

UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN GESTIÓN DE RIESGOS
Y CAMBIO CLIMÁTICO**

LICENCIATURA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

TESIS

**“MEDICIÓN DE EMISIÓN DIFUSA DE DIÓXIDO DE
CARBONO EN EL VOLCÁN CHICHÓN “**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

Alberto Alonso Culebro Gil

DIRECTOR

Lic. Juan Lorenzo Jon Selvas

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS FEBRERO DEL 2024





Agradecimientos

Dentro de estos párrafos me gustaría agradecer a todas las personas que me apoyaron al momento de realizar este documento, con el conocimiento que se proporcionó en los momentos de dudas, el apoyo moral que familiares y amigos me brindaron en las ocasiones que sentía que estaba haciendo mal las cosas o cuando sentía que estaba estancado y no avanzaba, también le agradezco a todas las personas que me presionaron a mejorar así como mis padres y maestros que sin su guía durante todo el tiempo que estuve en instituto no hubiera logrado alcanzar el objetivo de culminar con mis estudios.

Agradezco al Dr. Ramón Ortiz Ramis, por su invaluable apoyo en la elaboración de este documento, por todo el conocimiento brindado sobre las emisiones difusas de CO₂ en los volcanes. También agradezco al Lic. Juan Lorenzo Jon Selvas por su apoyo constante y por ayudarme a corregir mis errores para entregar un trabajo de calidad, por el apoyo para realizar el trabajo de campo en el volcán Chichón. Finalmente, agradezco a mis revisores Emmanuel Díaz Nigenda, Miguel Ángel Alatorre Ibarquengoitia y Williams Vázquez Morales por su tiempo y atención a los detalles, sus comentarios fueron de gran ayuda para mejorar el documento; tal vez no mencione a cada una de las personas con las que estoy agradecido por su apoyo incondicional, pero estoy consciente de que no terminaría nombrar a todos y reiterando una vez más familiares, amigos y profesores muchas gracias.

Dedicatoria

Este trabajo lo quiero dedicar a mi padre Rene Manuel Culebro Marin y mi madre Beatriz Gil Montelongo que estuvieron apoyando y motivando cada uno a su estilo, a mis familiares y amigos que de una u otra forma estuvieron al pendiente y apoyaron en algo.

Muchas gracias por todo.

Guadalupe Lacares Gallardo

Jhonny Culebro Lascares

Víctor Manuel Lascares Gallardo

Alessandro Osorio Gonzales

Laura Antonia Cruz Hernández

Manuel de Jesús Bautista Moreno

Fátima del Carmen Morales Espinoza

Carlos Eduardo Pérez Ruiz

Jessika Belem Córdova de la Torre

Sahian Areli Pérez Catillo

Ivana Georgina Roveló López

Moctezuma Esponda Cabrera

ÍNDICE

Introducción.....	VII
1 Marco Teórico.....	1
1.1 ¿Qué es un volcán?	1
1.2 Monitoreo volcánico	2
1.2.1 Vigilancia Visual.....	3
1.2.2 Medición de Actividad Sísmica.	4
1.2.3 Monitoreo Geodésico.....	5
1.2.4 Medición de temperaturas.	6
1.2.5 Monitoreo Geoquímico.	6
1.3 Dióxido de Carbono (CO ₂)	8
1.4 Desgasificación difusa de CO ₂	10
2 Planteamiento del Problema.....	13
3 Justificación	17
4 Antecedentes.....	19
5 Objetivo.....	22
5.1 General	22
5.2 Objetivos específicos	22
6 Metodología.....	23
6.1 Zona de estudio	23
6.2 Método de cámara de acumulación	24
6.3 Campaña de monitoreo en zona de estudio	29
6.4 Análisis de datos	32
7 Resultados.....	34
7.1 Prueba piloto del equipo.....	34
7.2 Resultados del trabajo en el área de estudio	36
8 Conclusiones	41
9 Recomendaciones	42
10 Anexos	45
11 Bibliografía.....	46

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Lago cratérico volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).	1
Imagen 2. Instalación de cámara para el monitoreo del volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).	3
Imagen 3. Monitoreo Geodésico volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023)..	5
Imagen 4. Difusividad de los gases en sistemas volcánicos. Tomada de Ortiz (2001).....	7
Imagen 5. Fumarolas y burbujeos en cráter del volcán Chichón.....	10
Imagen 6. Emisión de gases en cuerpos volcánicos, 1. Penacho de gases 2. Fumarolas 3. Difusión de gases. Tomada de Llinares (2004).	11
Imagen 7. Formación de escarpes o escalonamiento consecuencia de inestabilidad de laderas ocasionando deslizamientos en el cráter del volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).....	13
Imagen 8. Mapa de la ubicación del volcán Chichón.	23
Imagen 9. Diseño de la cámara de acumulación.....	25
Imagen 10. Cámara de acumulación de gases.	26
Imagen 11. Componentes de la cámara de acumulación.	27
Imagen 12. Especificaciones del nombre del archivo.....	28
Imagen 13. Contenido del archivo.....	28
Imagen 14. Circuito de Muestreo.	30
Imagen 15. Paisajes de interés en el ascenso al volcán Chichón. a) Depósitos de piroclastos, b) Valles erosivos, c) Cráter del volcán Chichón.....	31
Imagen 16. Rutas de acenso.....	32
Imagen 17. Grafica elaborada con datos obtenidos de la medición de CO ₂	35
Imagen 18. Mapa de la distribución del CO ₂ dentro de la UNICACH.	35
Imagen 19. Muestreo del CO ₂ en el Cráter del volcán Chichón.	36
Imagen 20. Muestreo de CO ₂ en el borde del cráter.	38
Imagen 21. Mapa de la distribución del CO ₂ en el volcán Chichón.	39
Imagen 22. Concentración de CO ₂ dentro del cráter.....	40
Imagen 23. Aumento del nivel del lago.	43
Imagen 24. Aumento del nivel del lago respecto al primer espejo de agua al pico de la isla dentro el cráter del 2019-2023.	43
Imagen 25. Sismos cercanos al volcán Chichón del año 2020-2023.	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto del CO ₂ en las personas en lugares cerrados	9
Tabla 2. Datos recabados por la cámara de acumulación.	34
Tabla 3. Concentraciones de CO ₂ en el volcán Chichón.	37

Introducción

A lo largo de la historia del monitoreo vulcanológico, se ha destacado la importancia del estudio de los gases emitidos por los volcanes, incluyendo vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfúrico (H_2S), dióxido de azufre (SO_2), entre otros. El monitoreo geoquímico o monitoreo de gases se enfoca principalmente en la actividad interna de los volcanes, específicamente en la cámara magmática. Las altas concentraciones de gases, son un indicativo de una posible reactivación volcánica, lo que sugiere que se está albergando una gran cantidad de magma. Por lo tanto, los procesos y la presión en la cámara magmática provocan la liberación de estos gases hacia la superficie.

La mayoría de los gases emitidos por los volcanes no son visibles a simple vista debido a la escasez de vapor de agua en su composición. A este tipo de gases se les conoce como gases difusos, por esta característica, se han desarrollado las denominadas cámaras de acumulación para el monitoreo de los gases volcánicos. Estas cámaras se utilizan para cubrir previamente una zona específica de la superficie volcánica con un cierre hermético, que permite el intercambio de gases presentes en el suelo y la atmósfera interior de la cámara sin permitir ningún tipo de intercambio con el entorno exterior (Calle, 2015).

El monitoreo de gases es relevante, no solo debido a la actividad volcánica en sí, sino también por el riesgo que los gases difusos representan para las poblaciones cercanas a los volcanes, así como para diversas especies animales. Entre los gases más peligrosos para cualquier organismo vivo, se encuentra el CO_2 . Este gas tiene la capacidad de desplazar el oxígeno y al ser más denso que el oxígeno, tiende a asfixiar a cualquier ser vivo presente en la zona. Se han registrado incidentes en diferentes países donde la liberación repentina de este tipo de gas ha ocasionado tragedias, como fue el caso del Lago Nyos en Camerún, donde se produjo la muerte tanto de ganado como de personas que vivían cerca del lago.

El volcán Chichón se encuentra en el noroeste del estado de Chiapas y es considerado un volcán activo. En su cráter, alberga un cuerpo de agua conocido como lago cratérico. La presencia de este lago impide que el CO₂ que emana desde el interior del volcán se libere por completo hacia la superficie, lo que resulta en una acumulación significativa de CO₂ debajo del lago y en una cantidad limitada que llega a la superficie.

La acumulación de gas bajo el lago representa un riesgo potencial. La liberación repentina de gas causada por movimientos sísmicos o la presión del viento externo, podría resultar en una muerte instantánea para cualquier ser vivo que descienda al cráter.

El CO₂ puede manifestarse en la superficie a través de grietas o fallas en el interior del volcán. El riesgo reside en su acumulación en espacios cerrados, como las depresiones topográficas naturales que rodean el volcán Chichón.

Por esta razón, en el presente documento se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de CO₂ en las depresiones topográficas naturales localizadas en los alrededores del volcán Chichón, con lo cual, se pretenden identificar las fluctuaciones del gas para identificar fuentes de emanación en la región para señalar áreas que puedan representar un riesgo.

Marco Teórico.

1.1 ¿Qué es un volcán?

Según Reyna (2008) un volcán es un lugar en la superficie terrestre por el cual sale material magmático o sus derivados, creando una montaña generalmente de forma aproximadamente cónica alrededor del punto de salida.

El material fundido que sale por las grietas o por el cráter, puede acumularse alrededor del lugar de salida originando cerros o montañas alcanzando grandes alturas. En la parte más alta de la estructura volcánica se forma el cráter, orificio que puede almacenar un volumen considerable de agua, originando a lo que se le conoce como lago cratérico (CENAPRED, 2014).

Los lagos cratéricos (**Imagen 1**) son comunes en muchos de los volcanes activos en todo el mundo, y muchos de ellos se forman a partir de las propias estructuras volcánicas. Estos lagos cumplen varias funciones además de su valor escénico, funcionan como grandes cuerpos que condensan las especies volátiles que emanan de la fuente magmática subyacente, de esta manera, los lagos reflejan la temperatura, acidez y concentraciones químicas de alto valor científico, que de otro modo serían difíciles de estudiar. La energía volcánica subacuática se ve atenuada por la presencia de un espejo de agua que varía en profundidad y diámetro, lo que da lugar a una dinámica compleja que ocurre en los lagos (Gómez et al., 2001).



Imagen 1. Lago cratérico volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).

De acuerdo con Duarte (2015) el volumen de agua acumulada inhibe la propagación vertical de gases tóxicos, los cuales se acumulan y pueden alcanzar una presión importante hasta generar la liberación violenta afectando la vida humana y animal que se encuentre en la periferia de estos cráteres. De hecho, han sucedido eventos catastróficos derivados de la acumulación de gases tóxicos en el fondo lacustre y su liberación espontánea arrasando la vida humana y animal (ej. - Lago Nyos en Camerún, 1986) (Fihswrap, 2018).

La vulcanología es la disciplina que se encarga del estudio de los volcanes y los procesos relacionados, con el fin de desarrollar una vigilancia eficiente de los mismos y lograr la prevención exitosa de los posibles desastres vinculados con ellos (Villar, 2008).

El estudio de los fenómenos vulcanológicos es una ciencia relativamente joven, especialmente en países como México. No obstante, los científicos han empezado a involucrarse en este campo con el respaldo logístico proporcionado por organismos internacionales, lo que finalmente ha conducido al desarrollo de tecnología local.

1.2 Monitoreo volcánico

El monitoreo volcánico es un concepto muy amplio, donde se incluye desde la simple inspección visual hasta instrumentos complejos. Un correcto estudio vulcanológico, con técnicas geodésicas, geoquímicas y geofísicas de la zona evidencia el estado de la actividad del volcán en estudio (Díez Gil, 1992). Si éstos se aplican en las fases previas a un proceso eruptivo, es posible en la mayoría de los casos, detectar oportunamente cambios cualitativos y cuantitativos de la actividad, con la finalidad de anticipar alguna condición anómala precursora de un proceso eruptivo inminente. Es fundamental establecer sistemas de vigilancia y monitoreo en los volcanes potencialmente riesgosos del país para establecer programas preventivos de acción frente a posibles desastres.

El monitoreo de los volcanes se realiza mediante el análisis de los datos recabados instrumentalmente de la actividad sísmica, deformación, emisión de gases y temperaturas anómalas, complementando con la información obtenida a través de la observación directa por el hombre (visual) (Linares et al., 2008). En los siguientes párrafos se describirán algunas de las técnicas más utilizadas en el monitorio volcánico.

1.2.1 Vigilancia Visual.

La vigilancia visual es la apreciación por medio de observación óptica y mediante el registro frecuente de las condiciones físicas del volcán, como emanación de gases y cenizas, deformaciones de la superficie del cuerpo volcánico, derrumbes o deslaves, flujos de lodo, actividad magmática, ruidos o cualquier manifestación anómala que indica un cambio perceptible de su estado y actividad. Esta se lleva a cabo, entre otras, mediante observaciones a simple vista, con ayuda de binoculares, registros fotográficos o inclusive mediante sistemas de monitoreo con cámaras de video como se aprecia en la **Imagen 2** (Guevara et al., 2003).



Imagen 2. Instalación de cámara para el monitoreo del volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).

1.2.2 Medición de Actividad Sísmica.

El monitoreo sísmico consiste, principalmente, en la implementación de sismómetros de tres componentes de alta calidad, perfectamente instalados y mantenidos los cuales “escuchan” y registran las vibraciones del terreno.

