labs se identifican como el método más confiable dentro del conjunto evaluado para la estimación del contorno y volumen del cuerpo de agua.

Formula empírica

Con el objetivo de monitorear indirectamente la dinámica del lago a lo largo del tiempo, se propuso la elaboración de una fórmula empírica para estimar su volumen. Esta fórmula se desarrolló a partir de los contornos y profundidades registradas durante las campañas de campo realizadas en el volcán El Chichón en abril de 2014, enero y junio de 2021, y los contornos inferidos mediante el análisis de imágenes satelitales, lo que permitió extender la serie temporal de observaciones.

El cálculo de volumen del lago se estimó asumiendo que este puede tomar forma de tres cuerpos geométricas con base elíptica; casquete esférico, cono y cono truncado. La Tabla 17 presenta un resumen de los parámetros geométricos utilizados y los volúmenes estimados para el lago del cráter de El Chichón correspondientes a las tres fechas de campañas de medición realizadas. Los datos se organizan por método de delimitación de contorno, incluyendo mediciones de campo e inferidas mediante imágenes satelitales (MTL, clasificación supervisada y Planet Labs). Por cada método se reporta el área estimada de la base elíptica, los radios mayor y menor calculados a partir del contorno correspondiente, la profundidad máxima registrada (constante para todos los métodos en la misma campaña de medición), y los volúmenes calculados para cada uno de los cuerpos geométricos.

Tabla 17. Estimaciones de volumen del lago cratérico para abril de 2014, enero y junio de 2021, a partir de la fórmula de volumen de cuerpos elípticos; casquete esférico, cono y cono truncado. Considerando los radios máximos y mínimos de cada uno de los contornos, así como el volumen estimado con las fórmulas de los cuerpos geométricos.

Método de contorno	Base Elíptica			Prof. máx. (m)	Vol. Casquete esférico (m³)	Vol. Cono (m³)	Vol. Cono truncado (m³)
	Área (m²)	Radio mayor (m)	Radio menor (m)				
Abril 2014							
Campo	692589.233	543	406	13	4502980.362	3001220.011	4504702.818
		237	125				
MTL	692353.614	521	423		4501448.836	3000198.993	4503494.643
		237	125				
Clasificación supervisada	875825.766	576	484		5694017.828	3795244.987	5435733.159
		237	125				
Planet Labs	668687.996	550	387		4347622.323	2897647.984	4381980.515
		237	125				
Enero 2021							
Campo	835384.044	587	453	15	6267147.477	4176920.221	6208333.144
		310	110				
MTL	764742.192	535	455		5737333.584	3823710.959	5790484.385
		310	110				
Clasificación supervisada	840680.769	583	459		6306872.916	4203403.847	6239551.222
		310	110				
Planet Labs	770840.023	587	418		5783067.319	3854200.115	5826667.927
		310	110				
Junio 2021							
Campo	855593.910	577	472	20	8560127.887	5703959.398	10074796.46
		374	188				
MTL	--	--	--		--	--	--
Clasificación supervisada	880264.837	573	489		8806837.158	5868432.245	10280757.32
		374	188				
Planet Labs	740862.946	578	408		7412818.250	4939086.306	9108612.896
		374	188				

Los valores de área presentados en la Tabla 17, estimados a partir de la suposición de una superficie elíptica, se comparan con los de la Tabla 16, los cuales corresponden a áreas derivadas directamente de los contornos obtenidos en campo y mediante imágenes satelitales. En promedio, las áreas de la Tabla 17 son aproximadamente 3.6 veces mayores que los reportados en la Tabla 16. Esto se debe a que las áreas de la Tabla 16 representan contornos reales del lago, caracterizados por geometrías irregulares y no ideales, mientras que la Tabla 17 considera una elipse ideal con radios definidos a partir de los extremos máximos de los contornos, lo que genera valores mayores.

Para el análisis de los resultados presentados en la Tabla 17, durante abril de 2014 la profundidad máxima registrada fue de 13 m, mientras que las áreas estimadas varían entre 668687.996 m² (Planet Labs) y 875825.766 m² (clasificación supervisada). El volumen calculado oscila entre 2.8 y 5.6 millones de m³.

En enero de 2021, la profundidad máxima aumenta a 15 m, el área más amplia fue estimada con el método de la clasificación supervisada resultando 840680.769 m². En consecuencia, los volúmenes aumentan con un rango de 5.7 a 6.3 millones de m³ para el casquete esférico, de 3.8 a 4.2 millones de m³ para el cono y de 5.7 a 6.2 millones de m³ para el cono truncado.

Durante junio 2021, la profundidad máxima incrementa a 20 m, las áreas estimadas varían entre 740862.946 m² y 880264.837 m². En esta fecha se obtienen los volúmenes más altos del periodo analizado, con un rango general de 4.93 a 10 millones de m³, dependiendo del modelo geométrico.

Para facilitar la interpretación los resultados de volumen de los diferentes cuerpos geométricos, se generaron los siguientes gráficos. Los gráficos se organizan por método de contorno (campo, MTL, clasificación supervisada y Planet Labs) y muestran los volúmenes estimados para cada uno de los cuerpos geométricos en función del área de la base elíptica.

A partir de los gráficos generados se observa que los modelos geométricos influyen significativamente en la estimación del volumen. Los modelos de casquete esférico (azul) y el cono truncado (gris) otorgan valores similares; sin embargo, en algunos casos el cono truncado tiende a sobrestimar los valores. En contraste, el modelo de cono (amarillo) tiende a subestimar los valores.

Además, se denota que la profundidad máxima y el área superficial son los factores con mayor impacto sobre el volumen estimado. A medida que pasan los años, se observa un aumento de volumen, lo cual podría estar relacionado con el incremento en la descarga de los manantiales hidrotermales que alimentan el sistema. Es importante recordar que la actividad hidrotermal del lago es muy variable; por lo tanto, durante los periodos en los que no se cuenta con mediciones o información satelital es posible que el volumen también haya experimentado disminuciones.

