



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**  
**CARRERA DE BIOLOGÍA**

SULFUROS Y SULFATOS EN  
EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON  
LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATÉPETL

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**BIÓLOGA**

**P R E S E N T A:**

**LOURDES GISELLE SANVICENTE VELÁZQUEZ**

JURADO DE EXAMEN

DIRECTORA: DRA. ELOISA ADRIANA GUERRA HERNÁNDEZ

ASESOR: DR. GERARDO CRUZ FLORES

ASESORA: BIOL. AÍDA ZAPATA CRUZ

SINODAL: DR. GUILLERMO ARTEMIO BLANCAS ARROYO

SINODAL: MTRO. JOSE RIGOBERTO RAMOS VELÁZQUEZ



**CIUDAD DE MÉXICO**

*Mayo 2024*



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
CARRERA DE BIOLOGÍA  
FORMATO F-5



**OFICIO DE FECHA DE EXAMEN**

**QFB GRACIELA ROJAS VÁZQUEZ**  
JEFA DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
Presente

Le comunico que al alumno: **SANVICENTE VELAZQUEZ LOURDES GISELLE** con número de cuenta **313051746** de la carrera **BIOLOGÍA** se le ha fijado el día **14 de Mayo de 2024** a las **11:00 hrs.**, para presentar la réplica oral de su examen profesional, que tendrá lugar en esta facultad, ante el siguiente jurado:

CARGO	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	DR. BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO	
VOCAL	DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA	
SECRETARIO	DR. CRUZ FLORES GERARDO	
SUPLENTE	BIOL. ZAPATA CRUZ AIDA	
SUPLENTE	MTRO. RAMOS VELAZQUEZ JOSE RIGOBERTO	

El título del trabajo escrito que se presenta es:

**Sulfuros y sulfatos en el agua fluvial y su relación con la actividad volcánica del Popocatépetl.**

En la modalidad de: **TESIS**

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
CDMX, a 4 de Abril de 2024

**DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD**  
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR CARRERA DE BIOLOGÍA



**SOLICITUD DE SINODALES**

**DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD**  
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA  
Presente

Me dirijo a ustedes para solicitarle la asignación de **SINODALES** del siguiente trabajo de titulación en la modalidad de: **TESIS**

**Sulfuros y sulfatos en el agua fluvial y su relación con la actividad volcánica del Popocatepetl.**

Director del trabajo **DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA**

Asesor **DR. CRUZ FLORES GERARDO**

Asesor **BIOL. ZAPATA CRUZ AIDA**

Propuesta de sinodales:

Sinodal **DR. BLANCAS ARROYO GUILLERMO ARTEMIO**

Sinodal **MTRO. RAMOS VELAZQUEZ JOSE RIGOBERTO**

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**

  
**DRA. GUERRA HERNANDEZ ELOISA ADRIANA**  
Director(a) del proyecto

  
**SANVICENTE VELAZQUEZ LOURDES GISELLE**  
No. Cuenta: 313051746

  
**DR. VICENTE JESÚS HERNÁNDEZ ABAD**  
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación académica a lo largo de estos increíbles años.

Gracias a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por brindarme la base y los conocimientos para emprender mis sueños como bióloga.

A la Doctora Eloisa Adriana Guerra Hernández, por sus enseñanzas, su ayuda, su paciencia y sus consejos en los últimos semestres de la carrera y en este camino de titulación. Estoy muy agradecida con usted por brindarme sus conocimientos, por ser mi directora de Tesis y porque ha marcado un antes y un después en mi aprendizaje.

Al Laboratorio de Calidad del Agua y Ecohidrología de la FES Zaragoza, por brindarme un espacio para concluir mis últimos semestres en la carrera y mi trabajo de Titulación.

Al Doctor Gerardo Cruz Flores y a la Bióloga Aida Zapata Cruz, por brindarme su tiempo, por sus comentarios y sugerencias que fueron de gran ayuda para llevar a cabo este trabajo.

Al Doctor Guillermo Artemio Blancas Arroyo y Maestro José Rigoberto Ramos Velázquez por sus observaciones y comentarios para concretar este trabajo.

## DEDICATORIA

*Este trabajo va dedicado principalmente a mis padres, porque sin ellos no hubiera podido lograr esta meta. Estaré eternamente agradecida, los amo.*

*A mi madre María de Lourdes Velázquez Trejo, por creer en mí, por impulsarme y ayudarme a levantar en los momentos más duros, por tus mensajes de aliento cuando tenía exámenes y por ayudarme a nunca rendirme en la carrera. Eres la mejor mamá del mundo, soy muy afortunada de tenerte en mi vida.*

*A mi padre Jorge Sanvicente Armenta, porque me diste tu apoyo para lograr mi sueño y ser una Profesionalista, por enseñarme a luchar, a enfrentar los problemas, a ser perseverante, resiliente y a nunca rendirme, simplemente gracias por ser mi papá y estar en mi vida.*

*A mi compañero de vida Edgar Ulises Salinas Martínez, estoy tan agradecida por tu amor, por tu apoyo incondicional, por formar parte de este ciclo tan importante y por ser parte de mi caótica vida. Gracias por vivir cada momento de este camino conmigo, por levantarme, consolarme, por siempre motivarme a seguir y por ayudarme a superar todo obstáculo. Te amo muchísimo.*

*A mi hermano Jorge Luis Hernán Sanvicente Velázquez, porque en los momentos más difíciles me hiciste reír y me brindaste tu apoyo incondicional. Eres el mejor hermano mayor, te amo.*

*A mi hermano Mauro Rodrigo Sanvicente Velázquez, porque me enseñaste a ser más fuerte y porque a pesar de todo, siempre vendrán días mejores. También estoy tan agradecida contigo por traer al mundo un pedacito de cielo llamado Leonardo que llegó a alegrar mi vida, los amo a los dos.*

*A mi abuelo Crescencio Velázquez, a mi mamá Lourdes Trejo y a mi abuelita Teresa Armenta, porque siempre están en mi corazón y sus enseñanzas las llevo conmigo siempre.*

*De todos los recursos naturales, el  
agua es el más precioso.*

*Rachel Carson.*

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>ANTECEDENTES</b> .....	5
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	9
<b>Ciclos Biogeoquímicos</b> .....	9
<b>Ciclo del Azufre</b> .....	9
<b>Azufre en el agua</b> .....	11
<b>El volcán Popocatépetl</b> .....	13
Ecología del volcán.....	14
Geología del volcán.....	15
Composición de la ceniza del volcán Popocatépetl.....	16
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	16
<b>HIPÓTESIS</b> .....	17
<b>OBJETIVOS</b> .....	18
<b>General</b> .....	18
<b>Particulares</b> .....	18
<b>ZONA DE ESTUDIO</b> .....	18
<b>Geología</b> .....	19
<b>Suelo</b> .....	20
<b>Clima</b> .....	21
<b>Hidrología</b> .....	22
<b>Vegetación</b> .....	22

<b>MÉTODO</b> .....	23
<b>Análisis Estadístico</b> .....	24
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	26
<b>Sulfuros</b> .....	26
<b>Sulfatos</b> .....	38
<b>pH</b> .....	46
<b>Variación Temporal</b> .....	54
<b>Variación Espacial</b> .....	59
<b>Variación por Fase</b> .....	75
<b>CONCLUSIONES</b> .....	83
<b>REFERENCIAS</b> .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del azufre.	11
Figura 2. Volcán Popocatepetl.	13
Figura 3. Ubicación de los Sitios de Muestreo	25
Figura 4. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2001.	28
Figura 5. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2002.	30
Figura 6. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2005.	31
Figura 7. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2007.	32
Figura 8. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2008.	33
Figura 9. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2013.	34
Figura 10. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2014.	35
Figura 11. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2018.	36
Figura 12. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2019.	37
Figura 13. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2001.	39
Figura 14. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2002.	40
Figura 15. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2008.	40
Figura 16. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2009.	41
Figura 17. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2013.	42
Figura 18. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2014.	43
Figura 19. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2018.	44
Figura 20. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2019.	45
Figura 21. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2001.	47
Figura 22. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2002.	48
Figura 23. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2005.	49
Figura 24. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2007.	49
Figura 25. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2008.	50
Figura 26. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2009.	51
Figura 27. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2013.	51
Figura 28. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2014.	52
Figura 29. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2018.	52
Figura 30. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2019.	53
Figura 31. Variación de sulfuros por año a escala de 0 a 50 000 mg L <sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L <sup>-1</sup> .	54
Figura 32. Variación de sulfatos por año.	55
Figura 33. Variación de pH por año.	56
Figura 34. Variación de la altura de la columna eruptiva por año.	57
Figura 35. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por año.	58
Figura 36. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por año.	58
Figura 37. Variación de sulfuros por municipio a escala de 0 a 50 000 mg L <sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L <sup>-1</sup> .	62
Figura 38. Variación de sulfatos por municipio.	63
Figura 39. Variación de pH por municipio.	64
Figura 40. Variación de la altura de la columna eruptiva por municipio.	65
Figura 41. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por municipio.	66
Figura 42. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por municipio.	67
Figura 43. Variación de las concentraciones de sulfuros por municipio.	71
Figura 44. Variación de las concentraciones de sulfatos por municipio.	72
Figura 45. Variación de los valores de pH por municipios.	73
Figura 46. Escenario de Mayor Probabilidad de Caída de Ceniza.	74
Figura 47. Variación de sulfuros por fase a escala de 0 a 50 000 mg L <sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L <sup>-1</sup> .	76
Figura 48. Variación de sulfatos por fase.	77
Figura 49. Variación de pH por fase.	77
Figura 50. Variación de la columna eruptiva por fase.	78
Figura 51. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por fase.	78
Figura 52. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por fase.	79

Figura 53. Tabla de frecuencia de exhalaciones.

81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recuentos, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por año.	27
Tabla 2. Recuentos, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por municipio.	60
Tabla 3. Recuentos, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por fase.	75

## RESUMEN

Los volcanes liberan a la atmósfera gases y ceniza conformados por compuestos de azufre provenientes de las emisiones ( $H_2S$  y  $SO_2$ ) y de la ceniza ( $CaSO_4 \cdot H_2O$ ,  $FeS_2$  y  $CuS$ ) que son dispersados en la atmósfera por el viento, depositándose en vegetación, suelo y agua de zonas cercanas al cono volcánico o hasta varios kilómetros de distancia.

Con el objetivo de analizar el efecto de la actividad volcánica con la presencia de azufre, se eligieron arroyos y ríos del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl (PNIP) y su zona de influencia que, por su ubicación, podían verse alterados en la calidad de sus aguas.

Se recopiló la información obtenida en el periodo de 2001 a 2019, en el Laboratorio de Calidad del Agua y Ecohidrología (LCAyE) de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FESZ), de 243 sitios de estudio, considerando ubicación geográfica, valores de pH y concentraciones de sulfuros y sulfatos, además de los registros de la actividad volcánica ocurrida días anteriores y posteriores a las fechas de muestreo.

Posteriormente se elaboró una base de datos y gráficos sobre cada uno de los parámetros y su relación con la ceniza y emisiones volcánicas. Los datos se analizaron y compararon en función del comportamiento temporal a través de los años, el comportamiento espacial en función de los municipios y su variación de acuerdo a la fase del semáforo volcánico.

Las concentraciones de sulfuros en los cuerpos de agua presentaron relación con las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, con un efecto retardado de aproximadamente cinco días, siendo 2001 y 2002 los años más destacados para esto. Los sulfatos se relacionaron significativamente tanto con las exhalaciones de vapor de agua y gas, como con las de vapor de agua, gas y ceniza, siendo los procesos de deposición húmeda y seca, así como la oxidación de los sulfuros los más relevantes, principalmente en 2018 y 2019. Los valores de pH más ácidos se asocian con la presencia de sulfuros en zonas altas, consecuencia de la actividad volcánica y la cobertura de bosque de pino. Por otro lado, los valores con tendencia neutra o alcalina en el agua coincidieron con mayor abundancia de sulfatos en zonas aledañas al volcán con origen en la actividad antropogénica y de manera secundaria la actividad volcánica.

El aumento en la actividad volcánica a lo largo de los años sufrió variaciones importantes en el número, tipo de exhalaciones y altura de la columna, lo que influyó significativamente en

las concentraciones de sulfuros y sulfatos, siendo los años 2001, 2002, 2018 y 2019 los más representativos.

Los municipios de Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos, Tetela del Volcán y Tochimilco sufrieron mayor variabilidad respecto a las concentraciones de sulfuros y sulfatos debido a su cercanía al cono volcánico y que se encuentran en el rango de caída de ceniza de 1 cm de espesor.

La dirección de la pluma eruptiva tuvo un efecto directo en el incremento de las concentraciones de sulfuros y sulfatos en los cuerpos de agua que se encontraban en su trayectoria, debido a la deposición de los gases y ceniza.

Los municipios que presentaron mayores concentraciones de sulfuros, no relacionada con la actividad volcánica, fueron Chiautzingo, Huejotzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde y Tlahuapan como consecuencia de procesos de degradación orgánica y arrastre por intensas lluvias en 2007.

Los municipios Atlixco, Atzitzihuacán, Huaquechula, Nealtican, San Martín Texmelucan y Tepeojuma resultaron ser los municipios con concentraciones de sulfatos muy variables debidas principalmente a las actividades antrópicas que se realizan en la zona.

Respecto a las distintas fases del semáforo de alerta volcánica, la fase uno tuvo menor duración y variabilidad, con impacto mínimo en las concentraciones de azufre. La fase dos fue la mejor representada y mostró alta variabilidad en las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, generando un impacto significativo en las concentraciones de sulfuros y sulfatos. La fase tres estuvo presente por poco tiempo, con poca variabilidad y su efecto se vio reflejado en un incremento de sulfatos.

Los valores de pH, las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza y la altura de la columna no presentaron diferencias significativas en función de cada una de las fases.

## INTRODUCCIÓN

Una cuenca hidrográfica es un área natural, con límites que se definen naturalmente en función del relieve y la pendiente, es en las partes más altas donde tienen origen los escurrimientos incipientes provenientes de la precipitación, el deshielo o las corrientes subsuperficiales, que se unen para formar una red hidrográfica a través de la cual fluyen arroyos y ríos de diferente magnitud (Rodríguez, 2006).

Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales que se encuentran delimitados por un parteaguas (zona más elevada de la montaña) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser una laguna, lago o el mar (Cotler et al., 2013).

En México la disponibilidad de agua es de 551.6 km<sup>3</sup> en promedio al año, el 80% de ese volumen corresponde al escurrimiento superficial (359.04 km<sup>3</sup>) que fluye por los ríos y los arroyos (SEMARNAT, 2019). Una de las principales problemáticas detectadas en estas aguas superficiales es la eutrofización debido a la alta cantidad de nutrientes presentes en estos cuerpos que lleva a su deterioro y contaminación (CEMBA, 2006; García, 2016).

Sin embargo, los problemas de contaminación no siempre son de origen antropogénico, debido a que la tierra en su estado natural también contribuye a la alteración de la composición atmosférica. Un claro ejemplo es la actividad volcánica, ya que es una fuente no antropogénica de contaminación, puesto que, en estos períodos de actividad además de emanar vapor de agua, se han identificado gases tóxicos como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) (George, 2014; Sierra, 2012).

El azufre en particular se encuentra presente en la atmósfera en varias formas químicas, ya que es componente esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos, para la síntesis de aminoácidos (cisteína, cistina y metionina), así como de vitaminas, hormonas y procesos metabólicos (Hales, 2009; Gupta y Germida, 2021). Las principales formas químicas de azufre presentes en la naturaleza se encuentran en forma de sulfuro

(S<sup>-2</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) y de azufre elemental (S), que, mediante una combinación de procesos biológicos, químicos y geoquímicos, estos compuestos se convierten continuamente entre sí. Esta combinación de procesos da como resultado el ciclo global del azufre (Lomans et al., 2002).

Una de las fuentes constantes de azufre a la atmósfera son las erupciones volcánicas (Brimblecombe, 2002), ya que emiten gases y ceniza que traen consigo compuestos de azufre que se transportan y depositan en el agua, suelo y vegetación (Hales, 2009; Martin del Pozzo et al., 1995; OPS, 2005).

Esto se debe a que, durante una erupción volcánica, se emiten gases y ceniza a la atmósfera en cantidades indeterminadas, que son impulsadas a grandes distancias por la presión confinada en el magma y la onda de energía térmica (calor). Estos gases y ceniza son depositados temporalmente en la estratósfera y tropósfera, mientras son dispersados por la acción del viento y la lluvia (OPS, 2005).

La pluma volcánica (columna de gases que salen del volcán) es una mezcla de gases, líquidos y sólidos que su composición varía por el origen del volcán. El H<sub>2</sub>O<sub>(g)</sub> representa el 50 al 90%, el CO<sub>2</sub> de 1 a 40%, el SO<sub>2</sub> de 1 a 25%, el H<sub>2</sub>S el 1 al 10%, el HF, HCl, HBr y HI menos del 1% (Schiavo et al., 2021). Otros contaminantes primarios presentes en la emisión volcánica son óxidos de azufre, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas (OPS, 2005).

De igual manera, las emisiones volcánicas traen consigo tefra, que son partículas volcánicas suspendidas en el aire. Los ácidos, las sales metálicas y los gases son adsorbidos por la superficie de la tefra denominado como *lixiviados de ceniza* (Jones y Gislason, 2008). Esta ceniza al contacto con el agua aumenta la turbidez provocando la proliferación de microbiota y el recubrimiento de la ceniza aumenta la acidez, debido a la influencia en la columna de aerosoles compuestos por ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl y HF) (Schiavo et al., 2021; Stewart et al., 2006).

## ANTECEDENTES

En el periodo comprendido entre 1995 y 2004, se realizó un estudio en cinco manantiales en el área aledaña al volcán Popocatépetl en el estado de Puebla (San Baltazar Atlimeyaya, Paleorio, Axocopan, Huexocoapan, Teconala), en un pozo poco profundo y un manantial localizados al suroeste en el estado de Morelos (Chihuahuita y El Bosque) (Armienta et al., 2008). Se analizaron tres muestras en cada sitio por año y los resultados obtenidos con respecto a la concentración de sulfatos fueron: para Atlimeyaya se encontraron entre 6.5 y 8.3 mg L<sup>-1</sup>, en Paleorio los valores estuvieron entre 11.8 y 13.7 mg L<sup>-1</sup>, en Axocopan entre 26.9 y 48 mg L<sup>-1</sup>, en Huexocoapan entre 7.5 y 13.6 mg L<sup>-1</sup>, en Teconala entre 16.4 y 25.6 mg L<sup>-1</sup>, para el sitio Chihuahuita 17.9 y 81.9 mg L<sup>-1</sup> y en el Bosque se presentaron entre 0.3 y 2.9 mg L<sup>-1</sup>.

En el lago del cráter del volcán Popocatépetl se realizó un estudio para determinar sus características, para el análisis químico se recolectaron tres muestras de agua en noviembre de 1985, abril de 1992 y febrero de 1994. Los datos obtenidos de sulfatos fueron 11100 mg L<sup>-1</sup> (1985), 17000 mg L<sup>-1</sup> (1992) y 23660 mg L<sup>-1</sup> (1994), este aumento se relaciona con el reinicio de la actividad del volcán en 1993 (Armienta et al., 2000).

En el estudio llevado a cabo por Martin del Pozzo y colaboradores se realizó un análisis de agua, de ceniza y lixiviados después de una erupción ocurrida el 21 de diciembre del año 1994. Para el análisis de ceniza se establecieron estaciones de muestreo de recolección periódica alrededor del volcán para determinar sus componentes, registrando cristales de feldespato (plagioclasa intermedia), cuarzo, piroxeno (augita e hiperstena), hornblenda, pirita, ilmenita, vidrio (rico en sílice y álcalis), yeso y dacita. En el caso del agua se analizaron las variaciones en manantiales aledaños al volcán y se obtuvo que las concentraciones de sulfatos oscilaron entre 4 y 40 mg L<sup>-1</sup>. El análisis de lixiviados de ceniza demostró concentraciones máximas de 12353 ppm de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) al inicio de la erupción, mientras que los valores mínimos fueron 75 ppm (Martin del Pozzo et al., 1995).

Uno de los trabajos realizado en el área del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl (PNIP) con relación a la dinámica del azufre y su relación con la actividad del volcán Popocatépetl fue presentado por González-Aguado y Guerra-Hernández (2013), los

resultados demuestran que a mayor actividad volcánica y de acuerdo con la dirección de dispersión de la ceniza, mayor son las concentraciones de azufre inorgánico en los arroyos, registrando concentraciones de sulfuros y sulfatos desde ausencia a  $5.7 \text{ mg S}^{-2} \text{ L}^{-1}$  y a  $38.47 \text{ mg SO}_4^{-2} \text{ L}^{-1}$ .

En el 2017, Guerra-Hernández y Cruz registraron el contenido de sulfatos y sulfuros en la zona de la Reserva de la Biósfera Los Volcanes, el contenido de sulfatos fluctuó de  $78.8 \text{ mg L}^{-1}$  a una ausencia total, mientras que, las concentraciones de sulfuros más elevadas fueron  $20 \text{ mg L}^{-1}$ . Las mayores concentraciones de sulfatos se registraron en sitios contaminados de la cuenca como consecuencia de la incorporación de efluentes agrícolas, mientras que para las concentraciones de sulfuros se infiere que fueron de emisiones volcánicas.

En el trabajo "Influencia de la actividad volcánica en la química del agua de manantial en el Volcán Popocatépetl, México" realizaron monitoreos del agua de manantiales antes y durante las erupciones volcánicas durante 7 años (1994-2000). La variación de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) preceden a la actividad eruptiva principal, que se considera vinculada a la afluencia de gases magmáticos y fluidos ácidos que reaccionan con sublimaciones y rocas hospedantes que se mezclan con el gran sistema de agua (Martin del Pozzo et al., 2002).

De acuerdo con lo realizado por López (2010), donde se evaluó el efecto de la vegetación sobre el pH del agua de lluvia en bosques templados del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl, Parque Nacional El Chico y La Mojonera. Se registró que la concentración de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en los claros de bosques del Parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl fueron  $0.23 \text{ mg L}^{-1}$ , mientras que en la zona boscosa fueron entre  $0.14$  a  $0.21 \text{ mg L}^{-1}$ .

La finalidad del estudio realizado por Ávila (2011), fue evaluar la composición iónica ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ) y los niveles de acidez del agua de lluvia que es captada sobre el bosque templado del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl de junio a noviembre del 2009. El pH del agua de lluvia que llega a los claros del bosque, indica la presencia de lluvia ácida durante el periodo de estudio, debido a los iones sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), presentes en las partículas atmosféricas.

Catán, Juárez y Bubach (2016) proporcionan una caracterización de las propiedades químicas, incluyendo datos de los componentes mayores y menores disueltos en el agua superficial de dos lagos argentinos que rodean el área impactada del complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle, en la erupción de 2011. El análisis se realizó después de la erupción cada tres meses desde septiembre de 2011 a junio de 2012. Las concentraciones obtenidas de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) se encuentran entre  $2 \pm 1.3 \text{ mg L}^{-1}$ , llegando algunas hasta  $5.1 \text{ mg L}^{-1}$  (zona más cercana al volcán). Estos valores se encuentran por encima de las concentraciones normales presentados en los lagos ( $1.1 \pm 0.1 \text{ mg L}^{-1}$ ).

En el estudio “Impacto de las emisiones de pluma volcánica en la química del agua de lluvia durante el evento eruptivo de Nyamuragira” de enero de 2010 en África, se realizó la toma de muestras en dos sitios, recolectadas el 5 de enero de 2010, aproximadamente tres días después del inicio de la erupción. En el primer sitio que se encontraba cerca de la columna volcánica se obtuvieron valores de  $0.2$  a  $2.4 \text{ mg L}^{-1}$  de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). En el segundo sitio que se encontraba lejos de la columna se obtuvieron valores de  $2.8$  a  $30.4 \text{ mg L}^{-1}$  (Cuoco et al., 2013).

En el trabajo de Flaathen y Gislason (2007) en Islandia, se tomaron muestras del río Ytri-Rangá recolectadas en la estación de monitoreo después del inicio de las erupciones del volcán Hekla ocurridas en el año 1991 y en el 2000, también se recolectó en el suelo nieve fresca con contenido de cenizas 18 a 23 h después del comienzo de la erupción del 2000 a 10 y 20 km al norte y al oeste de Hekla. Las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) fueron mínimas, debido a la baja tasa de oxidación del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) por la baja radiación solar.

Paez, Caselli, Cogliati y Monasterio en el 2017 estudiaron el impacto de emisiones de cenizas volcánicas provenientes del volcán Copahue, en un área cercana a los centros de población mediante la recolección de cenizas volcánicas utilizando muestreadores pasivos de finales de octubre a principio de diciembre del 2016, emisiones observadas vía satelital y datos meteorológicos para la realización de un modelo de dispersión, al igual que se realizó, a través de un ensayo de lixiviación, la caracterización geoquímica de las cenizas volcánicas donde se determinó la presencia de aniones, cationes y de

algunos metales en la muestra. Los resultados de este ensayo de lixiviados demostraron que el sulfato fue el anión más abundante con valores de  $50.78 \text{ mg L}^{-1}$ , lo cual les dio indicios que el contenido de los gases provenientes de la erupción fueron más ricos en azufre.

Un estudio realizado por Pérez (2017) de septiembre del 2015 a octubre del 2016 en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl donde analizó las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en cuerpos de agua de 4 diferentes sitios (Joyita, Buenavista, Xalizintla y San Nicolás). Los resultados que se obtuvieron de las concentraciones de sulfatos se encontraron entre los  $0.9$  a  $39.62 \text{ mg L}^{-1}$ , su presencia en los sitios de mayor altitud se justifica por la actividad volcánica; menciona que las emisiones de  $\text{SO}_2$  emitidas por el volcán Popocatépetl tienen relación con la presencia de sulfatos en los cuerpos de agua, mientras que los sitios de menor altitud (San Nicolás) la presencia de sulfatos es atribuida a la actividad agrícola y urbana.

Por último, de agosto de 2019 a febrero de 2020, Morales y Reyes analizaron ocho sitios en la región oriental del Popocatépetl. Los resultados obtenidos de las concentraciones de azufre estuvieron entre  $0.001$  a  $1.99 \text{ mg L}^{-1}$  ( $\text{S}^{-2}$ ) y  $0.001$  a  $73.35 \text{ mg L}^{-1}$  ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), concentraciones que provienen de la incorporación de cenizas, emisiones y arrastre a los cuerpos de agua, por la deposición seca y húmeda y el uso de fertilizantes que aumentan los sulfuros, mientras que los sulfatos proceden de la oxidación de los sulfuros.

## MARCO TEÓRICO

La transferencia y transformación de materia y energía entre la biósfera y los otros reservorios activos de la Tierra (la atmósfera, la hidrósfera y la litósfera) se le define como “ciclo biogeoquímico” (Panagiotaras et al., 2015).

### Ciclos Biogeoquímicos

Hay dos tipos de ciclos biogeoquímicos (Escolástico et al., 2013):

- Sedimentario: están ligados al ciclo hidrológico. En ellos los nutrientes circulan principalmente por la corteza terrestre, la hidrósfera y los organismos vivos. Ejemplo de este tipo de ciclos son el fósforo y el azufre.
- Gaseoso: los nutrientes circulan principalmente entre la atmósfera y la biósfera. Un ejemplo de estos ciclos son el carbono, nitrógeno y oxígeno.

En cada ciclo biogeoquímico, como menciona Mascot, se pueden distinguir tres fases:

- Fase geoquímica: la materia fluye entre la atmósfera, hidrósfera (océanos, lagos y ríos) y litósfera (corteza sólida de la tierra).
- Fase bioquímica: comprende la transferencia de materia orgánica dentro de la biocenosis (organismos vivos que comprenden el ecosistema).
- Fase biogeoquímica: paso de la materia inorgánica a orgánica y viceversa.

Los principales elementos químicos que componen los nutrientes básicos que circulan dentro de un ciclo biogeoquímico específico son Carbono, Nitrógeno, Azufre, Fósforo y Oxígeno (Panagiotaras et al., 2015).

### Ciclo del Azufre

El azufre existe en la atmósfera en varias formas químicas, es un componente esencial del sistema Tierra – Biósfera. Los compuestos de azufre participan en un intercambio cíclico dinámico entre la tierra, los océanos y la atmósfera (Figura 1). Numerosas fuentes naturales se combinan con las emisiones humanas para suministrar cantidades sustanciales de compuestos de azufre a la atmósfera, donde pueden transportarse a

grandes distancias desde sus regiones de origen. Una vez en el aire, estos compuestos reaccionan químicamente y regresan a la superficie de la Tierra mediante procesos de deposición seca (el ácido sulfúrico vuelve a la tierra como finas partículas de sulfatos) y húmeda (el ácido sulfúrico entra en contacto con el vapor de agua, cae a la tierra en forma de lluvia ácida, nieve y niebla) (Granados et al., 2010; Hales, 2009).

Su reserva principal se encuentra en la atmósfera como dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que proviene de la actividad volcánica y como sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) proveniente de la materia orgánica en descomposición, en forma de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) en la hidrósfera y por último en la litósfera como yesos, piritas y sulfuros de rocas básicas, que se oxidan a sulfatos en condiciones aerobias (Guerra-Hernández y Cruz, 2017; Lomans et al., 2002).

En escalas de tiempo geológicas, existen tres vías principales para transferir azufre del manto de la Tierra al medio ambiente superficial y, finalmente, a los océanos. Estas vías son (1) emisión volcánica de dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno, (2) liberación de sulfuro de hidrógeno de respiraderos hidrotermales en el océano y (3) meteorización de rocas que contienen sulfuro por el agua de mar (Dolman, 2019).

El reservorio de la superficie consiste principalmente en azufre como sulfato o minerales de sulfuro en varias rocas continentales. Cuando estas rocas se llevan al ambiente de meteorización superficial, los sulfuros se oxidan a sulfatos en presencia de oxígeno, y este sulfato es transportado por los ríos a los océanos (Canfield y Farquhar, 2012).

El sulfato se acumula en los océanos, parte de ese sulfato es absorbido por la corteza oceánica durante la circulación hidrotermal principalmente como sulfuro formado por reducción termoquímica o biológica ( $\text{H}_2\text{S}$ ) por bacterias sulfato-reductoras (Canfield y Farquhar, 2012; Escolástico et al., 2013).

El ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) puede seguir dos caminos: uno ascendente, hasta alcanzar lugares oxigenados para formar sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) mediante un proceso fotosintético ( $\text{H}_2\text{S} + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$ ), y otro descendente, que combinándose con hierro precipita en forma de piritita,  $\text{FeS}_2$  (Escolástico et al., 2013).

La piritita en los sedimentos de la plataforma continental forma el sumidero de sulfuro más grande, y estas rocas pueden ser devueltas por procesos tectónicos al ambiente de

meteorización o pueden perderse en el manto durante la subducción (Canfield y Farquhar, 2012).

En la atmósfera el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) se oxida rápidamente con los iones de  $OH^-$  formando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y cae a la tierra en forma de lluvia ácida, pasando al suelo en forma de sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) que pueden ser lixiviados o incorporados por las plantas, bacterias y hongos para ser transferidos a los demás niveles tróficos. Los seres vivos al morir liberan sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) de vuelta a la atmósfera (Escolástico et al., 2013).

Los volcanes de forma natural incrementan en la atmósfera dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) los cuales, por reacciones químicas son transformados en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) que se condensa en la atmósfera y se precipita en forma de lluvia ácida, que devuelve el azufre al mar o al continente (Escolástico et al., 2013; OPS, 2005).

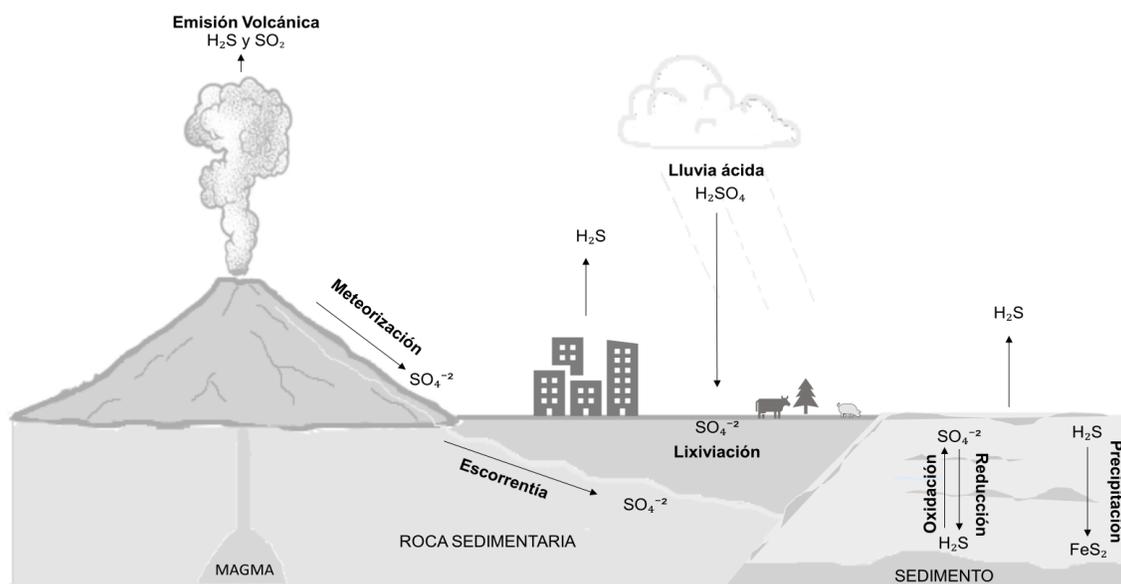


Figura 1. Ciclo del azufre (elaboración propia).