Para un análisis preciso de la actividad sísmica se necesitan tres estaciones, para hacer el análisis de triangulación, el cual nos proporciona información como profundidad, magnitud, ubicación de los sismos y cantidad de eventos. Las técnicas actuales de proceso digital de la señal permiten localizar eventos y determinar su mecanismo focal con una sola estación digital de tres componentes (Díez Gil, 1992). Sin embargo, con el análisis de una estación y sus tres componentes, la magnitud que nos arroja no es muy precisa.

La vigilancia sismológica de los volcanes se basa en identificar las pautas de la actividad sísmica durante la fase de reposo. Cuando la actividad se aleja de la línea de base, indica que el volcán entro en actividad. Reflejándose en cambios en la distribución de los distintos tipos de eventos sísmicos, como la presencia de nuevas familias de sismos, así como la relación con otros fenómenos (Ortiz, 1992).

La medición de la actividad microsísmica, permite localizar la fuente de energía de los sismos, permitiendo deducir la estructura interna del volcán, como cambios en la misma. Para ello se instalan redes sísmicas alrededor del volcán. Estas redes pueden utilizar diferentes tipos de instrumentos, dependiendo de su tecnología, medios de registro y respuesta de sus sensores.

Para este caso, los vulcanólogos colocan sismómetros en diferentes puntos del volcán para determinar la ubicación y fuerza del sismo o terremoto. La señal medida por estos sensores es enviada por lo general vía radio frecuencia hacia un receptor en un punto lejano. Los sismómetros pueden detectar vibraciones superiores a los 2 Hz.

De acuerdo con Díez Gil (1992), los eventos sísmicos directamente relacionados con la actividad del volcán son:

- Establecimiento de las fracturas en ascenso.
- Inyección de magma en fracturas.
- Vaporización de aguas subterráneas.
- Fracturación inducida térmicamente.
- Leves movimientos sísmicos.
- Colapsos.

1.2.3 Monitoreo Geodésico

El monitoreo geodésico (**Imagen 3**) consiste en la medición de las deformaciones que el edificio volcánico sufre, a consecuencia de los esfuerzos ejercidos desde el interior del volcán. Los cambios en la estructura están asociados a la actividad volcánica, son el reflejo de procesos volcánicos internos, relacionados con el movimiento del magma (CENAPRED, 2001).



Imagen 3. Monitoreo Geodésico volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).

Para el monitoreo geodésico es necesario la instalación de redes de estaciones monumentadas, puntos de observación e inclinómetros de diversos tipos. Las medidas pueden hacerse por métodos geodésicos convencionales (nivelación, triangulación, trilateración, inclinometría seca, etc.), por gravimetría y por otros métodos electrónicos como radio telemetría y mediante sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés), Radar Interferométrico de Apertura Sintética (InSAR por sus siglas en inglés).

1.2.4 Medición de temperaturas.

La medida de temperatura en una zona volcánica activa, comprende mediciones de lagos, rocas, suelo e inclusive lava. Para medir la temperatura del suelo y de la lava en forma directa se utilizan termocuplas que se introducen ya sea en el suelo o en la lava.

La transmisión de calor desde el interior del volcán hasta la superficie se hace a través de las fracturas del suelo. Las medidas de temperaturas que se hacen en un volcán se reducen al control de la temperatura de las anomalías térmicas, de las rocas y de las fumarolas, ya que son indicadores importantes de la actividad volcánica. Cuando la temperatura de un volcán aumenta, es señal de que el magma está ascendiendo y de una erupción inminente.

1.2.5 Monitoreo Geoquímico.

Se refiere al análisis químico de concentrados y elementos en gases de fumarolas, manantiales, composición de cenizas, lavas y otros productos del volcán que son una manifestación de su actividad. Otras variables asociadas y que también son monitoreadas son vientos, temperatura, precipitación, pH y emanación de gas radón, entre otras (CENAPRED, 2001).

Las muestras de gases que se recopilan directamente de las fumarolas proveen información adicional que permite establecer la situación interna del volcán. Por ejemplo, un aumento en la proporción de CO₂ y compuestos de azufre puede ser usado para indicar el ascenso del magma.

El análisis de los gases volcánicos es una de las técnicas más utilizadas para el monitoreo de la actividad volcánica. Los gases, por su extraordinaria difusividad (**Imagen 4**), traen hasta la superficie información sobre el estado del volcán. A través del análisis de sus componentes y de las posibles reacciones que entre ellos pueden tener lugar, se puede conocer si el sistema está o no en equilibrio y en tal caso, deducir cuál es su presión y temperatura.

En la siguiente imagen, se observa cómo los gases volcánicos que proceden del sistema magmático (M) llegan a la superficie a través del sistema de fracturas dando origen a las fumarolas (F). Otra parte, especialmente el CO₂ se difunde a través del edificio volcánico (D). Los gases se disuelven en el agua de los acuíferos (A), apareciendo en las fuentes termales (R) o en los pozos (P) (Ortiz, 2001).

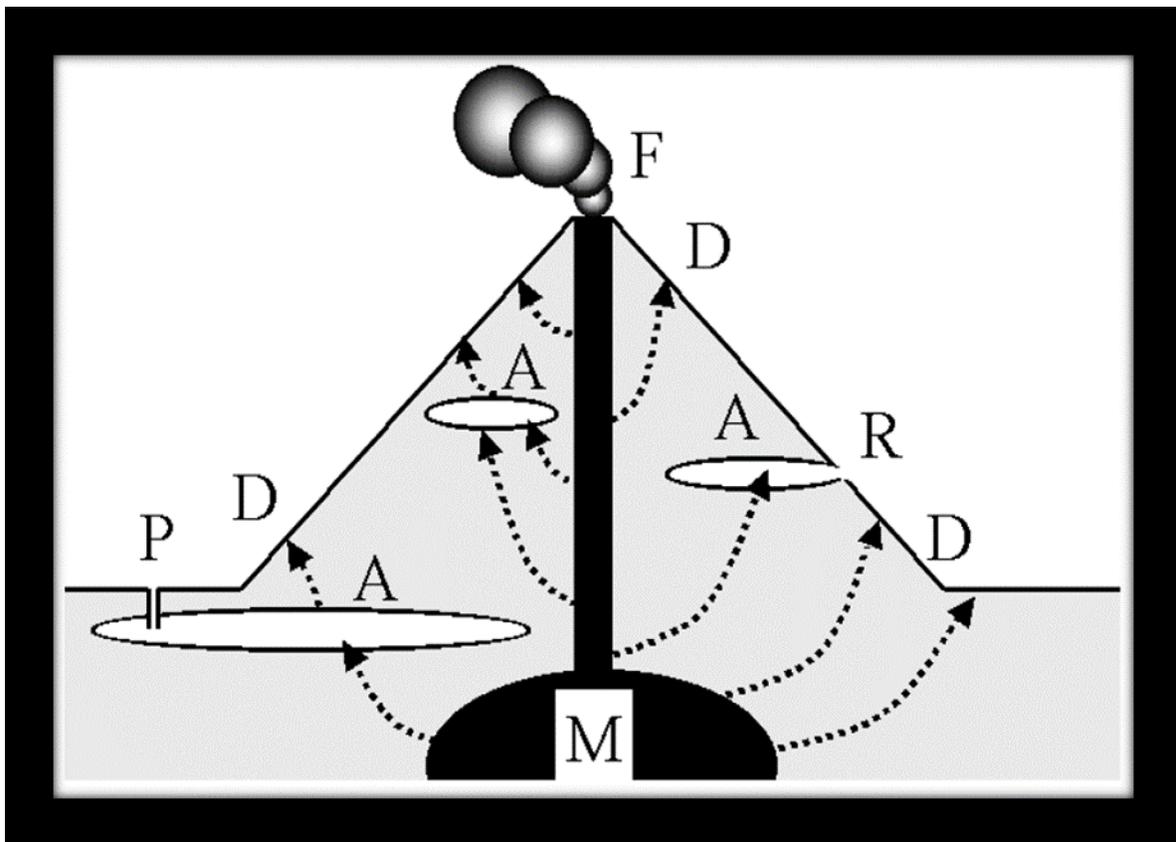


Imagen 4. Difusividad de los gases en sistemas volcánicos. Tomada de Ortiz (2001).

Tradicionalmente el estudio de los gases volcánicos se ha llevado a cabo en las zonas de emisión fumarólica próximas a los cráteres activos. Hoy en día, el descubrimiento de la emisión difusa, o sea, de la salida de gases a través de los flancos del volcán, permite situar los instrumentos en ambientes mucho menos agresivos y disponer de sistemas de seguimiento continuo. El mecanismo de difusión hace posible la medida de la emisión del Dióxido de carbono (CO_2) y gases raros en las laderas del volcán, mientras que los gases ácidos como el Ácido sulfhídrico (H_2S), Dióxido de azufre (SO_2), Ácido clorhídrico (HCl), Ácido fluorhídrico (HF), en condiciones favorables pueden detectarse a distancias relativamente alejadas del cráter activo, en las zonas de mucha mayor seguridad.

La fase gaseosa de un magma está constituida por combinaciones de un limitado número de elementos: Hidrogeno (H), Carbono (C), Oxígeno (O), Azufre (S), Cloro (Cl), Flúor (F) y Nitrógeno (N), asociados con metales pesados y otros elementos. Las condiciones termodinámicas del sistema gas-líquido y gas-roca regulan las proporciones de las distintas especies. En un sistema a alta temperatura (superior a $200\text{ }^\circ\text{C}$) están presentes H_2O , CO_2 , SO_2 y otros gases. La medida de la concentración de CO_2 se realiza fácilmente mediante la absorción en el infrarrojo ($4.3\text{ }\mu\text{m}$) (Ortiz, 2001).

1.3 Dióxido de Carbono (CO_2)

El CO_2 ha sido el gas producido en fenómenos relacionados con el volcanismo que ha resultado históricamente más mortal para personas y animales. Este gas es inodoro e incoloro, con una composición densa y poco reactiva, está conformado por un átomo de carbono y dos de oxígeno. El gas se encuentra en la atmósfera terrestre en una fracción molar de alrededor de los 350 a 450 ppm, las unidades de medida del CO_2 más utilizadas son partes por millón (ppm) y porcentaje en volumen (%).

El CO_2 es un asfixiante, dándose a través del desplazamiento del oxígeno, por lo cual al alcanzar elevadas concentraciones puede causar efectos nocivos progresivos en la salud como dolor de cabeza, mareos, entre otros síntomas,

dependiendo siempre de la concentración y el tiempo de exposición que se tenga al gas y es por esta razón que el CO₂ es denominado como un “asesino silencioso”; según los límites de exposición (LEP-VLA) del Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSHT) (Subils, 2000), una persona puede tener; una exposición diaria de 8 horas es de 5,000 ppm y con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de 15,000 ppm (Galobart, 2022), la **Tabla 1** muestra los efectos de este gas en diferentes concentraciones. El CO₂ representa un peligro para la salud relacionado al tiempo de exposición al gas y la concentración inhalada.

Para medir el CO₂ en el entorno del volcán Chichón, se pueden utilizar varios sensores de calidad del aire que sean capaces de detectar y cuantificar la concentración del gas en el aire circundante. Uno de los sensores más comunes y accesibles es el sensor de CO₂ basado en tecnología de infrarrojos no dispersivo (NDIR, por sus siglas en inglés). Estos sensores son ampliamente utilizados en aplicaciones de monitoreo de calidad del aire y proporcionan mediciones precisas y confiables de CO₂.

Tabla 1. Efecto del CO₂ en las personas en lugares cerrados.

Efecto del CO ₂ en las personas en diferentes niveles	
Concentraciones	Efecto
350 – 450 ppm	Concentración atmosférica típica
600 – 800 ppm	Calidad del aire interno aceptable
1,000 ppm	Calidad del aire interno tolerable
5,000 ppm	Límite promedio de exposición en un período de ocho horas
6,000 – 30,000 ppm	Preocupación, solo exposición breve
3 – 8%	Incremento de la frecuencia respiratoria, dolor de cabeza
> 10%	Náuseas, vómitos, pérdida de conocimiento
> 20%	Pérdida de conocimiento repentina, muerte

Los rangos son solo orientativos y la sensibilidad individual puede variar. Además, los efectos del CO₂ en la salud pueden estar influenciados por otros factores, como la presencia de otros contaminantes en el aire y las condiciones de temperatura y humedad.

1.4 Desgasificación difusa de CO₂

Los volcanes emiten grandes cantidades de gases a la atmósfera y estos se pueden dividir en dos grupos, el primero es el de los gases visibles al ojo humano, esto se debe a la presencia del vapor de agua en los penachos volcánicos y fumarolas, pero los gases volcánicos que son emitido a través de los hervideros, manantiales naturales o artificiales de aguas, en donde se tenga la presencia de un burbujeo (**Imagen 5**), es indicador de un proceso de desgasificación.



Imagen 5. Fumarolas y burbujeos en cráter del volcán Chichón.

En el segundo se encuentran las emanaciones de gases volcánicos no visibles al ojo humano, a este fenómeno se le conoce como emisiones difusas o dispersas y las principales emisiones son de CO₂. Las emisiones de este tipo se perciben a través de todo el edificio volcánico, pero la mayor presencia de emisiones se presenta principalmente en las zonas de mayor permeabilidad vertical (fracturas y fallas), la característica que llegan a presentar dichas zonas favorecen el traslado de los gases desde el interior hacia la superficie del cuerpo volcánico.