Por otro lado, el método de clasificación supervisada tiende a estimar áreas ligeramente mayores, lo cual se refleja en volúmenes más altos para todos los modelos geométricos, mientras que en la mayoría de los casos las imágenes de Planet Labs otorgan valores mínimos de área y volumen.

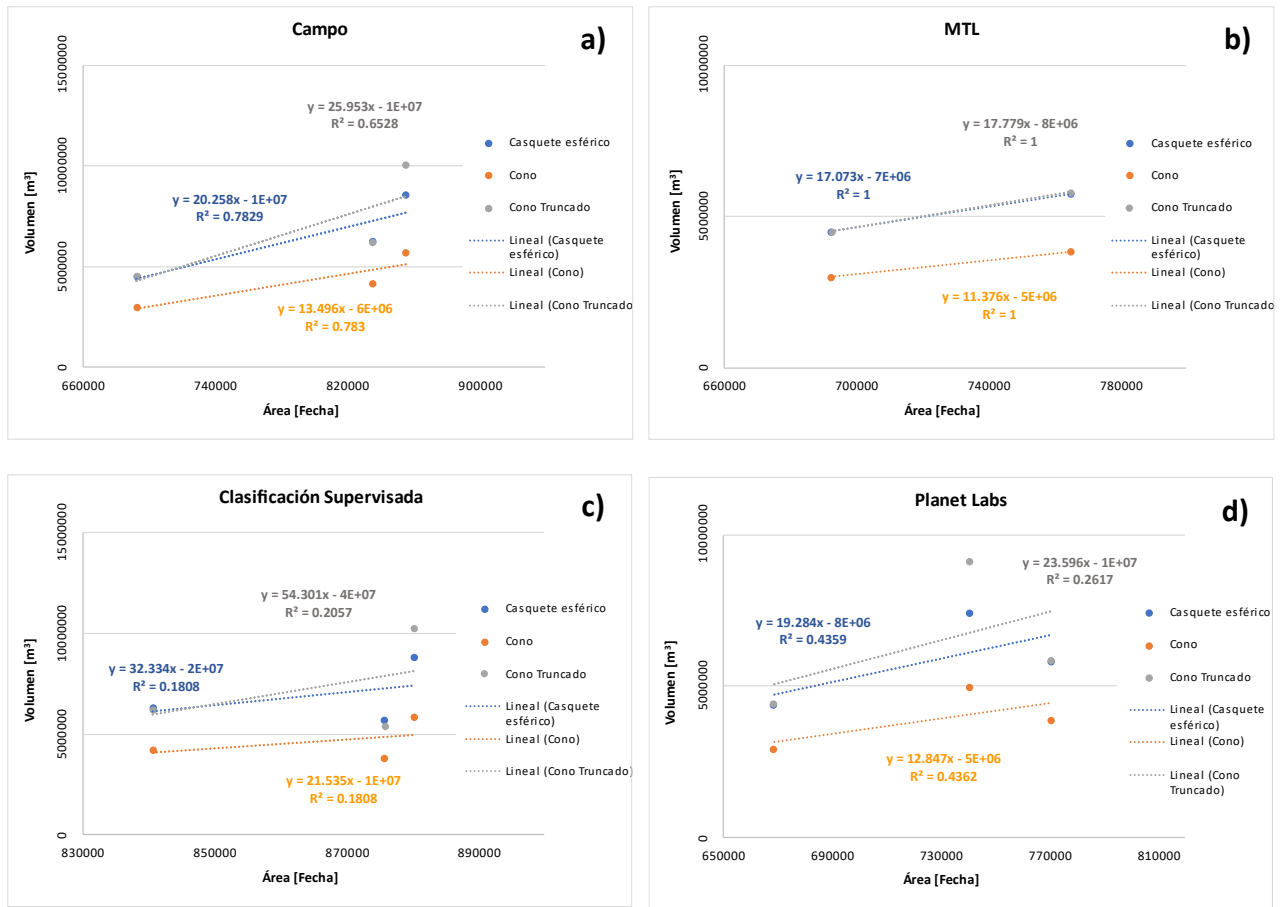


Figura 62: Gráficos de área contra volumen por método de contorno del lago, el eje X corresponde al área estimada contra el volumen calculado a partir de cada uno de cuerpos geométricos, y la línea de tendencia de cada cuerpo geométrico. En azul – casquete esférico, gris – cono, amarillo – cono truncado. a) abril 2014, b) enero 2021, c) junio 2021.

La estimación del volumen del lago cratérico es un parámetro fundamental para el monitoreo de la dinámica hidrogeológica y de las variaciones de la actividad volcánica. Si bien los modelos batimétricos obtenidos por mediciones directas en campo permiten calcular aproximaciones confiables del volumen, la elaboración de una fórmula empírica ofrece una herramienta útil para estimarlo a partir de variables de fácil medición, como el área superficial calculada a través de imágenes satelitales.

Con base en los valores de volumen obtenidos para cada uno de los métodos de contorno en el periodo de estudio (Tabla 17), y considerando la base elíptica con los tres cuerpos geométricos analizados (casquete esférico, cono y cono truncado), se buscó identificar el modelo que mejor represente la morfología del lago. Para ello, se compararon las estimaciones teóricas obtenidas mediante los modelos geométricos con los volúmenes calculados a partir de los datos batimétricos directos, evaluando el error relativo de cada caso. Estos resultados se presentan en la Tabla 18, donde se resumen los cálculos de volúmenes estimados de

forma directa e indirecta para las tres fechas de estudio y método de contorno, así como el error relativo calculado respecto al volumen para cada modelo geométrico y su correspondiente factor de corrección.