## Azufre en el agua

El azufre en las aguas naturales proviene de una amplia variedad de fuentes tanto naturales como antropogénicas. El azufre es un contaminante importante en las aguas dulces (Hutzinger, 1980).

Las concentraciones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en agua dulce varían de 0 a 630  $\text{mg L}^{-1}$  en ríos, de 0 a 250  $\text{mg L}^{-1}$  en lagos y de 0 a 230  $\text{mg L}^{-1}$  en aguas subterráneas. El aumento de sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) antropogénicos en los cuerpos acuáticos se debe a la lixiviación de fertilizantes empleados en la agricultura, a la escorrentía de aguas residuales agrícolas e industriales, al drenaje de minas y el aumento del nivel del mar (Zak et al., 2021).

Las formas de azufre que aparecen en el agua dependen del pH y la temperatura, pueden estar presente como ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), ion bisulfuro ( $\text{HS}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) y como sulfitos ( $\text{SO}_3^{-2}$ ). Asimismo, se puede encontrar el azufre en el agua en forma de tiosulfatos ( $\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$ ) (Ramírez y San José, 2006).

La reducción de sulfatos en ambientes pobres o carentes de oxígeno aunada a la actividad bacteriana genera sulfuros. El equilibrio entre estas especies químicas presenta una relación directa con los cambios de pH en el sistema. Sin embargo, la alcalinidad puede no alterarse, cuando el sulfuro se libera hacia la atmósfera, mientras que sí hay un ligero aumento del pH al reducirse la concentración total de sulfuro en el sistema acuoso (Marín, 2003).

La forma más abundante de azufre volátil en el océano es el dimetilsulfuro (DMS). Este se forma a partir de sulfato absorbido por fitoplancton convirtiéndolo en dimetilsulfoniopropionato (DMSP) que es utilizado por diversos microorganismos produciendo el DMS por DMSP liasas de algas y bacterias, este puede ser consumido por bacterias o ser liberado a la atmósfera (Sievert et al., 2007; Simó, 2001). En la atmósfera, el DMS sufre oxidación por hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), radicales halógenos ( $\text{Cl}^-$ ) y el radical nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para formar dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), que se puede oxidar para formar ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (Veres et al., 2020).

Una de las aportaciones del azufre a los medios acuáticos es por la oxidación del dióxido de azufre en la atmósfera, generando uno de los principales componentes de la lluvia ácida (ácido sulfúrico), que al precipitar forma sulfatos al estar en un medio acuoso (Marín, 2003).

Otro de los aportes de azufre al medio acuático es por el proceso de meteorización de los minerales sulfurados por medio de reacciones de carbonatación, de hidrólisis y de

oxidación. Los minerales sulfatados son solubles, aportando a las aguas el ion sulfato y el catión con el que lo forman. En las aguas minerales, los sulfuros y los sulfatos más comunes son los cálcicos y los sódicos (Marín, 2003; Ramírez y San José, 2006).

### **El volcán Popocatépetl**

El volcán Popocatépetl es la segunda cima más alta de México, con una elevación de 5419.43 m s.n.m. Es un estratovolcán de composición andesítico-dacítica, que se localiza en las coordenadas 19°01'23" N y 98°37'22" W, en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano. Constituye el extremo sur de la Sierra Nevada, colindando al N con el complejo volcánico Iztaccíhuatl a través del Paso de Cortés (3685 m s.n.m.), en el E y SE sus vertientes se encuentran rodeados por los valles de Puebla y Atlixco, al W y SW se encuentra un terreno de relieve más intrincado, con una morfología de montículos producto de los derrumbes gigantes del volcán (Soto et al., 2021; UNAM, 2017).



*Figura 2. Volcán Popocatépetl (CENAPRED, 2020).*

El volcán Popocatépetl, debido a sus erupciones altamente explosivas, es el segundo volcán más activo de México y el de mayor riesgo. La emisión y dispersión de cenizas son uno de los fenómenos más frecuentes en la actividad de este volcán (UNAM, 2017).

Cuando las partículas de ceniza caen al suelo, los lixiviados (componentes solubles) pueden ser arrastrados por el agua, cambiando la composición química y calidad del agua local (Instituto de Geografía UNAM, 2018).

El agua superficial (lagos, ríos y quebradas) tiene mayor riesgo de contaminación, ya que es más fácil el contacto de los materiales arrojados por el volcán con el agua. Estos contaminantes pueden alterar las condiciones de vida de los organismos acuáticos de cada ecosistema, a causa de los agentes inorgánicos solubles en agua y, en ocasiones, por empobrecimiento de la calidad del oxígeno disuelto y cambios en la temperatura del agua (OPS, 2005).

### Ecología del volcán

En la región del volcán Popocatépetl presenta un clima muy frío subhúmedo EFHw (más de 5275 m) y clima frío subhúmedo de alta montaña ETHw (4000 a 5275 m) (Almeida-Leñero et al., 2004; García, 2004).

La vegetación presente en el volcán se distingue por tres asociaciones de Zacatonal alpino (se desarrolla por encima del límite de la vegetación arbórea sobre las montañas) (Rzedwoski, 2006): 1) *Muhlenbergia quadridentata* (3700 y 3800 m), 2) *Calamagrostis toluensis* y *Festuca toluensis* (3 800 y 4 200 m) y 3) *Festuca lívida* y *Arenaria bryoides* (4 200 y 4 300 m).

Las barrancas del volcán Popocatépetl Huiloac, Nexpayantla y Pelagallinas-La Venta presentan árboles *Pinus hartwegii* Lindl., *Pinus ayacahuite* y *Abies religiosa* entre los 2000 y 3500 m de altura (Franco-Ramos et al., 2018).

Otro tipo de vegetación de la zona descrita en “La Flora fanerogámica del Valle de México”: *Juniperus monticola* (3000 a 4200 m), *Castilleja pectinata* (a más de 3800 m), *Plantago toluensis* (3800 m a 4200 m), *Senecio orizabensis* (3500 m) y *Gnaphalium lavandulaceum* (3800 a 4300 m).

El tipo de suelo presente en el área del volcán son los siguientes (Almeida et al., 1994):

*Andosol*: estos suelos, dominantes, en la vertiente NW del volcán en la zona de zacatonal alpino se desarrollaron a partir de formaciones geológicas parentales compuestas de piroclastos, presenta un alto porcentaje de ceniza volcánica y se encuentran a 3920 m, su textura es areno-migajosa con un porcentaje de arena de 84% y 14% de limo y 1% de materia orgánica.

*Litosol y Andosol vítrico*: este tipo de suelos se encuentran a 3900 y 3300 m en el bosque de *Pinus hartwegii*, su textura es migajón-arenosa y de los 20 a 50 cm de profundidad areno-migajosa con un porcentaje de limo de 24 a 17%.

*Andosol vítrico*: este tipo de suelo se encuentra a 3500 m en el bosque de *Abies religiosa* donde la textura migajón-arenosa y areno-migajosa se alternan hasta los 125 cm de profundidad.

La hidrología del volcán se divide principalmente en tres subcuencas (Navarro et al., 2013; SEMARNAT, 2005):

*Subcuenca Río Nexapa*: la corriente superficial más importante es el río Nexapa, la cual nace en la falda oriental del Popocatepetl, es de régimen permanente y alimentado en su porción alta por los deshielos del volcán.

*Subcuenca Cuautla-Yautepec*: inicia en el municipio de Amecameca y se reparte entre las dos subcuencas occidentales al Izta - Popo.

*Subcuenca Chalco-Texcoco*: confluyen escurrimientos del flanco occidental del Iztaccíhuatl con los de la vertiente Norte del Popocatepetl, la mayoría de estas corrientes son intermitentes y al llegar al pie de monte desaparecen.

### Geología del volcán

El Popocatepetl es un estratovolcán con un cráter truncado, compuesto por una alternancia de depósitos piroclásticos y lavas de composición andesítica-dacítica (Macías, 2005).

*Andesita*: contienen al menos un 25% de silicatos oscuros, principalmente anfíbol (ricos en calcio, hierro, magnesio y sodio), piroxeno (rico en magnesio y hierro) y biotita (rico en aluminio, hierro, magnesio y potasio), el otro mineral dominante es la plagioclasa (rica en calcio) (Fabregat-Guinhard, 1980; Tarbuck y Lutgens, 2005).

*Dacita*: consiste principalmente en plagioclasa (rica en calcio) con biotita (rica en aluminio, hierro, magnesio y potasio), hornblenda (rica en carbonatos), augita (rica en aluminio, calcio, hierro y magnesio) o enstatita (rica en magnesio) (Deer et al., 2013; Ortega-Gutiérrez, 1974; Universidad de Alicante, 2021; Tarbuck y Lutgens, 2005).

### Composición química de la ceniza del volcán Popocatépetl

La composición química de la ceniza está directamente relacionada con el magma y esta varía de un volcán a otro, aun entre exhalaciones de un mismo volcán. No obstante, el análisis químico revela que generalmente la ceniza volcánica está predominantemente constituida de sílice (del 40 al 80%), óxidos de aluminio, calcio, hierro, sodio, magnesio y potasio (Instituto de Geografía UNAM, 2019).

Los análisis realizados en la ceniza del volcán Popocatépetl muestran que está constituida por cristales de feldespatos y piroxenas, y en ocasiones de olivino o anfíbol, además se encuentran algunas partículas de yeso. También revelan que la mayoría está compuesta por fragmentos de roca volcánica, tanto de los domos actuales como de rocas más antiguas (CENAPRED, 2001; Martin del Pozzo et al., 1995).

El Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ) reportó que la ceniza del volcán Popocatépetl contenía del 65 al 68% de  $\text{SiO}_2$ , 5-6% de álcalis (óxidos de calcio y potasio) y 3.5% de sílice libre (cristobalita), azufre, cobre, manganeso, plomo y zinc (Narváez y Cano, 2004).

Las cenizas emanadas durante una erupción pueden atrapar parte del gas liberado en la columna eruptiva. Las emanaciones gaseosas de los volcanes están constituidas en su mayoría por  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ . El  $\text{SO}_2$  puede reaccionar con el agua, formar ácido sulfúrico y depositarse sobre las partículas de ceniza (CENAPRED, 2001).

### **JUSTIFICACIÓN**

La actividad volcánica altera la composición hídrica (escurrimiento superficial y subterráneo) en las áreas adyacentes del centro emisor. Tanto las partículas sólidas como los gases disueltos pueden afectar en diverso grado la calidad del agua (Sruoga, 2021).

“La actividad del volcán Popocatépetl hasta ahora no ha significado un grave peligro en cuanto a destrucción física por su grado de explosividad, pero las emanaciones de gases

y cenizas pueden llegar a deteriorar el ambiente y el estado de salud de las poblaciones circundantes por la cantidad de partículas y gases que exhala” (Rivera, 2004).

Los gases y líquidos volcánicos mezclados con los materiales sólidos son arrojados por el cráter a velocidades de varios cientos de kilómetros por hora. Estos materiales pueden permanecer suspendidos a lo largo de varios kilómetros sobre el cráter formando una columna. La parte superior de la columna, o pluma, es usualmente arrastrada por los efectos del viento y en su trayectoria deposita las cenizas que transporta (Hernández, 1998).

Realizar un análisis de impacto de las emisiones del volcán en las concentraciones de azufre es de gran relevancia, debido a que la caída de ceniza provocada por las emisiones volcánicas del Popocatépetl trae consigo diferentes materiales y compuestos, entre ellos el azufre en sus diferentes formas, que puede depositarse en los ecosistemas acuáticos elevando la concentración de sulfuros y sulfatos.

## **HIPÓTESIS**

El volcán Popocatépetl llega a emitir un volumen estimado de 300000 m<sup>3</sup> de ceniza durante un periodo de erupción de un año (Martin del Pozzo et al., 2002). Esta ceniza representa un impacto en los ecosistemas circundantes, ya que puede ser arrastrada por los efectos del viento, depositándose a corto o largo plazo en los suelos y sistemas acuáticos desde la zona de mayor altitud hasta la zona de menor altitud.

Las cenizas emitidas por el volcán tienen asociados compuestos de azufre, por lo que se infiere que existirá una relación entre el aumento de la concentración de sulfuros (S<sup>-2</sup>) y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) en los ríos y arroyos que fluyen en la misma dirección de la pluma de las emisiones volcánicas del Popocatépetl modificando la calidad del agua.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar la variación temporal y espacial de la concentración de azufre ( $S^{-2}$  y  $SO_4^{-2}$ ) en las corrientes de agua superficiales del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia y su relación con la actividad volcánica del Popocatepetl, a partir de los datos obtenidos en las campañas de muestreo realizadas por integrantes del Laboratorio de Calidad del agua y Ecohidrología de 2001 a 2019.

### Particulares

1. Conformar una base de datos con los registros de las concentraciones de sulfuros ( $S^{-2}$ ) y sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en ríos y arroyos realizados durante el periodo 2001 a 2019 en el área del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia.
2. Recopilar y seleccionar información sobre las emisiones volcánicas del Popocatepetl y su dirección en días anteriores y posteriores a las fechas en las que se realizaron las campañas de muestreo de agua para cuantificar sulfuros ( $S^{-2}$ ) y sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en el periodo mencionado.
3. Analizar la relación entre la presencia y variación de sulfuros ( $S^{-2}$ ) y sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en el agua y la dirección e intensidad de las emisiones volcánicas del Popocatepetl.

## ZONA DE ESTUDIO

El Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl se localiza en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal en las coordenadas  $18^{\circ}59'00.43''$  y  $19^{\circ}28'09.44''$  de Latitud Norte y  $98^{\circ}34'55.88''$  y  $98^{\circ}46'40.95''$  de Longitud Oeste. El parque tiene una superficie de 39 mil 819.086 hectáreas, abarcando el Estado de México (los municipios Texcoco, Ixtapaluca, Chalco, Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo), el Estado de Puebla (los municipios Santa Rita Tlahuapan, San Salvador el Verde, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco) y el Estado de Morelos (el municipio de Tetela del Volcán). La zona de influencia del parque está delimitada por 17 mil 442.1140 hectáreas a su alrededor, el cual abarca el Estado de México (los municipios de Texcoco, Ixtapaluca,

Tlalmanalco, Chalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo), el Estado de Morelos (el municipio de Tetela del Volcán) y el Estado de Puebla (los municipios Santa Rita Tlahuapan, San Salvador El Verde, San Felipe Teotlalcingo, Chiautzingo, Huejotzingo, San Nicolás de los Ranchos, Calpan, Tianguismanalco, Tochimilco y Atlixco) (CONANP, 2013).

## **Geología**

La formación del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl presenta varias etapas geológicas, las cuales se describen a continuación:

Terciario: la formación de la Faja Volcánica Transmexicana se originó en el Mioceno, debido a la subducción de las placas de Coco y Rivera bajo la Placa Norteamericana. El origen del volcán Popocatepetl fue debido a las fracturas tensionales que ocurrieron en la dirección NNW a SSE en el plioceno (Botero-Santa et al., 2015; Lejsec et al., 1978).

Cuaternario: la evolución del volcán Popocatepetl comienza con el colapso del volcán ancestral Nexpayantla por una erupción ocurrida hace 200000 años, ocasionando la formación de la caldera. Al interior de esta caldera empezó la formación del nuevo volcán El fraile mediante el emplazamiento de flujos de lava dacítica y andesítica. El colapso del volcán El Fraile fue resultado de una erupción que ocurrió hace 50000 y 30000 años AP, ocasionando la destrucción del flanco sur, una avalancha de escombros con dirección S-SW y una erupción pliniana. Posteriormente a estos eventos inició la formación del cono del Popocatepetl (Macías, 2005; Macías et al., 2012).

El complejo volcánico Iztaccíhuatl consta de las dos formaciones Llano Grande (el Pulpito del Diablo, la Caldera Llano Grande y el volcán Los Pies Ancestrales) e Iztaccíhuatl (Los Pies, Las Rodillas, El Pecho, La Cabeza y Táyotl), que tienen un origen entre el Pleistoceno y Holoceno (Macías et al, 2012; Nixon, 1989):

*Llano Grande:* inicia con la formación del volcán Llano Grande hace 0.9 Ma, la actividad de este volcán provocó el colapso de la cumbre formando la caldera, las erupciones en el flanco N produjeron el cerro La Trampa y un flujo de riodacita que da forma al cerro La Tlacupaso, mientras que un flujo de lava hace 0.6 Ma dio origen a la Montaña Pulpito del Diablo.

Las erupciones laterales y la actividad del volcán Llano Grande dieron forma a los Pies Ancestrales en el flanco sur. Los Pies Ancestrales sufrieron una ruptura debido a los conductos de ventilación en flanco sureste, mientras que más al sur su respiradero expulsó lava y terminó enterrando la mayor parte de su estructura.

*Iztaccíhuatl*: en el Plioceno medio-superior surgió lava del tipo andesita que va a formar la mayor parte del Iztaccíhuatl.

## **Suelo**

Los diferentes tipos de suelo que se encuentran presentes en el área del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl son (FAO, 2015; Vargas, 1997):

*Andosol*: son suelos que se desarrollan en eyecciones volcánicas ricas en vidrio. La meteorización rápida de vidrio volcánico resulta en acumulación de complejos órgano-minerales estables o minerales como alófono, además se forma ferrihidrita.

*Cambisol*: se caracterizan por la meteorización leve o moderada de material parental y por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica o compuestos de Al y/o Fe.

*Fluvisol*: contienen suelos jóvenes en depósitos fluviales, lacustres o marinos, sus perfiles tienen evidencia de estratificación y horizontes con poca diferenciación, pero puede tener un horizonte superficial diferente.

*Litosol*: son suelos muy delgados sobre roca continua y que son extremadamente ricos en fragmentos gruesos. El material calcáreo meteorizado puede tener un horizonte móllico.

*Regosol*: son suelos poco desarrollados en materiales no consolidados que carecen de un horizonte móllico o úmblico, no son muy ricos en fragmentos gruesos, arenosos, ni con materiales. Estos suelos son extensos en tierras erosionadas y zonas de acumulación, en particular en zonas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos.

## Clima

Debido a la topografía y ubicación del Parque Nacional, presenta diferentes tipos de climas de los cuales los más representativos son los siguientes (CONANP, 2013; García, 2004; Instituto de Geografía, 1989; SEMARNAT, 2005; Vidal, 2005):

- Cc(w2)(w)iw”: clima semifrío húmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 7.7 °C y la precipitación media anual es de 1186 milímetros.
- Cb(m)(w)ig: clima templado húmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 17.2 °C y una precipitación media anual de 1885 milímetros.
- Cb(w)kig: clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 13.5 °C y una a precipitación anual de 910 milímetros.
- Cb(w2)(w)ig: clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 13.2 °C y una precipitación anual de 1092 milímetros.
- Cb(w2)(w)'gw”: clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 14 °C y una precipitación media anual de 928 milímetros.
- C(m)(w)b(e)g: clima templado húmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual es entre 12 y 18 °C y una precipitación media anual de 659.3 milímetros.
- C(w“2)big: clima templado, pero el más húmedo de los subhúmedos, con una temporada lluviosa marcada en el verano y otra en invierno, la temperatura media anual es de 14. 6 °C y una precipitación media anual es de 970.6 milímetros.
- C(w2)(w)(b')ig: clima templado subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media del mes más frío es menor a 18 °C pero mayor a -3 °C y una precipitación de 40 milímetros en el mes más seco.
- ETHw: clima frío, la temperatura media anual esta entre los -2 y 5 °C.
- EFHw: clima muy frío, la temperatura media anual es de -2 °C.

## Hidrología

Los recursos hídricos presentes en el área del Parque Nacional son originados principalmente por el deshielo de glaciares y la precipitación pluvial. El “*Programa de ordenamiento ecológico y por riesgo eruptivo del territorio del Popocatepetl y su zona de influencia*” identifica cuatro subcuencas en la zona:

- Subcuenta Chalco-Texcoco: se encuentra al norte y occidente de la zona y se ubica en el Estado de México.
- Subcuenta Cuautla-Yautepec: está ubicada en la parte sur y occidente, se encuentra en el Estado de México, Morelos y Puebla.
- Subcuenta Río Atoyac: se encuentra al norte y oriente, la cual se encuentra en el Estado de Puebla y una parte en el Estado de México.
- Subcuenta Río Nexapa: se encuentra al sur y oriente, en los Estados de Puebla y Morelos.

## Vegetación

La distribución de la vegetación en la zona del PNIP atiende a la altitud, de modo que se pueden distinguir tres pisos de vegetación (Mascot, 2013):

- De 2400 a 3100 m s.n.m. se encuentra la asociación de *Q. laurina* con *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, *Abies*, *Juniperus* y *Pinus*. Se presenta una combinación de zacatonales primigenios y zacatonales secundarios.
- Entre 4000 y los 4500 m s.n.m se establece el pastizal alpino. Se hallan asociaciones de vegetación en que las gramíneas amacolladas dominan.
- El pastizal alpino y subalpino se encuentra por arriba del límite arbóreo y constituye la vegetación clímax. Los pastizales subalpinos se caracterizan por la presencia de gramíneas amacolladas y se localizan en altitudes de 2700 a 4300 m s.n.m.

## MÉTODO

Para este estudio, se recopilaron los datos de las concentraciones de sulfuros ( $S^{-2}$ ) y sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) registradas en un total de 243 sitios de muestreo en los arroyos y ríos del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su área de influencia, obtenidos entre los años 2001 y 2019 por el Laboratorio de Calidad del Agua y Ecohidrología (LCAyE) de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FESZ).

Los métodos descritos a continuación son los utilizados por los integrantes del LCAyE para la obtención de muestras, análisis de campo y laboratorio.

Para la determinación de las concentraciones de sulfuros ( $S^{-2}$ ) se recolectaron muestras de agua en botellas de polietileno de 0.5 L, y se utilizó acetato de zinc para su conservación, estas muestras se almacenaron a una temperatura de 4 °C para su traslado y análisis en el laboratorio. Para la determinación de sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) las muestras de agua se tomaron con botellas de polietileno de 1 L y se conservaron a una temperatura de 4 °C para posteriormente ser analizadas en el laboratorio (APHA-AWWA-WEF, 2017).

Las concentraciones de sulfuros y sulfatos registradas entre los años 2001 y 2019 fueron determinadas por el LCAyE de la FESZ, utilizando el método yodométrico para la determinación de sulfuro ( $S^{-2}$ ) (APHA-AWWA-WEF, 2017; NMX-AA-084-1982), mientras que se utilizó el método turbidimétrico para la obtención de sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) (APHA-AWWA-WEF, 2017; NMX-AA-074-SCFI-2014).

La medición de pH se realizó *in situ* en los diferentes sitios de estudio con un método electrónico, mediante potenciómetro digital (Conductronic PC18), combo HANNA modelo H9140 y combo HANNA modelo HI 98129 (NMX-AA-008-SCFI-2016).

De la página del reporte del monitoreo del CENAPRED, se obtuvieron los datos de la actividad volcánica del Popocatepetl, como intensidad de las emisiones, dirección de la pluma y fase del semáforo de alerta días anteriores y posteriores a las fechas en las que se realizaron los muestreos de agua.

Se elaboró una base de datos considerando el lugar o localidad de la obtención de la muestra, el municipio, el estado y subcuenca en la que se ubica, al igual que los datos obtenidos de la actividad volcánica (número y tipo de emisión, altura y dirección de la pluma y el semáforo de alerta); así como, el pH y la concentración registrada para los sulfuros ( $S^{-2}$ ) y sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) en las corrientes superficiales en la fecha correspondiente.

Con la información de la base de datos y con ayuda del programa QGIS 3.26.3 'Buenos Aires', se elaboró un mapa utilizando las coordenadas UTM, donde se hizo la delimitación de las subcuencas y los municipios donde se encuentran ubicados los sitios de muestreo en los diferentes años (Figura 3), al igual que se obtuvieron los mapas con las concentraciones de sulfuros (Figura 43) y de sulfatos (Figura 44) y los valores de pH por municipio (Figura 45). De igual manera, con fines de mostrar el escenario de mayor probabilidad de la caída de ceniza en los diferentes municipios, se realizó un mapa (Figura 46) añadiendo los datos del atlas nacional de riesgos sobre las erupciones más frecuentes con columnas de ceniza menores a 10 km y la dirección predominante de los vientos.

Esta base de datos fue utilizada para elaborar los gráficos que representan el comportamiento espacial y temporal de sulfuros ( $S^{-2}$ ), sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ) y pH en los sistemas lóticos y su relación con la actividad volcánica, considerando los datos de las emisiones obtenidos del CENAPRED.

### **Análisis estadístico**

Para este trabajo, se sometieron los datos a pruebas de normalidad y homocedasticidad y dado que los datos no cumplen con estos supuestos, para las comparaciones propuestas se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, para determinar si las medianas de las variables (concentraciones de  $S^{-}$  y  $SO_4^{-2}$ , el pH y las características de las emisiones) de los diferentes años, fases y municipios son iguales o muestran diferencia, y para corroborar se aplicó la prueba de Mood's, ambas pruebas se realizaron con un nivel de confianza del 95% y se elaboraron gráficos de caja y bigote con muesca para ilustrar las diferencias o similitudes entre ellas (Delicado, 2008; Martínez, 2013).

SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

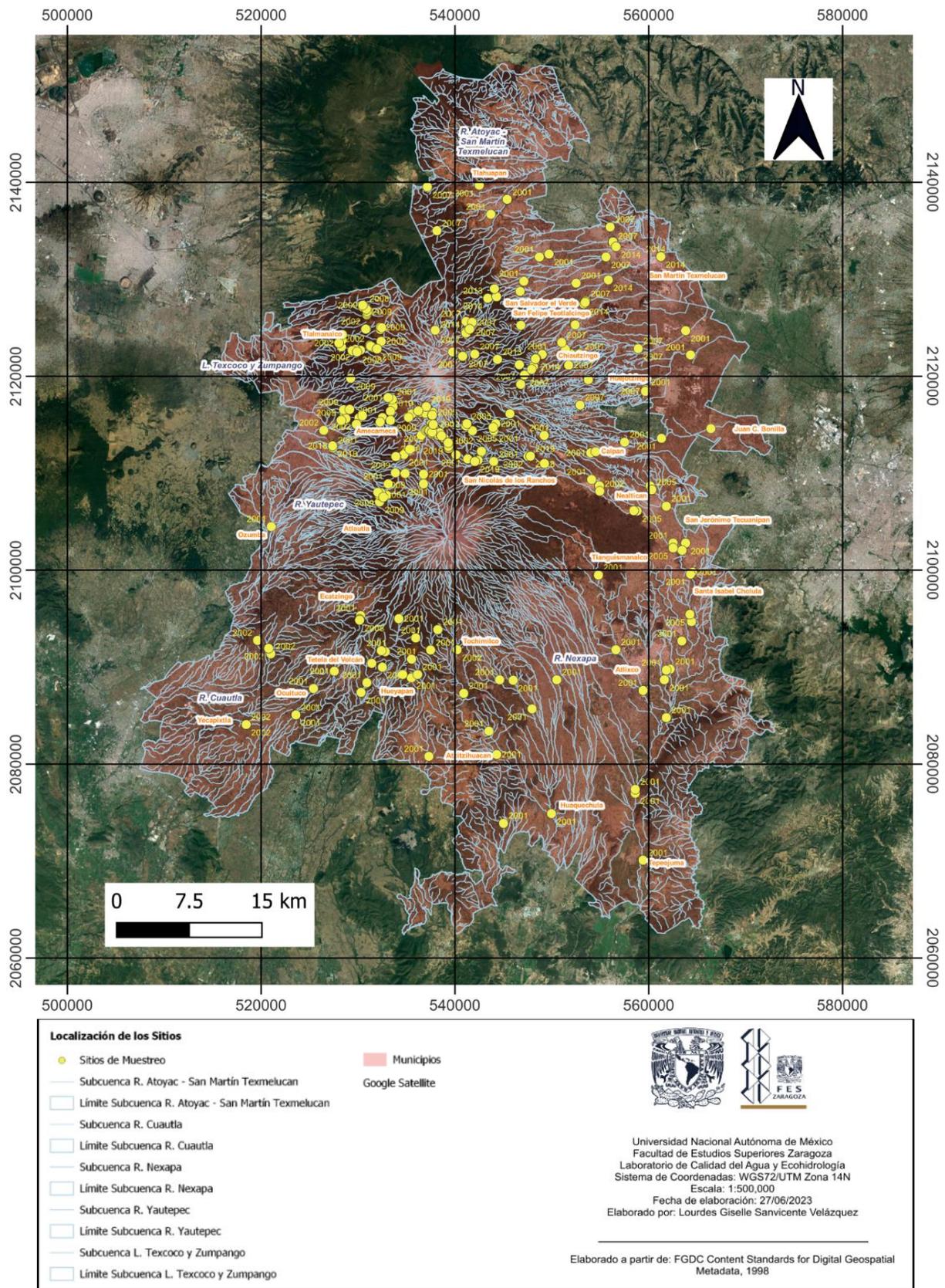


Figura 3. Ubicación de los Sitios de Muestreo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procesaron datos de los años 2001, 2002, 2005, 2007, 2008, 2009, 2013, 2014, 2018 y 2019 para las concentraciones de azufre ( $S^{-2}$  y  $SO_4^{-2}$ ) y pH de las muestras de agua, recopilados del registro con el que se cuenta en el Laboratorio de Calidad de Agua y Ecohidrología, a partir de los cuales se realizaron los análisis pertinentes, para dar cumplimiento a los objetivos. Además de acuerdo con los datos del CENAPRED se registró la fase del semáforo, la distancia y dirección de la columna eruptiva y el número de exhalaciones, considerando días anteriores y posteriores a la fecha del muestreo. La tabla 1 muestra el resumen del número de datos procesados de cada uno de los diferentes parámetros, el valor promedio, mínimo y máximo y el coeficiente de variación.

### Sulfuros

Los registros de las concentraciones de Sulfuros ( $S^{-2}$ ) en las corrientes superficiales tuvieron fluctuaciones a lo largo de los años, como se presenta en la tabla 1, esta variación en las concentraciones se debe principalmente al número y tipo de exhalación proveniente de la actividad volcánica del Popocatépetl, ya que estas pueden estar acompañadas de vapor de agua y gas o vapor de agua, gas y ceniza. Estos gases y ceniza suelen ser dispersados por el viento o la lluvia y depositarse en los ríos o arroyos circundantes dando origen a una fuente de azufre, afectando las concentraciones.

Los diferentes compuestos que se encuentran en la ceniza volcánica, al estar en contacto con el agua, empiezan a disolverse, dominando la disolución de sales y de los aerosoles adheridos. Uno de los principales elementos mayormente presentes en la disolución de la ceniza es el azufre, principalmente en forma de  $SO_4^{-2}$  (Cruz-Sánchez et al., 2021; Fernandez-Turiel et al., 2012; Méndez y Bertsch, 2011).

Las concentraciones de sulfuros registradas en los diferentes años son similares a otros valores obtenidos en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl y su zona de influencia, que van desde una ausencia total a  $20 \text{ mg L}^{-1}$  para la zona de mayor altitud y las subcuencas Amecameca y Nexapa, concentraciones que son atribuidas a la actividad volcánica previa a las mediciones (Guerra-Hernández y Cruz, 2017; González-Aguado y Guerra-Hernández, 2013).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

Tabla 1. Registros, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por año.