Las emisiones difusas o dispersas también pueden ser catalogadas como emisiones “silenciosas” (Pérez, 2009), esto se debe principalmente a que sus valores de flujos volumétricos suelen ser relativamente pequeños si se comparan con los valores que se registran en las fumarolas y en los penachos.

La desgasificación difusa es un proceso de emisión de gas que se da lugar a través de las superficies de los suelos, incluso en áreas muy alejadas del volcán y de fuentes termales como se aprecia en la **Imagen 6**. Las especies gaseosas emitidas a través de este tipo de manifestación son normalmente inertes y suelen ser liberadas a bajas temperaturas. En la siguiente imagen se ve la representación de las emisiones de los gases.

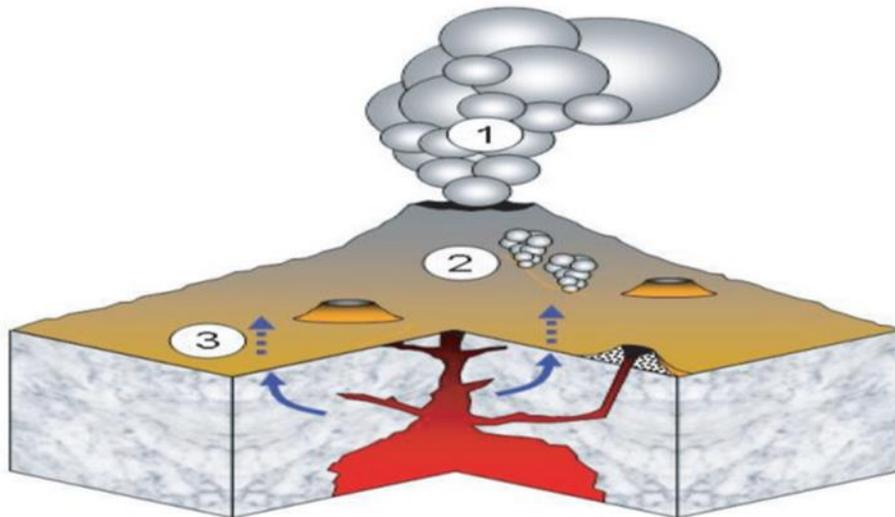


Imagen 6. Emisión de gases en cuerpos volcánicos, 1. Penacho de gases 2. Fumarolas 3. Difusión de gases. Tomada de Llinares (2004).

Los mecanismos responsables que se encargan del transporte de las emisiones difusas, dispersas y silenciosas de CO_2 son la difusión y la advección, estos dos mecanismos al momento de darse dicha función, obedecen a la existencia de gradientes de concentración y de presión de CO_2 . La difusión es el mecanismo que se encarga principalmente del transporte de los valores más pequeños de los flujos de CO_2 , mientras que el mecanismo de la advección se encarga de los valores más grandes del flujo difuso de CO_2 que se registran en los sistemas volcánicos.

La medición de estas emanaciones a la atmósfera puede ser evaluada, con alto grado de exactitud, mediante sensores de infrarrojo portátiles utilizados en el método de “cámara de acumulación de gases” lo que permite la localización de sus emisiones anómalas o variaciones espaciotemporales (Hernández, 2012).

Planteamiento del Problema

El CO₂ es el segundo gas volcánico más abundante, después del vapor de agua. Esto se debe a su baja solubilidad en fundidos silicatados (Gerlach y Graeber, 1985) y a su facilidad de medición en el sitio. El CO₂ se ha convertido en un marcador valioso para evaluar la desgasificación del magma, y por esta razón se han realizado numerosos estudios para analizar las variaciones espaciales y temporales del flujo difuso de CO₂, así como su relación con el nivel de actividad volcánica (Allard et al., 1991)

Cuando un volcán acumula agua, su peligrosidad aumenta, ya que se convierte en una trampa para los fluidos ricos en CO₂. En las profundidades del lago, se acumulan grandes cantidades de CO₂ de origen volcánico, que se liberan parcialmente a través de la superficie del lago. Sin embargo, si se alcanza la saturación, hay una disminución de la carga hidrostática o una presión externa como deslizamientos internos (**Imagen 7**) o movimientos sísmicos (véase en anexos), esto puede dar lugar a una erupción límnica o a la liberación de una cantidad considerable de gas, lo cual podría asfixiar a cualquier ser vivo ubicado cerca del sistema volcánico (Aguilera, 2000; Toulkeridis, 2013).



Imagen 7. Formación de escarpes o escalonamiento consecuencia de inestabilidad de laderas ocasionando deslizamientos en el cráter del volcán Chichón. Cortesía de Jon Selvas (2023).

El riesgo de una erupción límnica es mayor cuando, además de una alta concentración de CO₂, el lago es muy profundo y su fondo es frío, pero cerca de él

hay áreas de actividad volcánica. Además, el lago debe estar estratificado y ser estable.

Cuando el fondo del lago es cálido, la presión en su interior es alta, la concentración de CO₂ se mantiene constante. Sin embargo, si el fondo del lago es frío, la concentración del gas tiende a ser aún mayor debido a la falta de desgasificación del lago en forma de burbujeo. Esto significa que cualquier evento que altere el estado natural del lago puede provocar que parte del agua saturada ascienda hacia la superficie del lago, donde la presión no es suficiente para mantener el CO₂ en solución. En la superficie del lago comienzan a formarse burbujas, creando una columna de gas y haciendo que el agua del fondo ascienda por succión, perdiendo su CO₂ (Vallejo, 2023).

La topografía del volcán Chichón también desempeña un papel importante. El cráter del volcán se caracteriza por ser profundo y estrecho, y alberga un lago ácido. Durante períodos de actividad volcánica, el calor del magma subterráneo puede calentar el agua del lago, lo que provoca la liberación de gases volcánicos disueltos. Estos gases se acumulan en el fondo del cráter debido a su densidad y a las características físicas proporcionadas por la topografía del volcán.

Cuando la presión de los gases acumulados alcanza un punto crítico, se produce una erupción límnic. La liberación explosiva de gases y la expulsión de agua y material volcánico pueden generar una nube ardiente que se desplaza rápidamente por la ladera del volcán. Esta nube ardiente es extremadamente peligrosa y puede causar graves daños a la vida vegetal, animal y humana en su camino.

En el caso del volcán Chichón, el dato más reciente registrado acerca del CO₂, corresponde al año 2014-2015. Desde entonces, existe escasa información sobre la desgasificación difusa de CO₂ en los últimos años, lo que evidentemente ha resultado en una pérdida de datos sobre la desgasificación que indicaría el comportamiento interno del volcán.

Por otro lado, la información acerca de la emisión de CO₂ en los flancos de la superficie volcánica es nula. Por lo tanto, se desconoce la existencia de sitios donde se esté emitiendo el gas, lo que podría causar afectaciones irreversibles a las poblaciones cercanas al volcán, así como a los turistas que suelen visitar la zona y a las distintas especies animales que habitan en ella.

Existe información sobre la muerte de personas en todo el mundo debido a la exposición al CO₂ emitido por los volcanes, pero casi no se tiene en cuenta las emisiones de gas que provienen del suelo. Este tipo de emisión se considera especialmente peligroso, ya que el gas liberado por la superficie terrestre puede acumularse en espacios cerrados, como las depresiones topográficas naturales que se encuentran alrededor del volcán.

En cuanto a las localidades o pueblos que podrían ser afectados por una erupción freática en el volcán Chichón, las áreas más vulnerables serían aquellas ubicadas cerca del volcán. Algunas localidades cercanas que podrían ser afectadas incluyen:

1. Chichonal: Es una comunidad situada cerca del volcán Chichón, a 3 km aproximadamente al noroeste del cráter, tiene una población total de 66 habitantes. Esta comunidad ha sido afectada por erupciones pasadas y podría estar en riesgo nuevamente en caso de una erupción freática.
2. Francisco León: Es una localidad ubicada al noreste del volcán Chichón, a 5 km de distancia. Cuenta con una población total de 7,245 habitantes que también podría estar expuesta a los efectos de una erupción freática.
3. Nicolás Bravo: Es una comunidad situada al noroeste del volcán Chichón, a 7 km aproximadamente, tiene una población total de 446 habitantes. Aunque se encuentra a una distancia mayor, aún podría experimentar impactos significativos en caso de una erupción freática fuerte.
4. Esquipulas Guayabal. Es una localidad ubicada a 4 km aproximadamente al noroeste del volcán Chichón, cuenta con una población total de 87 habitantes. La

comunidad se ha visto afectada por erupciones pasadas lo que indica que pueda ser afectada por futuras erupciones.

El estado de Chiapas se encuentra en una zona altamente sísmica, lo que indica que siempre ocurren eventos sísmicos significativos con magnitudes perceptibles para la población. Uno de los terremotos más fuertes registrados en Chiapas tuvo lugar el 7 de septiembre de 2017, con una magnitud de 8.2. Este evento provocó daños materiales, pérdida de vidas humanas y numerosas réplicas continuas, como resultado de la ruptura de rocas en el subsuelo debido a dicho sismo. Existe la posibilidad de que este evento, acompañado de réplicas constantes, tenga como consecuencia modificaciones o alteraciones en las cámaras magmáticas de los volcanes cercanos al epicentro de estos sismos, y uno de estos volcanes podría ser el Chichón.

Justificación

El análisis de la composición química e isotópica de los gases volcánicos, así como sus niveles de emisión, nos proporciona información muy valiosa que puede estar relacionada con el estado de actividad del sistema volcánico.

Las emanaciones de CO₂ son uno de los componentes mayoritarios de los gases disueltos en los magmas (lava), y su baja solubilidad hace que se escape con facilidad hacia la superficie, manifestándose de forma visible a través de penachos, fumarolas o hervideros, o de manera no visible (difusa) a través del suelo. En algunos casos, estas emisiones no visibles pueden llegar a ser más significativas que las primeras. Es esencial prestar atención a este flujo, sobre todo debido a su capacidad de movilidad, ya que son los primeros en indicar cualquier variación térmica que ocurra en el interior de un volcán.

Por lo tanto, los científicos dedicados al estudio de los gases volcánicos han enfocado su atención en las emisiones difusas de CO₂ en los sistemas volcánicos. Esto se debe a que estas emisiones son fuente importante para evaluar la dinámica de los procesos de desgasificación en los sistemas volcánicos y, como resultado, los programas de vigilancia volcánica han mejorado. Esto se debe a que los gases o volátiles disueltos en los magmas son la fuerza impulsora detrás de las erupciones volcánicas.

Realizar el estudio del CO₂ en el volcán Chichón ayuda a mejorar la comprensión de sus procesos internos. Proporciona nueva información sobre el estudio de los gases tanto dentro del cráter como en la superficie del volcán, lo que resulta en un monitoreo más completo. Además, se pueden identificar lugares de emanación de CO₂ en los alrededores de la superficie del volcán y establecer medidas de prevención y mitigación del riesgo por la exposición al gas. Esto, a su vez, crea una base de datos para futuros estudios sobre la emisión de CO₂ por parte del volcán Chichón.

La medición y cuantificación continua de la composición química de los gases a través de la técnica de la cámara de acumulación de gases, proporciona una gran cantidad de datos que contribuyen a un mejor entendimiento del sistema en estudio. Además, permite identificar las variaciones a corto plazo. Las fluctuaciones temporales en la distribución espacial de las anomalías de CO₂ en la superficie de los volcanes pueden relacionarse con cambios en el sistema volcánico. Por lo tanto, el monitoreo de la emisión de este gas se convierte en una herramienta para identificar las áreas con mayor probabilidad de experimentar un proceso eruptivo.

Algunos estudios como el de Baubron, Allard y Toutain (1990) han señalado que la emisión difusa de CO₂ procedente de la actividad volcánica, tiene la misma magnitud que el CO₂ liberado por emisiones visibles, de ahí la importancia de la estimación de la emisión difusa de CO₂ en las áreas volcánicas.

Antecedentes

El flujo de CO₂ fue medido en marzo de 2007 en la superficie del lago del Volcán Chichón, México, usando el método de la cámara de acumulación flotante. Los resultados de 162 medidas y la aplicación del método estadístico estándar, desarrollado para estos estudios, demuestran que la tasa de emisión total de CO₂ del lago cratérico es relativamente alta. La tasa de emisión total calculada con simulación secuencial Gaussiana fue de $164 \pm 9.5 \text{ t.d}^{-1}$ para el área de superficie del lago de 138, 000 m² (Mazot, 2008)

En el año de 2007 se llevaron a cabo tres muestreos en diferentes meses (Marzo, Octubre y Diciembre) utilizando el método de la cámara de acumulación flotante para medir la salida del CO₂, en el mes de marzo la tasa media calculada en la superficie del lago fue de $1,500 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, en octubre se realizó una tasa de flujo en el suelo del cráter teniendo un resultado de $1,930 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$ y en el mes de diciembre se efectuó una estimación del flujo obteniendo en este $860 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ (Wunderman, 2007).

El flujo de CO₂ del cráter en el Chichón en el período de 2014 a 2015 aumentó en un factor de 3 (de $\sim 260 \text{ t.d}^{-1}$ a $\sim 800 \text{ t.d}^{-1}$) en comparación con los datos de 2007-2008. El mecanismo que desencadena el flujo de CO₂ desde la superficie del lago ha cambiado de ser predominantemente difusivo a principalmente advectivo (burbujeo) (Jácome & Taran, 2016).