La idealización de la base elíptica y el cuerpo geométrico permite utilizar modelos geométricos simples para la estimación del volumen, mientras que las áreas reales sirven como referencia para generar una relación empírica entre área superficial y volumen.

Los resultados presentados en la Tabla 18 y en las Figuras 62 muestran claramente que los cuerpos geométricos tienden a sobreestimar significativamente el volumen en comparación con el cálculo directo, los valores positivos de error indican dicha sobrestimación. En particular, el casquete esférico sobreestima hasta 4.4 veces el valor real de volumen, el cono truncado hasta 5.1 veces y el cono de 1.9 a 2.9 veces. Este último es el que presenta mejores estimaciones junto al contorno de las imágenes de Planet Labs, a partir de esto y sabiendo que el cráter tiene una forma más próxima al de un cono truncado se trató de generar la fórmula empírica basada en el análisis y comportamiento estadístico en el tiempo del volumen.

Sin embargo, a pesar de que las fórmulas fueron calibradas con valores reales, las estimaciones derivadas de cada uno de los contornos de área continuaron sobreestimando el cálculo real de volumen, por lo cual no lograban representar el comportamiento del volumen. En este contexto, surgió la necesidad de replantear el enfoque y buscar una relación más robusta entre las variables.

Para cumplir dicho objetivo, se realizó un análisis en el que era crucial encontrar una relación directa entre el área superficial y volumen, utilizando como base los cuerpos geométricos y eliminando así la dependencia de la profundidad o altura. A partir de estos criterios, se derivó la ecuación 10, la cual expresa el volumen como una función de tipo potencial del área superficial, dado que se observó en el periodo de estudio que el volumen aumenta más rápidamente que el área. Este comportamiento es consistente, ya que a medida que la profundidad aumenta, el área también tiende a expandirse.

$$V = k * A^{1.5} \tag{10}$$

Donde:

V : volumen del lago

k : factor de corrección

A : área superficial

Esta relación permite estimar el volumen del lago a partir de contornos de superficie obtenidos por imágenes satelitales, sin necesidad de mediciones directas de profundidad.

Con el fin de obtener una fórmula empírica más precisa y ajustada a las condiciones reales del cuerpo de agua, se procedió a calibrar el factor de corrección k dado por la siguiente ecuación.

$$k = \frac{V}{A^{1.5}} \tag{11}$$

Tabla 18. Estimaciones de volumen del lago cratérico para abril de 2014, enero y junio de 2021, error relativo de cada calculo y su factor de corrección.

Método de contorno	Área Directo (m ²)	Volumen (m ³)				Error %			Factor de corrección		
		Directo	Casquete esférico	Cono	Cono truncado	Casquete esférico	Cono	Cono truncado	Casquete esférico	Cono	Cono truncado
Abril 2014											
Campo	190201.685	1432213.996	4502980.362	3001220.011	4504702.818	214.407	109.551	214.527	0.318	0.477	0.318
MTL	193816.311	1454396.910	4501448.836	3000198.993	4503494.643	209.506	106.285	209.647	0.323	0.485	0.323
Clasificación supervisada	212341.714	1512659.114	5694017.828	3795244.987	5435733.159	276.424	150.899	259.350	0.266	0.399	0.278
Planet Labs	195536.166	1451223.208	4347622.323	2897647.984	4381980.515	199.583	99.669	201.951	0.334	0.501	0.331
Enero 2021											
Campo	239298.617	2061987.791	6267147.477	4176920.221	6208333.144	203.937	102.568	201.085	0.329	0.494	0.332
MTL	217592.215	1960415.849	5737333.584	3823710.959	5790484.385	192.659	95.046	195.370	0.342	0.513	0.339
Clasificación supervisada	223150.201	1982990.608	6306872.916	4203403.847	6239551.222	218.049	111.973	214.654	0.314	0.472	0.318
Planet Labs	227607.036	1979053.086	5783067.319	3854200.115	5826667.927	192.214	94.750	194.417	0.342	0.513	0.340
Junio 2021											
Campo	232346.06	2007846.349	8560127.887	5703959.398	10074796.463	326.334	184.083	401.771	0.235	0.352	0.199
MTL	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Clasificación supervisada	230130.686	2001572.708	8806837.158	5868432.245	10280757.324	339.996	193.191	413.634	0.227	0.341	0.195
Planet Labs	220682.317	1992471.070	7412818.250	4939086.306	9108612.896	272.041	147.887	357.152	0.269	0.403	0.219

Dicho factor se obtuvo utilizando los valores de volumen directo obtenidos mediante batimetría y las áreas estimadas para cada método de contorno. El coeficiente promedio obtenido fue de $k=0.0178$, por lo que la ecuación final queda expresada como:

$$V = 0.0178 * A^{1.5} \quad (12)$$

Esta ecuación es la relación matemática que mejor se ajusta a volúmenes observados; por lo tanto, funcionaría de forma correcta para estimar el volumen del lago a partir del área superficial calculada de forma indirecta.

En la Tabla 19 se presentan los resultados de la aplicación de la fórmula empírica, en la que se comparan las estimaciones de volumen obtenidas mediante técnicas indirectas con los volúmenes de referencia calculados a partir de los modelos batimétricos. De esta manera, la tabla permite evaluar la precisión de las estimaciones de volumen derivadas de los distintos métodos indirectos del contorno del lago, basados en el cálculo del área superficial, al aplicarse a la fórmula empírica propuesta.

Los resultados demuestran que la precisión de la estimación del volumen depende fuertemente de dos factores: precisión del área superficial y fórmula empírica. El primer factor está directamente relacionado con las diferencias entre el área superficial obtenida mediante métodos indirectos y el área medida en campo. Cuando el método satelital sobreestima el área como es el caso de la clasificación supervisada en 2014, el error de volumen es alto y positivo, caso contrario, cuando el método subestima el área como el MTL en enero 2021, el error es negativo.