Año		Sulfuros mg L <sup>-1</sup>	Sulfatos mg L <sup>-1</sup>	pH	Altitud m s.n.m.	Altura de la Columna m	Fase	Número de Exhalaciones de Vapor de agua y gas	Número de Exhalaciones de Vapor de agua, gas y ceniza
2001	Registro	96	96	96	96	34	96	53	31
	Promedio	10.67	13.05	7.48	2468.89	491.18	2.08	27.09	15.81
	Mínimo	0	0.07	6.33	1070	300	2	8	5
	Máximo	26.41	71.63	8.93	3650	1000	3	154	40
	Coef. de Var.	51.63%	128.25%	7.99%	24.61%	52.42%	13.34%	141.05%	62.28%
2002	Registro	48	48	48	48	12	48	36	19
	Promedio	16.52	1.39	7.04	3095.44	708.33	2	15.56	11
	Mínimo	0	0.55	5.22	1705	500	2	2	1
	Máximo	37.1	4.56	8.46	3897	1000	2	41	70
	Coef. de Var.	63.54%	80.86%	10.69%	22.66%	15.30%	0%	59.41%	190.48%
2005	Registro	45	SR	38	45	SRAV	45	45	SRAV
	Promedio	1.53	SR	7.09	3134.18	SRAV	1	12.24	SRAV
	Mínimo	0	SR	5.95	1948	SRAV	1	4	SRAV
	Máximo	10.56	SR	8.33	4056	SRAV	1	40	SRAV
	Coef. de Var.	199.71%	SR	9.27%	20.94%	SRAV	0%	68.16%	SRAV
2007	Registro	47	SR	46	47	SRAV	47	47	SRAV
	Promedio	11970.4	SR	7.18	2792.72	SRAV	2	4.38	SRAV
	Mínimo	408.71	SR	6.28	2264	SRAV	2	2	SRAV
	Máximo	43040.27	SR	9.74	3721	SRAV	2	8	SRAV
	Coef. de Var.	60.46%	SR	9.62%	17.42%	SRAV	0%	37.93%	SRAV
2008	Registro	13	13	13	13	SRAV	13	13	SRAV
	Promedio	0.06	0.48	7.21	3145	SRAV	2	5.08	SRAV
	Mínimo	0.05	0.40	6	2654	SRAV	2	3	SRAV
	Máximo	0.07	0.65	10.08	3591	SRAV	2	15	SRAV
	Coef. de Var.	11.50%	15.54%	13.95%	11.72%	SRAV	0%	64.06%	SRAV
2009	Registro	SR	42	41	42	2	42	34	8
	Promedio	SR	0.15	6.67	3311.48	2000	2	7.35	10
	Mínimo	SR	0.02	5.47	2534	2000	2	3	5
	Máximo	SR	0.32	8.2	3960	2000	2	15	15
	Coef. de Var.	SR	60.84%	10.69%	12.29%	0%	0%	55.10%	48.40%
2013	Registro	8	8	8	8	3	8	4	4
	Promedio	6.65	8.06	7.07	2890.13	300	2	18.25	53.5
	Mínimo	2.56	0	6.45	2272	300	2	16	10
	Máximo	20	27.46	8.15	4054	300	2	19	82
	Coef. de Var.	83.32%	144.34%	8.40%	19.44%	0%	0%	8.22%	57.28%
2014	Registro	31	31	31	31	6	31	24	7
	Promedio	2.72	9.96	6.74	2805.23	550	2	40.29	23
	Mínimo	0	0	5.62	2235	500	2	7	8
	Máximo	6.68	43.93	7.81	4054	600	2	163	29
	Coef. de Var.	66.71%	115.22%	8.75%	20.32%	9.96%	0%	112.31%	44.55%
2018	Registro	23	23	23	23	8	23	12	17
	Promedio	0.56	12.55	7.309	3227.57	2100	2	147.83	101.35
	Mínimo	0	1.81	6.1	2260	2000	2	55	2
	Máximo	1.99	27.93	8.43	4010	2400	2	206	183
	Coef. de Var.	92.69%	58.85%	6.63%	18.31%	8.82%	0%	37.72%	79.30%
2019	Registro	28	28	28	28	14	28	6	22
	Promedio	1.89	20.59	7.18	3305.29	2614.29	2.39	40.33	89.68
	Mínimo	0	1.38	6.2	2260	800	2	33	24
	Máximo	9.08	43.82	8.1	4012	5000	3	44	243
	Coef. de Var.	161.13%	60.47%	7.06%	17.68%	67.18%	20.78%	14.08%	79.20%
Total	Registro	339	289	372	381	79	381	273	108
	Promedio	1665.78	8.89	7.15	2925.78	1098.73	1.93	22.38	44.91
	Mínimo	0	0	5.22	1070	300	1	2	1
	Máximo	43040.27	71.63	10.08	4056	5000	3	206	243
	Coef. de Var.	295.74%	147.55%	9.82%	22.38%	104.37%	20.95%	170.74%	133.31%

Nota: Sin registro de actividad volcánica SRAV.  
Sin registro SR.

Respecto a lo anterior, la concentración de sulfuro suele ser afectada por la cercanía de los cuerpos de agua al volcán, debido a que, en las zonas colindantes al cono, la caída de ceniza es de mayor espesor (1 cm), resultado de columnas de erupción menores a 10 km que ocurren con mayor frecuencia. La presencia de sulfuros en las zonas más cercanas al volcán también puede ser atribuida por caída de ceniza, pero este aumento depende de la dispersión por la acción del viento y su dirección (CENAPRED, 2001; Delgado et al., 1995; Huitron, 2013; Martín del Pozzo, 2016; UNAM, 2017).

Otro factor que puede aumentar los valores de sulfuros en los cuerpos de agua es el origen geológico del sustrato en los sitios de muestreo (Figura 3). Algunas zonas del PNIP están formadas por depósitos de bloques, ceniza y rocas con contenido de azufre, al igual que revestimientos de pirita (Espinosa-Pereña y Martín del Pozzo, 2006; Nixon, 1989).

Las gráficas del comportamiento de los sulfuros en los sistemas lóticos del parque (Figura 4-12) muestran una mayor relación con las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza, esto se debe a que la ceniza y gases expulsados por el volcán contienen compuestos de azufre, como la Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) (Martín del Pozzo et al., 1995; Obenholzner et al., 2003). Cuando hay un alza en las exhalaciones se ve reflejado en el aumento de las concentraciones de los compuestos de azufre, con un efecto retardado de aproximadamente cinco días, ya que la ceniza generalmente no se deposita directamente en los cuerpos de agua, sino en el suelo y la vegetación aledaña y tarda un poco más en incorporarse al río.

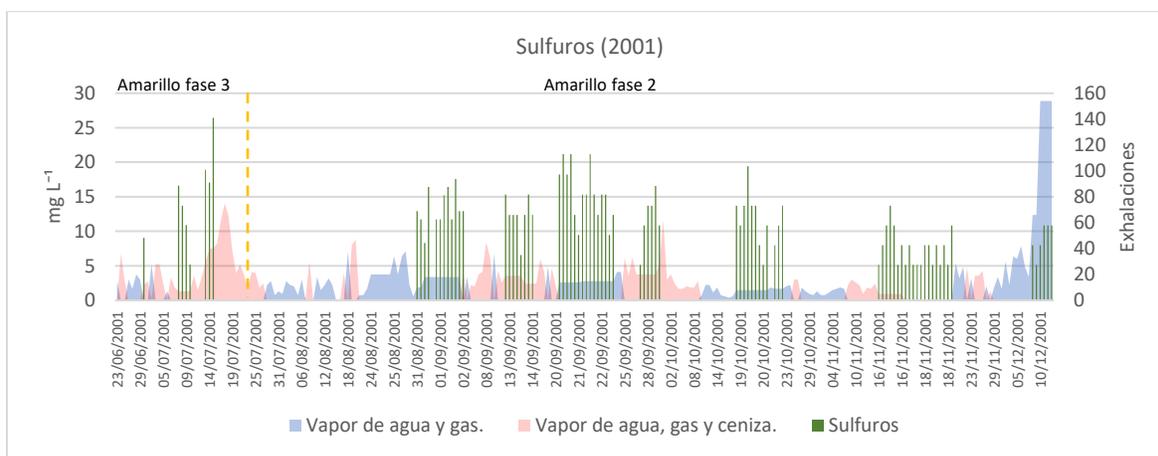


Figura 4. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2001.

Como se puede observar, las concentraciones de sulfuros registradas entre el 30 de junio y 10 de diciembre del año 2001 (Figura 4) se encuentran entre una ausencia total y 26.41 mg L<sup>-1</sup>, con un promedio de 10.67, en sitios que se ubicaron en un rango de altitud variado (1070 a 3650 m s.n.m.) y se encuentran situados en diferentes zonas de casi todo el PNIP. En el semáforo de alerta amarillo fase tres que se presentó días antes de iniciar la recolecta y terminó el 23 de julio, las concentraciones registradas fueron altas (5.02 a 26.41 mg L<sup>-1</sup>), derivadas de un máximo de 40 exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza y columnas con contenido de ceniza que llegaron a medir de 500 m a 4 km, donde esta última produjo que las concentraciones en los cuerpos de agua se elevaran, ya que la columna fue dirigida al NW del volcán, afectando los sitios que se encontraron ubicados en esa dirección con la caída de ceniza. En el cambio de semáforo a amarillo fase dos, la mayor parte de los sitios de muestreo se encontraron ubicados en la dirección de la columna de emisión, dado que los vientos fueron dirigidos predominantemente de NW al SW en la mayoría de los días y con una dirección predominante al NE en el último mes, aumentando las concentraciones, esto es debido a que el número de exhalaciones de vapor de agua y gas que se presentaron fue de hasta 154 por día, mientras que, el número de las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza ocurridas fueron de hasta 29 en días de colecta y de hasta 62 en días previos, donde las columnas de gases y las columnas acompañadas de ceniza llegaron a medir hasta 4 y 2.5 km respectivamente.

El 22 de enero del 2001 ocurrió una explosión que generó una columna de ceniza de aproximadamente 18 km, acompañada de lanzamientos de fragmentos y flujos de ceniza que descendieron hasta una distancia de 6 km, ocasionando el derretimiento parcial del glaciar, removiendo cerca de 50000 m<sup>3</sup> de hielo mezclándose con depósitos de piedra pómez que formaron lahares los cuales descendieron aproximadamente 15 km (Capra et al., 2004; Martin del Pozzo et al., 2003), resultando una fuente constante de azufre para los cuerpos de agua, con incremento en las concentraciones de sulfuros en sitios ubicados en las faldas del volcán.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

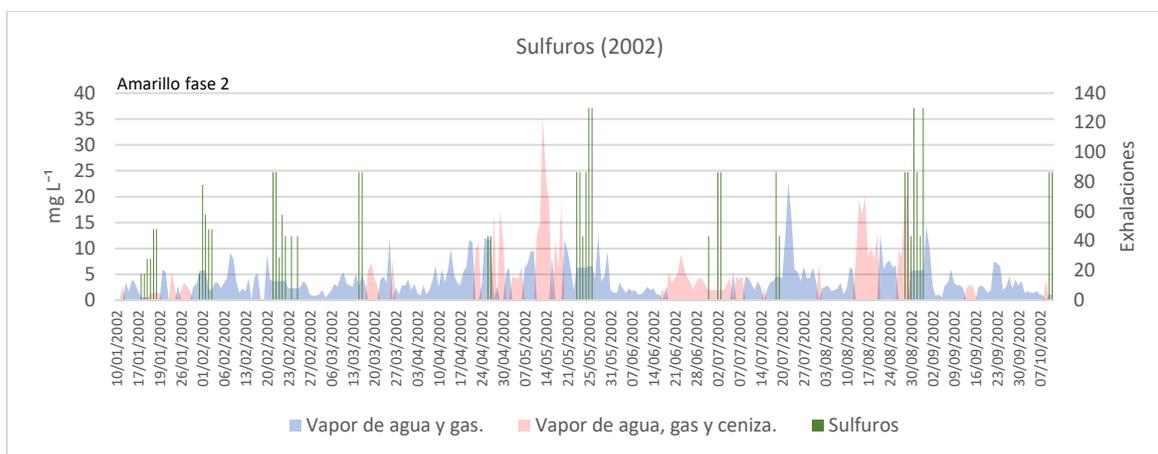


Figura 5. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2002.

Los sitios de colecta entre el 18 de enero y el 10 de octubre del año 2002 (Figura 5) se ubicaron principalmente al N y NW del volcán, con algunos sitios al SW y NE, entre una altitud de 1705 y 3897 m s.n.m., donde las concentraciones fueron de una ausencia total a 37.1 mg L<sup>-1</sup>, con un promedio de 16.52. Estas concentraciones proceden de las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza y de columnas con contenido de ceniza, ya que llegaron a presentarse en los días de muestreo hasta 70 exhalaciones, mientras que las columnas llegaron a medir hasta 700 m. Las exhalaciones ocurridas en el intervalo entre las fechas de muestreo son de suma importancia, ya que como se mencionó anteriormente, la ceniza suele no depositarse de manera directa e inmediata en los cuerpos de agua, presentándose hasta un número de 124 exhalaciones, donde las columnas con contenido de ceniza llegaron a tener una altura máxima de 2.5 km. Aunque la actividad volcánica ocurrida fue una fuente de sulfuros, la presencia del ion en concentraciones elevadas son también resultado del deshielo y la incorporación de materiales restantes de los lahares que se formaron en el año 2001.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

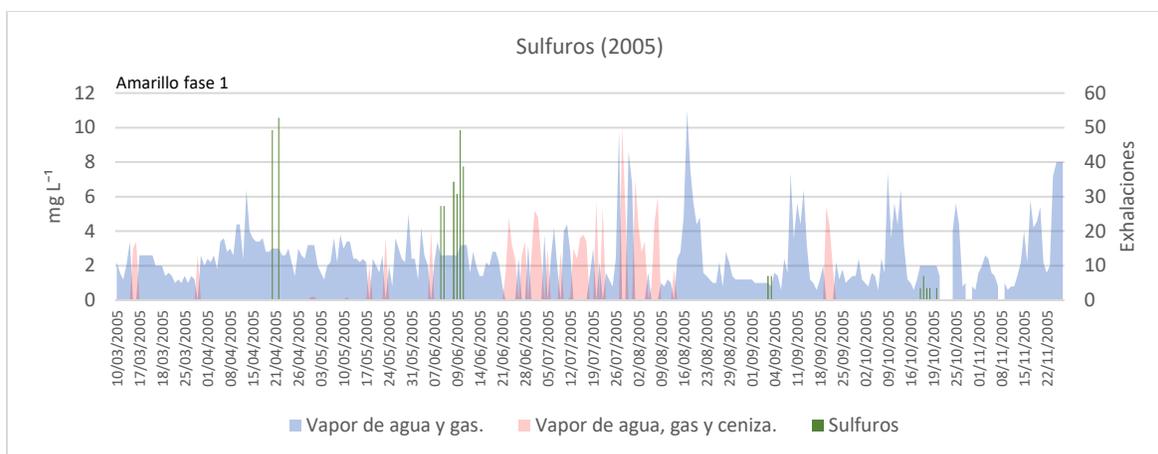


Figura 6. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2005.

Las concentraciones de sulfuros entre el 17 de marzo y el 25 de noviembre del año 2005 (Figura 6) se encontraron entre la ausencia total y  $10.56 \text{ mg L}^{-1}$ , con un promedio de  $1.53$ , donde el número de las exhalaciones de vapor de agua y gas estuvieron entre 4 y 40 en días de colecta de muestra, mientras que, en los días previos a la toma de muestra las exhalaciones acompañadas de vapor de agua y gas y vapor de agua, gas y ceniza llegaron hasta a un número de 55 y 50 por día respectivamente.

La baja actividad volcánica debido a la fase amarilla uno eruptiva, fue la principal causa de que los valores se ubicaran entre una ausencia y  $1.4 \text{ mg L}^{-1}$  en la mayoría de los sitios, mientras que, para los sitios restantes, los valores oscilaron entre los  $5.46$  y  $10.56 \text{ mg L}^{-1}$ , resultado de la presencia de columnas eruptivas con contenido de ceniza de  $1.5$  a  $1.8 \text{ km}$  de altitud, ocurridas en días cercanos a las fechas de medición con dirección al NE principalmente por los vientos predominantes, donde la mayoría de las zonas de muestreo se ubicaron ( $1948$  a  $4056 \text{ m s.n.m}$  al NE-SE del volcán).

Respecto a la poca actividad volcánica del Popocatépetl, se puede deducir que las concentraciones también pueden ser debidas a la erosión de las zonas altas formadas por depósitos de ceniza y de rocas en las zonas muestreadas de mayor altitud ( $2969$  a  $4056 \text{ m s.n.m.}$ ) (Espinosa-Pereña y Martin del Pozzo, 2006).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

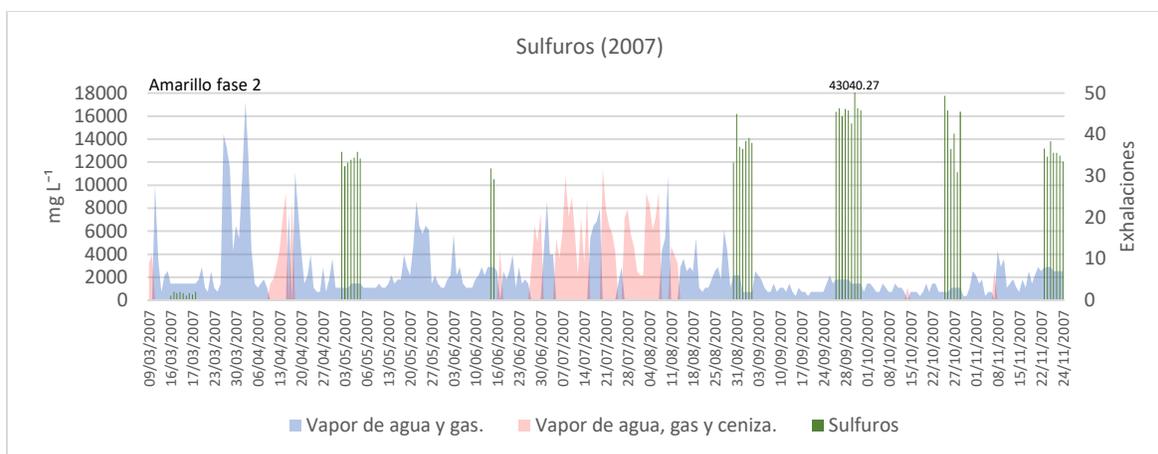


Figura 7. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2007.

La figura 7 muestra la variación de las concentraciones de sulfuros registradas entre el 16 de marzo y el 24 de noviembre del año 2007, donde los valores sobrepasan los 400  $\text{mg L}^{-1}$ , llegando hasta 43040.27  $\text{mg L}^{-1}$  y presentando una media de 11970.4. Las exhalaciones de vapor de agua y gas predominaron en este lapso, debido a que ocurrieron de 2 a 8 exhalaciones en días de toma de muestra y hasta 48 en días previos a los muestreos.

La actividad volcánica no fue la principal causa de las altas concentraciones de  $\text{S}^{2-}$  para este año, sino que, es atribuido al arrastre de materiales provenientes del volcán en zonas altas (2770 a 3721 m s.n.m.), a la incorporación de las aguas residuales (de 20 a 50  $\text{mg L}^{-1}$  de sulfatos) y a la disolución de los fertilizantes con contenido de azufre (Sulfato de Amonio, Sulfato de Cobre, Sulfato Ferroso y Sulfato de Zinc) en los cuerpos de agua que se ubicaron primordialmente en zonas cercanas a la población (2264 a 2712 m s.n.m.), debido a las lluvias e inundaciones ocurridas (Hernández, 2007; IFA, 1992; González, 2007; Metcalf y Eddy, 2003; Nixon 1989).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

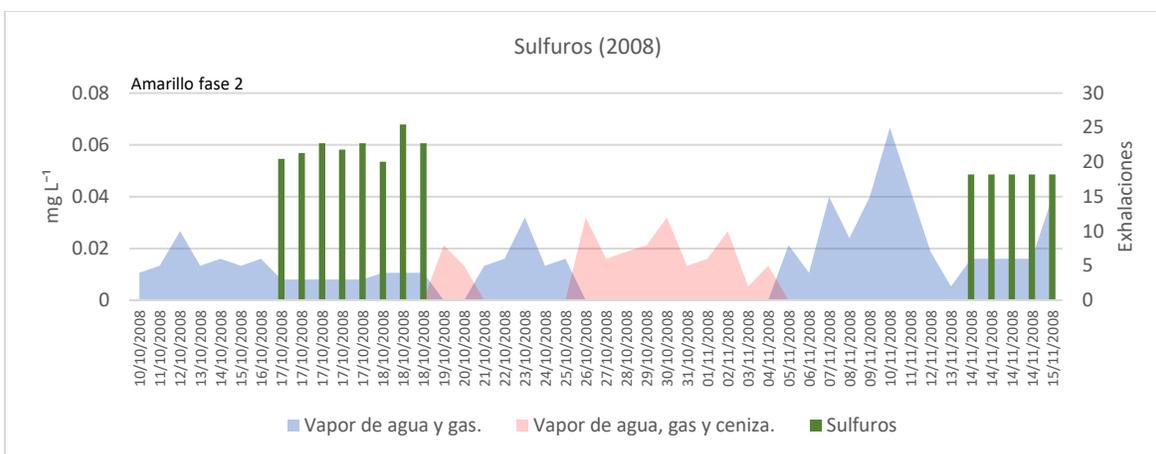


Figura 8. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2008.

Entre el 17 de octubre y 15 de noviembre del año 2008 (Figura 8), los sitios de recolección se ubicaron al NW y SW del volcán a una mayor altitud (2654 a 3591 m s.n.m.), donde las concentraciones fueron mínimas ( $0.05$  a  $0.07$  mg L<sup>-1</sup>), con un valor promedio de  $0.06$ , atribuidas a la poca actividad del volcán, dado que, en los días de recolección, no ocurrió algún evento eruptivo significativo (exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza y columna eruptiva), mientras que, en el intervalo entre los días de muestreo del mes de octubre a noviembre, solo en 12 días hubo presencia de exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, donde los vientos predominantes fueron en dirección al NE y SE.

Los sitios muestreados se encuentran formados por piedra pómez y depósitos de ceniza con compuestos de azufre, que pueden ser erosionados y arrastrados a los cuerpos de agua, siendo un precursor de la presencia de sulfuros (Espinosa-Pereña y Martín del Pozzo, 2006; Nixon, 1989)

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

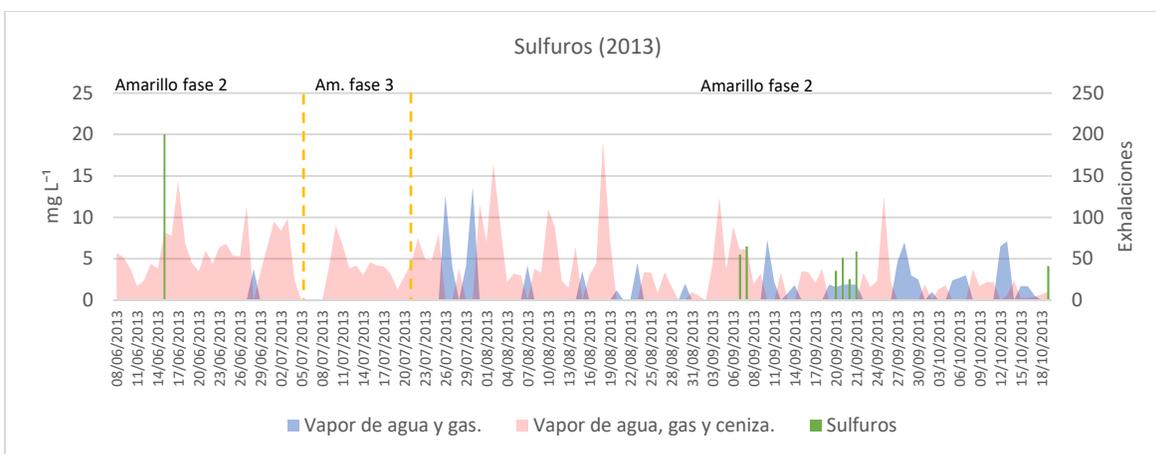


Figura 9. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2013.

El comportamiento de sulfuros ( $2.56$  a  $20 \text{ mg L}^{-1}$  y un promedio de  $6.65$ ) en los sitios de muestreo (NE del volcán entre  $2272$  y  $4054 \text{ m s.n.m.}$ ), entre el  $15$  de junio y  $19$  de octubre del año  $2013$  (Figura 9), no presentó mucha variación, con un valor sobresaliente de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  (a  $4054 \text{ m s.n.m.}$ ), resultado de una columna eruptiva de  $3 \text{ km}$  con contenido de ceniza. Respecto a esto, las concentraciones fueron afectadas de menor manera por la actividad volcánica, debido a que, las exhalaciones y columnas presentadas (hasta  $82$  exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza en días de muestreo y en días previos hasta  $192$ , con columnas con contenido de ceniza que llegaron a medir  $4 \text{ km}$ ) fueron en dirección al NW, SW y W. Aunque la dirección de los vientos predominó al W, los sitios de muestreo se encuentran dentro del rango de caída de ceniza de  $1 \text{ mm}$  de espesor (Martin del Pozzo, 2016).

La erosión de los depósitos de bloques y ceniza, ubicados alrededor de la zona alta de la cabeza, pecho y rodillas del volcán Iztaccíhuatl (Ayoloco), contribuyeron de igual manera en el aumento de sulfuros en los arroyos y ríos, indicando que los sitios en donde se realizaron los muestreos pueden ser un factor importante en la presencia de este ion en los cuerpos de agua (Nixon, 1989).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

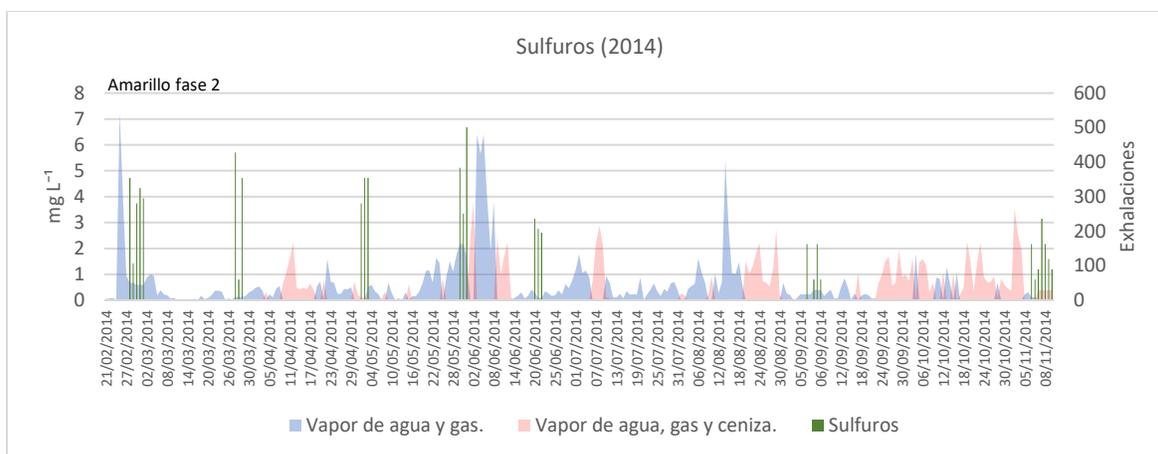


Figura 10. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2014.

La actividad volcánica registrada entre el 28 de febrero y 8 de noviembre del año 2014 (Figura 10) tuvo un impacto en los valores de sulfuros (de ausencia total a  $6.68 \text{ mg L}^{-1}$  y promedio de  $2.72$ ) registrados en los cuerpos de agua (2235 a 4054 m s.n.m.), debido a que se presentaron de 7 a 163 y de 8 a 29 exhalaciones de vapor de agua y gas y vapor de agua, gas y ceniza respectivamente, donde las columnas de vapor de agua y gas llegaron a medir entre los 500 y 600 m, mientras que, para los días de intervalo entre las fechas de muestreo, las exhalaciones llegaron hasta 544 y 284, donde las columnas eruptivas con contenido de ceniza midieron hasta 4 km con una dirección predominante al NE-SE, donde se encuentran los sitios de muestreo.

Las concentraciones de sulfuros, al igual que en el año 2013, son atribuidas a la erosión de los depósitos de bloques y ceniza de la parte alta del Iztaccíhuatl (Ayoloco), además de que los sitios muestreados de ambos años se encuentran dentro del rango de caída de ceniza de 1 mm de espesor, provenientes de columnas de ceniza menores a 10 km (Martín del Pozzo, 2016; Nixon, 1989).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

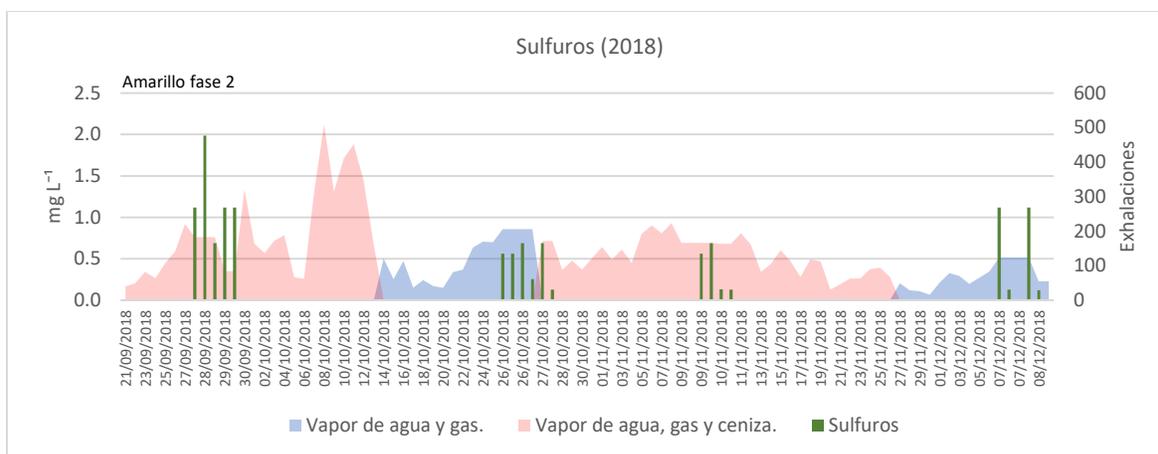


Figura 11. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2018.

Entre las fechas del 28 de septiembre y el 8 de diciembre del 2018 (Figura 11), las concentraciones de sulfuros en los sitios de muestreo (NW y NE a 2260 a 4010 m s.n.m.) estuvieron de una ausencia total a  $1.99 \text{ mg L}^{-1}$  en los cuerpos de agua, con una media de 0.56. La presencia de sulfuros fue baja pero constante, derivada de las exhalaciones acompañadas de ceniza (hasta 183 por día) y columnas con contenido de ceniza que llegaron a medir 2.4 km en los días de medición, con dirección predominante al NE, mientras que, en los días previos llegaron a ocurrir hasta 509 exhalaciones acompañadas de ceniza por día y columnas con contenido de ceniza que midieron hasta 3.5 km con dirección predominante al NW y NE.

Los lugares donde se realizaron los muestreos se encuentran dentro de la zona de caída de ceniza con un espesor de 1 mm, además de que estos sitios (Xalizintla, Buenavista, Alcalica, Tomacoco y la Joya) se encuentran en zonas con depósitos de ceniza negra y revestimientos de pirita (Espinosa-Pereña y Martín del Pozzo, 2006; Nixon, 1989), que aportan este ion al cauce.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

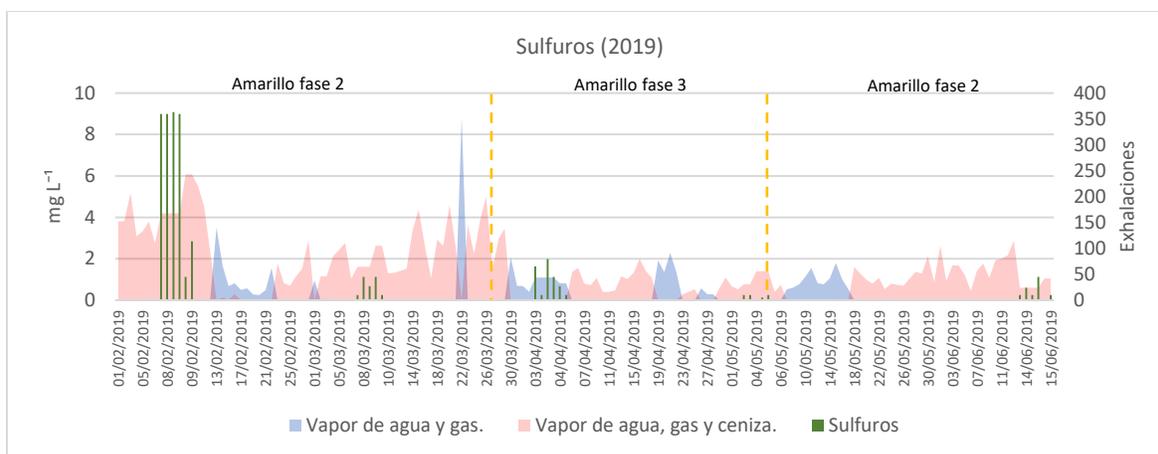


Figura 12. Comportamiento de sulfuros y de las emisiones volcánicas en el año 2019.