En abril de 2015 se encontró un punto de desgasificación en medio del lago con un flujo de CO₂ de más de $10,000 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. Estas observaciones son la evidencia del inicio de una nueva etapa de actividad dentro del sistema volcán-hidrotermal del volcán El Chichón está asociado muy probablemente con cambios en la actividad magmática en profundidad (Jácome & Taran, 2016).

En el año de 2001, se realizó el estudio sobre desgasificación difusa de CO₂ en el volcán Irazú, con la finalidad de evaluar el origen y la distribución espacial

del flujo difuso de CO₂, así como la tasa de emisión de CO₂ a la atmósfera (Revista Geológica de América Central, 2011).

El 15 de agosto de 1984, se liberó una nube CO₂ del fondo del lago Monoun, matando 37 personas, siendo la primera vez que se registró una liberación masiva del gas (González, 2018).

El 21 de agosto de 1986, en el Lago Nyos, al oeste de Camerún, se desencadenó una de las mayores catástrofes mundiales por una enorme explosión límnic, de más de 80 millones de m³ de CO₂ (Kling, 1987); (Cotel, 1999), que mató a todo ser vivo en un radio de 25 km, incluyendo 1800 personas y decenas de miles de ganado.

En el Cuicocha, la actividad post-volcánica está evidenciada por la emisión de gases volcánicos en diferentes lugares de la laguna, en forma de burbujas de gas, especialmente en el filo norte del domo Yeroví. Dos expediciones de un grupo Ecuatoriano-Español conformadas por el Dr. TheofilosToulkeridis y su grupo de colaboradores científicos del ITER de las Islas Canarias han llevado a cabo estudios de emisión de CO₂ método de cámaras de flujo en los años 2006 y 2012, obteniendo una cantidad de 106 ± 5 y $652 \pm 25 \text{ t.día}^{-1}$, respectivamente (Perez, 2014).

Cava dei Selci, en el lado Norte del complejo volcánico Colli Albani, cerca de Roma, se han registrado las muertes de animales y de una persona en diferentes años por ejemplo la muerte por asfixia de 29 vacas (septiembre de 1999), cinco ovejas (marzo de 2000), un hombre (diciembre de 2000), dos ovejas (febrero de 2001) y una oveja (octubre de 2001) (Carapezza, 2003).

En Italia, en Vulcano (Islas Eolias), dos niños y pequeños animales salvajes han muerto por las emisiones de CO₂ y los turistas informan con frecuencia de síntomas relacionados con la inhalación de gases (Baubron, 1990).

En la región de Lazio, en el centro de Italia, se han producido varios accidentes de personas debido a la inhalación de gas natural (Chiodini et al.,

1996): en 2000, dos cazadores murieron en Veiano; en 2011 murió un hombre y otros tres intoxicados en Lavinio (Barberi, 2019) y dos personas fallecieron en un spa al aire libre en Suio.

Objetivo

5.1 General

- Realizar la medición de emisiones difusa de CO₂ con la técnica de la cámara de acumulación de gases en el volcán Chichón.

5.2 Objetivos específicos

- Utilizar instrumento de cámara de acumulación de CO₂ diseñado en el Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sísmico.
- Realizar pruebas piloto para comprobar la funcionalidad del instrumento de cámara de acumulación.
- Realizar tres campañas para medición de CO₂ difuso en los circuitos propuestos, Viejo Volcán y Cráter del volcán Chichón.
- Analizar datos CO₂ obtenidos en campo para elaboración de mapas de flujo.
- Elaborar mapas de flujo de CO₂ de la zona de estudio para determinar las zonas con mayor emisión de CO₂ en el volcán.
- Analizar la distribución espacial de la emisión difusa de CO₂ para identificar las zonas en las que se presentan altas concentraciones de CO₂.

Metodología

6.1 Zona de estudio

El volcán Chichón está ubicado al norte del estado de Chiapas (17°21' N; 93°41' W; 1,100 msnm), a unos 60 km de la ciudad de Pichucalco, también con influencia en los municipios de Chapultenango, Sunuapa, Ostucán, Francisco León y, en menor medida, Ixtacomitán (Imagen 8). Se destaca por tener un relieve montañoso limitado al norte por la Llanura Costera del Golfo. Este terreno está compuesto principalmente por rocas calizas del Cretácico Superior y del Mioceno. Se considera uno de los sistemas volcánico-hidrotermales más recientes a nivel mundial, su origen está relacionado con la interacción de las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica (Salgado, 2012).

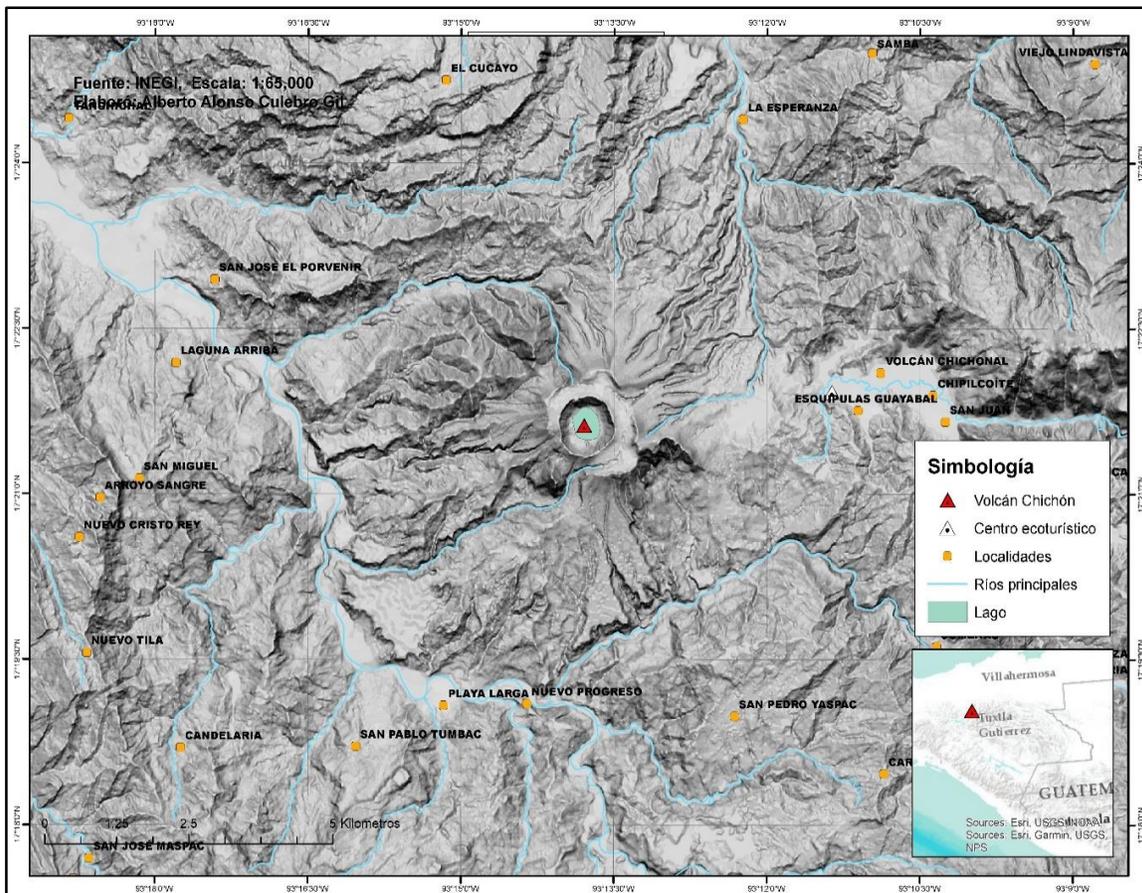


Imagen 8. Mapa de la ubicación del volcán Chichón.

El Chichón es el volcán activo más joven del arco volcánico Chiapaneco. Localmente, las rocas del basamento del Chichón están afectadas por fallas orientadas en dirección E-W con movimiento lateral izquierdo, como la falla de San Juan, y por fallas normales de rumbo N45°E, con planos buzando en dirección NW, conocidas como la zona de fallas de Chapultenango (Macías, 2006). El Chichón es un volcán compuesto por un cráter de 1.5 x 2 km de diámetro denominado Somma, que tiene una elevación de 1,150 msnm. Este cráter en realidad es un anillo de domos de composición traquiandesítica con paredes internas subverticales y pendientes externas suaves (Macías, 2006).

La región Mezcalapa de la que forma parte Francisco León, en donde predomina el clima cálido húmedo con lluvias todo el año, seguido por el clima cálido subhúmedo con lluvias abundantes de verano y el cálido subhúmedo con lluvias de verano, en la parte sur de la región. Con una geología formada por rocas sedimentarias, compuesta mayoritariamente por material detrítico que contiene clastos de tamaño arena (lutita-arenisca con 46.24%), por calcita (caliza 30.56%) y en la porción cercana al volcán Chichonal existen rocas ígneas extrusivas producto del derrame de lava de tipo andesítica y brechas volcánicas de acidez intermedia donde (CEIEG, 2023).

La región norte conformada por los municipios de Pichucalco, Chapultenango, Sunuapa, Ostuacan y Ixtacomitán, abarca climas cálidos húmedos con lluvias todo el año, seguido por el clima cálido húmedo con lluvias abundantes de verano en la parte norte de la región. En la geología de la región se hallan once tipos de rocas siendo las principales por calcita (calizas), roca de tipo detrítico que contiene clastos de tamaño arena (lutita-arenisca), así como rocas detríticas del tipo arenisca, rocas ígneas producto del derrame de lava de tipo andesítica y de brecha volcánica intermedia debido a las explosiones del volcán Chichón (Ibid).

6.2 Método de cámara de acumulación

Esta técnica permite medir el flujo de CO₂ emitido por el suelo hacia la atmósfera. Aunque este flujo puede ser relativamente elevado, incluso en áreas no activas,

los valores a nivel del suelo muestran diferencias mínimas en comparación con el contenido promedio de CO₂ en la atmósfera. El método consiste en evitar que el CO₂ emitido por el suelo se disperse en la atmósfera mediante el uso de una cámara cerrada.

Según Calle (2015) para medir la tasa de flujo de gases en el suelo mediante una cámara de acumulación, se extraen muestras de aire de la parte superior de la cámara a intervalos regulares, como cada 5 o 10 minutos. En cámaras simples, las muestras se extraen con una jeringa, pero en cámaras más sofisticadas se utilizan bombas de vacío o sistemas automatizados.

La concentración de gas dentro de la cámara aumenta con el tiempo debido a la primera ley de Fick, que establece que el flujo de gas es proporcional al gradiente de concentración y a la difusividad del suelo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los aspectos clave en el diseño de las cámaras de acumulación para garantizar que la técnica funcione correctamente y que los errores asociados a la técnica se minimicen.

La cámara de acumulación es muy fácil de utilizar y consta de un recipiente cilíndrico (por ejemplo, una cacerola), en el cual se sitúa el sensor de CO₂ K-30. Este último está equipado con un ventilador con el fin de mejorar la mezcla de gases. La cámara se entierra parcialmente en el suelo, como se aprecia en la imagen (**Imagen 9**).

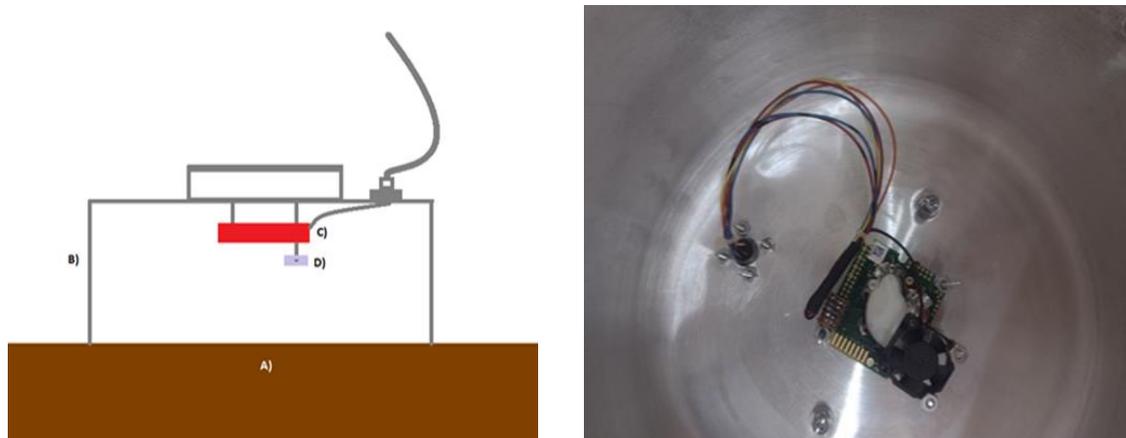


Imagen 9. Diseño de la cámara de acumulación.

La cámara de acumulación se coloca directamente sobre el suelo, y en su interior se instala un medidor de CO₂ (sensor K-30) que toma medidas periódicamente cada 2 segundos durante 10 minutos (**Imagen 10**). Antes de colocar la cámara en el suelo, se debe medir el nivel de CO₂ atmosférico. Una vez que la cámara está cerrada, la concentración de CO₂ aumenta con el tiempo, y la pendiente de esta concentración con el tiempo nos proporciona el flujo de CO₂.



Imagen 10. Cámara de acumulación de gases.