El segundo factor corresponde a la propia fórmula empírica, la cual es altamente sensible a las variaciones en el área, por su potencia a la 1.5. Este valor surge de la relación geométrica entre el área superficial y la profundidad del lago. En los modelos geométricos utilizados, se asume que la profundidad h es proporcional al radio r , y el radio a su vez es proporcional a la raíz cuadrada del área. Por lo tanto, al expresar el volumen en función del área y h , se obtiene el exponente 1.5. De esta manera, el exponente indica que el volumen del lago no aumenta de manera línea, sino que aumenta conforme se incrementa el área superficial y la profundidad del cuerpo de agua, comportamiento consistente con la morfología del cráter volcánico.

A pesar de estos factores que afectan directamente el cálculo, los errores máximos encontrados entre los volúmenes calculados de forma directa e indirecta son relativamente bajos. Para los contornos de campo, el intervalo de error se encuentra entre -0.713 a 3.094 %, en cambio, las estimaciones basadas en imágenes de Planet Labs, que fueron las que dieron mayor acercamiento al área real del lago tienen un intervalo de error de -7.385 a 6.054 %.

Sin duda, la fórmula empírica propuesta de tipo potencial es una gran herramienta para el monitoreo indirecto del volumen del lago y de sus variaciones temporales. Sin embargo, la confiabilidad de las estimaciones depende directamente de la precisión con la que se obtiene el área superficial a partir de las imágenes satelitales; en general, una mayor resolución espacial de las imágenes permite obtener delimitaciones más precisas del contorno del lago y, en consecuencia, estimaciones de volumen más confiables. Es importante señalar que la ecuación fue ajustada utilizando el rango de áreas observadas

durante el periodo de estudio, el cual presenta una extensión media a grande del lago. Por esta razón, se recomienda aplicar la fórmula principalmente dentro del rango de áreas para el cual fue ajustada, donde ha demostrado que reproduce adecuadamente las estimaciones de volumen.

Por otro lado, con el fin de evaluar una alternativa a la fórmula empírica de potencia, se aplicó un ajuste polinomial de segundo grado utilizando únicamente los datos de campo, área y volumen, y las campañas de los modelos batimétricos. El ajuste polinomial se expresa de la siguiente forma.

$$V(A) = -0.00011953 * A^2 + 64.1666667 * A - 6443786.004 \quad (13)$$

Esta ecuación reproduce (Tabla 19) valores muy similares a los volúmenes observados, con errores menores al 1 % para los contornos y volúmenes observados en campo. De igual forma, al aplicarse a los contornos de las imágenes Planet Labs, los errores se encuentran en un intervalo de -4.8 a 5.6 %, lo que resalta un mejor ajuste en comparación con la fórmula de potencia.

Sin embargo, a pesar de que los errores son menores, el modelo polinomial presenta importantes limitaciones. Dado que el ajuste se basa únicamente de las observaciones de campo, su capacidad de representación es limitado al intervalo analizado, fuera de este intervalo, la ecuación reproduce volúmenes negativos al extrapolar a áreas menores y mayores. En este sentido, aunque el ajuste polinomial otorga con mayor exactitud los datos observados, no permite representar el comportamiento no lineal del sistema.

En contraste, la fórmula empírica de tipo potencial, aunque presenta un error promedio ligeramente mayor, ofrece una representación más general y consistente de la relación área–volumen, al basarse en los cuerpos geométricos con base elíptica, como el casquete esférico, el cono y el cono truncado. Por ello, es adecuado para describir la evolución del sistema volcánico.

Finalmente, el principal beneficio de la fórmula empírica de potencia es su contribución para fortalecer el monitoreo de la actividad volcánica interna de El Chichón, ya que los lagos cratéricos actúan como indicadores del estado del sistema hidrotermal profundo. Cambios bruscos en el volumen o en el área del lago pueden reflejar variaciones en la temperatura, la presión o el flujo de gases y fluidos magmáticos al interior del sistema volcánico, proporcionando información relevante para la vigilancia volcánica. En este sentido, el monitoreo del lago complementaría las observaciones de datos sísmicos, geodésicos, hidrotermales y de emisión de gases. En conjunto, estos parámetros permitirían la detección temprana de cambios en la dinámica del sistema volcánico, contribuyendo a la actualización de los mapas de riesgo y al diseño de estrategias de evacuación y medidas preventivas orientadas a proteger la integridad de las poblaciones cercanas.

Tabla 19. Análisis comparativo de las estimaciones de área y volumen del lago cratérico, contrastando las mediciones directas en campo con los resultados obtenidos mediante métodos indirectos y la aplicación de una fórmula empírica calibrada, y el error relativo para cada método con respecto al volumen estimado por área de contorno

Método de contorno	Área (m ²)	Volumen real (m ³)	Volumen Potencial (m ³)	Error (%)	Volumen Polinomial (m ³)	Error (%)
Abril 2014						
Campo	190201.685	1432213.996	1476527.508	3.094	1436623.446	0.308
MTL	193816.311	1454396.910	1518817.131	4.429	1502644.574	3.317
Clasificación Supervisada	212341.714	1512659.114	1741698.510	15.142	1791985.396	18.466
Planet Labs	195536.166	1451223.208	1539078.054	6.054	1532961.086	5.632
Enero 2021						
Campo	239298.617	2061987.791	2083676.460	1.052	2066463.222	0.217
MTL	217592.215	1960415.849	1806695.788	-7.841	1859069.284	-5.170
Clasificación Supervisada	223150.201	1982990.608	1876358.962	-5.377	1922901.229	-3.030
Planet Labs	227607.036	1979053.086	1932851.671	-2.335	1968751.606	-0.521
Junio 2021						
Campo	232346.060	2007846.349	1993530.896	-0.713	2012296.000	0.222
MTL	--	--	--	--	--	--
Clasificación Supervisada	230130.686	2001572.708	1965087.081	-1.823	1992608.368	-0.448
Planet Labs	220682.317	1992471.070	1845318.369	-7.385	1895469.795	-4.868

Conclusiones y recomendaciones

El volcán El Chichón, ubicado en el noroeste del estado de Chiapas, es un volcán activo que alberga un lago cratérico altamente dinámico, caracterizado por cambios rápidos tanto en su volumen como en su composición química. El estudio de la dinámica del lago cratérico resulta fundamental para comprender las variaciones de la actividad volcánica interna y, en consecuencia, contribuir a la mitigación de riesgos asociados a posibles incrementos de la actividad.