En el año 2019 (8 de febrero al 15 de junio), la mayoría de las concentraciones (entre ausencia total y  $9.08 \text{ mg L}^{-1}$ ) estuvieron en niveles bajos, presentando un promedio de  $1.89$  (Figura 12), derivado de la presencia de exhalaciones acompañadas de ceniza (hasta 243 por día) ocurridas en los días de muestreo y con influencia de columnas con contenido de ceniza de hasta 5 km con dirección predominante al NW y NE, donde se encuentran los sitios ubicados (NW y NE entre los 2260 y 4012 m s.n.m.). Estas concentraciones, como se mencionó con anterioridad, son afectadas por las exhalaciones con contenido de ceniza con un efecto retardado de aproximadamente cinco días, por lo que las exhalaciones y columnas acompañadas de ceniza en días previos a la toma de muestra son relevantes, ya que llegaron a ocurrir hasta 221 exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, al igual que las columnas de ceniza llegaron a medir 5 km con dirección al NW, NE y SE.

Los valores más elevados de sulfuros presentados ( $9$  y  $9.08 \text{ mg L}^{-1}$ ) resultaron tener una relación con la caída de ceniza en San Nicolás de los Ranchos y Nealtican, por columnas de ceniza de uno y 3.5 km ocurridas días antes de los muestreos, además de múltiples exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza con dirección NE y NW.

Es importante recalcar que estos sitios son los mismos muestreados que en el 2018, por lo que se encuentran en el rango de caída de ceniza y las zonas presentan depósitos de ceniza negra y revestimientos de pirita.

## Sulfatos

Las concentraciones de Sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) en las corrientes superficiales presentaron diferentes valores, como se muestra en la tabla 1, indicando que la mayoría se ubica dentro de los límites que van desde 5 y 30  $\text{mg L}^{-1}$  en aguas naturales (Wetzel, 2001). En pocos sitios de forma natural se sobrepasan estos valores, encontrándose las concentraciones en un intervalo de 0 a 630  $\text{mg L}^{-1}$  perteneciente a los ríos, de acuerdo con lo citado por Zak y colaboradores (2021).

Los valores antes mencionados concuerdan con resultados de estudios realizados en el Parque Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de influencia en diferentes años, ya que se han registrado valores entre 0.03 y 48  $\text{mg L}^{-1}$  de sulfatos en diferentes Manantiales entre los años 1995 a 2004, específicamente en 1995 las concentraciones de sulfatos se mantuvieron en un intervalo de 4 a 40  $\text{mg L}^{-1}$ , mientras que, en un estudio que se realizó de 2010 a 2014 las concentraciones de sulfatos fluctuaron desde ausencia total hasta los 78.75  $\text{mg L}^{-1}$  en 78 sitios de muestreo considerando manantiales, arroyos y ríos (Armienta et al., 2008; González-Aguado y Guerra-Hernández, 2013; Guerra, 2020; Martín del Pozzo et al., 1995).

Estudios realizados en la zona (Guerra, 2020; Monfil, 2020) demuestran la calidad del agua en diversos sitios del parque, reflejando perturbaciones, como desechos y aguas residuales que se vierten a los ríos, al igual que el uso de fertilizantes utilizados en los cultivos, revelando que estas alteraciones pueden ser otro factor que aumenta las concentraciones en los diferentes sitios, sobre todo en la zona de influencia del PNIP de menor altitud con actividad humana a lo largo de los años, ya que resultan ser una fuente constante de  $\text{SO}_4^{-2}$  de origen antropogénico. Todas las concentraciones registradas se encuentran dentro de los límites permisibles para aguas de uso y consumo humano (400  $\text{mg L}^{-1}$ ) de la NOM-127-SSA1-2021.

La ubicación de la zona de muestreo (Figura 3), también juega un papel muy importante en el aumento del ion sulfato en los cuerpos de agua, debido a los diferentes depósitos de piedra pómez con contenido de sulfatos que se encuentran presentes en el PNIP y su zona de influencia (Ángeles, 2019; Arana-Salinas et al., 2010; Larocque et al., 2008; Schaaf et al., 2005; Siebe et al., 2017; Sosa-Ceballos et al., 2012).

Los cuerpos de agua que se encuentran ubicados en sitios con cercanía al volcán Popocatépetl o en zonas donde ocurre la deposición de la ceniza que es llevada por el viento y dirección de la pluma resultan ser afectados por el aumento de sulfatos que se derivan de los lixiviados de la ceniza proveniente del volcán, estos lixiviados de ceniza presentan concentraciones entre los 4.32 a 23.03 mg L<sup>-1</sup> de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> (Cruz-Sánchez et al., 2021), llegando hasta concentraciones elevadas de 6015 a 12353 mg L<sup>-1</sup> (Martin del Pozzo et al., 1995).

Las gráficas de la variación de los sulfatos en los sistemas lóticos del PNIP (Figura 13-20) muestran una relación inversa con las concentraciones de sulfuros, ya que, al incrementarse las concentraciones de sulfatos, los sulfuros tienden a disminuir. Esto ocurre de manera natural en las zonas forestales, debido a la rápida transformación de los sulfuros a sulfatos por medio de procesos de oxidación, lo que ocasiona un aumento en el pH del agua (Hem, 1960; Wetzel, 2001; Zak et al., 2021).

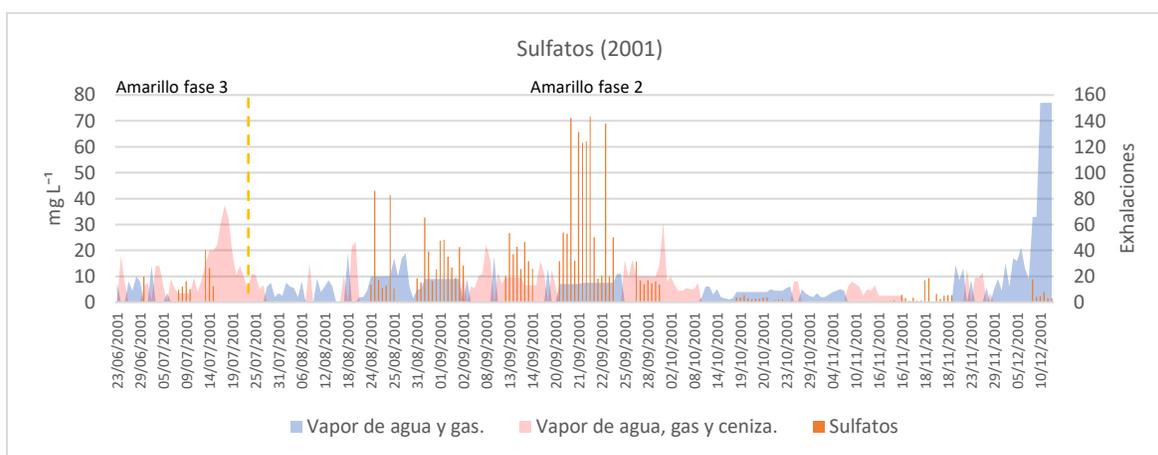


Figura 13. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2001.

En el año 2001 (Figura 13), las concentraciones de sulfatos se presentaron de 0.07 a 71.63, con una media de 13.05. En las zonas de mayor altitud, las concentraciones estuvieron entre 0.89 y 43.04 mg L<sup>-1</sup>, mientras que, para el resto de los puntos de medición (zona agrícola y poblada) entre 1.09 y 71.63 mg L<sup>-1</sup>. Estas concentraciones elevadas son resultado de la oxidación de sulfuros provenientes de los materiales arrojados en la erupción del 22 enero. Relacionado con lo anterior, los sulfatos en los

sitios ubicados entre los 1070 a 2620 m s.n.m. también presentan un origen antropogénico, donde el uso de fertilizantes y las aguas residuales son una fuente constante de este ion.

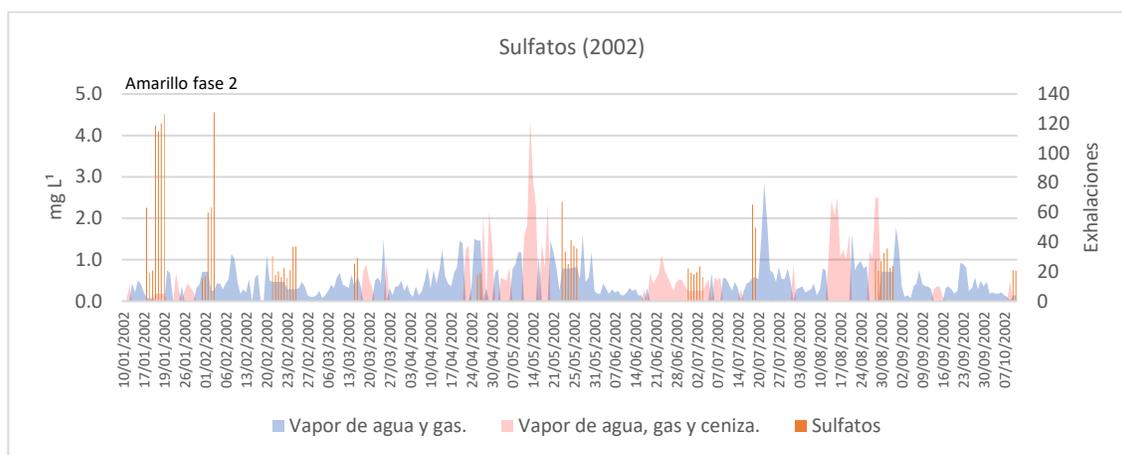


Figura 14. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2002.

Las concentraciones de sulfatos en el año 2002 (Figura 14) se encontraron de 0.55 a 4.56 mg L<sup>-1</sup>, presentando una media de 1.39. Estas concentraciones son resultado del proceso de oxidación de los sulfuros provenientes de la actividad volcánica.

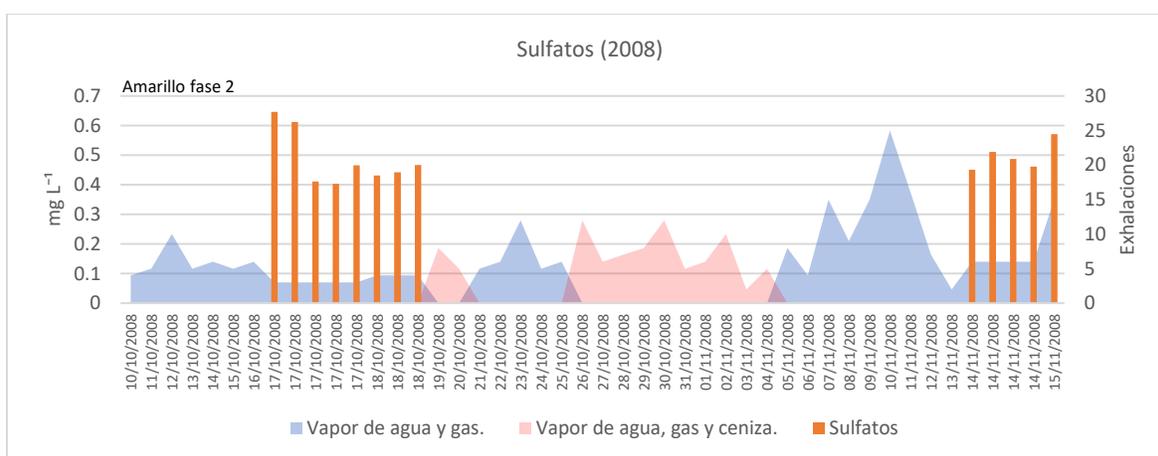


Figura 15. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2008.

La figura 15 muestra que las concentraciones de sulfatos fueron mínimas (0.4 a 0.65 mg L<sup>-1</sup>, con un promedio de 0.48), esto se debe a que en los días de recolección o previos no ocurrió algún evento eruptivo significativo, como se mencionó con anterioridad. La presencia de este ion en los cuerpos de agua puede ser derivado de la oxidación de los sulfuros o de la deposición seca de los gases provenientes del volcán.

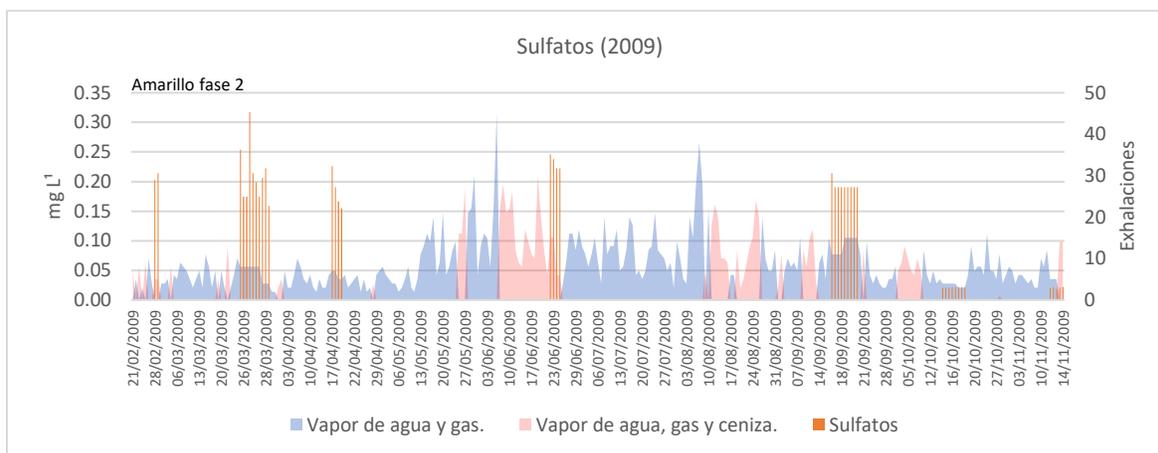


Figura 16. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2009.

Entre el 28 de febrero y el 14 de noviembre del año 2009 (Figura 16), los sulfatos se encontraron entre 0.02 y 0.32 mg L<sup>-1</sup>, con una media de 0.15. Estos valores se deben a que la ubicación de los sitios (NW entre 2534 a 3960 m s.n.m.) no se encontrara en la dirección de las plumas de emisión (NE, SE y W). A pesar de lo mencionado, las concentraciones son derivadas de la actividad volcánica, ya que los sitios muestreados se encuentran ubicados en la zona de caída de ceniza, resultando afectados de menor manera por las exhalaciones acompañadas de vapor de agua gas y ceniza ocurridas días antes de las fechas de la toma de muestra, ya que en estos días de intervalo ocurrieron entre 0 y 30. Las exhalaciones acompañadas de vapor de agua y gas estuvieron presentes, llegando a ocurrir hasta 45 por día en las fechas previas a la toma de muestra, donde la deposición seca de estos gases también fueron un factor para el aumento de este ion en los cuerpos de agua.

Otro factor que influyó en las concentraciones presentadas en 2009 es la erosión de la piedra pómez y los depósitos de ceniza ubicadas en las zonas de muestreo, que aportan sulfatos a los cuerpos de agua (Espinosa-Pereña y Martin del Pozzo, 2006; Nixon, 1989)

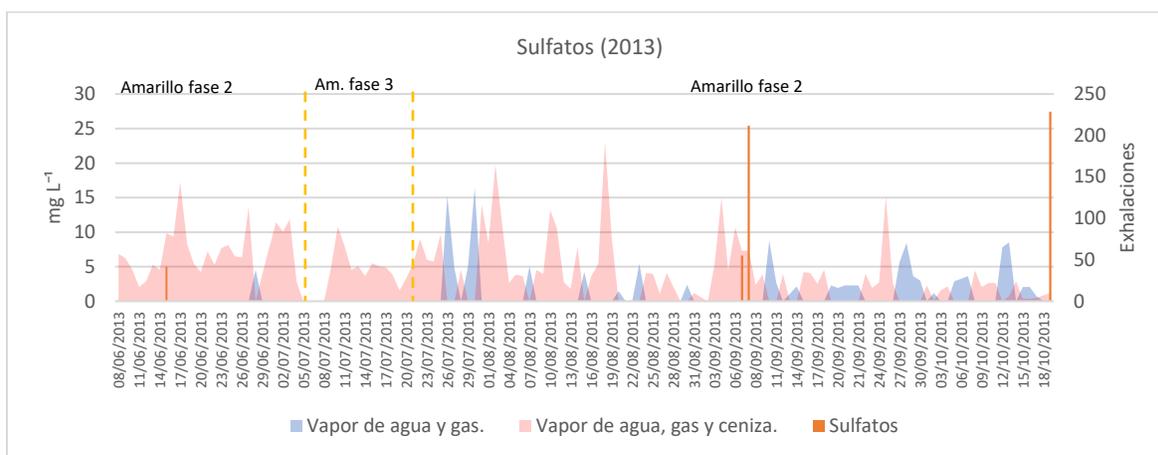


Figura 17. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2013.

Los valores de sulfatos (ausencia total a  $27.46 \text{ mg L}^{-1}$  y un promedio de  $8.06$ ) en el año 2013 (Figura 17) fluctuaron desde la ausencia total a concentraciones de  $6.63 \text{ mg L}^{-1}$  en zonas de mayor altitud, como resultado de la oxidación de los sulfuros provenientes de la actividad volcánica. Las concentraciones elevadas se encontraron en diferentes escenarios, ejemplo de ello es una localidad agrícola-urbana situada cerca de la carretera en donde los escurrimientos agrícolas y la deposición en la zona baja ocurren ( $2272 \text{ m s.n.m.}$ ) registra concentraciones de hasta  $25.41 \text{ mg L}^{-1}$ , otro sitio que presentó concentraciones promedio de  $27.46 \text{ mg L}^{-1}$ , por su localización a una altitud de  $3144 \text{ m}$ , pero con menor impacto urbano y agrícola debe la presencia de estos sulfatos a la continua exposición a las emisiones volcánicas y columnas de ceniza de  $1$  y  $2 \text{ km}$  ocurridas días antes del muestreo y a los procesos de deposición y oxidación de sulfuros.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

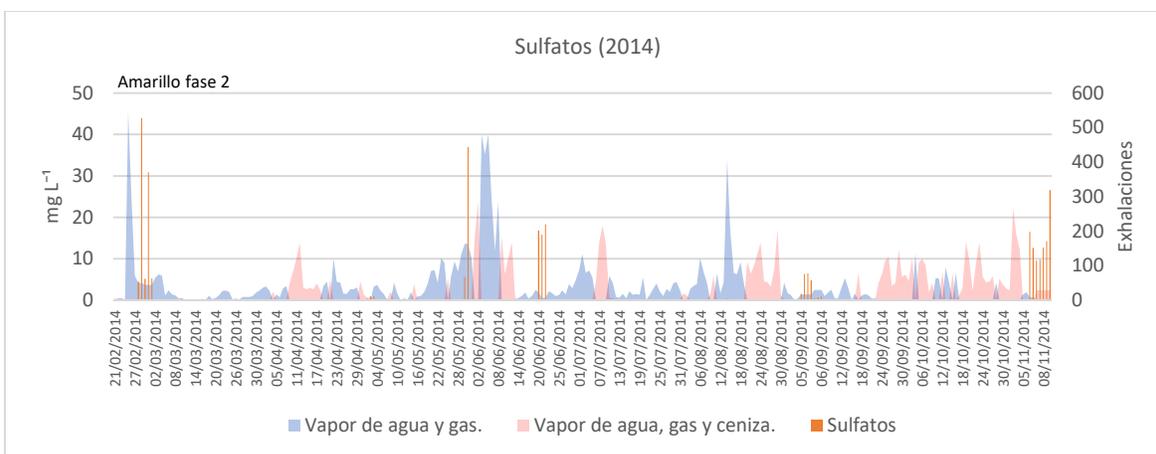


Figura 18. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2014.

Las concentraciones de sulfatos en los cuerpos de agua en el año 2014 (Figura 18) se encontraron entre la ausencia total y  $43.93 \text{ mg L}^{-1}$ , presentando un promedio de  $9.96$ . Estas variaciones son resultado de la oxidación de los sulfuros a sulfatos principalmente en las zonas de mayor altitud (2744 a 4054 m s.n.m.), ya que las concentraciones se encontraron desde una ausencia a  $0.95 \text{ mg L}^{-1}$ , con un valor máximo de  $16.55 \text{ mg L}^{-1}$  proveniente de múltiples exhalaciones de hasta 2 km de altura ocurridas días antes a la medición. Para los demás sitios (2235 a 2713 m s.n.m.), las concentraciones estuvieron entre 1.53 y  $43.93 \text{ mg L}^{-1}$ , consecuencia de múltiples factores: animales muertos en los cauces, influencia de zonas agrícolas con fertilizantes residuales dedicadas al cultivo de maíz y diferentes tipos de legumbres y árboles frutales, actividades de pastoreo y desechos sólidos provenientes de las zonas urbanas que causan turbidez en el agua y mal olor (Cornejo, 2016; Soria, 2016).

De los sitios muestreados, hay dos lugares que se ubican dentro de la zona alta (2746 y 2861 m s.n.m.), donde las concentraciones se encontraron entre  $9.58$  y  $36.93 \text{ mg L}^{-1}$ , derivadas de la actividad humana, ya que uno es un manantial represado con agua proveniente del cauce y de agua corriente y el otro sitio está cercano a las zonas de cultivo.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

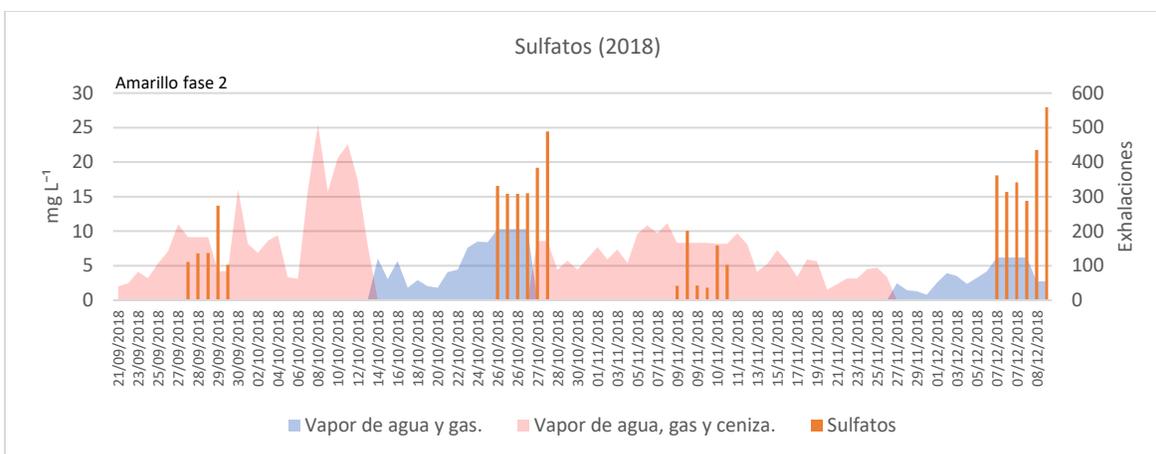


Figura 19. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2018.

La presencia de sulfatos en el año 2018 (Figura 19) tuvo una mayor variación (1.81 a  $27.93 \text{ mg L}^{-1}$  y promedio de 12.55), debido a la transformación rápida de los sulfuros a sulfatos por procesos de oxidación, provenientes de las múltiples columnas y exhalaciones acompañadas de ceniza con dirección predominante al NW y NE, donde se ubicaron los sitios de muestreo de este año.

Las exhalaciones de vapor de agua y gas ocurridas en los días de recolecta y previos a cada muestreo llegaron hasta 206, estas exhalaciones son un factor que pueden elevar las concentraciones de sulfatos en los cuerpos de agua, ya que los gases se adhieren al smog y al polvo, que por gravedad caen a la superficie como deposición seca y al estar en contacto con los cuerpos de agua pueden formar sales como  $\text{CaSO}_4$  (Garcés y Hernández, 2004; Granados et al., 2010).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

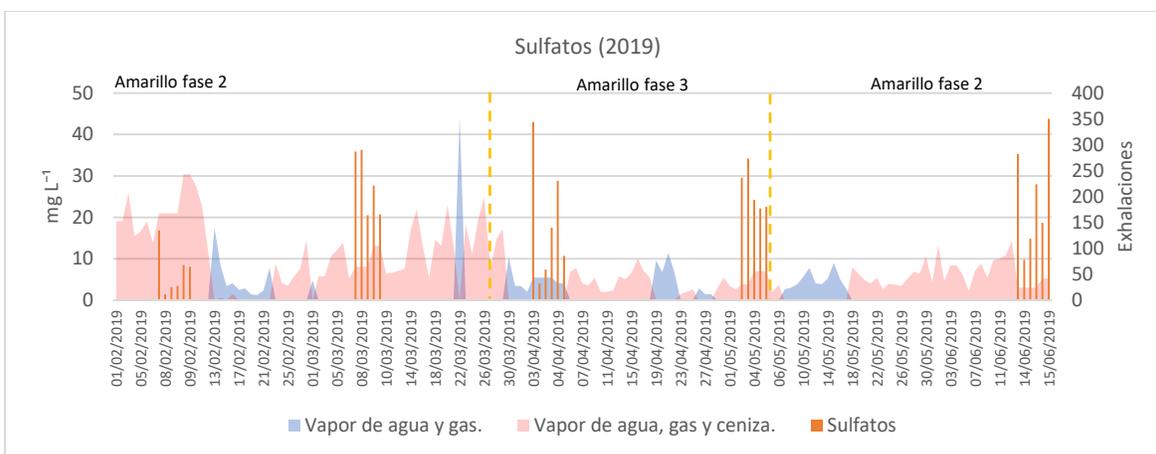


Figura 20. Comportamiento de sulfatos y de las emisiones volcánicas en el año 2019.

El comportamiento de los sulfatos en el año 2019 (Figura 20) fue resultado de la alta actividad volcánica, donde predominaron las exhalaciones acompañadas de ceniza, debido a que ocurrieron hasta un máximo de 243 por día y las columnas llegaron a medir hasta 5 km, con una dirección predominante NW y NE. Las concentraciones fluctuaron entre 1.38 y 43.82 mg L<sup>-1</sup>, con una media de 20.59, que son derivadas de la oxidación de los sulfuros presentes en la ceniza, además de los sulfatos que se encuentran presentes en los lixiviados de ceniza.

En el semáforo amarillo fase tres, que estuvo presente del 27 de marzo al 4 de mayo, las concentraciones fueron de las más elevadas (4.04 a 43 mg L<sup>-1</sup>), ya que esta fase fue acompañada por explosiones y columnas con contenido de ceniza con una altitud máxima de 3 km.

No hay que descartar que algunos sitios muestreados (Xalizintla, Tomacoco y Nealtican) se encuentran ubicados en uso de suelo agropecuario y muestran desviaciones de los cauces y descargas de aguas residuales provenientes de la zona urbana, aumentando el ion sulfato (Monfil, 2020).

## pH

Los valores de pH (Tabla 1), en su mayoría, se encuentran dentro de los límites permisibles en la NOM-127-SSA1-2021 para agua de uso y consumo humano (6.5 a 8.5), algunos valores que se encuentran por debajo o por arriba de estos, están dentro de los criterios ecológicos de calidad de agua, donde el potencial de hidrógeno se considera adecuado entre 5 y 9.

El pH tiene una relación con la forma de azufre presente en los cuerpos de agua, cuando el pH es igual o menor a 7, el azufre se encuentra en forma de ácido débil ( $H_2S$ ), cuando el pH se encuentra igual o mayor a 7 se encuentra como  $HS^-$ , la presencia de azufre en forma de  $SO_4^{2-}$  prevalece en los rangos de pH habituales (entre 4 y 9) del agua natural (Aiba et al., 2003; Lewis, 2010; Hem, 1960; Wetzel, 2001). Lo que indica que las altas concentraciones de sulfuros o sulfatos influyen en el pH, pues al haber mayor concentración de sulfuros el pH tiende a la acidez, mientras que, al haber una mayor concentración de sulfatos el pH es más básico.

Los valores de pH registrados para este estudio son similares a los reportados por Guerra (2020) y Martin del Pozzo et al., (2002) en manantiales, arroyos y ríos en el PNIP y su zona de influencia, donde registraron valores de pH mínimos de 5.47 y máximos de 8.63.

Los valores de pH más ácidos, de manera general, se encontraron en las zonas de mayor altitud, que pueden ser derivados de la Materia Orgánica (M.O.) incorporada a los cuerpos de agua que proviene de la hojarasca que presenta un carácter ácido de los bosques de pino. Esta M.O. no siempre se descompone de manera rápida, ya que esta cae en pedazos grandes y se degrada lentamente en el fondo del cauce (Granados-Sánchez et al., 2006; Miguel, 2013; López, 2010). Los valores de pH más básico se registraron en sitios de menor altitud, estas zonas por lo general son afectadas por la presencia de alguna actividad humana que causan alteraciones en la composición de los cuerpos de agua, ocasionando el aumento del pH derivado de sales provenientes de actividades agrícolas o de aguas residuales domésticas que se vierten a los cauces (IFA, 1992; González, 2007; Metcalf y Eddy, 2003).

Las figuras 21 a la 30 muestran la variación del pH en los sistemas lóticos del PNIP y su zona de influencia, estas gráficas revelan que las emisiones acompañadas con vapor de agua, gas y ceniza influyen en el pH del agua, pues tienden a disminuirlo, debido a que hay estudios que revelan que el pH de los lixiviados de la ceniza del volcán Popocatepetl se encuentra entre 5.98 y 6.55, llegando hasta 7.3 (Almanza et al., 2017; Cruz-Sánchez et al., 2021). Esto se debe a que, en la columna de emisión, la ceniza absorbe los aerosoles como el HCl y HF, al igual que se pueden depositar gotas de  $H_2SO_4$  en la ceniza, acidificando el agua (Martin del Pozzo et al., 1995; Obenholzner et al., 2003).

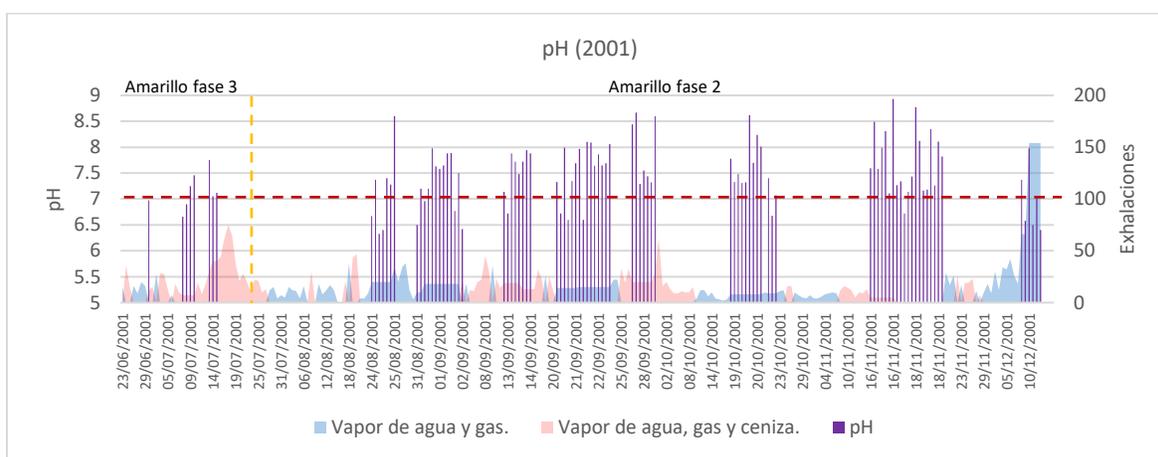


Figura 21. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2001.

Los valores de pH en el año 2001 (Figura 21) se encontraron de 6.33 a 8.93, presentando un promedio de 7.48, con tendencia a la alcalinidad. El carácter básico tiene relación con la cantidad de sulfatos registrados en los cuerpos de agua analizados en este año, ya que estos cuerpos se encuentran mayormente ubicados en sitios de menor altitud (1070 a 2620 m s.n.m.), donde la actividad agrícola y los asentamientos humanos son los principales causantes de la incorporación de este ion a los cauces. El pH básico en zonas con altitudes mayores a 2620 m s.n.m., es derivado de los sulfatos presentes en los cuerpos de agua que proviene de la oxidación de sulfuros presentes en la ceniza.

El pH ácido se encontró en algunos sitios de mayor altitud (2620 a 3650 m s.n.m.), esto se debe al carácter ácido de la ceniza, pues al estar en la columna eruptiva, los aerosoles son adheridos a esta o se le pueden depositar gotas de ácido sulfúrico. Relacionado con

lo anterior, no solo el pH ácido fue encontrado en sitios de mayor altitud, sino que, al estar los cuerpos de agua cercanos a zonas pobladas este tiende a acidificarse, esto se debe a la descomposición de residuos provenientes de las zonas urbanas.