Las medidas de flujo difuso de CO₂ se realizaron mediante el uso de un espectrómetro infrarrojo no dispersivo NDIR (Sensor de CO₂ K-30) portátil, capaz de medir concentraciones de 0 a 10,000 ppm con una precisión de ± 30 ppm o $\pm 3\%$ del valor medido, según las especificaciones. El sensor de CO₂ K-30 se basa en la absorción de luz infrarroja cuando atraviesa un haz de luz, se debe a que algunos gases tienen la capacidad de absorber la luz infrarroja a longitudes de onda específicas, lo que permite la identificación y cuantificación de estos gases en una muestra de aire (Magnetism, 2023). El instrumento cuenta con una cámara de acumulación circular de 15 cm de altura y 27.5 cm de diámetro, con un volumen interno de 7,660.57 cm³, donde se acumula el gas. El gas se homogeniza dentro de la cámara mediante una hélice o un pequeño ventilador colocado en su interior.

Los puntos de muestreo de CO₂ son registrados mediante un GPS incorporado en el instrumento. Este es un módulo GPS de alta calidad, el Adafruit Ultimate GPS, capaz de rastrear hasta 22 satélites en 66 canales. Cuenta con un

excelente receptor de alta sensibilidad (-165 dBm de seguimiento) y una antena incorporada. Puede realizar hasta 10 actualizaciones de ubicación por segundo para el registro o seguimiento a alta velocidad y alta sensibilidad. El consumo de energía es bajo, solo 20 mA durante la navegación. Este GPS proporciona la ubicación exacta en coordenadas geográficas y la hora local actual en UTC/GMT.

La antena incorporada tiene una extensión de 2 metros, opera en una frecuencia de 1,575.42 MHz y funciona con un voltaje de 3.0-5.0 V. Esta antena ayuda a obtener los datos GPS evitando obstrucciones de línea de visión, como la vegetación densa o los árboles, durante el muestreo.

Los datos proporcionados por el Sensor de CO₂ K-30 y el Adafruit Ultimate GPS son procesados por una mini computadora Raspberry Pi Zero y almacenados en una memoria micro-SD. La Raspberry Pi Zero cuenta con 512 MB de RAM, una ranura para tarjeta micro-SD, un puerto mini HDMI con resolución de 1080p, y dos puertos micro USB, uno para conectar dispositivos de datos y otro para proporcionar la alimentación. Tiene un procesador de un solo núcleo con una velocidad de 1 GHz.

Para alimentar el equipo, se utilizó una batería externa (power bank) con una capacidad de carga de 10,000 mAh, que suministra la energía necesaria para el funcionamiento del equipo. Cuenta con dos entradas USB y una entrada micro USB para la carga. En la **Imagen 11** se puede observar cada uno de los componentes que le dan funcionalidad a la cámara de acumulación.

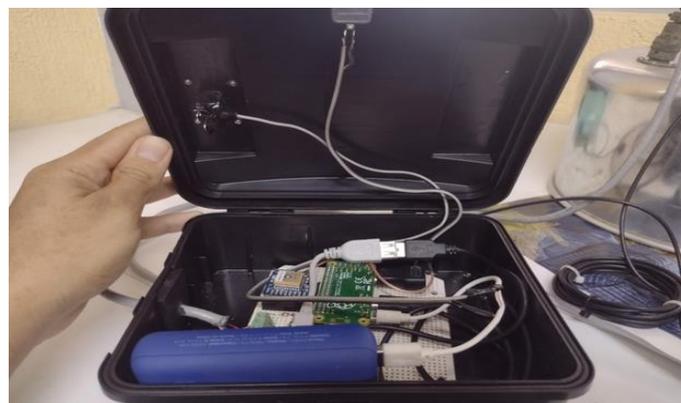


Imagen 11. Componentes de la cámara de acumulación.

El equipo genera un archivo por muestra (**Imagen 12**), en formato de texto, el nombre del archivo se crea a partir de los datos obtenidos del GPS, colocando como nombre el día, mes, hora y minuto con extensión.CO₂; por ejemplo: 03081729.CO₂

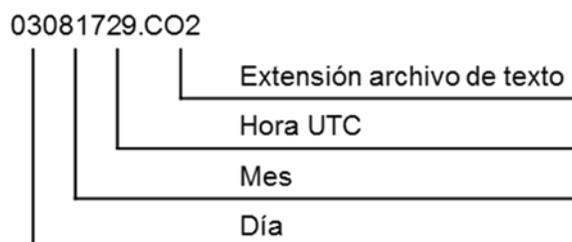


Imagen 12. Especificaciones del nombre del archivo.

La información que contiene el archivo generado en su primera línea contiene la latitud y longitud del punto muestreado, y en las siguientes la fecha, hora UTC y medición de CO₂, como se puede apreciar en la siguiente imagen (**Imagen 13**).

```
1646.6411N 09307.3415W
2022-03-08T17:20:01 395
2022-03-08T17:20:02 395
2022-03-08T17:20:03 388
2022-03-08T17:20:04 388
2022-03-08T17:20:05 388
2022-03-08T17:20:06 388
2022-03-08T17:20:07 391
2022-03-08T17:20:08 391
2022-03-08T17:20:09 389
2022-03-08T17:20:10 389
2022-03-08T17:20:11 388
2022-03-08T17:20:12 388
2022-03-08T17:20:13 387
2022-03-08T17:20:14 387
2022-03-08T17:20:15 388
2022-03-08T17:20:16 388
2022-03-08T17:20:17 389
2022-03-08T17:20:18 389
2022-03-08T17:20:19 388
```

Imagen 13. Contenido del archivo.

Antes de llevar a cabo la campaña de medición en el volcán Chichón, se realizó una prueba piloto en las instalaciones de la UNICACH para evaluar el funcionamiento del equipo y el desempeño de la batería, en particular su tiempo de vida.

6.3 Campaña de monitoreo en zona de estudio

Se programaron tres salidas de medición de CO₂ difuso en el volcán Chichón. El instrumento está configurado para medir durante un período de 10 minutos. La tasa de cambio de la concentración dentro de la cámara a lo largo del tiempo se cuantifica para calcular una tasa de flujo, que puede extrapolarse a un área fuera de la cámara.

Se han seleccionado sitios estratégicos en la zona de estudio para las mediciones de gas difuso de CO₂, entre los cuales se encuentra un sendero interpretativo para las mediciones. En la **Imagen 14** se puede observar el circuito principal (circuito Chichonal) que conduce hasta el cráter del volcán.

Las mediciones de CO₂ se realizaron del cráter al oeste del volcán que corresponde a la ruta de ascenso (circuito chichonal) al cráter, esta zona es la más transitada por turistas y ganaderos de la zona, por esto es el área que representa un mayor riesgo e interés de estudio para salvaguardar a la población en general.

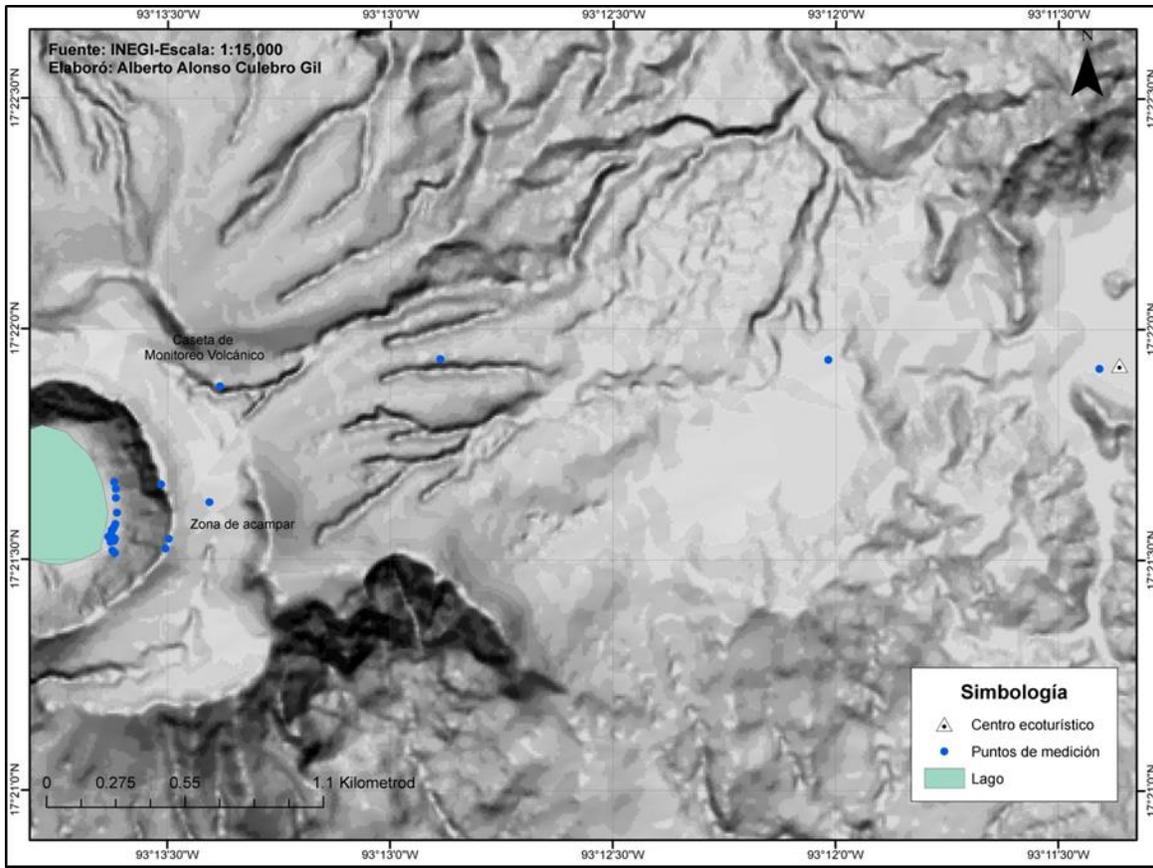


Imagen 14. Circuito de Muestreo.

El sitio de ascenso al Circuito Chiconal (ruta principal) está ubicado en la localidad de Viejo Volcán, en la vertiente oriente del volcán, cuya vía de acceso se encuentra en Chapultenango. El cráter se encuentra a 5.6 km de distancia, se caracteriza por laderas con pendientes suaves (5.2°), por lo que el ascenso es relativamente tranquilo. Entre el punto de inicio y el cráter existe una variación altitudinal entre 573-1 040 m. A lo largo del trayecto se aprecian diferentes valles fluviales (**Imagen 15 a**) que cortan depósitos piroclásticos (**Imagen 15 b**), al final del recorrido se llega al borde del cráter que tiene un kilómetro de diámetro (**Imagen 15 c**); una profundidad de 160 m y en el fondo un lago de color verde, rodeado por fumarolas y nubes de vapor que desprenden azufre (López, 2013).

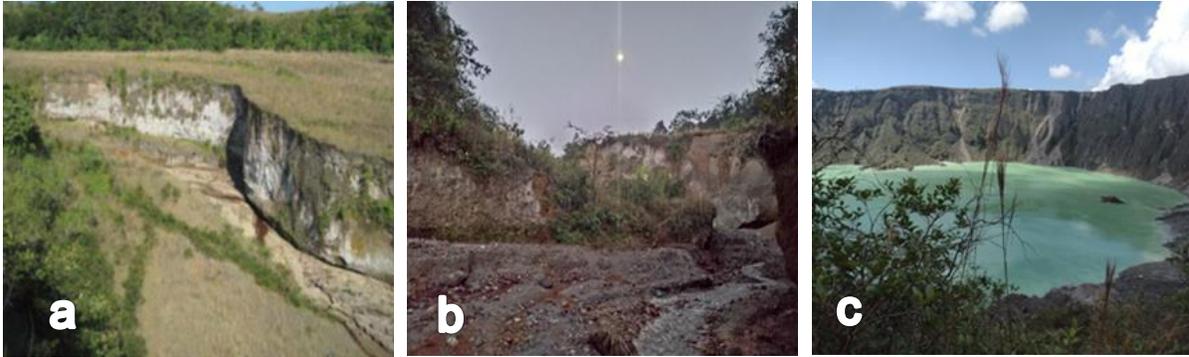


Imagen 15. Paisajes de interés en el ascenso al volcán Chichón. a) Depósitos de piroclastos, b) Valles erosivos, c) Cráter del volcán Chichón.

Dentro de la zona de estudio son conocidas tres rutas además de la abordada (**Imagen 16**), sin embargo, son de menor flujo poblacional por lo que no implican un riesgo muy elevado para el sector social, en caso de querer continuar con el proyecto o necesitar medir la concentración de estos gases. Las rutas son las siguientes:

Ruta Francisco León (rivera del Viejo Carmen)

En Chapultenango se encuentra la desviación a Viejo Volcán donde se ubica el sitio de ascenso al volcán Chichón. Esta ruta se encuentra al sur de Pichucalco, Francisco León (rivera del Viejo Carmen), se ubica a 7.8 km de distancia, el trayecto está dominado por pendientes moderadas (4.28°). (Ibid)

Ruta Viejo Nicapa

El recorrido se encuentra al sureste de Pichucalco, a lo largo del camino se observan lomeríos con pastizales. Este sitio constituye una alternativa para ubicar al cráter del volcán Chichón, cuya distancia aproximada es de 5.2 km desde San José del Porvenir y 12 km desde Nicapa, sobre terrenos dominados con pendientes moderadas a fuertes ($> 4^\circ$). (Ibid)

Ruta Ostucán

El circuito que corresponde a Ostucán, se decidió que fuera una ruta alterna de medición por si el acceso de alguna ruta de las anteriores se

complicaba, sin embargo, es necesario que en esta ruta se efectúen mediciones de CO₂ e implementar más zonas de medición.