Entre los métodos de monitoreo aplicados en El Chichón destacan el monitoreo geoquímico y las mediciones batimétricas, como lo documentan Rouwet (2006), Rouwet et al. (2008) y Jácome Paz et al. (2016), quienes obtuvieron contornos y modelos batimétricos del lago a partir de mediciones de profundidad, fotografías y formulaciones empíricas. En este contexto, el presente trabajo retomó los estudios previos de volumen y plantea una actualización de la fórmula empírica del lago cratérico, utilizando imágenes satelitales para la delimitación de contornos y datos batimétricos recientes obtenidos en enero y junio de 2021.

El análisis se estructuró en dos fases principales. En primer lugar, se realizó un análisis espectral de imágenes satelitales provenientes de Landsat y Planet Labs, mediante técnicas visuales y estadísticas (análisis visual, MTL, NDWI y clasificación supervisada). De las cinco metodologías aplicadas, las técnicas MTL y clasificación supervisada aplicadas a imágenes Landsat, y la delimitación visual realizada sobre imágenes de Planet Labs, fueron las que presentaron los mejores resultados. En particular, las imágenes Planet Labs, debido a su mayor resolución espacial, ofrecieron la mejor aproximación a los valores medidos en campo.

El cálculo de áreas a partir de imágenes confirmó un incremento en la superficie del lago del orden de 25 km² durante el periodo analizado, lo cual coincide con las mediciones directas en campo que reportaron un aumento de aproximadamente 40 km². Durante este intervalo de 10 años únicamente se observó una tendencia de incremento; pero es importante considerar que la actividad del volcán es altamente variable, por lo que es posible que en periodos sin información se hayan presentado disminuciones en el área superficial del lago. Hay que tomar en cuenta que las cinco imágenes y fechas analizadas corresponden a observaciones puntuales, lo que limita la representación continua de su dinámica.

En este sentido, los resultados evidencian la utilidad de la percepción remota como una herramienta complementaria para obtener información de zonas de difícil acceso, como el cráter de El Chichón. Asimismo, la correlación entre los datos obtenidos por métodos directos e indirectos permitió validar la capacidad de los métodos remotos para aproximarse a los valores reales.

Durante el análisis también se identificaron variaciones en la coloración del lago, los cuales podrían estar asociadas a un incremento en la turbidez o en la concentración de partículas en suspensión, posiblemente relacionados con la actividad de los campos fumarólicos. Asimismo, los cambios en la reflectancia observados, especialmente en enero de 2022, podrían asociarse con el aumento de partículas finas en suspensión de azufre coloidal (Ohsawa et al., 2010), igualmente asociadas con cambios en la actividad hidrotermal del cráter. Estas modificaciones pueden relacionarse con los periodos de actividad de las fumarolas y manantiales hidrotermales que alimentan el lago cratérico, los cuales presentan un

enriquecimiento en sodio durante las descargas de agua y un aumento en la concentración de sulfatos durante los episodios de exhalación de vapor (Taran & Peiffer, 2009; Rouwet et al., 2008).

En conjunto, estas observaciones respaldan la interpretación de que el lago cráterico del volcán mantiene una dinámica activa, vinculada a procesos hidrotermales que modifican tanto su volumen como sus propiedades ópticas en escalas temporales cortas. Este comportamiento es consistente con su condición de volcán activo y destaca la relevancia del monitoreo satelital continuo como una herramienta eficiente para la vigilancia y el estudio de sistemas volcánicos activos.

Por su parte, los cálculos de volumen realizados a partir de los tres modelos batimétricos confirmaron un incremento aproximado de 575,632 m³ en el periodo de estudio, el cual se asocia a una mayor descarga de los manantiales hidrotermales que alimentan el lago. Si bien los modelos de 2014 a enero de 2021 muestran un incremento en la profundidad y el volumen, estos resultados deben interpretarse con precaución, ya que no necesariamente representan el comportamiento integral del sistema. A partir del comportamiento observado en las estimaciones de área y volumen, tanto en campo como en imágenes satelitales, se formuló una nueva ecuación empírica de tipo potencial para estimar el volumen del lago en función del área superficial. Esta fórmula permite determinar el volumen de agua de forma indirecta y constituye el principal aporte metodológico de este trabajo, especialmente considerando las dificultades de acceso al cráter.

El error máximo obtenido al aplicar la fórmula empírica de potencia con los contornos de campo y los modelos batimétricos varió entre -0.713 y 3.094 %, mientras que al emplear las áreas estimadas con imágenes Planet Labs se obtuvo un intervalo entre -7.385 y 6.054 %. Estos resultados demuestran que la fórmula propuesta puede ser una herramienta eficaz para el monitoreo indirecto del volumen del lago y sus variaciones temporales. Sin embargo, es necesario recordar que la fórmula fue ajustada utilizando valores de área y volumen correspondientes a un periodo de estudio relativamente corto, en el cual se observaron extensiones de media a gran magnitud. Considerando que el lago presenta una alta variabilidad y en ciertos periodos puede alcanzar áreas considerablemente menores, se recomienda aplicar la fórmula principalmente dentro del rango de valores de área para el cual fue calibrada, donde se ha comprobado que reproduce adecuadamente las estimaciones de volumen.