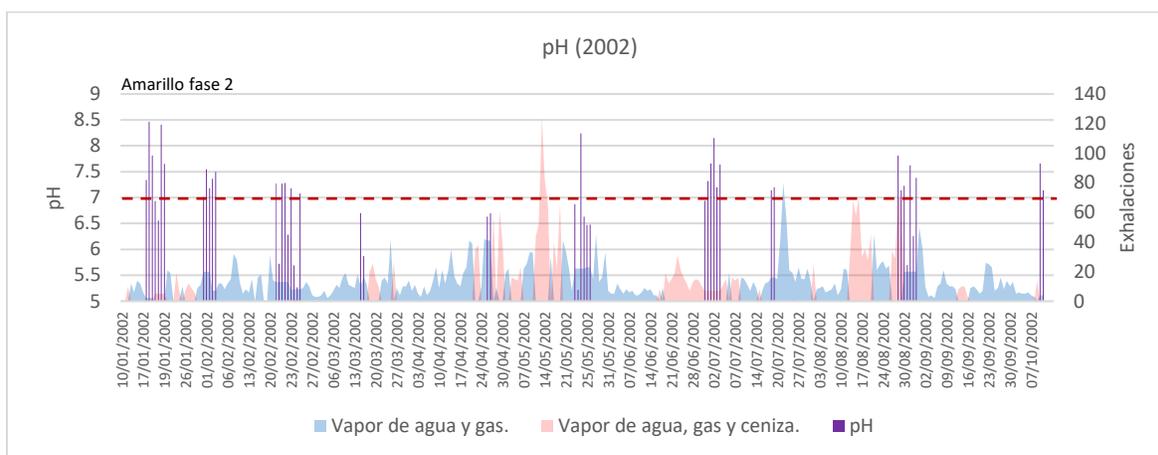


Figura 22. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2002.

En el año 2002 (Figura 22), los valores de pH en los sitios muestreados (1705 a 3897 m s.n.m.) estuvieron entre 5.22 y 8.46 y un promedio de 7.04, con tendencia a la acidez, derivados de los lixiviados de ceniza.

Los gases que se liberan a la atmósfera son arrastrados y depositados de dos maneras, seca y húmeda. Estas deposiciones consisten en que los óxidos de azufre, de carbono y nitrógeno al combinarse con el vapor de agua en la atmósfera se convierten en ácidos ( $H_2SO_4$ ,  $HNO_3$  y  $HCO_3$ ), parte de estos son adheridos al smog o al polvo y por gravedad, caen a la atmósfera (deposición seca) o, por otra parte, estos ácidos son devueltos junto con la lluvia (lluvia ácida) a la superficie (deposición húmeda), disminuyendo el pH de las aguas, ya que el pH de la lluvia ácida se encuentra alrededor de 5 (Garcés y Hernández, 2004; Granados et al., 2010). Esto concuerda con un trabajo realizado en la zona del PNIP, donde el pH de la lluvia del parque se encontró de 4.51 (López, 2010).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

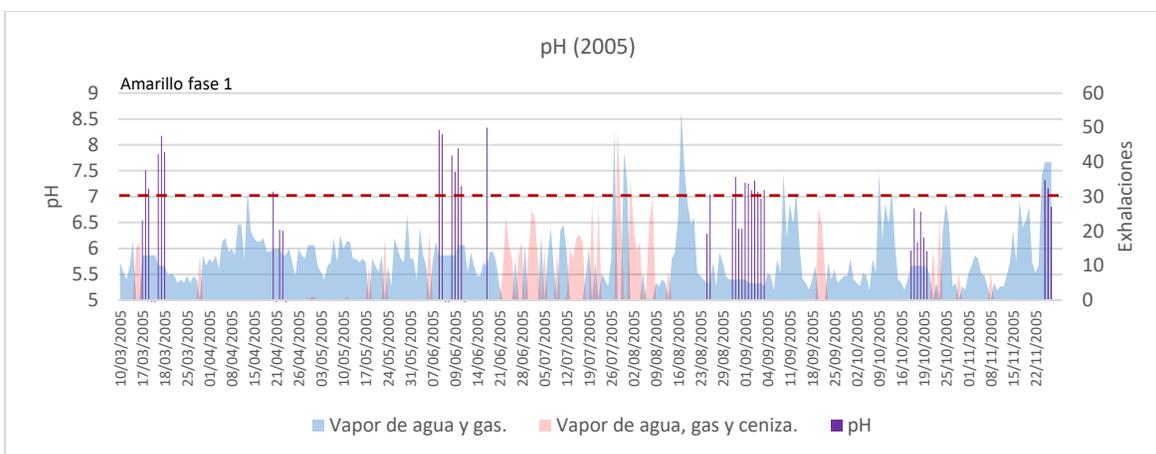


Figura 23. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2005.

En el año 2005 (Figura 23) la tendencia del pH fue a la acidez, debido a que los sitios de muestreo se encontraron mayormente a altitudes entre los 2969 y 4056 m s.n.m., con siete sitios de recolección ubicados a menor altitud (1948 a 2365 m s.n.m.). Los valores de pH se encontraron entre 5.95 y 8.33, con un promedio de 7.09, derivados principalmente de la M.O. proveniente de la hojarasca de los bosques de pino que se incorpora a los cauces, dándole un carácter ácido a los cuerpos de agua en el PNIP. El pH más básico se pudo encontrar en sitios cercanos a la población, donde las fuentes procedentes de la actividad agropecuaria pueden afectar el pH del agua.

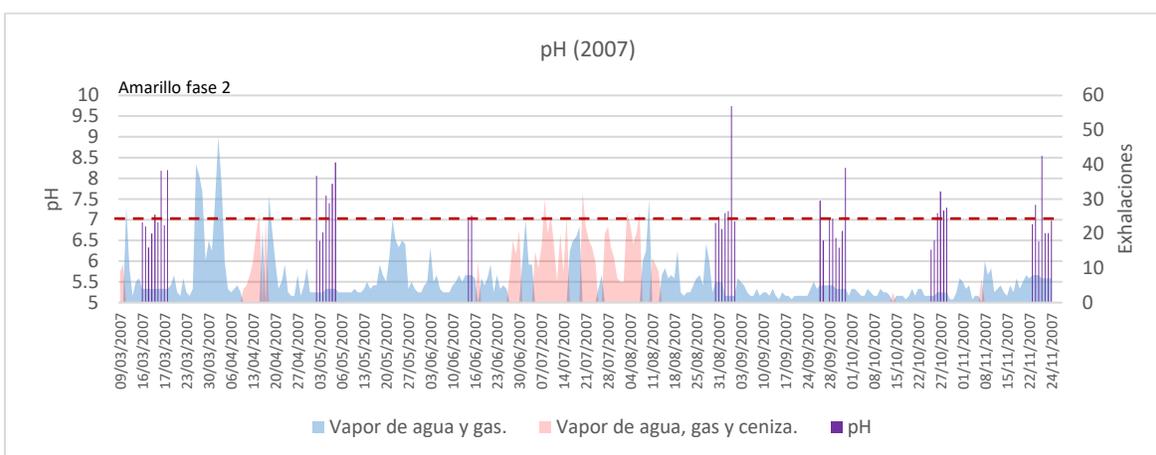


Figura 24. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2007.

Los valores de pH en los cuerpos de agua en el año 2007 (Figura 24) se encontraron entre 6.28 y 9.74, con una media de 7.18, por lo que se ve el impacto de las lluvias e inundaciones. En las zonas ubicadas entre los 2770 a 3721 m s.n.m., se encuentran formaciones de bloques y cenizas, que pueden ser afectadas por la erosión hídrica y ser arrastradas por la escorrentía junto con la M.O. proveniente del bosque de pino y ser incorporados al cauce, acidificando el caudal (Colotti, 1999; Nixon, 1989).

En sitios cercanos a los asentamientos humanos (2264 a 2712 m s.n.m.), los valores de pH se encontraron de 6.33 a 9.74, con una tendencia a lo básico. Esto es derivado de la descomposición de residuos provenientes de las aguas domésticas y residuales o de la disolución de los fertilizantes.

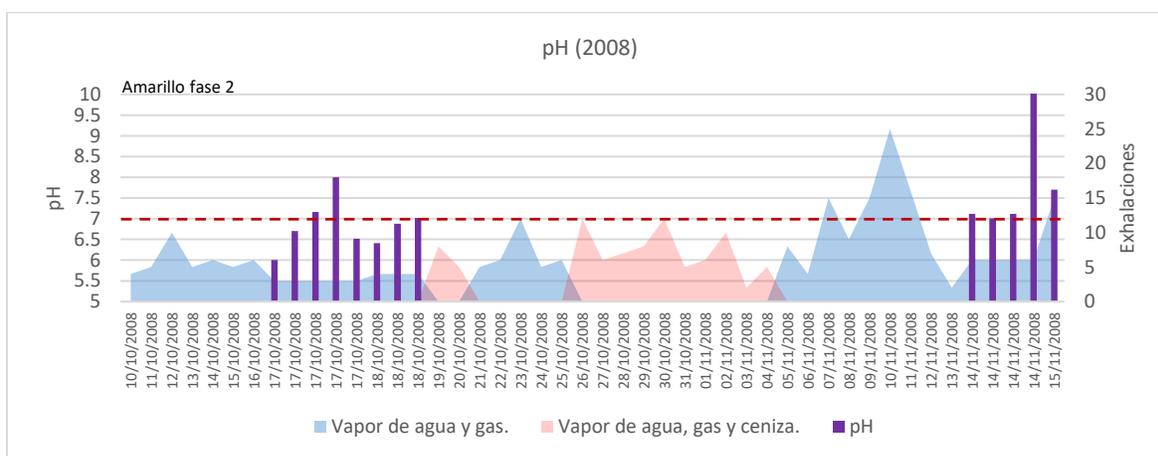


Figura 25. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2008.

Las zonas de muestreo en el 2008 (Figura 25) se encontraron a una altitud de 2654 a 3591 m s.n.m., donde el pH presentó un promedio de 7.21, esto tiene relación con el pH ácido que presentaron los cuerpos de agua, procedente de la degradación de M.O. encontrada en zonas altas. Los dos valores sobresalientes de 8 y 10.08 son resultado de la cercanía de los sitios con asentamientos humanos y a la zona de actividad agrícola.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

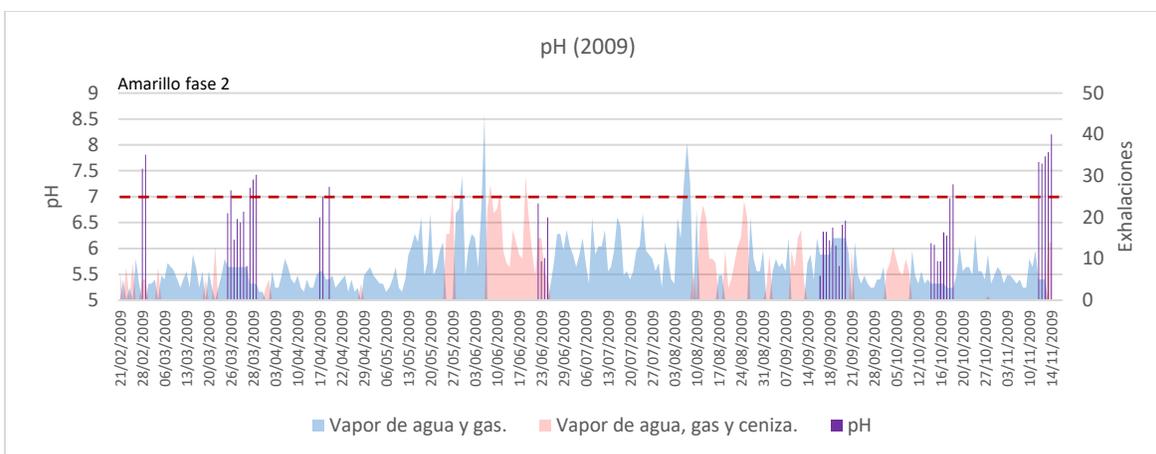


Figura 26. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2009.

Los sitios de recolecta en el año 2009 (Figura 26) se encontraron entre 2534 y 3960 m s.n.m., este gradiente altitudinal tuvo un impacto en el pH (5.47 a 8.2 y una media de 6.67), dando como resultado una mayor presencia de valores ácidos derivados de la ceniza y de la M.O. que se incorporan al cauce.

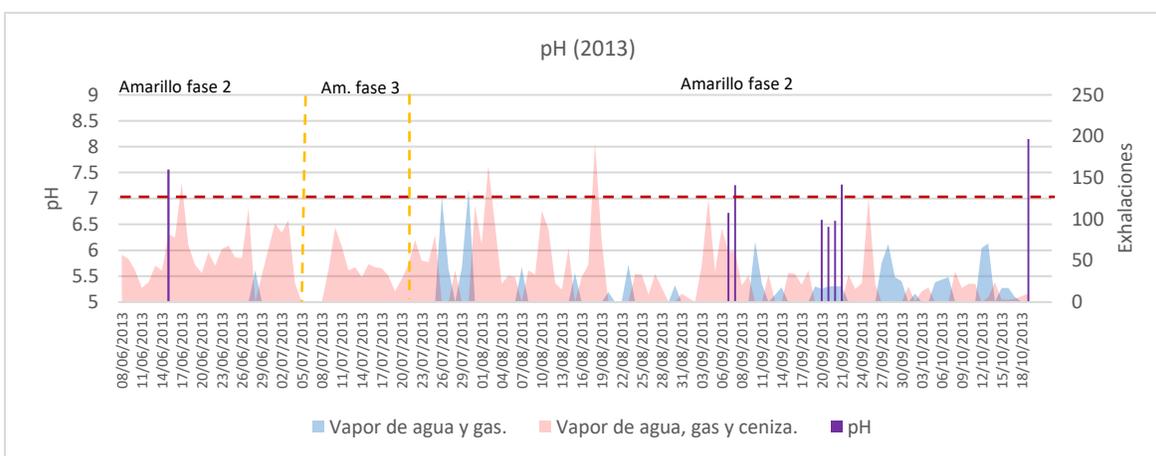


Figura 27. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2013.

El pH en el año 2013 (Figura 27) se encontró de 6.45 a 8.15, con un promedio de 7.07, presentando una tendencia ácida, derivada de la actividad volcánica (deposición seca, húmeda y de la ceniza). El pH más básico fue de 8.15, debido a la alta cantidad de sulfatos presentes en el sitio ( $27.46 \text{ mg L}^{-1}$ ).

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

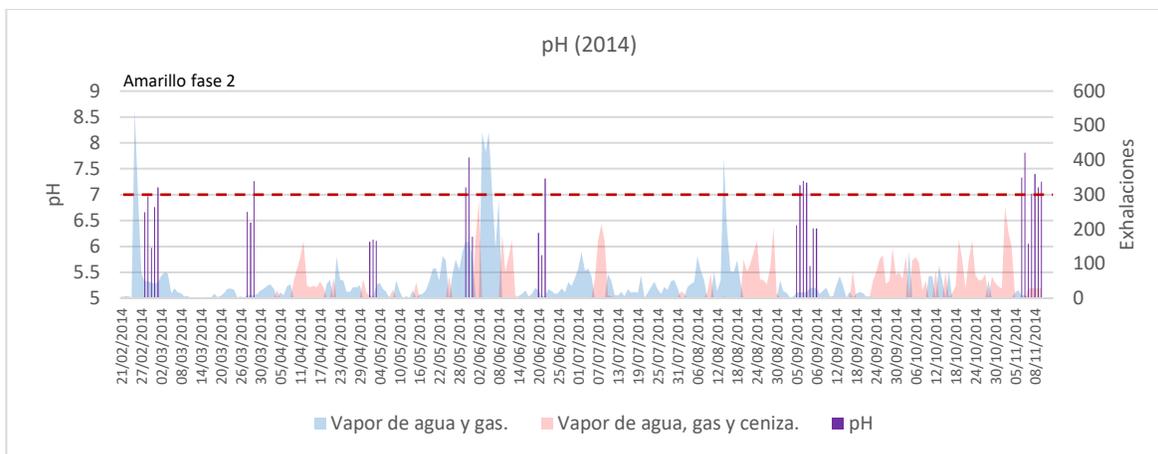


Figura 28. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2014.

El pH en el año 2014 (Figura 28) se encontró con tendencia a la acidez (5.62 a 7.81), presentando un promedio de 6.74, resultado de la actividad volcánica que afecta las zonas de mayor altitud (2744 a 4054 m s.n.m.) y de la descomposición de materiales orgánicos en zonas pobladas (2235 a 2713 m s.n.m.). Los valores con una ligera tendencia básica (7.7 y 7.8) se encontraron en un manantial represado con agua proveniente del cauce con alto contenido de sulfatos ( $36.93 \text{ mg L}^{-1}$ ).

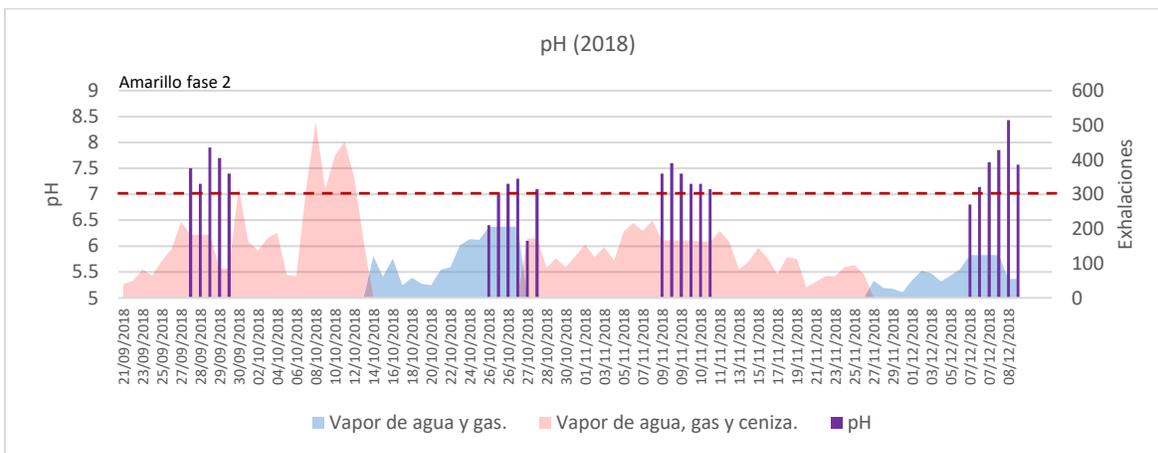


Figura 29. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2018.

El pH del agua en el año 2018 (Figura 29) fue principalmente de neutro a básico (6.1 a 8.4 y una media de 7.3) por la presencia dominante de los sulfatos. Los pH más ácidos (6.1, 6.4 y 6.8) se registraron en zonas altas, esto se debe a la presencia de la hojarasca

de pino que presenta carácter ácido y tiende a acumularse en la zona ribereña y fondo del cauce, donde se degrada lentamente (Guerra-Hernández y Cruz, 2017). El pH con tendencia básica se encontró en Xalizintla, Tomacoco y Nealtican (7.2 a 7.85), donde los cauces muestran desviaciones y se descargan aguas residuales (Monfil, 2020).

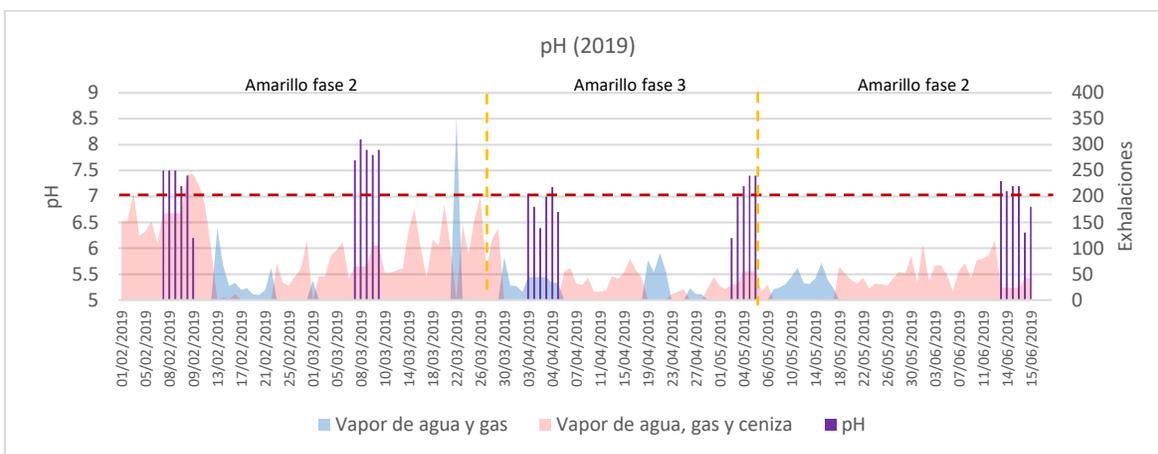


Figura 30. Comportamiento del pH y de las emisiones volcánicas en el año 2019.

El pH (6.2 a 8.1 y media de 7.18) en los cuerpos de agua en el 2019 presentó tendencia hacia la basicidad, relacionado con las concentraciones elevadas de sulfatos provenientes de la oxidación de los sulfuros por la alta actividad volcánica. Los valores más ácidos son derivados de los lixiviados provenientes de la ceniza.

## Variación Temporal

Con los datos obtenidos para cada uno de los años, y tomando en cuenta los diferentes parámetros, se hizo una comparación no paramétrica, por no cumplir con los supuestos de homocedasticidad y normalidad en los datos. Se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para comprobar si las medianas en los diferentes años se comportaban igual y la prueba de mediana de Mood's para definir si las medianas dentro de cada uno de los años es la misma. Ambas pruebas arrojaron una diferencia significativa entre las medianas de los años, que se pueden observar en las gráficas de caja y bigote (Figura 31-36).

En la tabla 2, se sintetiza la información recopilada por año, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación de los diferentes parámetros (sulfuros, sulfatos, pH, altitud, fase del semáforo, distancia y dirección de la pluma, exhalaciones de vapor de agua y gas y exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza de los datos recopilados de los días de muestreo).

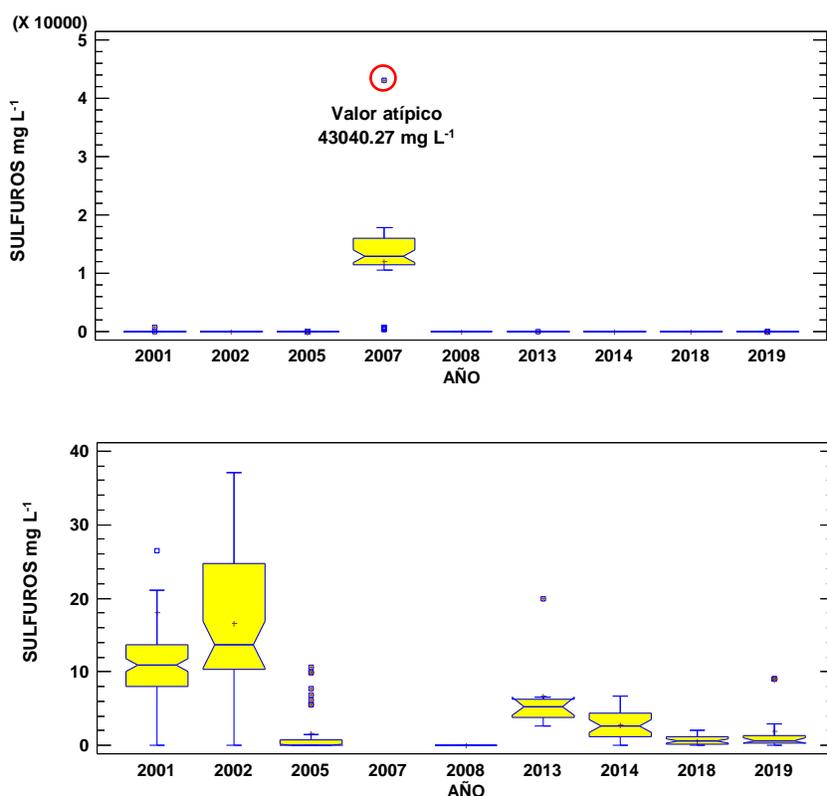


Figura 31. Variación de sulfuros por año a escala de 0 a 50 000 mg L<sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L<sup>-1</sup>.

Ya que el gráfico de caja y bigote con un intervalo de 0 a 50000 mg L<sup>-1</sup> no demostraba la variación de los sulfuros en los diferentes años, se realizaron dos gráficos con diferentes intervalos (Figura 31) con fines de mostrar las diferencias. En la figura 31 se observa que las concentraciones de sulfuros en el año 2001 son altas, derivadas de la actividad volcánica y de la fuente constante que generó los materiales y cenizas al mezclarse con el agua proveniente del glaciar que fue parcialmente derretido por la erupción ocurrida en enero. Posteriormente, las concentraciones en el año 2002 resultaron mayores, provenientes de las múltiples exhalaciones y columnas de ceniza con dirección a la ubicación de los sitios muestreados, para el año 2005 esta tendencia ascendente desaparece, derivada de la poca actividad presentada por el volcán debido a la fase uno. En el año 2007 se presentaron los valores más altos del ion, teniendo una variación importante originada por las inundaciones procedentes de las lluvias que aportaron sulfuros a los cauces, presentando un valor atípico (43040.27 mg L<sup>-1</sup>). El año 2008 muestra un descenso por la poca actividad presentada, mientras que, para el año 2013 los valores incrementan, ya que la actividad fue más fuerte, debido a que se presentaron exhalaciones acompañadas de ceniza, para los años siguientes (2014 al 2019) se observa una disminución en la concentración, esto fue resultado de la oxidación de los sulfuros provenientes de las múltiples exhalaciones y columnas con contenido de ceniza.

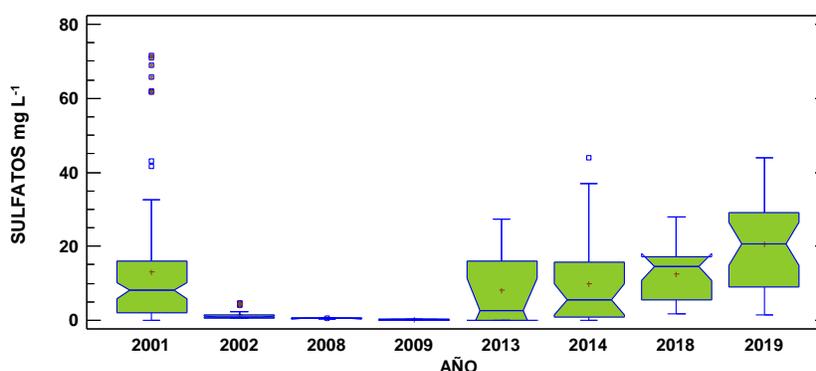


Figura 32. Variación de sulfatos por año.

En la figura 32 se puede observar claramente que en el año 2001 hay una mayor concentración de sulfatos, debido a que hubo una mayor actividad volcánica y a que algunas de las zonas registradas presentaron algún tipo de influencia humana, teniendo

una variación importante. En los años siguientes (2002, 2008 y 2009) esta variación no se percibe, sin embargo, cambia en el 2013 y 2014, presentando una gran similitud entre la cantidad de sulfatos que se tiene por el aumento de la actividad, que posteriormente vuelve a incrementar, llegando a perder la similitud, debido a que en los últimos dos años la actividad volcánica fue la más relevante.

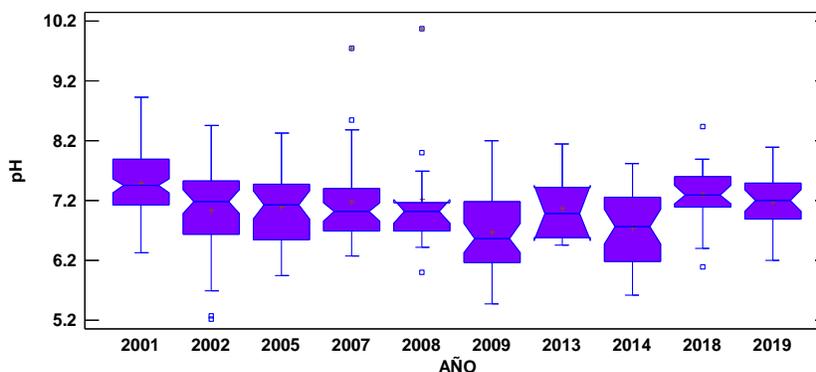


Figura 33. Variación de pH por año.

El pH a lo largo de los años sufrió una variación respecto a la altitud, ya que, como se puede observar en la figura 33, en el año 2001 el pH se mostró con tendencia a la alcalinidad, ya que la mayoría de los sitios muestreados se ubicaron en menor altitud y presentaron una alta concentración de sulfatos, mientras que, para los años siguientes (2002, 2005, 2007 y 2008), se observa una disminución en el pH y no es perceptible su diferencia, esta disminución es debido a que en el 2002, 2005 y 2008 los sitios de muestreo se ubicaron a una mayor altitud, mientras que en el 2007, el pH ácido es resultado de la alta cantidad de sulfuros derivados de los eventos naturales ocurridos. En el año 2009 se observa que la similitud entre los años anteriores se pierde, resultado de la ubicación de los sitios de muestreo y del incremento en la actividad volcánica, posteriormente, para el año 2013 los valores de pH presentaron un alza, derivado de la ubicación de los sitios a menor altitud y de la presencia de sulfatos por la oxidación de sulfuros, mientras que, para el año 2014, el pH en los cuerpos de agua presentó una mayor acidez, derivado del aumento de la actividad volcánica, donde la trayectoria de la pluma predominó en dirección de la ubicación de los sitios de muestreo. Los años 2018

y 2019 presentan entre ambos un gran parecido, esto se debe a que los sitios de muestreo fueron los mismos, ambos años presentan un incremento en el pH, originado por las altas concentraciones de sulfatos que se presentaron en los cuerpos de agua.

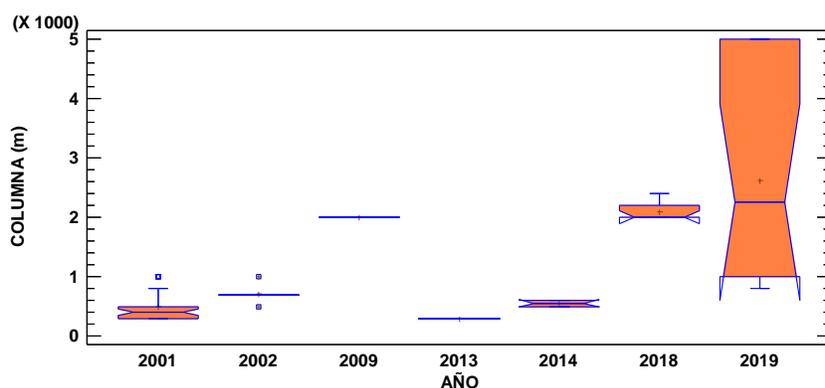


Figura 34. Variación de la altura de la columna eruptiva por año.

La altura de la columna eruptiva (Figura 34) fue muy distinta, debido a la actividad volcánica presentada en los diferentes años. En 2001 y 2002 la altitud de la columna estuvo entre 300 m a 1 km y 500 m a 1 km, resultado de la constante actividad, para los años siguientes, debido a la poca actividad presentada por el volcán, no se registraron columnas de erupción en los días de muestreo, posteriormente, para el 2009, la columna que se generó a finales de las fechas de muestreo llegó a medir 2 km, resultado del incremento de la actividad comparada con los anteriores años (2005, 2007 y 2008). En los dos siguientes años (2013 y 2014), las columnas registradas en los días de muestreo fueron de poca altura (300 y 600 m), pero se presentaron columnas de mayor altitud en los días de intervalo entre las fechas de muestreo. En el año 2018 se generaron columnas que llegaron a medir entre los 2 y 2.4 km, mientras que, en el año 2019, las columnas que se presentaron fueron las más elevadas (800 m a 5 km), derivadas del aumento en la actividad que presentó el volcán, que resultó ser la más dominante en comparación con los anteriores años en que se realizaron los muestreos.

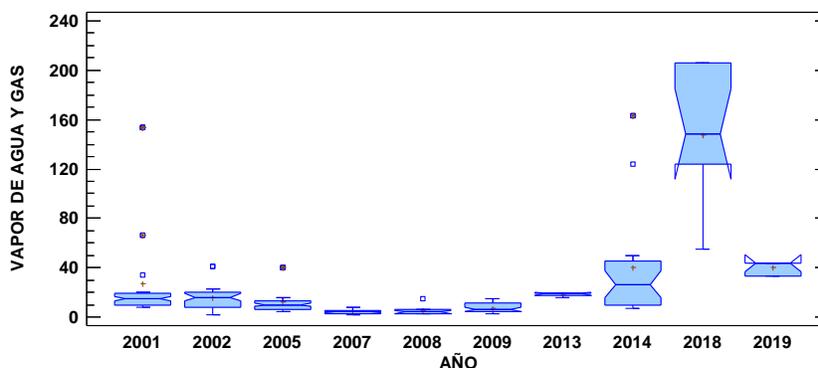


Figura 35. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por año.