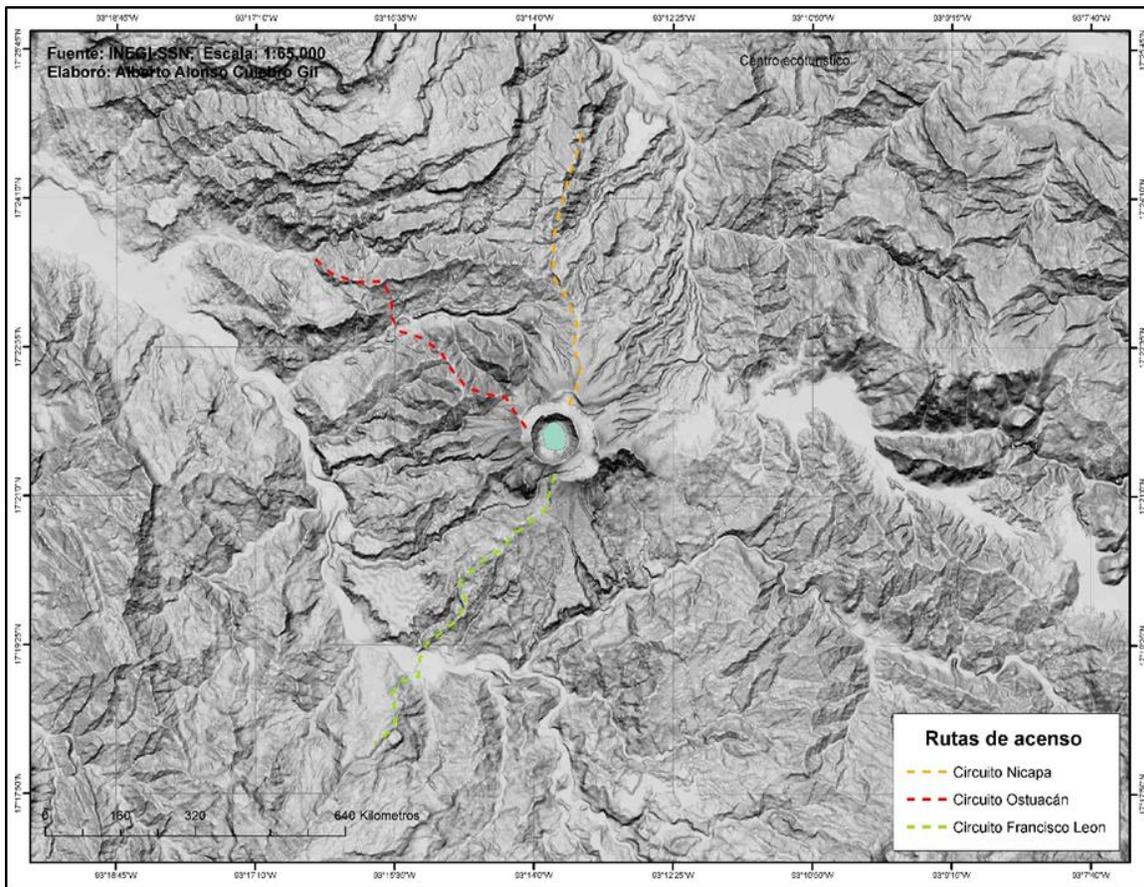


Imagen 16. Rutas de ascenso.

Un monitoreo exhaustivo del volcán Chichón requeriría una red de estaciones de monitoreo estratégicamente ubicadas para obtener una imagen completa de las condiciones atmosféricas y los gases volcánicos presentes en el área. Además del CO₂, también se monitorean otros gases volcánicos, como el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S), para una evaluación más completa de la actividad volcánica.

6.4 Análisis de datos

Los datos recopilados en el campo durante la campaña de muestreo se analizaron y procesaron en el Centro de Monitoreo Volcanológico y Sismológico de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). Posteriormente, se

generó un gráfico para cuantificar la tasa de flujo de CO₂, la cual se calculó a partir de la pendiente de la concentración en función del tiempo.

El mapa de contorno de la distribución espacial de CO₂ difuso se creó utilizando el programa ArcMap. Este software es completo y representa la información geográfica mediante una colección de capas y otros elementos en un mapa, permitiendo la visualización en 3D, la creación de isolíneas y el modelado de superficies. ArcMap funciona en el entorno de Microsoft Windows y se emplea ampliamente para el modelado 3D del terreno, el modelado batimétrico, la visualización del paisaje, el análisis de superficies, la cartografía de curvas de nivel, la cartografía de superficies 3D, el gridding y la volumetría.

En este software se utilizó el método de interpolación de puntos, que consiste en emplear una capa de puntos como entrada y que debe incluir un campo numérico que servirá como base para la interpolación. El método de interpolación de puntos se aplica a datos que cambian de manera lenta y gradual en el paisaje, como la temperatura, los niveles de contaminación y, en este caso, la concentración de CO₂.

7 Resultados

7.1 Prueba piloto del equipo

Con el objetivo de observar el funcionamiento de la cámara de acumulación antes de llevar el dispositivo a la zona de estudio, se realizaron pruebas dentro de las instalaciones de la UNICACH; los datos generados por cada punto de medición durante la prueba, fueron los esperados debido a que los datos generados concuerdan con el rango de concentración que hay en el ambiente (300-400 ppm) según la NASA (2023), genero los archivos por cada punto de medición, en la Tabla 2 se muestra los datos de tres puntos de medición. Durante la toma de muestreo no se tuvo errores en el funcionamiento del instrumento.

Tabla 2. Datos recabados por la cámara de acumulación.

1646.6201N	09307.2682W	1646.6205N	09307.2377W	1646.6282N	09307.1897W
2022-03-08T14:51:01	387	2022-03-08T15:02:01	391	1970-01-01T00:00:04	425
2022-03-08T14:51:02	388	2022-03-08T15:02:02	391	1970-01-01T00:00:05	425
2022-03-08T14:51:03	388	2022-03-08T15:02:03	391	1970-01-01T00:00:06	395
2022-03-08T14:51:04	388	2022-03-08T15:02:04	391	1970-01-01T00:00:07	395
2022-03-08T14:51:05	388	2022-03-08T15:02:05	390	1970-01-01T00:00:08	404
2022-03-08T14:51:06	385	2022-03-08T15:02:06	390	1970-01-01T00:00:09	404
2022-03-08T14:51:07	385	2022-03-08T15:02:07	391	1970-01-01T00:00:10	387
2022-03-08T14:51:08	388	2022-03-08T15:02:08	391	1970-01-01T00:00:11	387
2022-03-08T14:51:09	388	2022-03-08T15:02:09	391	1970-01-01T00:00:12	389
2022-03-08T14:51:10	386	2022-03-08T15:02:10	391	1970-01-01T00:00:13	389
2022-03-08T14:51:11	386	2022-03-08T15:02:11	392	1970-01-01T00:00:14	388
2022-03-08T14:51:12	388	2022-03-08T15:02:12	392	1970-01-01T00:00:15	388
2022-03-08T14:51:13	388	2022-03-08T15:02:13	396	1970-01-01T00:00:16	388
2022-03-08T14:51:14	387	2022-03-08T15:02:14	396	1970-01-01T00:00:17	388
2022-03-08T14:51:15	387	2022-03-08T15:02:15	396	1970-01-01T00:00:18	389
2022-03-08T14:51:16	388	2022-03-08T15:02:16	396	1970-01-01T00:00:19	389
2022-03-08T14:51:17	388	2022-03-08T15:02:17	394	1970-01-01T00:00:20	389
2022-03-08T14:51:18	387	2022-03-08T15:02:18	394	1970-01-01T00:00:21	389
2022-03-08T14:51:19	387	2022-03-08T15:02:19	394	1970-01-01T00:00:22	389
2022-03-08T14:51:20	391	2022-03-08T15:02:20	394	1970-01-01T00:00:23	389

Con los datos obtenidos, se trabajó con los valores más altos de cada punto para identificar cuales puntos se registraron las concentraciones más elevadas de CO₂ y analizar el comportamiento de cada uno de ellos en una gráfica.

Posteriormente, se generó un mapa de flujo para observar de qué manera se distribuye el CO₂ en la universidad.

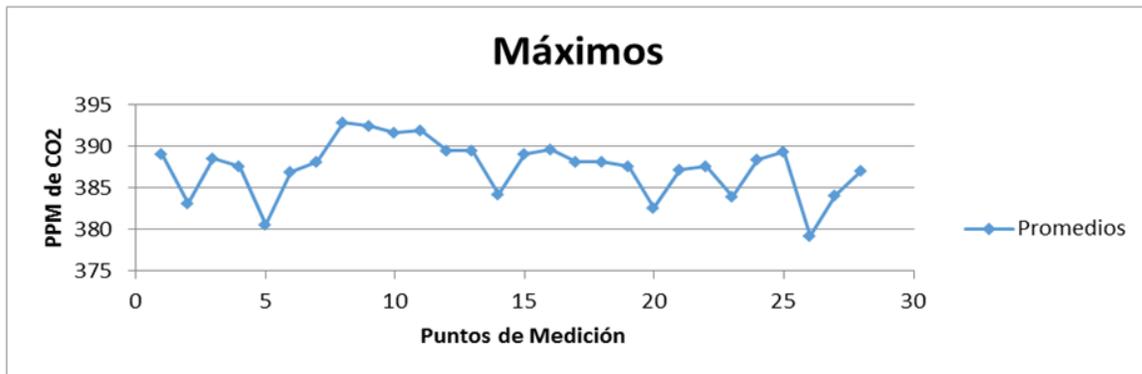


Imagen 17. Grafica elaborada con datos obtenidos de la medición de CO₂.

Con el análisis de los datos obtenidos y la representación generada en la gráfica, se elaboró un mapa (Imagen 18) de flujo a través del programa ArcMap para apreciar de mejor manera el comportamiento del CO₂ entre cada punto en el área seleccionada para el análisis antes de llevar a cabo la actividad en zona del volcán Chichón.

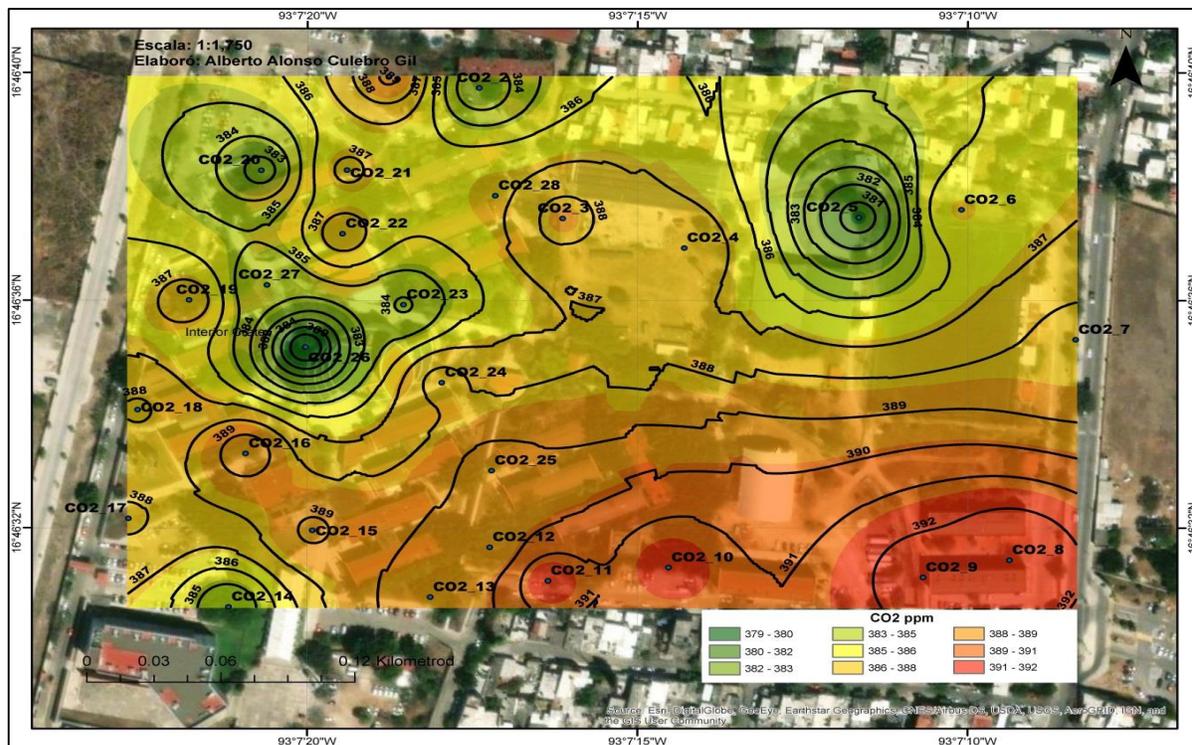


Imagen 18. Mapa de la distribución del CO₂ dentro de la UNICACH.

7.2 Resultados del trabajo en el área de estudio

La campaña de medición de emisión difusa de CO₂ se llevó a cabo en la superficie del volcán Chichón como se ve en la **Imagen 19**. Se realizaron 23 puntos de muestreo durante tres campañas, se obtuvieron registro de concentraciones que variaron desde 360 hasta 1,133 ppm.



Imagen 19. Muestreo del CO₂ en el Cráter del volcán Chichón.

Con los datos obtenidos de la medición del flujo difuso del gas, se realizó un análisis inicial del conjunto de datos tomados en el campo, en el cual se identificaron los valores máximos de cada punto. A su vez, se calculó la media y el valor mínimo de los datos obtenidos en cada punto de medición para trabajar con valores fijos. De esta manera, en cada medición se registraron trescientos valores del flujo difuso de CO₂. Una vez obtenida la media de los datos de cada punto, se elaboró una tabla, como la que se muestra en la **Tabla 3**, para observar en qué punto se encuentra la mayor concentración de CO₂.