Como alternativa, se aplicó un ajuste polinomial a los datos de campo, el cual mostró un mejor ajuste estadístico, generando los volúmenes observados con errores menores al 1 %. Sin embargo, su aplicación se limita al rango de calibración, ya que fuera de este intervalo puede generar resultados no físicos, por lo que su uso se recomienda únicamente como complemento al modelo empírico principal.

Si bien los métodos indirectos como la percepción remota no sustituyen los métodos directos de monitoreo, constituyen una alternativa valiosa para el seguimiento de cuerpos de agua ubicados en zonas aisladas o de difícil acceso. Para fortalecer la confiabilidad de los resultados se recomienda realizar campañas periódicas de verificación en campo que permitan calibrar y validar los modelos derivados de imágenes satelitales. En particular, el análisis geoquímico del agua contribuiría a confirmar los incrementos o disminuciones de algunos componentes químicos y, por ende, las variaciones en la actividad volcánica interna.

Asimismo, se sugiere ajustar la fórmula empírica de volumen mediante nuevos levantamientos batimétricos que cubran una mayor superficie del lago y mantengan una distribución uniforme de puntos de medición. Para este trabajo en específico, también se recomienda ampliar el periodo de estudio y disminuir el intervalo de tiempo entre imágenes, con el fin de mejorar la comprensión de la variabilidad del sistema volcánico, ya que la cantidad de imágenes analizadas limita la interpretación de su comportamiento. Pese a las limitaciones espaciales, el uso del sonar Fish Finder demostró ser una herramienta eficiente y económica, cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados.

Finalmente, se recomienda mantener la vigilancia remota del volcán a través del análisis continuo de imágenes satelitales, complementado con visitas de calibración en campo. Este enfoque permitirá obtener series temporales más densas y confiables, identificar cambios morfológicos en el cráter, variaciones en el área del lago y alteraciones químicas reflejadas en el color o en la respuesta espectral del agua. En conjunto, la vigilancia remota y los resultados de este estudio proporcionan una base sólida para la detección temprana de cambios en la actividad volcánica, favoreciendo la toma de decisiones oportunas en salvaguardar la integridad de las poblaciones cercanas al volcán El Chichón.

Referencias

1. Ahumada-Mexía, R., Murillo-Jiménez, J. M., Ortega-Rubio, A., Marmolejo-Rodríguez, A. J., Nava-Sánchez, E. H. (2021) Identification of mining waste using remote sensing technique: A case study in El Triunfo town, BCS, México. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100493, ISSN 2352-9385.
2. Alcántara Ayala, I., Garnica Peña, R. J., Coll-Hurtado, A., Ramos Hernández, G. (2013). La región del volcán Chichón, Chiapas: un espacio potencial para su protección, conservación y desarrollo sustentable. UNAM, Instituto de Geografía.
3. Alonzo, M., Van Den Hoek, J., Murillo-Sandoval, P. J., Steger, C. E., Aloysius Zinda, J. (2021). Mapping and quantifying land cover dynamics using dense remote sensing time series with the user-friendly pyNITA software. *Environmental Modelling & Software*, 145, 105179, ISSN 1364-8152.
4. Andersen, P. (2005). The crater of the volcano Poás in Costa Rica. Wikipedia. https://es.wikipedia.org/wiki/Parque_nacional_Volc%C3%A1n_Po%C3%A1s#/media/Archivo:Poas_crater.jpg
5. Arredondo-Figueroa, J. L., Borrego-Enríquez, L. E., Castillo-Domínguez, R. M., Valladolid-Laredo. (1983). Batimetría y morfometría de los lagos "Maars" de la Cuenca Oriental, Puebla, México. *BIOTICA*, 8, 37-47.
6. Bravo Morales, N. F. (2017). Teoría: Teledetección Espacial Landsat, Sentinel 2, Aster L1T y MODIS. Universidad Nacional Agraria De La Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal.
7. Brenes-André, José, Alvarado, Guillermo E., Chavarría, Nathalie, Sánchez, Blas, Avard, Geoffroy, Barrantes, Manuel, & Quesada, Catalina. (2020). Análisis de la dinámica y productos balísticos durante la erupción del Poás (Costa Rica) en el 2017. *Revista Geológica de América Central*, (62), 74-101.
8. Campbell, J. B., Wynne, R. H. 2011. Introduction to Remote Sensing. (5ta Ed). New York, USA. The Guilford Press.
9. Canto Torres, E. O. (2016). Detección de la deforestación en tiempo casi real mediante GRASS GIS e imágenes MODIS MOD13Q4N. Universidad Nacional de Córdoba Argentina, Facultad de Matemática, Astronomía y Física.
10. Chavez, P. S., Jr. (1996). Image-based atmospheric corrections: Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.
11. Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. (2021). Volcanes. Printed in México.
12. Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. (2018). Monitoreo del Volcán Chichón. Subsecretaría de Planeación, Información y Protección Civil, Coordinación Nacional de Protección Civil.
13. Como Funciona (2022). Como funciona un sonar (ecosonda). <https://como-funciona.co/un-sonar-ecosonda/>
14. Danesh-Yazdi, M., Bayati, M., Tajrishy, M., Chehrenegar, B. (2021). Revisiting bathymetry dynamics in Lake Urmia using extensive field data and high-resolution satellite imagery. *Journal of Hydrology*, 603 (Part B), 126987, ISSN 0022-1694.
15. De la Cruz-Reyna, S., Nolasco, H., Ramos, E., Degollado J. L., Castillo, F. J., Velásquez C., Medrano, A., González, H., Romero, H., Castellanos, D. A. (1998). La red geodésica del volcán Popocatepetl para el monitoreo de la actividad volcánica. México, D.F. 12.
16. De la Cruz-Reyna, S. (2008). Volcanes. Peligro y riesgo volcánico en México. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Serie Fascículos 51.