Las exhalaciones acompañadas de vapor de agua y gas (Figura 35) en los años 2001 y 2002 presentaron una gran similitud, mientras que, para los siguientes años, la variación no es perceptible, derivada de la poca actividad volcánica ocurrida. En los años 2013 y 2014, el incremento en la actividad dio origen al aumento en las exhalaciones, llegando hasta 163 por día en el 2014, posteriormente, en el año 2018 hubo una mayor variación, dado que, la actividad presentada por el volcán tuvo un incremento significativo, por último, para el año 2019 estas exhalaciones disminuyeron, ya que al aumentar la actividad dominan las exhalaciones acompañadas de ceniza. Los valores atípicos presentados son resultado del aumento esporádico de la actividad volcánica del Popocatepetl en los años.

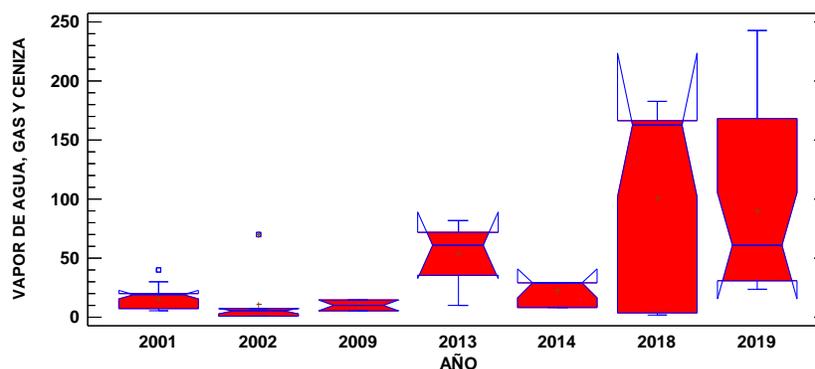


Figura 36. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por año.

Las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza (Figura 36) muestran una variación respecto a la actividad que se presentó a lo largo de los años el volcán

Popocatépetl. Las exhalaciones registradas en el año 2001 fueron derivadas de la fase del semáforo amarillo dos y tres, mientras que, para el año 2002, se puede observar una disminución en el número de exhalaciones, esta tendencia en la disminución siguió por los siguientes años (2005, 2007 y 2008), donde no se presentaron exhalaciones acompañadas de ceniza en los días de muestreo por la poca actividad. En el año 2009 la actividad aumentó, elevando el número de las exhalaciones, este aumento en la actividad volcánica siguió hasta el año 2013, provocando que el número de exhalaciones llegaran hasta más de 80 por día, pero esta tendencia desaparece en el año 2014. En los años siguientes las exhalaciones muestran una variación importante, ya que se presentó una mayor actividad volcánica.

Los análisis de comparación de medianas, anteriormente mencionados, revelan que las concentraciones de sulfuros y sulfatos en los cuerpos de agua presentaron diferencias significativas entre los diferentes años, a consecuencia de la variabilidad en la actividad volcánica del Popocatépetl y de la cercanía de los poblados o localidades donde se llevan a cabo diferentes actividades, que generan descargas o desechos con azufre residual.

### **Variación espacial**

La comparación de medianas de las variables por municipio a través de la prueba de Kruskal-Wallis presentó diferencias significativas, mientras que la prueba de Mood's determinó que hay diferencia entre las medianas de los 27 municipios, para las diferentes variables a excepción de la fase. Estas diferencias se observan en los diagramas siguientes de caja y bigote (Figura 37-42), mientras que, en la tabla 2, se muestra el conjunto de la información por municipio, que es registro, el valor promedio, mínimo, máximo y el coeficiente de variación en cada uno de los parámetros.

Debido a que el gráfico con intervalo de 0 a 50000 mg L<sup>-1</sup> no mostraba las diferencias entre las concentraciones de sulfuros que se presentaron en los diferentes municipios, se realizaron dos gráficos con diferente escala (Figura 37) con fines de demostrar las variaciones.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

Tabla 2. Registro, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por municipio.

Municipio		Sulfuros mg L <sup>-1</sup>	Sulfatos mg L <sup>-1</sup>	pH	Altitud m s.n.m.	Altura de la Columna m	Fase	Número de Exhalaciones de Vapor de agua y gas	Número de Exhalaciones de Vapor de agua, gas y ceniza
Amecameca	Registro	73	84	93	96	23	96	63	39
	Promedio	5.19	9.88	7.09	3500.43	1513.04	1.96	39.39	53.69
	Mínimo	0	0.02	5.22	2521	700	1	3	2
	Máximo	37.1	43.82	8.6	4056	3000	3	206	243
	Coef. de Var.	184.14%	121.69%	9.63%	13.02%	52.85%	23.33%	148.35%	127.68%
Atlatlula	Registro	6	16	16	17	2	16	11	5
	Promedio	14.19	2.12	7.04	3125.13	1400	2.19	6.73	22.4
	Mínimo	8.01	0.022	5.81	2534	800	2	3	6
	Máximo	26.41	13.19	8.2	3960	2000	3	15	40
	Coef. de Var.	48.15%	189.40%	7.22%	11.59%	60.61%	18.43%	54.45%	72.92%
Atlixco	Registro	10	9	10	10	3	10	10	SRAV
	Promedio	14.17	30.46	7.53	1988.9	300	1.9	14.8	SRAV
	Mínimo	0	13.4	6.6	1070	300	1	10	SRAV
	Máximo	21.15	71.1	8.33	2500	300	2	18	SRAV
	Coef. de Var.	45.19%	72.47%	7.31%	19.79%	0%	16.64%	17.09%	SRAV
Atzitzihuacán	Registro	3	3	3	3	SRAV	3	3	SRAV
	Promedio	12.39	34.65	7.8	1886.67	SRAV	2	15	SRAV
	Mínimo	9.47	9.91	7.65	1810	SRAV	2	15	SRAV
	Máximo	15.31	68.98	8.06	2030	SRAV	2	15	SRAV
	Coef. de Var.	23.57%	88.56%	2.90%	6.58%	SRAV	0%	0%	SRAV
Calpan	Registro	8	4	7	8	4	8	4	1
	Promedio	5.17	4.96	7.09	2416	425	1.5	10.75	13
	Mínimo	0	0.66	5.96	1920	400	1	5	13
	Máximo	15.31	15.84	7.94	2969	500	2	15	13
	Coef. de Var.	102.94%	146.76%	8.74%	15.33%	11.76%	35.63%	40.46%	0%
Chiautzingo	Registro	26	12	25	26	SRAV	26	18	2
	Promedio	6513.41	10.12	7.48	2669.08	SRAV	2	22.5	19.5
	Mínimo	0.8	0.3	6.05	2390	SRAV	2	3	10
	Máximo	16685.87	36.93	8.38	3144	SRAV	2	163	29
	Coef. de Var.	118.74%	114.56%	8.34%	7.89%	SRAV	0%	227.29%	68.90%
Ecatzingo	Registro	5	5	5	5	1	5	5	SRAV
	Promedio	1.07	0.81	7.58	2685.6	1000	2	18	SRAV
	Mínimo	0.05	0.45	6.58	2654	1000	2	6	SRAV
	Máximo	5.16	2.13	10.08	2727	1000	2	66	SRAV
	Coef. de Var.	213.46%	91.52%	18.65%	1.11%	0%	0%	149.07%	SRAV
Huaquechula	Registro	4	4	4	4	SRAV	4	4	SRAV
	Promedio	15.31	39.74	7.63	1576.25	SRAV	2	15	SRAV
	Mínimo	15.31	10.23	6.6	1550	SRAV	2	15	SRAV
	Máximo	15.31	62.1	8.09	1600	SRAV	2	15	SRAV
	Coef. de Var.	0%	65.99%	9.08%	1.74%	SRAV	0%	0%	SRAV
Huejotzingo	Registro	9	3	9	9	1	9	6	1
	Promedio	8314.29	10.27	7.64	2426.56	500	2	3.67	13
	Mínimo	8.01	8.54	6.99	2180	500	2	3	13
	Máximo	14473.87	12.88	8.77	3015	500	2	5	13
	Coef. de Var.	75.80%	22.39%	7.25%	11.23%	0%	0%	22.27%	0%
Hueyapan	Registro	1	1	1	1	SRAV	1	1	SRAV
	Promedio	5.16	1.74	8.24	2140	SRAV	2	8	SRAV
	Mínimo	5.16	1.74	8.24	2140	SRAV	2	8	SRAV
	Máximo	5.16	1.74	8.24	2140	SRAV	2	8	SRAV
	Coef. de Var.	0%	0%	0%	0%	SRAV	0%	0%	SRAV
Juan C. Bonilla	Registro	1	1	1	1	1	1	SRAV	1
	Promedio	12.39	23.25	7.72	2190	500	2	SRAV	13
	Mínimo	12.39	23.25	7.72	2190	500	2	SRAV	13
	Máximo	12.39	23.25	7.72	2190	500	2	SRAV	13
	Coef. de Var.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	SRAV	0%
Nealtican	Registro	12	6	11	12	2	12	7	5
	Promedio	2.69	21.94	7.34	2249	3700	1.58	16.14	92.2
	Mínimo	0	10.07	6.12	2200	2400	1	10	19
	Máximo	9	43	8.29	2262	5000	3	44	168
	Coef. de Var.	114.03%	62.52%	8.81%	0.81%	49.69%	42.22%	76.66%	79.09%
Ocuituco	Registro	4	4	4	4	3	4	4	SRAV
	Promedio	10.16	2.42	7.38	1852.75	1000	2	117.5	SRAV
	Mínimo	8.01	1.51	6.5	1835	1000	2	8	SRAV
	Máximo	10.87	3.91	8.01	1885	1000	2	154	SRAV
	Coef. de Var.	14.08%	43.43%	10.04%	1.28%	0%	0%	62.13%	SRAV
Ozumba	Registro	1	1	1	1	1	1	1	SRAV
	Promedio	8.01	8.86	7.37	2300	1000	2	66	SRAV
	Mínimo	8.01	8.86	7.37	2300	1000	2	66	SRAV
	Máximo	8.01	8.86	7.37	2300	1000	2	66	SRAV
	Coef. de Var.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	SRAV
San Felipe Teotlalcingo	Registro	12	8	12	12	1	12	11	1
	Promedio	4953.75	10.14	6.71	2446	500	2	19	29
	Mínimo	0	1.53	5.83	2376	500	2	4	29
	Máximo	43040.27	30.88	7.26	2746	500	2	45	29
	Coef. de Var.	257.83%	92.33%	7.27%	5.74%	0%	0%	92.43%	0%

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

San Jerónimo Tecuanipan	Registro	6	2	6	6	SRAV	6	4	2
	Promedio	6.42	20.02	7.17	2118	SRAV	1.33	11.5	19
	Mínimo	0	18.59	5.95	2100	SRAV	1	10	19
	Máximo	12.39	21.45	7.88	2128	SRAV	2	13	19
	Coef. de Var.	84.03%	10.10%	12.01%	0.66%	SRAV	38.73%	15.06%	0%
San Martín Texmelucan	Registro	12	8	12	12	1	12	8	4
	Promedio	4363.31	18.05	7.02	2267.5	500	2	17.75	45
	Mínimo	0	4.52	6.66	2235	500	2	2	29
	Máximo	13841.87	43.93	7.31	2283	500	2	50	61
	Coef. de Var.	147.76%	75.53%	3.75%	0.72%	0%	0%	115.13%	41.06%
San Nicolás de los Ranchos	Registro	48	30	45	48	7	48	26	20
	Promedio	5.94	5.85	7.22	3237.08	2742.86	1.77	19.46	73.45
	Mínimo	0	0.49	6.34	2410	400	1	4	7
	Máximo	24.73	27.95	8.67	3704	5000	3	44	183
	Coef. de Var.	122.12%	101.43%	6.31%	11.46%	80.73%	39.05%	80.67%	100.68%
San Salvador el Verde	Registro	32	18	32	32	9	32	26	7
	Promedio	4380.06	2.38	6.96	3209.59	500	2	15.58	19.29
	Mínimo	0	0	5.62	2090	300	2	2	1
	Máximo	17760.27	16.85	9.74	4054	700	2	124	82
	Coef. de Var.	148.73%	199.01%	13.02%	19.67%	26.46%	0%	157.68%	151.19%
Santa Isabel Cholula	Registro	2	2	2	2	SRAV	2	SRAV	2
	Promedio	13.85	18.38	6.93	2025	SRAV	2	SRAV	19
	Mínimo	12.39	10.12	6.72	2000	SRAV	2	SRAV	19
	Máximo	15.31	26.64	7.14	2050	SRAV	2	SRAV	19
	Coef. de Var.	14.91%	63.56%	4.29%	1.75%	SRAV	0%	SRAV	0%
Tepeojuma	Registro	1	1	1	1	SRAV	1	1	SRAV
	Promedio	21.15	71.63	8.1	1500	SRAV	2	15	SRAV
	Mínimo	21.15	71.63	8.1	1500	SRAV	2	15	SRAV
	Máximo	21.15	71.63	8.1	1500	SRAV	2	15	SRAV
	Coef. de Var.	0%	0%	0%	0%	SRAV	0%	0%	SRAV
Tetela del Volcán	Registro	7	7	7	7	1	7	7	SRAV
	Promedio	13.72	1.69	7.46	2401.71	1000	2	28.86	SRAV
	Mínimo	10.87	1.09	6.4	2200	1000	2	8	SRAV
	Máximo	19.42	2.67	8.62	2620	1000	2	154	SRAV
	Coef. de Var.	20.77%	30.60%	8.87%	7.73%	0%	0%	191.23%	SRAV
Tianguismana Ico	Registro	1	1	1	1	1	1	1	SRAV
	Promedio	17.58	9.38	6.77	2180	300	2	18	SRAV
	Mínimo	17.58	9.38	6.77	2180	300	2	18	SRAV
	Máximo	17.58	9.38	6.77	2180	300	2	18	SRAV
	Coef. de Var.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	SRAV
Tlahuapan	Registro	12	7	12	12	6	12	7	5
	Promedio	5561.13	0.23	7.19	2590.75	366.67	2	10.14	5.6
	Mínimo	2.56	0	6.09	1990	300	2	6	5
	Máximo	16180.27	0.44	8.49	3114	400	2	19	8
	Coef. de Var.	124.81%	87.24%	9.03%	14.14%	14.08%	0%	60.09%	23.96%
Tlalmanalco	Registro	24	33	33	33	3	33	31	5
	Promedio	11.87	0.59	6.59	3266.7	700	2	9.52	28.6
	Mínimo	0	0.02	5.27	2721	700	2	3	1
	Máximo	37.1	1.32	8	3591	700	2	20	70
	Coef. de Var.	104.38%	67.57%	11.25%	7.67%	0%	0%	63.97%	132.14%
Tochimilco	Registro	12	12	12	12	9	12	11	1
	Promedio	12.18	13.63	7.19	2369.08	322.22	2	15.27	22
	Mínimo	0	1.04	5.87	1610	300	2	8	22
	Máximo	24.73	32.72	7.98	2842	500	2	18	22
	Coef. de Var.	47.45%	70.92%	8.90%	16.70%	20.69%	0%	25.88%	0%
Yecapixtla	Registro	7	7	7	7	SRAV	7	3	7
	Promedio	7.68	2.98	7.59	1798.14	SRAV	2	2	3.29
	Mínimo	0	0.69	6.56	1705	SRAV	2	2	1
	Máximo	13.72	4.51	8.46	1979	SRAV	2	2	5
	Coef. de Var.	63.96%	57.64%	9.37%	6.65%	SRAV	0%	0%	65.07%
Total	Registro	339	289	372	381	79	381	273	108
	Promedio	1665.78	8.89	7.15	2925.78	1098.73	1.93	22.38	44.91
	Mínimo	0	0	5.22	1070	300	1	2	1
	Máximo	43040.27	71.63	10.08	4056	5000	3	206	243
	Coef. de Var.	295.81%	147.55%	9.82%	22.38%	104.37%	20.95%	170.74%	133.31%

Nota: Sin registro de actividad volcánica SRAV.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

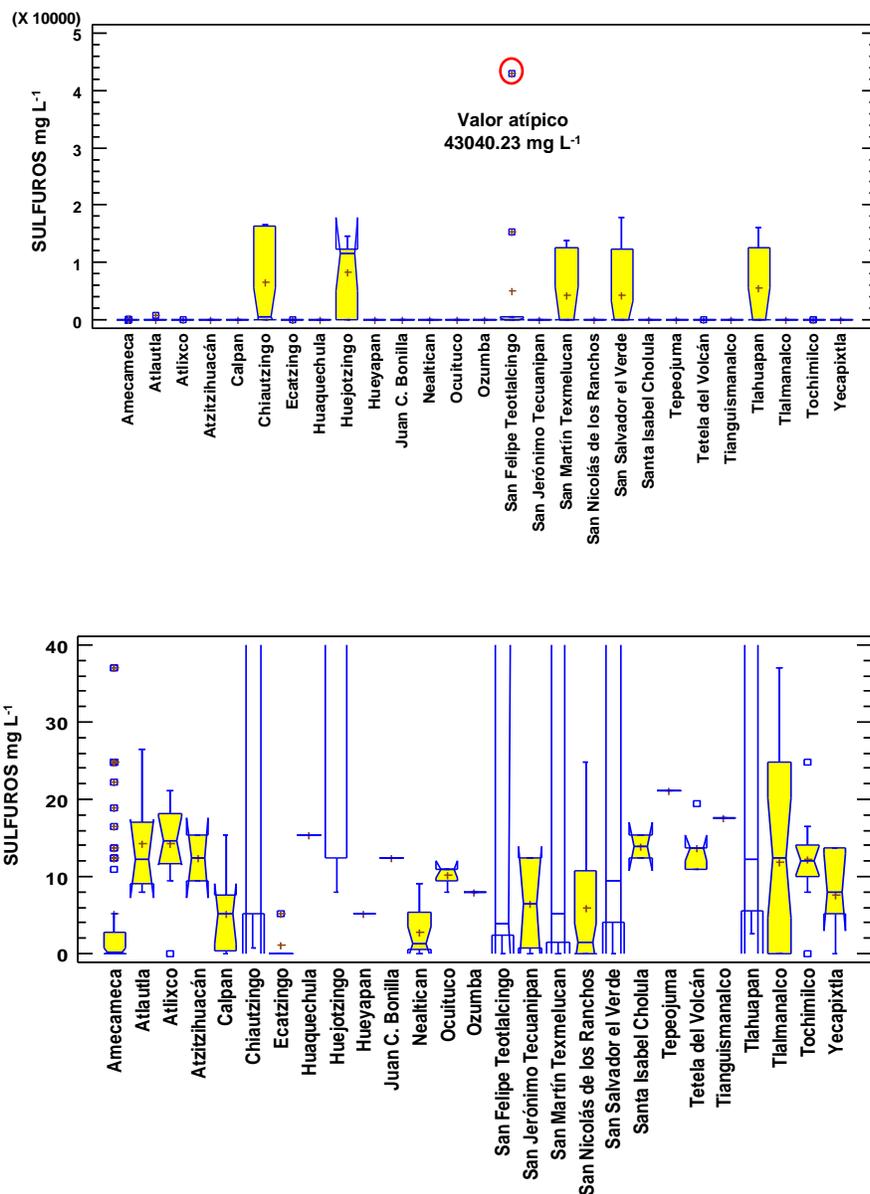


Figura 37. Variación de sulfuros por municipio a escala de 0 a 50 000 mg L<sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L<sup>-1</sup>.

La variación respecto a la ubicación (Figura 37) es muy evidente, donde las concentraciones más altas de sulfuros se registraron en los cuerpos de agua ubicados en los municipios de Chiautzingo, Huejotzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde y Tlahuapan en el año 2007, donde San Felipe Teotlalcingo arrojó un valor atípico de hasta 43040.27 mg L<sup>-1</sup>.

Los municipios de Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos, Tetela del Volcán y Tochimilco muestran una variación importante, ya que las concentraciones de este ion

son afectadas principalmente por la caída de ceniza debido a su cercanía al volcán, al igual que son afectados los municipios que se encuentran a una mayor altitud, como Tlamanalco. En los municipios de Atlixco, Atzitzihuacán, Calpan, Ecatzingo, Huaquechula, Hueyapan, Juan C. Bonilla, Nealtican, Ocuituco, Ozumba, San Jerónimo Tecuanipan, Santa Isabel Cholula, Tepeojuma, Tianguismanalco y Yecapixtla la variación es derivada primordialmente de la actividad antropogénica de origen urbano.

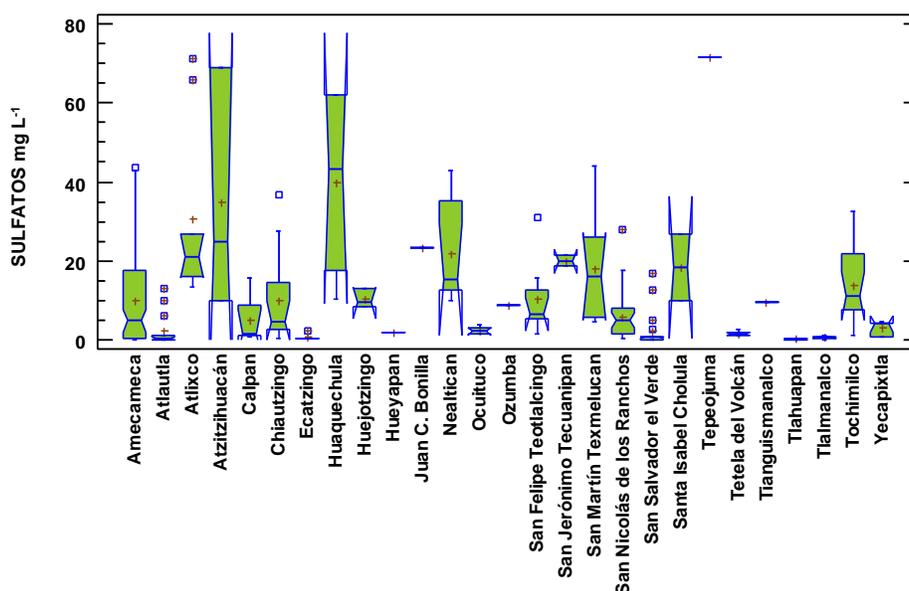


Figura 38. Variación de sulfatos por municipio.

La figura 38 muestra la variación de las concentraciones de sulfatos en los diferentes municipios donde se realizaron las recolectas. La presencia y variación del ion sulfato en los municipios con cercanía al volcán, mencionados anteriormente, están relacionados con la transformación de los sulfuros a sulfatos por procesos de oxidación, al igual que en los municipios ubicados en zonas elevadas como San Salvador el Verde, Tlahuapan y Tlamanalco. La presencia de este ion en los municipios restantes es derivada de la actividad agropecuaria y de la cercanía a las zonas urbanizadas, teniendo una diferencia significativa en los valores, que van desde concentraciones mínimas como en el municipio Ecatzingo, o concentraciones elevadas como en los municipios de Atlixco, Atzitzihuacán, Huaquechula o Tepeojuma.



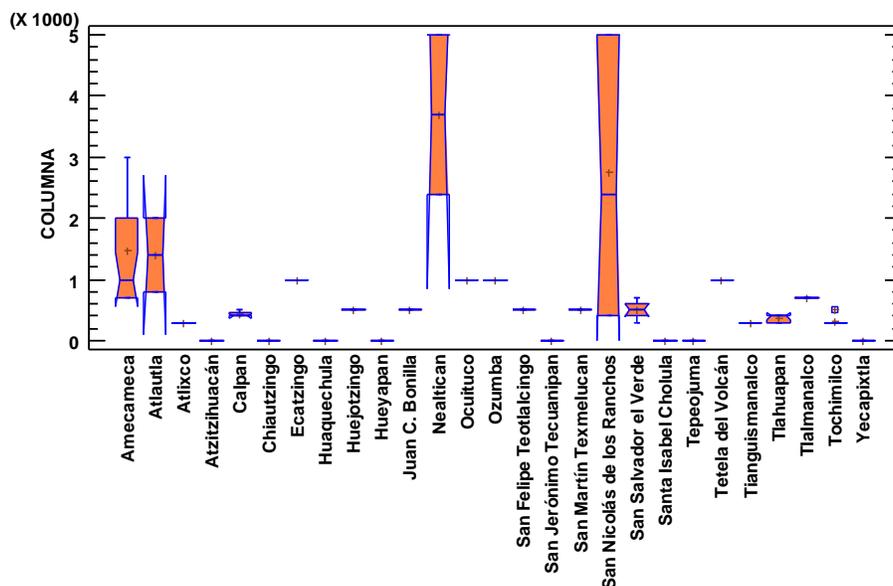


Figura 40. Variación de la altura de la columna eruptiva por municipio.

En la figura 40, se observa una diferencia notable entre la altitud de las columnas eruptivas que se formaron en los días de colecta de muestra realizadas en algunos municipios, como Amecameca, Nealtican y San Nicolás de los Ranchos, donde la variación se debe a que los cuerpos de agua de estos municipios se muestrearon en diferentes años, donde el 2018 y 2019 fueron los más significativos, debido a la alta actividad que presentó el volcán Popocatepetl. Las columnas que se presentaron en los días de recolecta en el municipio de Atlautla ocurrieron en el año 2001 y 2009, siendo el último año donde se generó una columna de 2 km acompañada de vapor de agua, gas y ceniza, a pesar de la poca actividad ocurrida en ese año. Los municipios San Salvador el Verde y Tlahuapan fueron muestreados en diferentes años donde la actividad volcánica estuvo presente, dando como resultado la formación de columnas menores a 700 m de altitud, mientras que, para los municipios de San Felipe Teotlalcingo y San Martín Texmelucan, que fueron muestreados en la misma fecha, la columna registrada fue derivada de la actividad que presentó el volcán en el año 2014. Los municipios restantes se registraron en los años 2001 y 2002, donde algunos de ellos fueron muestreados en la misma fecha, ambos años presentaron una actividad volcánica significativa, originando columnas entre 300 m y 1 km de altura a nivel del cráter.

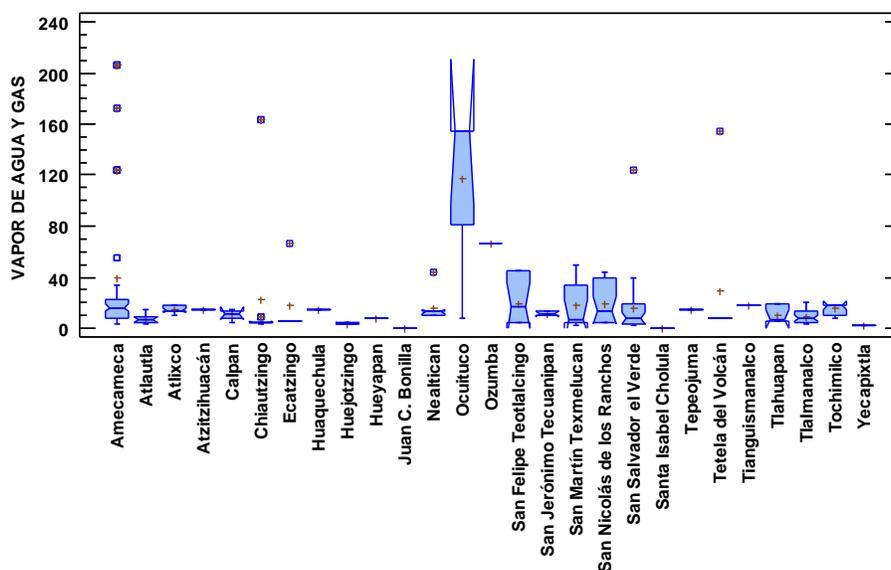


Figura 41. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por municipio.

El número de las exhalaciones acompañadas de vapor de agua y gas (Figura 41), que ocurrieron en los días de colecta en la mayoría de los municipios, fue menor a 22, este número de exhalaciones estuvieron registradas en todos los años y son originadas principalmente de la poca actividad volcánica del Popocatepetl o por la predominancia de las exhalaciones acompañadas de ceniza. El municipio de Ocuiluco muestra que el número de exhalaciones ocurridas en los días de colecta fue elevado, esto se debe a que fueron registradas en el año 2001, donde la actividad del volcán fue una de las más prominentes, al igual que en el año 2014, donde las exhalaciones registradas en días de recolecta en los municipios de San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan y San Salvador el Verde muestran un aumento en el número. Los municipios de Amecameca y San Nicolás de los Ranchos también revelan un mayor número de exhalaciones ocurridas por día, esto se debe a que fueron registradas en los años 2018 y 2019. Los valores atípicos que se observan en los municipios fueron registrados en los años 2001, 2014, 2018 y 2019, donde el volcán Popocatepetl presentó mayor actividad.

## SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

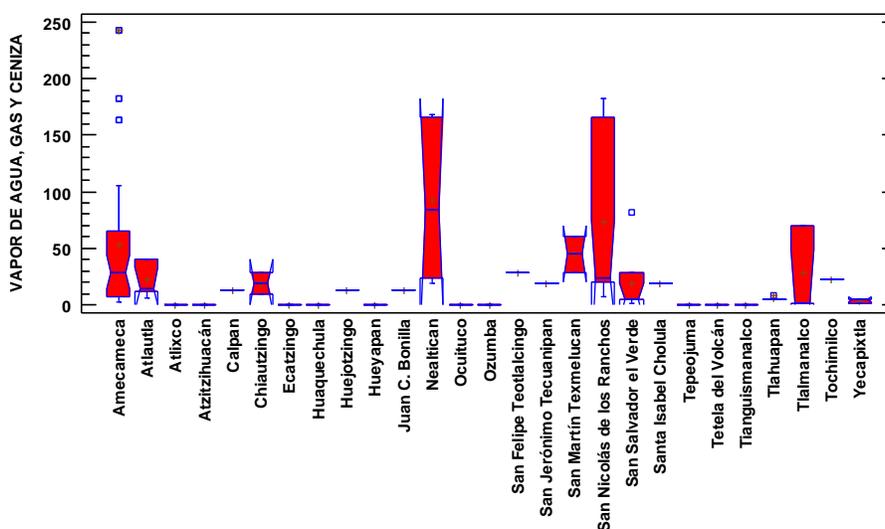


Figura 42. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por municipio.

La variación en el número de las de exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza (Figura 42) muestra que en los días de recolecta en los municipios de Amecameca, Nealtican y San Nicolás de los Ranchos presentaron una mayor cantidad de exhalaciones, proveniente de la actividad volcánica ocurrida en los diferentes años en los que se realizaron los muestreos, donde el año 2018 y 2019 fue la más prominente, causando una variación importante. Los municipios de Chiautzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde y Tlahuapan fueron muestreados en similares años (2001, 2013 y 2014), que a pesar de que la actividad volcánica ocurrida no fue tan significativa como en los años 2018 y 2019, fueron años que presentaron una alta actividad, al igual que para los municipios de Atlautla (2001 y 2009), Tlalmanalco y Yecapixtla (2002). Los restantes municipios revelan que el número de exhalaciones presentadas en los días de muestreo son menor a 22, derivados de la actividad ocurrida en el 2001.

Al conjuntar la relación del análisis temporal y espacial se concluyó que la actividad ocurrida en los años 2001, 2002, 2005, 2008, 2009, 2018 y 2019 influyó en las concentraciones de azufre en los cuerpos de agua ubicados en los municipios de Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos, Tetela del Volcán y Tochimilco. El resultado de la cambiante actividad se reflejó en los valores registrados de sulfuros y sulfatos, que van desde la ausencia total a  $37.1 \text{ mg L}^{-1}$  y de  $0.02$  a  $43.82 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente, los valores de pH ( $5.22$  a  $8.67$ ) tuvieron una mayor tendencia a la acidez en puntos de mayor altitud ( $2580$  a  $4056 \text{ m s.n.m.}$ ) y una mayor tendencia a la alcalinidad en puntos urbanizados y con alguna actividad ( $1610$  a  $2670 \text{ m s.n.m.}$ ). Los valores más altos de azufre se encuentran en los puntos más cercanos al volcán, donde la caída de ceniza es mayor, ya que los municipios se encuentran dentro de la zona donde la caída de ceniza (Figura 46) es de un espesor de  $1 \text{ cm}$  (Martin del Pozzo, 2016).