Tabla 3. Concentraciones de CO₂ en el volcán Chichón.

Puntos de medición	Longitud	Latitud	Minima	Maxima	Promedio	Media	PB (hPa)	Temp (c°)
CO2_1	17.358563	-93.226969	399	403	400.88	401	913.0hPa	22°c
CO2_2	17.358967	-93.227133	394	413	403.63	404	912.6hPa	23.9°c
CO2_3	17.359083	-93.226967	393	416	403.24	402	913.3hPa	25.1°c
CO2_4	17.35915	-93.227217	387	511	407.86	399	913.3hPa	24.5°c
CO2_5	17.3594	-93.227085	361	431	392.85	393	913.3hPa	24.5°c
CO2_6	17.359267	-93.2271	384	648	457.61	436	913.0hPa	22.2°c
CO2_7	17.359433	-93.227033	249	556	374.15	380	912.5hPa	24.4°c
CO2_8	17.359533	-93.226983	121	1133	393.66	388	908.3hPa	32.2°c
CO2_9	17.359083	-93.22495	322	507	412.57	409	894.7hPa	32.1°c
CO2_10	17.358733	-93.225067	386	398	394.2	394	896.1hPa	29.7°c
CO2_11	17.3604	-93.223433	390	420	405.12	406	908.3hPa	32.1°c
CO2_12	17.365583	-93.2148	395	410	402.17	402	915.5hPa	30.9°c
CO2_13	17.365567	-93.200283	360	395	383.46	386	931.7hPa	25.9°c
CO2_14	17.36525	-93.190133	371	396	389.58	391	929.3hPa	26°c
CO2_15	17.364597	-93.223042	379	389	383.32	383	913.7hPa	28°c
CO2_16	17.361053	-93.225241	392	403	395.46	395	910.2hPa	24°c
CO2_17	17.359	-93.227	387	415	395	392	890.2hPa	26°c
CO2_18	17.358649	-93.22706	352	906	470	394	920.2hPa	21°c
CO2_19	17.36002	-93.226893	307	720	408.41	384	896.1hPa	32.1°c
CO2_20	17.360882	-93.226933	389	518	400.41	394	915.5hPa	23.9°c
CO2_21	17.359611	-93.226952	341	513	391.82	388	908.3hPa	25.9°c
CO2_22	17.36113	-93.226991	379	385	381.98	382	894.7hPa	24.4°c
CO2_23	17.360552	-93.226934	395	398	395.91	396	931.7hPa	29.7°c

En la **Tabla 3** se puede observar que las muestra 8 registro la concentración más alta con 1133 ppm, de acuerdo con la **Tabla 1** (que describe los efectos del CO₂ en las personas) esta concentración de CO₂ no es nociva para la población. Se menciona que es una condición tolerable, aunque estar expuesto durante un tiempo prolongado puede causar malestar. Por esta razón, se deben extremar precauciones al descender al cráter, especialmente en la zona donde se registró la concentración más alta del gas. La concentración puede ser un indicador de fuentes de emanación o posibles fisuras en esas partes del volcán. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que haya más fuentes de emanación o fisuras por donde el CO₂ pueda fluir a la superficie.

En los puntos ubicados en la parte alta de la orilla del cráter (**Imagen 20**), correspondientes a las muestras 9 y 10, se obtuvieron concentraciones de 507 y 398 ppm.



Imagen 20. Muestreo de CO₂ en el borde del cráter.

El muestreo 11 se llevó a cabo en la zona de acampar del volcán, dado que el área es frecuentemente utilizada por turistas y podría ser peligrosa si se presentaran mayores concentraciones de CO₂ en el lugar. Los datos del muestreo 11 indican que no existe riesgo alguno en la zona de acampar. Sin embargo, sería recomendable realizar muestreos regulares en el área por si en algún momento la concentración de CO₂ llegara a aumentar.

En cuanto a las muestras 12, 13 y 14, que se tomaron en el sendero que conduce directamente a las cabañas, se obtuvieron concentraciones normales por debajo de los 410 ppm, lo que indica que no hay riesgo alguno para la población durante el ascenso y descenso al cráter del volcán. El punto 15, se tomó en el área de la caseta de monitoreo por la cercanía al cráter, la concentración que se tubo fue de 389 ppm.

Del punto 16 al 23, en donde los puntos 18 y 19 presentaron concentraciones de 907 y 720 ppm respectivamente, las concentraciones máximas que se tuvieron en los demás sitios oscilan entre los 380 a 518 ppm.

Después del análisis de los datos en la tabla, se procedió a la elaboración del mapa de distribución de CO₂ utilizando los datos GPS generados en cada punto de medición. En la **Imagen 21**, se puede apreciar la distribución del CO₂

representada mediante líneas de color negro (isoyetas), que muestran la cantidad de gas presente en el lugar e indican dónde se encuentran los valores más altos de CO₂. A simple vista, los valores más elevados se encuentran dentro del cráter del volcán.

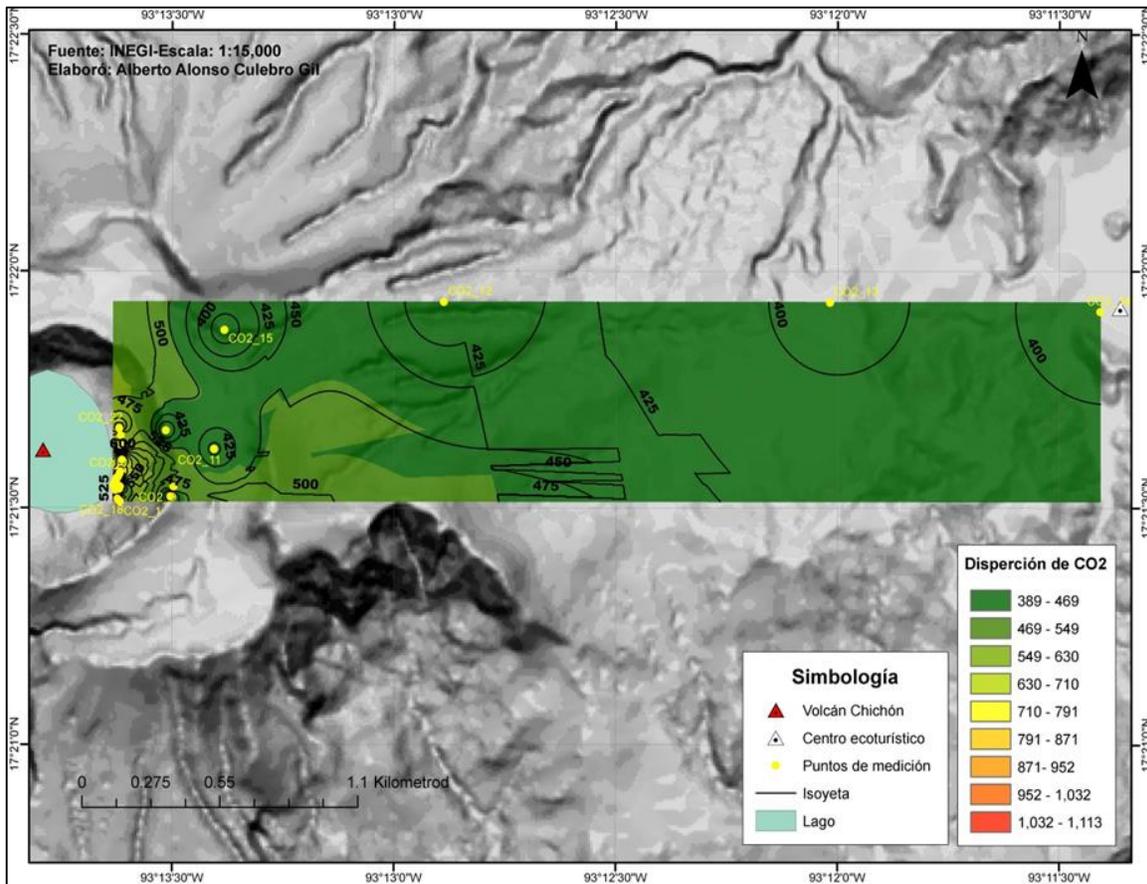


Imagen 21. Mapa de la distribución del CO₂ en el volcán Chichón.

La concentración de CO₂ dentro del cráter se puede observar en la **Imagen 22**. Al examinar detenidamente la imagen, se destacan dos puntos que sobresalen entre los demás debido al tono de color en el que se encuentran, indicando que son los puntos con mayor concentración de gas. Las isoyetas muestran cómo se distribuye el CO₂ en la zona y señalan dónde se encuentran los valores más altos en la distribución.

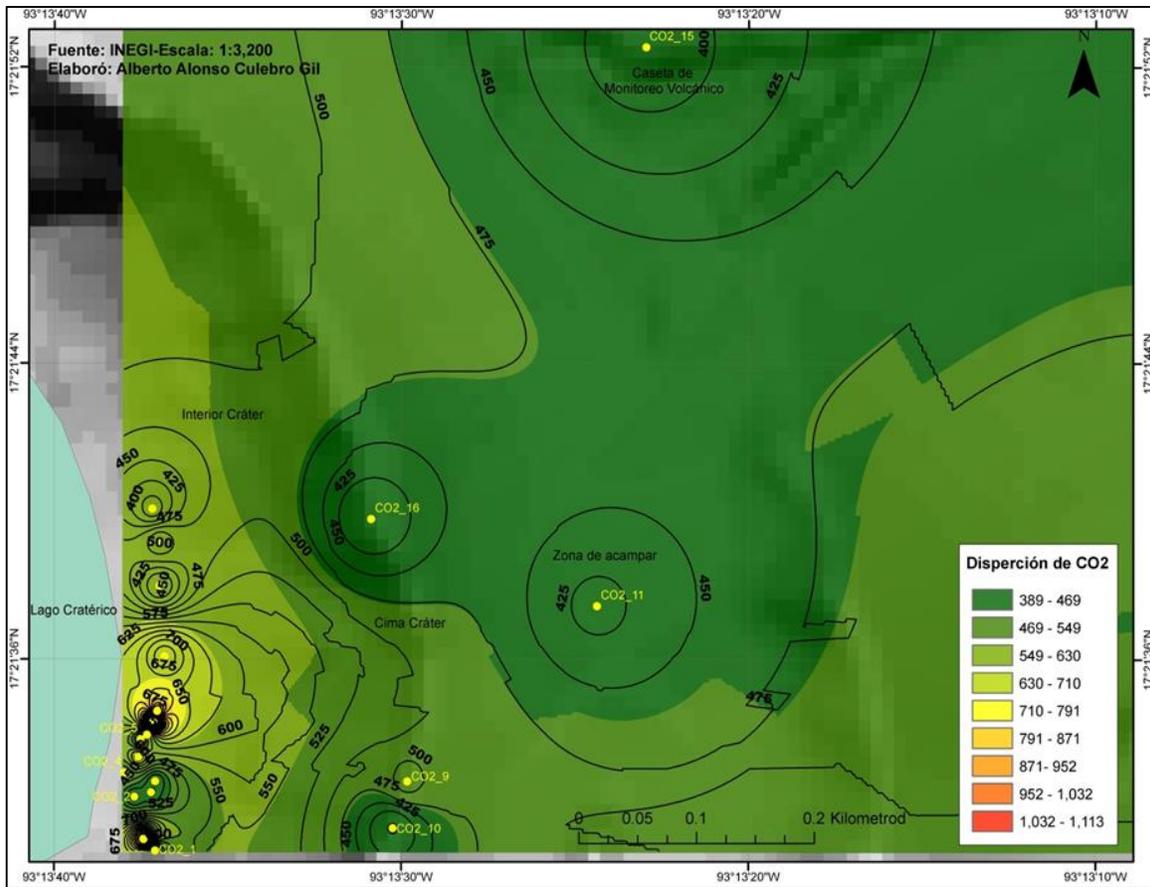


Imagen 22. Concentración de CO₂ dentro del cráter.

8 Conclusiones

Las mediciones de la emisión difusa de CO₂ es una herramienta de suma importancia que puede funcionar como instrumentos para tomar decisiones en la gestión del riesgo relacionado con el volcán Chichón, con el fin de evitar posibles situaciones no deseadas.

El equipo desarrollado dentro del CMVS para medir el CO₂, con las pruebas realizadas previamente en las instalaciones de Ciudad Universitaria de la UNICACH, demostró ser un equipo portátil y ligero que proporciona datos confiables. Se puede afirmar que el instrumento fabricado con materiales de bajo costo dentro del CMVS para medir el CO₂ es un equipo confiable, portátil, ligero y genera datos altamente confiables.

El instrumento de bajo costo diseñado cumple la misma función que el equipo CM-HWR11, que es medir la difusión de CO₂. La diferencia entre el equipo desarrollado en el CMVS y el CM-HWR11 es la portabilidad y la facilidad de uso, ya que el CM-HWR11 es un instrumento grande y pesado.

Adicionalmente, la instalación del CM-HWR11 representa todo un reto debido a la irregularidad de la superficie del volcán y a su peso. La manera más viable para su transporte e instalación sería un helicóptero, pero a la larga puede representar una significativa pérdida de dinero debido al alto costo que conlleva. Además, existen diversos riesgos asociados con dejar el equipo en el cráter, como posibles derrumbes, incremento del nivel de la laguna y deterioro del instrumento debido a la exposición a los elementos o al vandalismo.