17. De la Cruz-Reyna, S., Martin del Pozzo, A. L. (2009). The 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster. *Geofísica internacional*, 48(1), 21-31.
18. De la Cruz R. V. M., Peña R. H. (1991). Informe Geológico No. 948 Zona Sureste. Prospecto Villahermosa. Petróleos Mexicanos.
19. De la Rosa Z. J. L., et al. (1989). Geología del Estado de Chiapas, Comisión Federal de Electricidad.
20. Doncel Domínguez, J. A. (2014). Calderas volcánicas. Las historias de Doncel. <http://jadoncel.blogspot.com/2014/06/calderas-volcanicas.html>
21. EOS, Data Analytics. (2022). Índice de Agua de Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
22. Espíndola, J.M., Macías, J.L., Tilling, R.I., Sheridan, M.F. (2000). Volcan history of El Chichón volcano (Chiapas, México) during the Holocene, and its impact on human activity. *Bulletin of Volcanology*, 62, 90-104.
23. Espinasa-Pereña, R. (2016). Evaluación del riesgo relativo de los volcanes en México. Foro Internacional: Los Volcanes y su Impacto, Arequipa, Perú, 2018.
25. Espinasa-Pereña, R., Hernandez Oscoy, A. (2018). Monitoreo del Volcán Chichón. CENAPRED: Subdirección de Riesgos Volcánicos. Dirección de Investigación.
26. Evans, W.C., Kling, G.W., Tuttle, M.L., Tanyileke, G., White, L.D. (1993). Gas buildup in Lake Nyo, Cameroon: The recharge process and its consequences. *Applied Geochemistry*, 8 (3), 207-221, ISSN 0883-2927.
27. Fulignati, P., Gioncada, A., Costa, S., Di Genova, D., Di Traglia, F., Pistolesi, M. (2018). Magmatic sulfide immiscibility at an active magmatic-hydrothermal system: The case of La Fossa (Vulcano, Italy), *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 45-57, ISSN 0377-0273.
28. García Palomo, A., Macías, J. L., Espíndola, J.M. (2004). Strike-slip faults and K-alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 247-268, ISSN 0377-0273.
29. González, X. P., Cancela, J.J. 2018. Utilización de imágenes de satélite y drones en horticuultura. <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/206464-Utilizacion-de-imagenes-de-satelite-y-drones-en-horticultura.html>
30. Halbwachs, M., Sabroux, J. C., Kayser, G., (2020). Final step of the 32-year Lake Nyo degassing adventure: Natural CO₂ recharge is to be balanced by discharge through the degassing pipes. *Journal of African Earth Sciences*, 167 (103575), ISSN 1464-343X.
31. Hiriart Le Bert, G. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Comisión Reguladora de Energía. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.
32. Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s.f) Técnicas de Vigilancia Volcánica. https://www.ign.es/resources/docs/IGNCnig/TecnicasDeVigilancia_v8.pdf
33. IngeOexpert (s. f). Configuración, estructura y características de las imágenes en teledetección. <https://ingeoexpert.com/articulo/21969/>
34. Jácome Paz, M.P., Taran, Y., Inguaggiato, S., Collard, N. (2016). CO₂ flux and chemistry of El Chichón crater lake (México) in the period 2013-2015: Evidence for the enhanced volcano activity. *Geophysical Research Letters*, 43, 127-134, doi:10.1002/2015GL066354.
35. Jiménez, B., Marín, L., Morán, D., Escolero, O., Alcocer, J. Martínez, V. H. (2005). El agua en México vista desde la academia. México: Academia Mexicana de Ciencias.
36. Jiménez-Moreno, M. J., González-Guillen, M. J., Escalona-Maurice, M., Valdez-Lazalde, J. R., Aguirre-Salado, C. A. (2011). Comparación de métodos espaciales para detectar cambios en el uso del suelo urbano. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(3), 389-406.