Estudios realizados en la zona revelan que las diferentes piedras pómez que conforman los sustratos en donde se encuentran los municipios de Amecameca, Atlautla, Tetela del Volcán, Tochimilco y San Nicolás de los Ranchos contienen compuestos de azufre en forma de inclusiones en los clinopiroxenos y ortopiroxenos (sulfatos, sulfuro de cobre, sulfuro de hierro, sulfuro de plata y sulfuro de zinc), que también dan origen al aumento de sulfuros y sulfatos en las aguas superficiales (Ángeles, 2019; Arana-Salinas et al., 2010; Larocque et al., 2008; Schaaf et al., 2005; Siebe et al., 2017; Sosa-Ceballos et al., 2012).

Los sitios muestreados en el municipio de Tlalmanalco arrojaron diferentes valores de sulfuros y sulfatos en los diferentes años (2002, 2008 y 2009). Las concentraciones de sulfuros se encontraron de una ausencia a  $37.1 \text{ mg L}^{-1}$  en 2002 y  $0.05$  a  $0.07$  en 2008, mientras que los valores de sulfatos estuvieron entre  $0.58$  y  $1.32 \text{ mg L}^{-1}$  en 2002,  $0.4$  y  $0.65 \text{ mg L}^{-1}$  en 2008 y  $0.02$  y  $0.21 \text{ mg L}^{-1}$  en 2009, estas fluctuaciones tienen una relación con la actividad volcánica, ya que en el 2002 fue la más fuerte. Los valores de pH se encontraron entre  $5.27$  y  $8$ , presentando una mayor tendencia a la acidez, ya que los sitios se encontraron en puntos de mayor altitud ( $2721$  a  $3591 \text{ m s.n.m.}$ ), donde los suelos son ácidos debido a la materia orgánica proveniente de la hojarasca y que están

formados por depósitos de cenizas (Guerra, 2020; Guerra-Hernández y Cruz, 2017; Nixon, 1989; Soledad, 2013).

Los municipios de Atlixco, Calpan, Ecatzingo, Nealtican, Ocuituco, San Jerónimo y Yecapixtla se encuentran ubicados entre una altitud de 1070 y 2969 m s.n.m. Los valores de pH que se encuentran en las aguas de estos municipios oscilan entre 5.95 y 10.8, mientras que, las concentraciones de sulfuros y sulfatos se encuentran en un rango de 0 a 21.15 mg L<sup>-1</sup> y 0.66 a 71.1 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, esta variación en los valores es principalmente debida a las fuentes antropogénicas que tienen un impacto en las aguas circundantes. La presencia de sulfuros es atribuida a la descomposición de residuos provenientes de fuentes urbanas y ganaderas que tiene como consecuencia la acidificación del pH, mientras que el origen principal de los sulfatos proviene de las sales que contienen las aguas residuales y de la utilización de fertilizantes y pesticidas a base de azufre, que aumenta el pH (García et al., 2018; IFA, 1992; Kraemer et al., 2001; Luzardo et al., 2014; Morel, 2005; Sperling, 2007).

Los Municipios de Atzitzihuacán, Huaquechula, Juan C. Bonilla, Ozumba, Santa Isabela Cholula, Tepeojuma y Tianguismanalco mostraron concentraciones de sulfuros (8.01 a 21.15 mg L<sup>-1</sup>) y sulfatos (8.86 a 71.63) elevadas, con un pH de 6.6 a 8.1 (con tendencia a básico). Estos resultados se deben a que los muestreos se realizaron en 2001 en sitios (1500 a 2300 m s.n.m.) con urbanización y donde se realizan actividades agrícolas que eleva de manera antropogénica las concentraciones de azufre (Anda y Miranda, 2004), además del aumento en la actividad volcánica del Popocatepetl anteriormente mencionada.

En el municipio de Hueyapan solo existe un registro en el año 2001 de los parámetros a una altitud de 2140 m s.n.m., donde las concentraciones de sulfuros (5.16 mg L<sup>-1</sup>) y sulfatos (1.74 mg L<sup>-1</sup>) fueron bajas y el pH del agua se encontró básico (8.24). Estos valores de sulfuros y sulfatos son debido a que días anteriores a la fecha de medición hubo una exhalación de vapor de agua, gas y ceniza de 2.5 km con dirección SSW, mientras que el pH de 8.24 registrado se encuentra dentro de los criterios ecológicos de la calidad de agua (entre 5 y 9).

Los municipios de Chiautzingo, Huejotzingo, San Felipe Teotlalcingo, San Martín Texmelucan, San Salvador el Verde y Tlahuapan tuvieron las concentraciones más elevadas de sulfuros ( $16685.87 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $14473.87 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $43040.27 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $13841.87 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $17760.27 \text{ mg L}^{-1}$  y  $16180.27 \text{ mg L}^{-1}$ ), esto se debe a las lluvias ocurridas en el año 2007, que se ha mencionado con anterioridad en otro párrafo. Fuera de estos eventos naturales, los registros de sulfuros (ausencia total a  $20 \text{ mg L}^{-1}$ ), sulfatos (ausencia total a  $43.93 \text{ mg L}^{-1}$ ) y el pH (5.62 a 9.74) tuvieron una variación respecto a la altitud (1990 a 4054 m s.n.m.) y los años (2001, 2013 y 2014), debido a la actividad. La altitud influyó en los valores de sulfuros (caída de ceniza y la erosión de sustrato con contenido de azufre), sulfatos (por procesos de oxidación) y el pH (ácides a consecuencia de la M.O. proveniente de la hojarasca y la absorción de HCl, HF y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  por la ceniza). A menor altitud, los sulfuros y sulfatos son afectados por el uso de fertilizantes en la agricultura y aguas residuales que se vierten al cauce, aumentando el valor del pH por las sales (Anda y Miranda, 2004; Cornejo, 2016; Espinosa-Pereña y Martín del Pozzo, 2006; Guerra-Hernández y Cruz, 2017; Hem, 1960; Martín del Pozzo et al., 1995; Nixon, 1989; Obenholzner et al., 2003; Soria, 2016; Wetzel, 2001; Zak et al., 2021)

Es importante mencionar que los 27 municipios (Figura 46) se encuentran dentro de la zona de caída de ceniza de 1 mm de espesor provenientes de columnas eruptivas menores a 10 km de altura (Martín del Pozzo, 2016).

A continuación, se pueden observar los mapas que se realizaron con fines de representar las concentraciones registradas de sulfuros y sulfatos, al igual que los valores de pH en los municipios (Figura 43-45). Asimismo, se puede observar el mapa que representa el escenario de mayor probabilidad de caída de ceniza relacionado con las erupciones más frecuentes menores a 10 km (Figura 46).

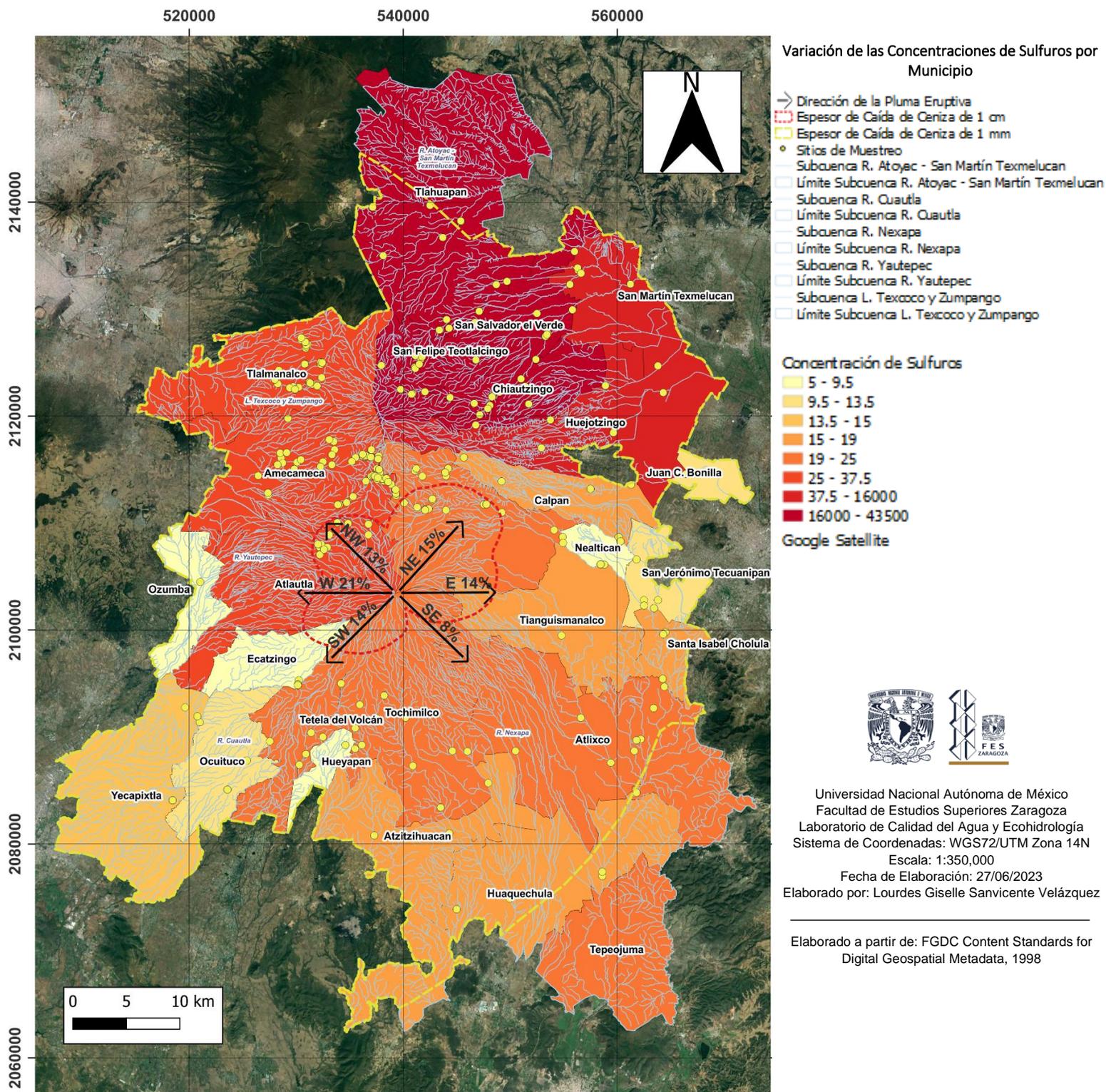


Figura 43. Variación de las concentraciones de sulfuros por municipio.

SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

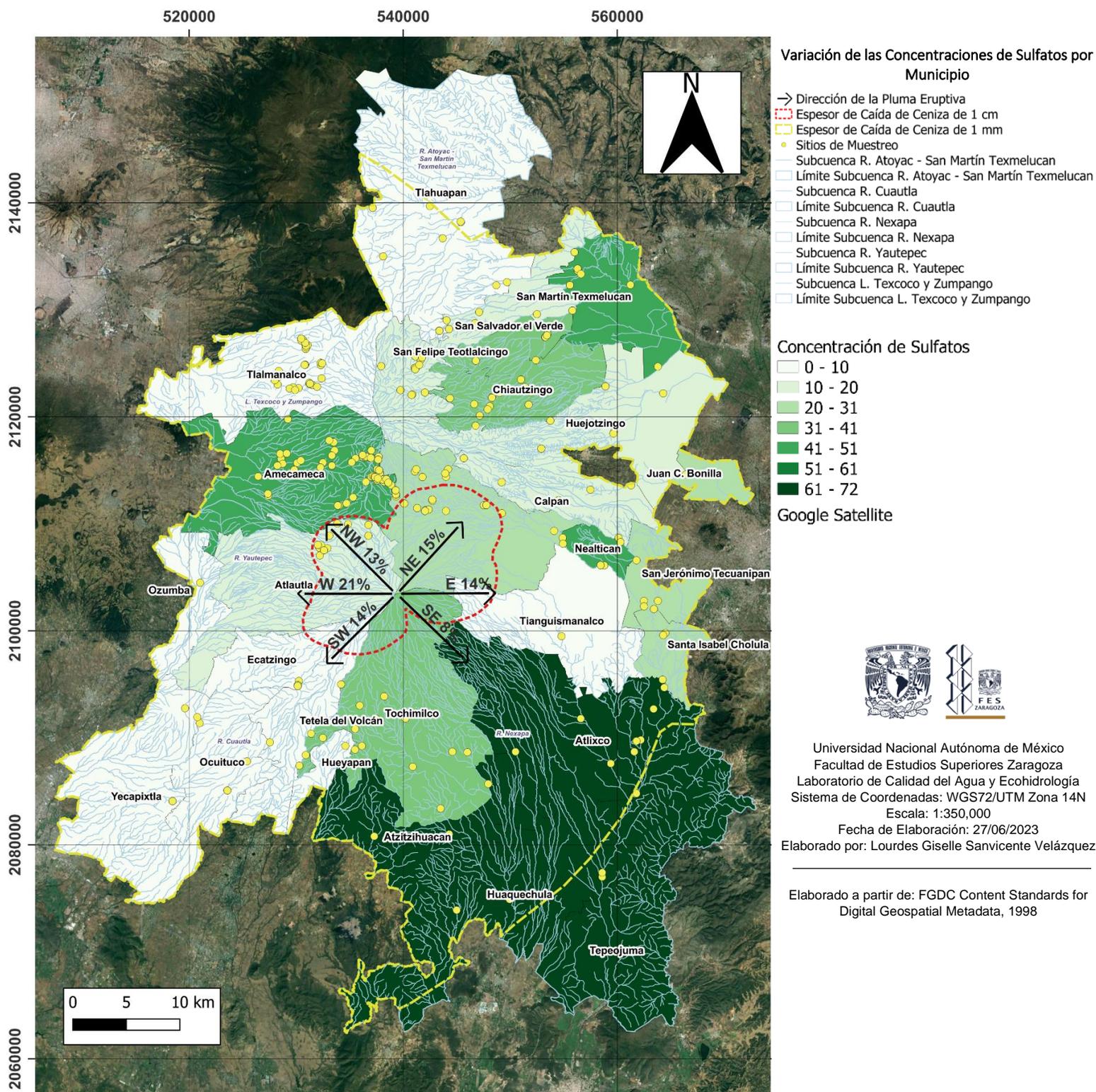


Figura 44. Variación de las concentraciones de sulfatos por municipio.

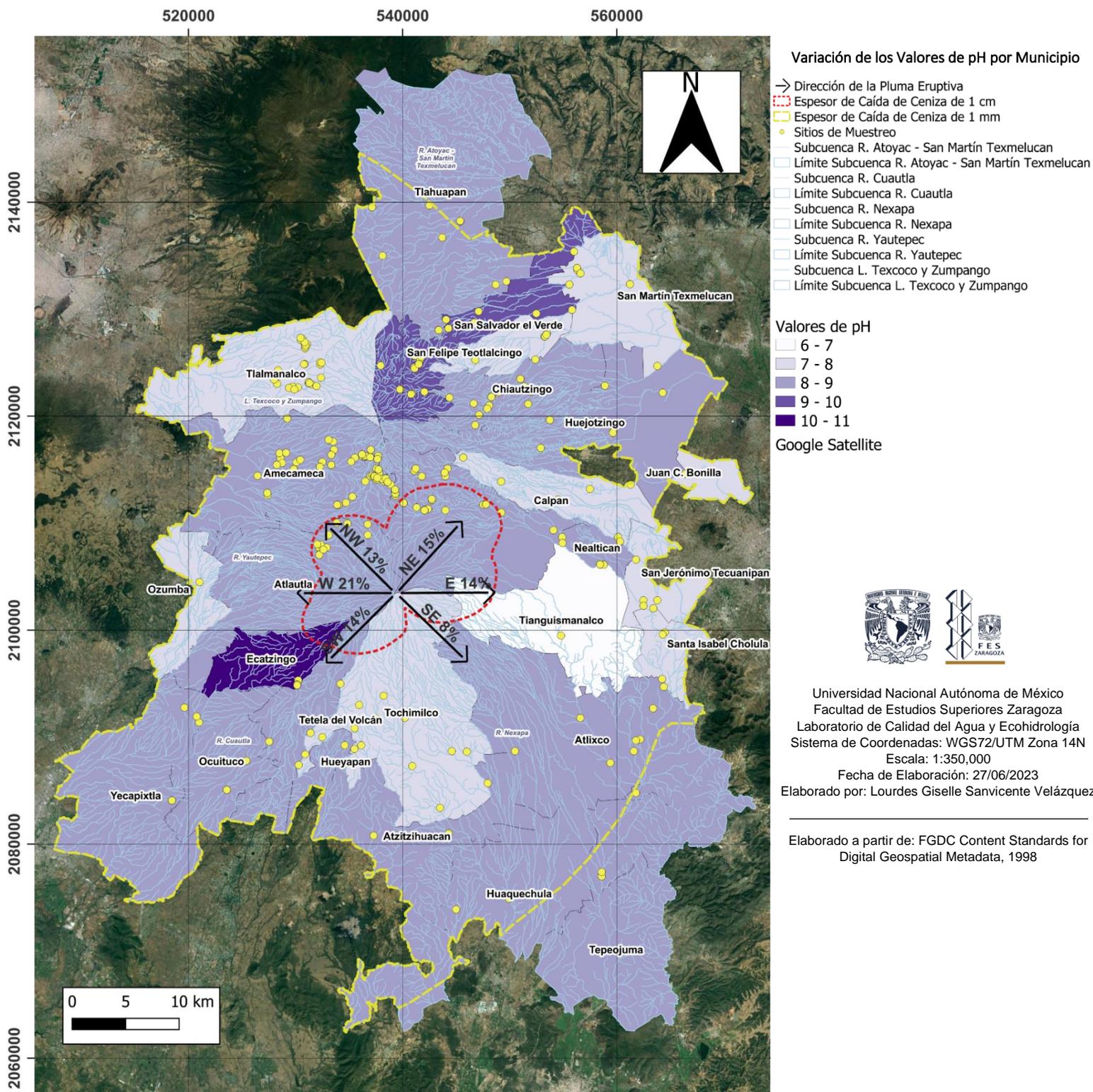


Figura 45. Variación de los valores de pH por municipio.

SULFUROS Y SULFATOS EN EL AGUA FLUVIAL Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL POPOCATEPETL

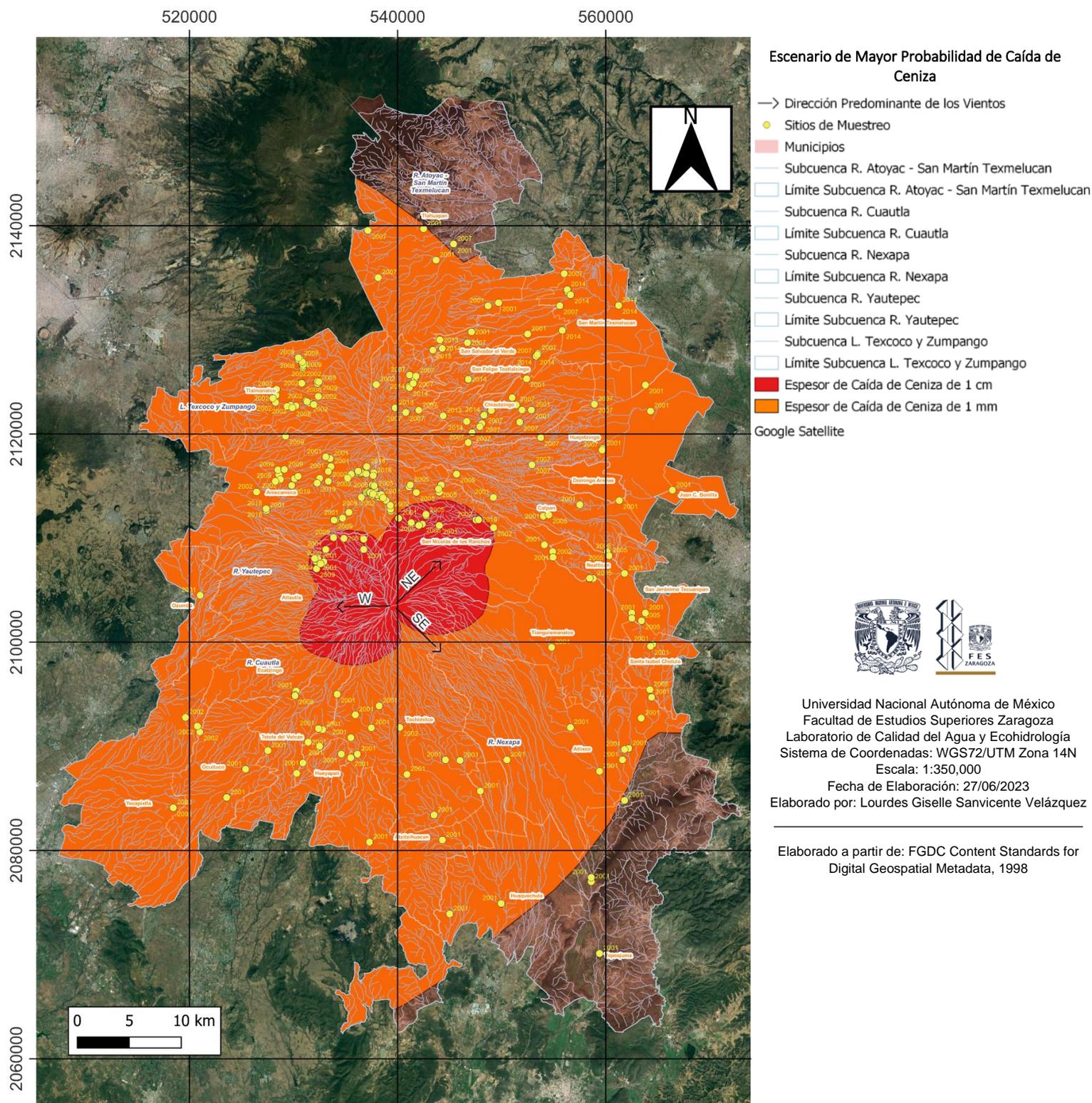


Figura 46. Escenario de Mayor Probabilidad de Caída de Ceniza.

## Variación por fase

Como en las anteriores comparaciones, la prueba de Kruskal-Wallis determinó que la mediana en cada una de las fases de la mayoría de las variables presenta una diferencia significativa, las variables que se muestran iguales son el pH, la columna y las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza. En la prueba de Mood's se determinó que sí hay alguna diferencia en las medianas, mientras que el pH y las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza muestran similitudes, ambas pruebas con un intervalo de confianza del 95%. Para observar estas diferencias y similitudes entre cada mediana de las tres fases, se encuentran los diagramas de caja y bigote (Figura 47-52), mientras que, en la tabla 3 se muestra el conjunto de la información por municipio, que es registro, el valor promedio, mínimo, máximo y el coeficiente de variación en cada uno de los parámetros.

Tabla 3. Registros, valor promedio, mínimo, máximo y coeficiente de variación por fase.

Fase		Sulfuros mg L <sup>-1</sup>	Sulfatos mg L <sup>-1</sup>	pH	Altitud m s.n.m.	Altura de la Columna m	Número de Exhalaciones de Vapor de agua y gas	Número de Exhalaciones de Vapor de agua, gas y ceniza
1	Registro	45	SR	38	45	SRAV	45	SRAV
	Promedio	1.53	SR	7.09	3134.18	SRAV	12.24	SRAV
	Mínimo	0	SR	5.95	1948	SRAV	4	SRAV
	Máximo	10.56	SR	8.33	4056	SRAV	40	SRAV
	Coef. de Var.	199.71%	SR	9.27%	20.94%	SRAV	68.16%	SRAV
2	Registro	275	270	315	317	73	222	95
	Promedio	2052.74	8.35	7.16	2876.83	1115.07	23.95	47.05
	Mínimo	0	0	5.22	1070	300	2	1
	Máximo	43040.27	71.63	10.08	4054	5000	206	243
	Coef. de Var.	262.98%	156.71%	10.08%	22.70%	106.87%	174.69%	134.27%
3	Registro	19	19	19	19	6	6	13
	Promedio	6.56	16.70	7.03	3248.84	900	40.33	29.23
	Mínimo	0	4.04	6.2	2260	800	33	7
	Máximo	26.41	43	7.75	4012	1000	44	56
	Coef. de Var.	125.9%	68.53%	5.31%	15.59%	12.17%	14.08%	67.43%
Total	Registro	339	289	372	381	79	273	108
	Promedio	1665.78	8.89	7.145	2925.78	1098.73	22.38	44.91
	Mínimo	0	0	5.22	1070	300	2	1
	Máximo	43040.27	71.63	10.08	4056	5000	206	243
	Coef. de Var.	295.74%	147.55%	9.82%	22.38%	104.37%	170.74%	133.31%

Nota: Sin registro de actividad volcánica SRAV.  
Sin registro SR.

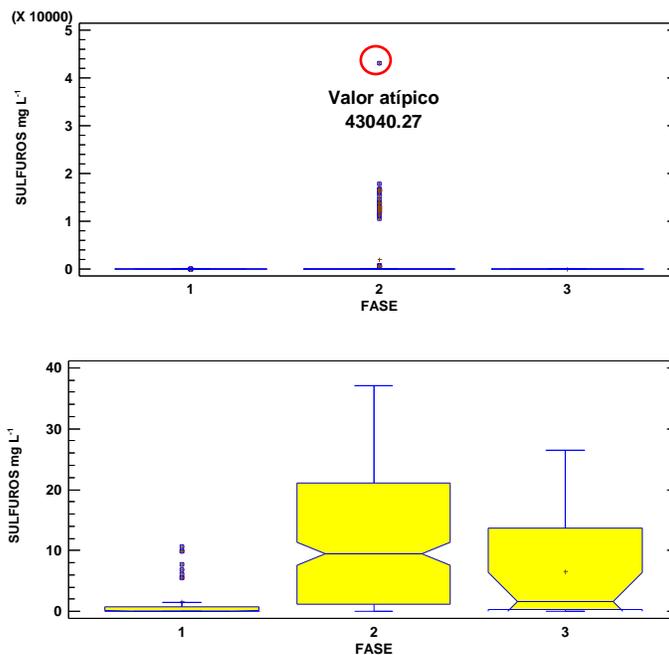


Figura 47. Variación de sulfuros por fase a escala de 0 a 50 000 mg L<sup>-1</sup> y de 0 a 40 mg L<sup>-1</sup>.

De igual manera, para poder observar las variaciones que presentaron las concentraciones de sulfuros en las tres fases, se realizaron dos gráficos con diferentes escalas (Figura 47). En esta figura se puede observar que la fase dos muestra una mayor variación respecto a las concentraciones de sulfuros en los cuerpos de agua registradas, debido a que fue la más representativa a lo largo de los años. La fase del semáforo amarillo uno presenta una menor concentración de sulfuros, derivado de la poca actividad volcánica ocurrida en el año 2005, por último, la fase del semáforo amarillo tres muestra concentraciones altas, ya que la actividad volcánica en esta fase es mayor.

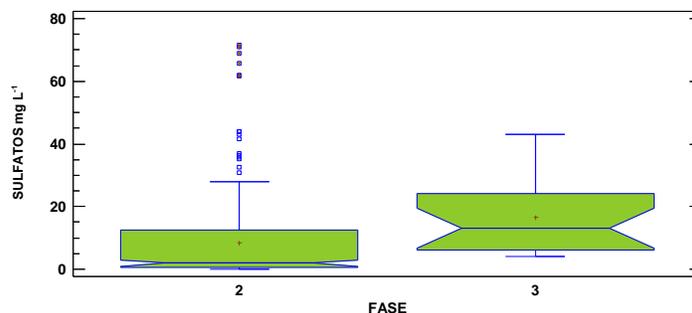


Figura 48. Variación de sulfatos por fase.

En la variación de los sulfatos, respecto a la fase del semáforo de alerta volcánica representada en la figura 48, se puede observar que las concentraciones de sulfatos en la fase volcánica amarilla dos es menor que las concentraciones que se presentaron en el semáforo de alerta volcánica amarillo fase tres, esto se debe a la alta actividad que presentó el volcán en esta última fase. Los valores atípicos mostrados en la fase amarilla dos son resultado de la ubicación de los sitios en zonas con población o con actividad agrícola y por la transformación de los sulfuros a sulfatos por proceso de oxidación por la elevada actividad volcánica.

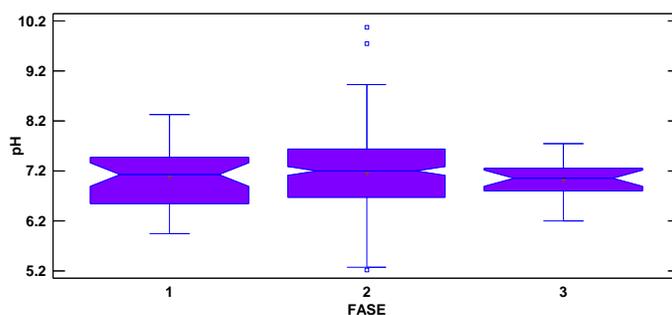


Figura 49. Variación del pH por fase.

La figura 49 muestra que el pH no presentó una variación respecto a las fases, ya que son valores (5 a 9) que se pueden encontrar de manera natural en los cuerpos de agua (SEDU, 1989). Los valores atípicos representados en el gráfico (9.74 y 10.08) fueron registrados en sitios con influencia humana.

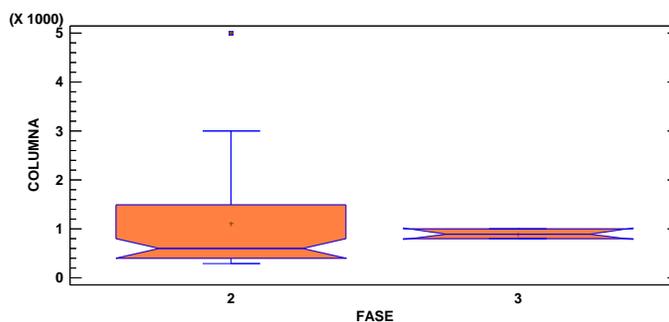


Figura 50. Variación de la altura de la columna eruptiva por fase.

La variación de la altura de la columna eruptiva (Figura 50) muestra que tuvieron una mayor aparición y altitud en la fase amarilla dos, debido a que esta fase estuvo mayormente presente en las fechas de muestreo, mientras que, en la fase amarilla tres, hubo una menor presencia de columnas, debido a su poca aparición de esta fase en las fechas de toma de muestra.

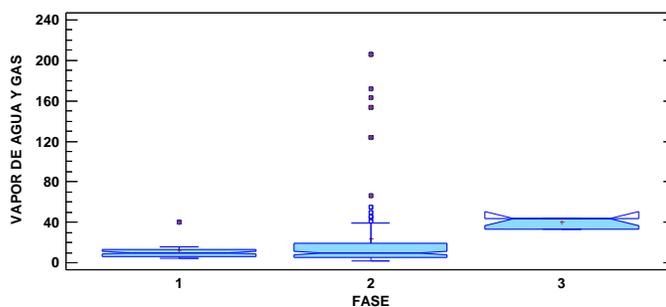


Figura 51. Variación de las exhalaciones de vapor de agua y gas por fase.

La figura 51 muestra la variación de las exhalaciones acompañadas de vapor de agua y gas, donde la fase amarilla uno, debido a la poca actividad que presentó, se registraron un menor número de exhalaciones, esto cambia en la fase del semáforo amarillo dos, donde se muestra un ascenso en las exhalaciones, ya que esta fase fue la más prevaleciente, revelando algunos valores atípicos derivados del aumento en la actividad presentada en algunos años, posteriormente, el número de exhalaciones se eleva, mostrando una variación importante en la fase volcánica amarilla tres, resultado de la alta actividad que presentó el volcán Popocatepetl en este cambio de fase.

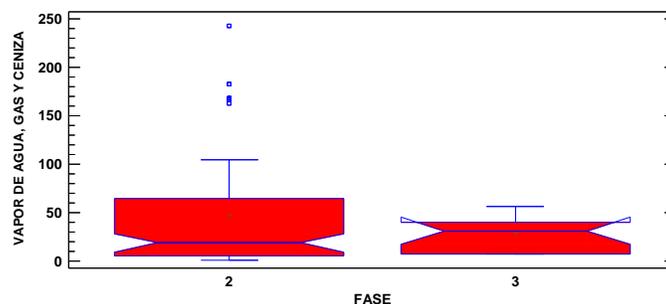


Figura 52. Variación de las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza por fase.

Las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza (Figura 52) no muestran una diferencia importante respecto a las fases, ya que se encuentran en un rango similar, a pesar de que la fase amarilla dos tiene algunos aumentos esporádicos de mayor número, representados como valores atípicos.

Con base a lo anterior, se puede observar que en la fase amarilla uno, que estuvo presente en el año 2005, las concentraciones de sulfuros en los cuerpos de agua fueron casi ausentes (ausencia total a  $1.41 \text{ mg L}^{-1}$ ) y su aumento esporádico ( $5.46$  a  $10.56 \text{ mg L}^{-1}$ ) fue debido a la influencia de columnas de ceniza, que ocurrieron en los días previos a la toma de muestra y que llegaron a medir entre 1.5 y 1.8 km con dirección a los puntos de muestreo (NE). En esta fase, las exhalaciones de vapor de agua y gas tienen una mayor dominancia y de manera esporádica ocurren emisiones ligeras de ceniza que pueden causar acidificación por lluvias meteóricas y ligeras caídas de ceniza sobre poblados aledaños al volcán (CENAPRED, 2019; Cruz-Reyna y Tilling, 2008).