Los registros obtenidos por el instrumento en el cráter del volcán Chichón se caracterizan por estar dentro del rango en el que no representa un riesgo significativo para la población (386 – 1133 ppm).

En los mapas se puede observar la distribución espacial de emisión de CO₂, prestando especial atención a la zona de mayor emisión.

De los veintitrés puntos de medición que se llevaron a cabo durante el presente trabajo, los niveles de concentración obtenidos se encuentran dentro de rangos normales, considerando los datos presentados en la Tabla 1.

9 Recomendaciones

El aumento del nivel del lago cratérico del volcán Chichón en los últimos cuatro años es significativo, ha sido hasta de 14 metros. Esto podría tener implicaciones para el volcán y aumentar la posibilidad de erupciones límnicas. Por ejemplo:

1. Mayor acumulación de gases: El aumento del nivel del lago puede resultar en una mayor acumulación de gases volcánicos disueltos en el agua. A medida que el agua se eleva, la presión en el fondo del lago aumenta, lo que puede llevar a una acumulación de gases a niveles peligrosos. Esto podría aumentar el riesgo de una erupción límnicia en el futuro.
2. Mayor inestabilidad del cráter: El aumento del nivel del agua puede afectar la estabilidad del cráter volcánico (**Imagen 23-24**). El agua puede infiltrarse en las grietas y fisuras existentes en las paredes del cráter, lo que puede debilitar la estructura y aumentar el riesgo de colapsos o deslizamientos de tierra en el área circundante.
3. Cambios en el régimen hidrotermal: El incremento del nivel del lago puede alterar el régimen hidrotermal del volcán Chichón. Los flujos de agua y las interacciones entre el agua y las rocas calientes pueden generar cambios en la actividad geotérmica. Esto podría resultar en la liberación de gases volcánicos y otros procesos asociados a la actividad volcánica.
4. Impacto en la vegetación y los ecosistemas: El aumento del nivel del lago puede afectar la vegetación y los ecosistemas en el área cercana al volcán Chichón. La inundación de áreas previamente secas puede tener consecuencias para la biodiversidad y la vida silvestre que dependen de esos ecosistemas.



Imagen 23. Aumento del nivel del lago.

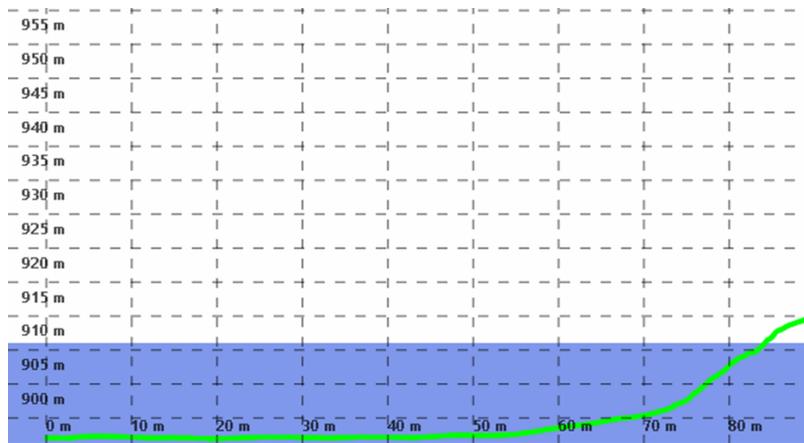


Imagen 24. Aumento del nivel del lago respecto al primer espejo de agua al pico de la isla dentro el cráter del 2019-2023.

Es necesario llevar a cabo un monitoreo continuo de la actividad volcánica en el volcán Chichón y realizar investigaciones para comprender mejor estos cambios en el lago cratérico y sus implicaciones. Es fundamental que las autoridades y los científicos trabajen en conjunto para evaluar los riesgos y tomar medidas adecuadas de mitigación, como fortalecer la vigilancia y planificar evacuaciones en caso de una erupción inminente.

Se recomienda en el Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sísmico la implementación del monitoreo continuo o en campañas intermitentes (por lo menos de tres campañas anuales) de gases en los volcanes activos del estado de Chiapas, con el objetivo de interpretar y comprender de manera más precisa los procesos internos. También se sugiere monitorear de forma constante las áreas

donde se registraron concentraciones más altas de CO₂ para evaluar si disminuyen o aumentan con el tiempo. Al mismo tiempo, se propone implementar las rutas previamente sugeridas y explorar áreas de mayor actividad volcánica para identificar posibles fuentes de emisión y concentraciones más elevadas de CO₂

11 Bibliografía

- Aguilera, E., Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Marini, L., & Raco, B. (2000). Water chemistry of Lake Quilotoa (Ecuador) and assessment of natural hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 97, 271-285.
- Allard, P. (1992). Global Emissions of Helium-3 by Subaerial Volcanism. *Geophysical Research Letters*, Vol. 19, 1479-1481.
- Allard, P., Carbonelle, J., Dajlevic, D., Le Bronnec, J., Morel, P., Robe, M., Zettwoog, P. (1991). Eruptive and diffuse emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, Vol. 351, 387-391.
- Baubron, J., Allard, P., & Toutain, J. (1990). Diffuse volcanic emissions of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, Vol. 344, 51-53.
- Baubron, J., Mathieu, R., & Miele, G. (1991). Measurement of gas flow from soils in volcanic areas: the accumulation method. *Napoli'91 International Conference on active volcanoes and Risk Mitigation*. Napoli, Italy.
- Calle, L. N. (2015). Diseño de cámara estática cerrada y móvil para monitoreo de parámetros volcánicos en Colombia. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 21(36), 109-126.
- CEIEG. (08 de Noviembre de 2023). CEIEG. Obtenido de https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPASTEMREG/REGION_VII_I_NORTE_Post.pdf
- CEIEG. (08 de Noviembre de 2023). CEIEG. Obtenido de https://www.ceieg.chiapas.gob.mx/productos/files/MAPASTEMREG/REGION_III_MEZCALAPA_post.pdf
- CENAPRED. (2001). *Las Cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*. Ciudad de México.

- Chiapas, G. d. (08 de Noviembre de 2023). Hacienda-Chiapas. Obtenido de <http://www.haciendachiapas.gob.mx/planeacion/Informacion/Desarrollo-Regional/prog-regionales/MEZCALAPA.pdf>
- Chiodini, G., Frondini, F., & Raco, B. (1996). Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). *Bull Volcanol*, Vol. 48, 41-50.
- Contreras, U. A., & Jiménez Salgado, E. (2012). Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, Chiapas, como fuente alterna de energía. *Geotermia*, 25(2), 3-20.
- Cotel, A. (1999). A trigger mechanism for the Lake Nyos disaster. *J Volc Geotherm Res*, Vol. 88, 343-347.
- CENAPRED. (2001). Las Cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. Ciudad de México.
- De la Cruz Reyna, S. d. (Diciembre de 2008). [Proteccióncivil.gob.mnx](http://www.proteccioncivil.gob.mnx). Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastre. Obtenido de http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/363/1/images/fasciculo_volcanes.pdf
- Díez Gil J. L. (1992). (ELEMENTOS DE LA VULCANOLOGÍA). Editorial SERIE CASA DE LOS VOLCANES. Recopilación. pp. 125-142
- Duarte, J., & Perez-Peñate, J. (2015). Influence of water on the diffusion of CO₂ from volcanic lakes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 303, 21-29.
- Fihswrap. (1 de Agosto de 2018). Obtenido de <https://blog.newspapers.com/lake-nyos-disaster-august-21-1986/>
- Galobart, N. (13 de Abril de 2022). Fontgas. Obtenido de: <https://www.fontgas.com/blog/calidad-del-aire-y-supervision-del-co2/>
- Gerlach, T., & Graeber, E. (1985). Volatile Budget of Kilauea Volcano. *Geology*, 13(12), 1121-1124.

- Giammanco, S., Inguaggiato, S., & Valenza, M. (1998). Soil and fumarole gases of Mount Etna: geochemistry and relations with volcanic activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 81, 297-310.
- Gómez, J. A., & Martí, J. (2001). The chemistry of crater lakes: A review. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(19), 3359-3380.
- González, D. (2018, 22 de octubre). El lago más peligroso del mundo. *Fronteras*. Obtenido de <https://fronterasblog.com/2018/10/22/el-lago-mas-peligroso-del-mundo/>
- Guevara E. Quaas R. Castelán P G. Ortiz J. Vázquez J. Morquecho C. Alarcón A. M. Martínez A. Gómez A. Espitia G. Alonso P. Cárdenas L. 2003. (Instrumentación y Monitoreo del Volcán Popocatepetl). CENAPRED. pp 1- 101
- Hernández, P., Notsu, K., Salazar, J., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Pérez, N. (2001). Carbon dioxide degassing by Advective Flow from Usu Volcano, Japón. *Science*, Vol. 292, 83-86.
- Hernández, P., Padilla, G., Padrón, E., Pérez, N., Calvo, D., Nolasco, D., Sumino, H. (2012). Analysis of long- and short-term temporal variations of the diffuse CO₂ emission from Timanfaya volcano, Lanzarote, Canary Islands. *Applied Geochemistry*, Vol. 27, Issue 12, 2486–2499.
- Kling, G., Clark, M., Compton, H., Devine, J., Evans, W., Humphrey, A., Wagner, G. (1987). The 1986 Lake Nyos gas disaster in Cameroon, West Africa. *Science*, Vol. 236, 169-175.
- Lpinares M de los Ángeles, Ortiz Ramón, Marrero José M. (2008) (Riesgo Volcánico). Dirección General de Protección Civil y Emergencias. España. pp. 104.
- Linares, M. de los Ángeles, Ortiz, R. (2004). Riesgo Volcánico. Madrid: DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIAS.
- Macías, J. L. (2006). Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. México: Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Del. Coyoacán, 04510.

- Mazot, A. y Taran, Y. (2009). Flujo de CO₂ del lago volcánico de El Chichón (México). *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica*, 184(1-2), 1-10.
- Magnetism, E. (2023, 8 de noviembre). Sensor de gas infrarrojo no dispersivo. *Electricity - Magnetism*. Obtenido de <https://www.electricity-magnetism.org/es/sensor-de-gas-infrarrojo-no-dispersivo/>
- Melián, G., Pérez, N., Hernández, P., Salazar, J., Yock, A., Sánchez, E., Notsu, K. (2004). Emisión Difusa de Dióxido de Carbono y Vapor de Mercurio en el volcán Miravalles- Costa Rica. *Reverendo Geol. Amér. Central*, vol. 30, 179-188.
- Carapezza, M.L., Badalamenti, B., Cavarra, L., & Scalzo, A. (2003). Evaluación del riesgo de gases en una zona densamente poblada del volcán Colli Albani (Cava dei Selci, Roma). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2), 81-94.
- Nacional, R. S. (8 de Agosto de 2014). Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/vulcanologia/716-los-lagos-volcanicos>
- NASA. (2023). Atmospheric carbon dioxide levels. Obtenido de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- Ortiz, R., (1992). Técnicas Instrumentales para la Vigilancia de Volcanes Activos. Dpto. De Vulcanología. Museo Nacional de Ciencias Naturales. C.S.I.C. Madrid España. 17 pp.
- Ortiz, R. (2001). Instrumentación en Vulcanología. Madrid España.
- Padrón, E., Hernández, P., Toulkeridis, T., Pérez, N., Marrero, R., Melián, G., Notsu, K. (2008). Diffuse CO₂ emission rate from Pululahua and the lake-filled Cuicocha calderas, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 176, 163–169.
- Pérez-Peñate, J., Coello, J., Bravo, J., Naranjo, J. I., & Rodríguez-Badiola, E. (2014). Emisión difusa de dióxido de carbono en el volcán Cumbre Vieja (Islas Canarias). *Geophysical Research Letters*, 41(12), 3834-3841.

- Pérez, N. M. (2009). Emisiones difusas, dispersas y silenciosas de carbono en los volcanes. En Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Misterios de la Gea: descifrando los enigmas ocultos en rocas, gases, agua y fuego*. Actas IV Semana Científica Telesforo Bravo. Instituto de Estudios Hispánicos de Canarias. ISBN 978-84-613-4817-6.
- Pérez, N., Hernández, P., Padrón, E., Cartagena, R., Olmos, R., Barahona, F., López, D. (2006). Emisión anómala y difusa de CO₂ antes de los disturbios de corta duración de enero de 2002 en el volcán San Miguel, El Salvador, Centroamérica. *Geofísica pura y aplicada*, vol. 163, 883-896.
- Programa Global de Vulcanismo, (2007). Informe 1 sobre El Chichón (México) (Wunderman, R., ed.). *Boletín de la Red Global de Vulcanismo*, 32:12. Institución Smithsonian.
- Revista Geológica de América Central*, 3. 1.-1. (1 de Enero de 2011). *Revista Geológica de América Central*. Obtenido de <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i30.7284>
- Rizzo, A., Grassa, F., Inguaggiato, S., Liotta, M., Longo, M., Madonia, P., Vita, F. (2009). Geochemical evaluation of observed changes in volcanic activity during the 2007 eruption at Stromboli (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 182, 246-254.
- Salgado, U. A. (2012). Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, como fuente alterna de energía. *Geotermia*, 3-20.
- Subils, J. B. (2000). NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire. CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO.
- Toulkeridis, T. (2013). *Volcanes Activos Ecuador*. Santa Rita, Quito, Ecuador, 152.
- Vallejo, J. M. (18 de Febrero de 2023). Triple enlace. Obtenido de <https://triplenlace.com/author/josemgav/>