37. Kokaly, R. F., Rockwell, B. W., Haire, S. L., King, T. V. V. (2007). Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 106 (3), 305-325, ISSN 0034-4257.
38. Llinares, M. A., Ortiz, R., Marrero, J. M. (). Dirección General De Protección Civil Y Emergencias. Ministerio Del Interior. España.
39. Macías, J.L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, 3*, 379-424.
40. Macías, J. L., Arce, J. L., Garduño Monroy, V. H., Rouwet, D., Taran, Y., Layer, P., Jiménez, A., Álvarez, R. (2010). Estudio de prospección geotérmica para evaluar el potencial del volcán Chichonal, Chiapas. Unpublished Report no. 9400047770 IGF-UNAM-CFE.
41. Macías-Vázquez, J.L, Capra-Pedol, L. (2005). Los volcanes y sus amenazas. México, D.F. Secretaría de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, La Ciencia para todos, 210, 159 p.
42. Macías, J.L., Capra, L., Arce, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Sheridan, M.F. (2008). Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175 (4), 2008, 444-458, ISSN 0377-0273.
43. Mazot, A., Rouwet, D., Taran, Y., Inguaggiato, S., Varley, N. (2011). CO₂ and He degassing at El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: Gas flux, origin and relationship with local and regional tectonics. *Bulletin of Volcanology*, 73, 423-441.
44. Mazot, A., Taran, Y. (2009). CO₂ flux from the volcanic lake of El Chichón (Mexico). *Geofísica Internacional*, 48 (1), 73-83.
45. Melián, G. V., Pérez, N. M., Hernández, P. A., Nolasco, D., Marrero, R., Fernández, M., Ramírez, C., Mora-Amador, R., Alvarado, G. E., (2010). Emisión Difusa de CO₂ y Actividad Volcánica en El Volcán Poás, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 43, 147-169.
46. Michaud, F., Rastov, G. S., Sallarés, V., Collot, J. Y., Pazmiño, N., De la Torre, G. (2009). Métodos e Instrumentación acústica para la exploración en Geofísica Marina.
47. MOUNTS, Monitoring Unrest from Space (s,f). <http://mounts-project.com/home>
48. NASA, 2022. Landsat Science. Landsat 9. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>
49. Nieto-Torres, Amiel. (2017). Infografía peligros volcánicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED.
50. Nieto-Torres, A., Guimarães. L. F., Bonadonna, C., Frischknecht, C. (2021). A New Inclusive Volcanic Risk Ranking, Part 1: Methodology. *Front. Earth Science*, 9:697451.
51. Nieto-Torres, A., Jaimes-Viera, C., Peérez, A. (2021). Sección 2.2 Estudio y Monitoreo de volcanes activos en México. Universidad Autónoma del Estado de México. Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos siconaturales (109-133). México. AM Editores.
52. Ohsawa, S., Saito, T., Yoshikawa, S. et al. (2010). Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: is it in response to change in water quality induced by volcanic activity?. *Limnology* 11, 207–215.
53. Padrón, E., Hernández, P. A., Toulkeridis, T., Pérez, N. M., Marrero, R., Melián, G., Virgili G., Notsu, K. (2008). Diffuse CO₂ emission rate from Pululahua and the lake-filled Cuicocha calderas, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176 (1), 163-169.
54. Peiffer, L., 2011. Caracterización geoquímica y potencial geotérmico de los acuíferos del volcán El Chichón, Chiapas, México. Tesis para obtener el grado de Doctor. Universidad Nacional Autónoma de México.

55. Pineda Pastrana, O. (2011). Análisis de Cambio de Uso de Suelo Mediante Percepción Remota en El Municipio de Valle de Santiago. Tesis de Maestría. Centro De Investigación en Geografía Y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo, A.C. CentroGeo.
56. Ramírez, Ronald, Cordero, Cecilia, & Alvarado, Guillermo E.. (2013). Variaciones y características en los cambios de nivel de la laguna cratérica del Volcan Irazú (1965-2012), Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (48), 141-157. Retrieved January 24, 2025, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000100008&lng=en&tlng=es.
57. Planet Labs PBC. (2023). Planet Combined Imagery Product Specs. Canada. https://assets.planet.com/docs/Planet_Combined_Imagery_Product_Specs_letter_screen.pdf
58. Reyes Morales, F., Ujpan, D., Valiente, S. (2018). Batimetría y análisis morfométrico del lago de Atitlán (Guatemala). *Revista Científica de Ciencias Químicas y Farmacia*, 27(2), 48–58.
59. Riaño Melo, O. (2022). Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa. *Colombia Forestal*, 7 (15) (Año 2002). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/colfor/article/view/3306/4807>
60. Rose, W. I., Bornhorst, T. J., Halsor, S. P., Capaul, W. A., Plumley, P. S., De la Cruz, M., Mena, M., Mota, R. (1984). Volcan El Chicón, México: Pre-1982 S-Rich eruptive activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23 (1–2), 147-167, ISSN 0377-0273.
61. Rosete, F., Bocco, G. (2003). Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Distrito Federal, México. *Gaceta Ecológica*, 68 (julio-septiembre), 43-54.
62. Rouwet, D. 2002. Geoquímica y actividad del volcán Chichón: La dinámica del sistema vulcano-hidrotermal y su lago cratérico entre 1983 y 2002. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Nacional Autónoma de México
63. Rouwet, D. 2006. Estudio geoquímico comparativo de los sistemas hidrotermales de los volcanes en Chiapas: El Chichón y Tacana. Tesis para obtener el grado de Doctor. Universidad Nacional Autónoma de México.
64. Rouwet, D., Christenson, B., Tassi, F., Vandemeulebrouck, J. (2015). *Volcanic Lakes. Advances in Volcanology*. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag.
65. Rouwet, D., Taran, Y., Inguaggiato, S., Varley, N., Santiago Santiago, J. A. (2008). Hydrochemical dynamics of the “lake–spring” system in the crater of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178 (2), 237-248, ISSN 0377-0273.
66. Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14 (3–4), 157-183, ISSN 0169-1368.
67. Sandoval Espinoza, S., Escobar-Flores, J., Sánchez Ortiz, E. (2020). Inventario de cuerpos de agua de la Sierra Madre Occidental (México) usando SIG y percepción remota. *Investigaciones Geográficas*, 102.
68. Schmincke, Hans-Ulrich. (2004). *Volcanism*. Germany. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
69. Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S. R., Rymer, H., Stix, J., Ballard, R. D. (2000). *Encyclopedia of Volcanoes*. Academic Press
70. Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 230–244.
71. Szakács, A. (1994). Redefining active volcanoes: a discussion. *Bulletin of Volcanology*, 56, 321–325.

72. Taipe, E. L., González, K., Van Der Laat, R., Santiago, H., & Froger, J. L. (2010). Implementación de redes geodésicas para monitoreo de los volcanes Misti y Ubinas. *Sociedad Geológica del Perú*, 9, 1167-1170.
73. Taran, Y., Peiffer, L. (2009). Hydrology, hydrochemistry and geothermal potential of El Chichón volcano-hydrothermal system, Mexico. *Geothermics*, 38, 370-378.
74. Yarza de De la Torre, E. (2003). Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. *Investigaciones geográficas*, 50, 221-234, ISSN 2448-7279.
75. Zaragoza, A. (2019). Monitoreo y estudio de volcanes desde el espacio. *Revista hacia el espacio de divulgación de la ciencia y tecnología espacial de la Agencia Espacial Mexicana*.