La fase amarilla dos fue la más representativa, pues estuvo presente en el año 2001, 2002, 2007, 2008, 2009, 2013, 2014, 2018 y 2019. Las concentraciones de sulfuros estuvieron entre una ausencia total y  $43040.27 \text{ mg L}^{-1}$  ( $0$  a  $37.1 \text{ mg L}^{-1}$ , sin contemplar 2007) y de sulfatos de la ausencia a  $71.63 \text{ mg L}^{-1}$ , estos datos tuvieron relación con el número de exhalaciones (entre 1 a 243 por día) y columnas con contenido de ceniza que midieron hasta 5 km de altura sobre el cráter, mientras que en los días de intervalo entre las fechas de muestreo, las exhalaciones acompañadas de ceniza por día llegaron hasta 509 y las columnas con contenido de ceniza alcanzaron una distancia de 5 km. Es importante recalcar que la mayoría de los sitios se encuentran en dirección (30% se

dispersan al NE, 20% al E, 17 % al SW, 13% al NW) donde ocurre con más frecuencia la caída de ceniza (Delgado et al., 1995; Huitron, 2013; UNAM, 2017). En la fase amarilla dos pueden ocurrir explosiones moderadas, estas explosiones pueden expulsar ceniza, que son impulsadas y dirigidas por el viento y logran producir una ligera a moderada caída ceniza en pueblos cercanos (Cruz-Reyna y Tilling, 2008).

La fase amarilla tres estuvo presente en algunos meses del año 2001 y 2019, en esta fase los registros de sulfuros fluctúan entre una ausencia total y  $26.41 \text{ mg L}^{-1}$  y los sulfatos entre  $4.04$  a  $43 \text{ mg L}^{-1}$ . La presencia elevada de azufre en los cuerpos de agua fue resultado de las exhalaciones acompañadas de ceniza (7 a 56) y columnas de ceniza de hasta 1 km de altura sobre el cráter, ocurridas en los días de recolección de muestras de agua, también se registraron hasta 138 exhalaciones acompañadas de ceniza y columnas con contenido de ceniza que llegaron a medir 4 km de altura en los días de intervalo entre las fechas de muestreo. La ceniza contiene compuestos de azufre, lo que ocasiona el aumento de sulfuros y sulfatos en los arroyos y ríos, este aumento es relacionado con la fase amarilla tres, ya que viene acompañada del crecimiento y destrucción de domos por explosiones, persistencia de exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, lanzamiento de fragmentos incandescentes y caída de ceniza en los pueblos y ciudades cercanas (CENAPRED, 2019; Cruz-Reyna y Tilling, 2008; Martin del Pozzo et al. ,1995; Narváez y Cano, 2004).

Las exhalaciones de vapor de agua y gas influyen también en el aumento de azufre en los cuerpos de agua, ya que  $\text{SO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  emitidos a la atmósfera son transformados en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y precipitan como lluvia ácida (Escolástico et al., 2013; OPS, 2005). El número de exhalaciones fue diferente respecto a las tres fases del semáforo amarillo que se presentaron: en la fase amarilla uno el número de exhalaciones fueron de cuatro a 40 por día, de dos a 206 en amarillo fase dos y de 33 a 44 en amarillo fase tres. Como ya se había mencionado, la fase uno se caracteriza por la presencia de fumarolas de vapor de agua y gas, la fase amarilla dos presenta plumas continuas de vapor de agua y gas, por último, la fase amarilla tres está representada principalmente por exhalaciones acompañadas de vapor, gas y ceniza (CENAPRED, 2019; Cruz-Reyna y Tilling, 2008).

La figura 53 muestra que el número de las exhalaciones más frecuentes que ocurren por día son entre dos y 30, pues este número de intervalo en las exhalaciones se encontraron en las tres fases. El aumento en las exhalaciones es menos frecuente y puede ocurrir de manera esporádica en las tres fases, también esta alza en las exhalaciones da como resultado el cambio en el semáforo de alerta volcánica a amarillo fase tres, pues se caracteriza por destrucción y construcción de nuevos domos, al igual que la persistencia en exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza (CENAPRED, 2019; Cruz-Reyna y Tilling, 2008).

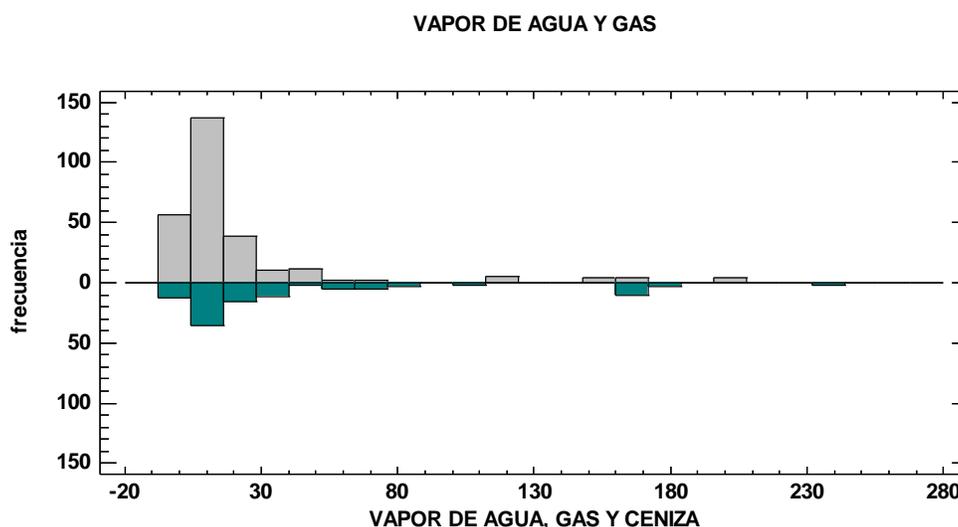


Figura 53. Tabla de frecuencia de las exhalaciones.

Se puede observar que el aumento esporádico en las exhalaciones por el incremento de la actividad del volcán Popocatepetl en los últimos años tiene un impacto en el alza de las concentraciones de azufre, ocasionando afectaciones debido a los sulfuros y sulfatos provenientes de la ceniza (WHO e International Programme on Chemical Safety, 1996; Zak et al., 2021).

El consumo de agua con presencia de sulfuro ocasiona una irritación en las membranas mucosas y pueden causar náuseas, vómitos y dolor epigástrico después de la ingestión, aunque es muy poco probable que se consuma una dosis nociva debido a que las aguas presentan mal olor y sabor a una concentración de  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$  y  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$ . Los registros arrojaron que la mayoría de los sitios de muestreo se encuentran concentraciones mayores a  $0.05 \text{ mg L}^{-1}$ , debido al aumento de la actividad volcánica y al cambio de fase

a través de los años, aunque su persistencia es muy corta en aguas altamente oxigenadas (WHO e International Programme on Chemical Safety).

La presencia de sulfuros puede generar un impacto negativo en muchas especies acuáticas, ya que, a niveles bajos ( $0.3 \text{ mg L}^{-1}$ ) es tóxico, en particular para la macrofauna acuática y macrófitos (Zak et al., 2021). Los cuerpos de agua registrados con cercanía a la población contienen concentraciones mayores a  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  de sulfuro, que son añadidos de forma constante debido a la actividad antropogénica, lo que puede causar afectaciones en los animales acuáticos, como la irritación y necrosis del tejido, menor consumo de alimentos, reducción de la producción, disminución en el tamaño de los huevos y menor probabilidad de supervivencia debido a las deformidades en las larvas recién nacidas como menciona WHO e International Programme on Chemical Safety.

Con respecto a los sulfatos, las afectaciones en los organismos provocan estrés osmótico en invertebrados, peces y crustáceos, algunas especies de plantas acuáticas presentan alteraciones en su reproducción y crecimiento como menciona Zak y colaboradores.

El consumo de agua con alto contenido de sulfatos ( $600 \text{ mg L}^{-1}$ ) tiene un efecto laxante sobre todo cuando se combina con calcio y magnesio (WHO e International Programme on Chemical Safety, 1996; Zak et al., 2021), esto es relevante ya que en algunos de los sitios de muestreo los pobladores consumen el agua de los manantiales o arroyos.

Los aumentos repentinos en las exhalaciones pueden no ser representativos, sin embargo, pueden causar grandes daños a la vegetación, a los animales y poblaciones (Boischio, 2013; Nieto-Torres y Martin del Pozzo, 2021; Rivera-Tapia et al., 2005; Robles, 2011; Sierra, 2012).

En los cuerpos de agua, la suspensión de cenizas aumenta la turbidez y estimula el crecimiento bacteriano, otro efecto es la acidificación debido a que la ceniza fresca que cae en los cuerpos de agua tiene una recubierta superficial muy ácida por los aerosoles volcánicos adsorbidos ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$  y  $\text{HF}$ ) (Stewart et al., 2006; Tomás et al., 2011). Este cambio en el pH puede originar la muerte de peces y una drástica alteración en la flora y fauna (Beita-Sandí y Barahona-Palomo, 2011; Gallego, 2017).

## CONCLUSIONES

Los sitios de muestreo donde se tiene registro de las concentraciones de azufre se encuentran dentro de la zona que puede ser afectada por caída de ceniza con un espesor de 1 cm a 1 mm, por lo que la presencia de sulfuros y sulfatos en los cuerpos de agua de la zona alta del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl y su zona de influencia se atribuye principalmente a la caída o arrastre de ceniza y emisiones que traen consigo compuestos de azufre.

El incremento de sulfuros en el agua de los sistemas lóticos del PNIP y su zona de influencia tiene relación directa con el incremento en las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza, con un efecto retardado de cinco días, ya que la ceniza al caer puede no depositarse directamente en los cuerpos de agua, sino en suelo y vegetación y posteriormente es transportada o arrastrada por viento o lluvia a los manantiales, ríos o arroyos.

La presencia de sulfatos en las corrientes de agua superficial en el parque y su zona de influencia además de su deposición directa, también provienen de la oxidación de sulfuros a sulfatos en los sistemas acuáticos.

Los procesos de erosión del suelo circundante al volcán que presenta compuestos de azufre son también un factor que continuamente transporta sulfuros y sulfatos a los manantiales, ríos y arroyos del parque y su zona de influencia.

La dirección de la pluma de emisión tiene una relación directa con las concentraciones de azufre en los cuerpos de agua que se ubican en la misma trayectoria, ya que la ceniza que cae se deposita directamente en estos sistemas o en suelo y vegetación aledaña y posteriormente es arrastrada por lluvia o viento hacia el cauce.

La presencia de sulfatos en los cuerpos de agua se debe principalmente a fuentes antropogénicas y de forma secundaria a la actividad volcánica.

Los valores de pH registrados en los diferentes años tienen una relación directa con la altitud, ya que los sitios que se encuentran a mayor altitud tienden a la acidez, debido a la ceniza y a la M.O. que proviene de la hojarasca de pino. El pH en los cuerpos de agua que se encuentran en sitios con una menor altitud tiende a la basicidad, esto se debe a

la incorporación de las sales provenientes de los fertilizantes utilizados en la agricultura y de las aguas residuales a los cuerpos de agua.

Los sistemas lóticos con valores de pH con tendencia a la acidez presentaron mayores concentraciones de sulfuros, mientras que los cuerpos de agua con pH básico presentaron una mayor concentración de sulfatos.

El aumento en la actividad volcánica a lo largo de los años sufrió una variación importante, reflejándose en las concentraciones de azufre, en el número y tipo de exhalaciones, al igual que en la presencia y altura de la columna eruptiva, siendo los años 2018 y 2019 los que más destacan.

Los años 2018 y 2019, debido al número elevado de exhalaciones de vapor de agua y gas y vapor de agua gas y ceniza, presentaron altas concentraciones de sulfatos, debido a la oxidación de los sulfuros presentes en los materiales arrojados por el volcán en la columna eruptiva y a los procesos de deposición de los gases.

La columna eruptiva presentó una diferencia importante en función de los años, siendo la más notoria en los años 2018 y 2019, pues ambos años presentaron explosiones acompañadas de columnas eruptivas de más de 1 km de altura con presencia de ceniza.

Los materiales arrojados durante una erupción volcánica son de suma importancia, ya que generan una fuente de sulfuros y sulfatos, siendo los años 2001 y 2002 los más afectados debido a la erupción ocurrida en enero del 2001.

El periodo de recolección de muestra en los diferentes años fue de marzo a diciembre principalmente, donde la dirección de la pluma volcánica fue primordialmente al W, NE y NW, donde los sitios de muestreo se ubicaron mayormente.

La dirección de la pluma eruptiva respecto al periodo de colecta de muestras de agua fue variada, donde la dirección registrada en los años predominó al NE y SE de enero a febrero, al E y NE de marzo a mayo, al SW, W y SE en junio, al W, NW y SW de julio a septiembre y al NE, NW, W y SW de octubre a diciembre.

La concentración de azufre en los manantiales, ríos y arroyos en los municipios ubicados al SW-SE del volcán fueron principalmente afectados por la mezcla del deshielo junto

con los materiales arrojados en la erupción del volcán Popocatépetl en el año 2001, aumentando los valores de sulfuros y sulfatos.

Los municipios que presentaron valores elevados de azufre en los manantiales, ríos y arroyos tuvieron relación con la actividad presentada a lo largo de los años, teniendo un impacto directo en el aumento de las exhalaciones de vapor de agua y gas y vapor de agua, gas y ceniza y en la presencia y altura de las columnas eruptivas que elevan las concentraciones de sulfuros y sulfatos en los cuerpos de agua, siendo Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos y Nealtican los municipios que presentaron una relación significativa mayor.

Los municipios que colindan con el cono del volcán Popocatépetl muestran concentraciones de sulfuros elevadas en los cuerpos de agua, ya que los materiales de mayor peso arrojados por el volcán se depositan de manera inmediata en las zonas más cercanas, siendo Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos, Tetela del Volcán y Tochimilco los más afectados de manera significativa, ya que se encuentran en el rango de caída de ceniza de 1 cm de espesor.

La presencia de sulfuros en los municipios aledaños al volcán se debe a la descomposición de la M.O. proveniente de las aguas residuales que se vierten a los cauces.

Los sulfuros registrados en los municipios que se encuentran ubicados al N-NE del volcán sufrieron una mayor variabilidad, debido a las lluvias y a las inundaciones ocurridas sobre todo en el año 2007.

Los municipios aledaños al volcán que presentaron concentraciones elevadas de sulfatos no son coincidentes con la actividad y emisiones volcánicas, estos incrementos se deben a la incorporación de las aguas residuales y sales provenientes de los agroquímicos utilizados en las zonas adjuntas a los cauces y que llegan a ellos por arrastre o escurrimiento.

Las concentraciones más elevadas de sulfuros y sulfatos en los sistemas lóticos se registraron en los municipios que se encuentran ubicados en donde la dirección de la

pluma fue con mayor frecuencia (W, NE, E, SW, NW y SE), como: Amecameca, Atlautla, San Nicolás de los Ranchos, Tetela del Volcán, Tlalmanalco y Tochimilco.

Los municipios cercanos al cono del volcán presentaron valores de pH más elevados en los cuerpos de agua, en relación con la presencia de sulfatos provenientes de la oxidación de sulfuros en el agua.

La pluma eruptiva durante el periodo de muestreo fue dirigida principalmente al Oeste (21%), Noreste (15%), Este (14%), Suroeste (14%), Noroeste (13%) y Sureste (8%), afectando las concentraciones de sulfuros y sulfatos en las aguas superficiales en los municipios ubicadas en esa dirección por la caída de ceniza.

La fase eruptiva que se presentó en los días de muestreo en los diferentes municipios no mostró diferencias significativas, ya que la fase dos fue la más representada, durante el periodo 2001-2019, considerando todos los municipios.

La fase dos ha estado mejor representada de 2001 a 2019 y ha mostrado mayor variabilidad, tanto en las exhalaciones de vapor de agua, gas y ceniza, generando un mayor impacto en el aumento en las concentraciones de sulfuros y sulfatos.

La fase tres estuvo presente por poco tiempo, en el periodo 2001-2019, por lo que ha tenido poca variabilidad y su efecto se vio reflejado en un incremento en las concentraciones de sulfatos.

Los valores de pH no presentaron diferencias significativas en función de cada una de las fases.

Las exhalaciones acompañadas de vapor de agua, gas y ceniza no muestran diferencias importantes respecto a las fases, debido que la fase dos y la fase tres se encuentran en un rango similar.

La altura de la columna eruptiva en la fase dos y tres son similares, según la prueba de Kruskal-Wallis, debido a que la fase dos puede presentar explosiones moderadas y generar columnas de gran altitud, mientras que la fase tres, debido a la alta actividad que se presenta, las columnas tienden a ser de mayor altitud.

## REFERENCIAS

- Aiba, L., Rejo, V. M. y Vieira, R. (2003). El tratamiento de aguas industriales contaminadas con sulfuros. *Residuos: Revista técnica*, 13(74), 64-71.
- Almanza, F., Rangel, J. L., González, F., Garfias, E. y Olguín, B. S. (2017). Caracterización y análisis de la ceniza del volcán Popocatepetl. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química*, 3(3), 1-6. <http://hdl.handle.net/11191/8307>
- Almeida, L., Cleef, A. M., Herrera, A., Velázquez, A. y Luna, I. (1994). El zacatonal alpino del Volcán Popocatepetl, México, y su posición en las montañas tropicales de América. *Phytocoenología*, 22(3), 391-436. [https://www.researchgate.net/profile/Isolda-Luna-Vega/publication/262798209\\_El\\_zacatonal\\_alpino\\_del\\_Volcan\\_Popocatepetl\\_Mexico\\_y\\_su\\_posicion\\_en\\_las\\_montanas\\_tropicales\\_de\\_America/links/55bfb7d008aed621de139f46/El-zacatonal-alpino-del-Volcan-Popocatepetl-Mexico-y-su-posicion-en-las-montanas-tropicales-de-America.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Isolda-Luna-Vega/publication/262798209_El_zacatonal_alpino_del_Volcan_Popocatepetl_Mexico_y_su_posicion_en_las_montanas_tropicales_de_America/links/55bfb7d008aed621de139f46/El-zacatonal-alpino-del-Volcan-Popocatepetl-Mexico-y-su-posicion-en-las-montanas-tropicales-de-America.pdf)
- Almeida-Leñero, L., Giménez, J., Cleef, A. M. y González, A. (2004). Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevado de Toluca, Región Central de México. *Phytocoenología*, 34(1), 91-132.
- Anda, P. y Miranda, G. P. (2004). *Contribución al conocimiento de la calidad del agua en diferentes corrientes superficiales del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y su zona de Influencia*, (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Ángeles, C. A. (2019). *Caracterización del contenido de Volátiles utilizando Inclusiones Magmáticas para entender las dinámicas eruptivas en el Volcán Popocatepetl a través del tiempo* (Tesis de Licenciatura). Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán, IPN.
- APHA, AWWA, WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22° edición. American Public Health Association
- Arana-Salinas, L., Siebe, C. y Macías, J. L. (2010). Dynamics of the ca. 4965 yr <sup>14</sup>C BP "Ochre Pumice" Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 192(3-4), 212-231. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.022>
- Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S., Gómez, A., Ramos, E., Ceniceros, N., Cruz, O., Aguayo, A. y Martínez, A. (2008). Hydrogeochemical indicators of the Popocatepetl volcano activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1-2), 35-50. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.006>
- Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S. y Macías, J. L. (2000). Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1-4), 105-125. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00157-2)

Ávila, M. (2011). Composición iónica y nivel de acidez del agua de lluvia en el bosque templado del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Beita-Sandí, W. y Barahona-Palomo, M. (2011). Físico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *UNED Research Journal / Cuadernos de Investigación UNED*, 2(2), 157-179. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=515651982004>

Boischio, A. (2013). *Los impactos a la salud asociados con las cenizas de los volcanes*. Organización Panamericana de la Salud [https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=es#gsc.tab=0](https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=8194:2013-los-impactos-salud-asociados-cenizas-volcanes&Itemid=39797&lang=es#gsc.tab=0)

Botero-Santa, P. A., Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, A. F., López-Martínez, M., Levresse, G., Xu, S. y Ortega-Obregón, C. (2015). Origen y desarrollo de la cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 84-98.

Brimblecombe, P. (2002). BIOGEOCHEMICAL CYCLES: Sulfur Cycle. En J. Curry, y J. Pyle (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (pp. 213-220). Academic Press <https://doi.org/10.1016/B0-12-227090-8/00015-4>

Canfield, D. E. y Farquhar, J. (2012). *Fundamentals of Geobiology: the global sulfur cycle*. Blackwell Publishing Ltd.

Capra, L., Poblete, M. A. y Alvarado, R. (2004). The 1997 and 2001 lahars of Popocatépetl volcano (Central Mexico): textural and sedimentological constraints on their origin and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 131(3-4), 351-369. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00413-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00413-X)

Catán, S., Juárez, N. A. y Bubach, D. F. (2016). Characterization of freshwater changes in lakes of Nahuel Huapi National Park produced by the 2011 Puyehue–Cordón Caulle eruption. *Environ Sci Pollut Res*, 23(20), 20700–20710.

CEMBA. (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debemos de saber*. Fondo de educación ambiental. [https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico\\_001.pdf](https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf)

CENAPRED. (2001). *Las cenizas volcánicas del Popocatépetl y sus efectos para sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria*. Secretaria de Gobierno [http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/363/1/images/libro\\_cvpeaia.pdf](http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/363/1/images/libro_cvpeaia.pdf)

CENAPRED. (2019). *POPOCATÉPETL – Semáforo de Alerta Volcánica*. Secretaria de Seguridad y Protección Ciudadana <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/441-INFOGRAFIASEMFORODEALERTAVOLCNICA.PDF>

Colotti, E. (1999). La erosividad: cualidad de la lluvia poco conocida. *Terra Nueva Etapa*, 15(24), 99-116.

- CONANP. (2013). *Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. SEMARNAT [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/87\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/87_libro_pm.pdf)
- Cotler, H., Galindo, A., González, I. D., Pineda, R. F. y Ríos, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. SEMARNAT [https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas\\_final\\_2014.pdf](https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/Cuencas_final_2014.pdf)
- Cornejo, C. (2016). *Clasificación de recursos hídricos de la subcuenca de San Martín Texmelucan* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Cruz-Sánchez, M., Cruz-Santos, M., Ángeles-García, S. y Girón-García, P. (2021). Caracterización de cenizas volcánicas depositadas en la ciudad de Puebla. *Publicación anual*, 8(8), 65-76. <https://doi.org/10.29057/aactm.v8i8.7667>
- Cruz-Reyna, S. y Tilling, R. I. (2008). Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1–2), 121-134. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.002>
- Cuoco, E., Tedesco, D., Poredac, R. J., Williams, J. C., Francescoa, S., Balagizi, C. y Darrah, T. H. (2013). Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: Implications for essential potable water resources. *Journal of Hazardous Materials*, 244–245, 570–581.
- Delgado, H., Carrasco, G., Cervantes, P., Cortés, R. y Molinero, R. (1995). *Patrones de viento en la región del volcán Popocatepetl y Ciudad de México*. CENAPRED, UMAN: 295-324.
- Delicado, P. (2008). *Curso de Modelos no Paramétricos*. Universidad Politécnica de Catalunya [http://www-eio.upc.edu/~delicado/docencia/Apuntes\\_Models\\_No\\_Parametrics.pdf](http://www-eio.upc.edu/~delicado/docencia/Apuntes_Models_No_Parametrics.pdf)
- Deer, W. A., Howie R. A. y Zussman J. (2013). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. The Mineralogical Society
- Dolman, H. (2019). *Biogeochemical Cycles and Climate*. Oxford University Press
- Escolástico, C., Cabildo, M. P., Claramunt, R. M. y Claramunt, T. (2013). *Ecología II: Comunidades y Ecosistemas*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Espinosa-Pereña, R. y Martín del Pozzo, A. L. (2006). Morphostratigraphic evolution of Popocatepetl volcano, México. *Geological Society of America Special Paper*, 402, 101–123, doi: 10.1130/2006.2402(05).
- Fabregat-Guinhard, F. (1980). Nomenclatura de los anfíboles. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 4(1), 84-90.
- FAO. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/i3794es/i3794es.pdf>

Fernandez-Turiel, J. L., Saavedra, J., Ruggieri, F., Gimeno, D., Pérez-Torrado, F. J., Rodríguez-González, A., Martínez, L. D., Gil, R., García-Valles, M. T., Polanco, E. y Galindo, G. (2012). Geoquímica de cenizas volcánicas a lo largo de dos transectas en Sudamérica: implicaciones ambientales. *Geotemas*, 13,1-4.

Flaathen, T. K. y Gislason, S. R. (2007). The effect of volcanic eruptions on the chemistry of surface waters: The 1991 and 2000 eruptions of Mt. Hekla, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 164(4), 293-316.

Franco-Ramos, O., Vázquez-Selem, L., Stoffel, M. y Villanueva, J. (2018). Potencial dendrogeomorfológico de coníferas en volcanes del centro de México. *BOSQUE*, 39(2), 191-204. DOI: 10.4067/S0717-92002018000200191

Gallego, B. J. (2017). *Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua en la reserva el santuario: Quebrada el Santuario, Tausa – Cundinamarca* (Tesis de Licenciatura). Universidad El Bosque

Garcés, L. F. y Hernández, M. L. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 67-72.

García, J., Leyva, J. B., Martínez, I. E., Hernández, M. I., Aldana, M. L., Rojas, A. E., Betancourt, M., Pérez, N. E. y Perera, J. H. (2018). Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34, 29-60. DOI:10.20937/RICA.2018.34.esp01.03

García, M. (2016). Eutrofización: una visión general. *CienciAcierta: revista científica tecnológica y humanística*, 12(47). <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/09/26/eutrofizacion-una-vision-general/#:~:text=La%20eutrofizaci%C3%B3n%20es%20un%20problema,grandes%20cantidades%20de%20nutrientes%20limitantes>

García, R. (2004). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>

George, S. (2014). *Contaminación Volcánica*. Department of Geography, Hunter College. <https://intlpollution.commons.gc.cuny.edu/volcanic-pollution/#:~:text=When%20volcanic%20ash%20clouds%20move,toxic%20levels%20of%20hydrogen%20fluoride>

González, C. (2007). *El uso de fertilizantes líquidos para el fertirriego* (Tesis de Licenciatura). Centro de Investigación de Química Aplicada

González-Aguado, T. y Guerra-Hernández, E. A. (2013). *Dinámica del azufre y su relación con la actividad volcánica en arroyos del parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y la zona de influencia*. Memorias VII Congreso de la Red Latinoamericana de Ciencias Ambientales

Granados, D., López, G. F. y Hernández, M. Á. (2010). La lluvia ácida y los ecosistemas forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(2), 187-206. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v16n2/v16n2a9.pdf>

Granados-Sánchez, D., Hernández-García, M., López-Ríos, G. (2006). Ecología de las Zonas Ribereñas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 12(1), 55-69. <https://www.redalyc.org/pdf/629/62912107.pdf>

Guerra, E. A. (2020). *Indicadores hídrico-edáficos de calidad para ambientes ribereños de la Reserva de la Biosfera "Los Volcanes"* (Tesis de Doctorado). UNAM.

Guerra-Hernández, E. A. y Cruz, G. (2017). Uso de suelo y calidad del agua. Caso de estudio: Reserva de la Biosfera Los Volcanes. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 8(18), 41-67. [http://cmas.siu.buap.mx/portal\\_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/49/1/8\(18\)-4.pdf](http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/work/sites/rlac/resources/LocalContent/49/1/8(18)-4.pdf)

Gupta, V. V. S. R. y Germida, J. J. (2021). Microbial transformations of sulfur in soil en T. Gentry, J. Fuhrmann y D. Zuberer (Ed.) *Principles and Applications of Soil Microbiology* (3 edition, pp. 489-522). Elsevier <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820202-9.00018-6>

Hales, J. M. (2009). *Environmental and Ecological Chemistry Volume 1: SULFUR DIOXIDE AND SULFUR CYCLES*. EOLSS <http://www.eolss.net/sample-chapters/c06/e6-13-02-03.pdf>

Hem, J. D. (1960). *Some chemical relationships among sulfur species and dissolved ferrous iron*. United States Government Printing Office.

Hernández, A. (2007). *Resumen de la temporada de ciclones tropicales 2007*. CONAGUA <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/informacion-historica>

Hernández, D. (1998). *El volcán Popocatépetl*. UAM <http://www.uam.mx/difusion/revista/julio-agosto98/volcan.html>

Huitron, D. (2013). *Estudio e identificación de zonas aéreas de alto riesgo alrededor del volcán Popocatépetl debidas a la presencia de cenizas volcánicas* (Tesis de Licenciatura). ESIME Ticoman, IPN.

Hutzinger, O. (1980). *The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Instituto de Geografía UNAM. (2018). *Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos*. CENAPRED [https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/30a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/V.%20GOES\\_16/Ceniza/Actividad%2031%20Recopilaci%C3%B3n%20de%20publicaciones%20cient%C3%ADficas.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/30a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/V.%20GOES_16/Ceniza/Actividad%2031%20Recopilaci%C3%B3n%20de%20publicaciones%20cient%C3%ADficas.pdf)

Instituto de Geografía UNAM. (2019). *Calibración de datos de nubes de ceniza para los Volcanes Mexicanos*. CENAPRED [https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/6a%20SESI%C3%93N%20EXTRAORDINARIA/3.%20GOES\\_16/CENIZA REPORTE 3.4 ABRIL 15 2019 BUENO CON%20DNDICE+TABLAS+FIGURAS\\_C.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/6a%20SESI%C3%93N%20EXTRAORDINARIA/3.%20GOES_16/CENIZA REPORTE 3.4 ABRIL 15 2019 BUENO CON%20DNDICE+TABLAS+FIGURAS_C.pdf)

Instituto de Geografía. (1989). *Climas: según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado de Enriqueta García*. UNAM

[https://mapamex.dgb.unam.mx/F/?func=direct&doc\\_number=000015042noSistema&local\\_base=MAP01](https://mapamex.dgb.unam.mx/F/?func=direct&doc_number=000015042noSistema&local_base=MAP01)

IFA, (1992). *Los fertilizantes y su uso*. FAO

Jones, M. T., y Gislason, S. R. (2008). Rapid releases of metal salts and nutrients following the deposition of volcanic ash into aqueous environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(15), 3661-3680. doi:10.1016/j.gca.2008.05.030

Kraemer, R. A., Choudhury, K. y Kampa, E. (2001). *Protecting water resources: pollution prevention*. Secretariat of the International Conference on Freshwater

Larocque, A. C. L., Stimac, J. A., Siebe, C., Greengrass, K., Chapman, R. y Mejia, S. R. (2008). Deposition of a high-sulfidation Au assemblage from a magmatic volatile phase, Volcán Popocatepetl, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170(1-2), 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.09.009>

Lejsec, R. J., Del Castillo, G. L., González M. T. y Comínguez, G. A. H. (1978). Interrelación Geodinámica del Golfo de México y el Eje Neovolcánico. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, 19(2), 77-99.

Lewis, A. E. (2010). Review of metal sulphide precipitation. *Hydrometallurgy*, 104(2), 222-234. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.010>

Lomans, B. P., van der Drift, C., Pol, A. y Op den Camp, H. J. M. (2002). Microbial cycling of volatile organic sulfur compounds. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 59, 575-588 <https://doi.org/10.1007/s00018-002-8450-6>

López, A. B. (2010). *Variación del pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Luzardo, O. P., Henríquez, L. A., Zumbado, M. y Boada, L. D. (2014). Impacto de las instalaciones ganaderas sobre la calidad y seguridad del agua subterránea. *Revista de Toxicología*, 31(1), 39-46. <https://www.redalyc.org/pdf/919/91932798005.pdf>

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 379-424. <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v57n3/1405-3322-bsgm-57-03-379.pdf>

Macías, J. L., Arce, J. L., García-Tenorio, F., Layer, P. W., Rueda, H., Reyes-Agustin, G., López-Pizaña, F., and Avellán, D. (2012). *Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico*. The Southern Cordillera and Beyond. En J. Aranda-Gómez, G. Tolson y R. Molina-Garza (Ed.), *The Southern Cordillera and Beyond* (Vol. 25, pp. 163-193). Geological Society of America [https://doi.org/10.1130/2012.0025\(08\)](https://doi.org/10.1130/2012.0025(08))

Martin del Pozzo, A. (2016). *Mapas de peligro del volcán Popocatepetl*. FOPREDEN

Martin del Pozzo, A. L., Aceves, F., Espinasa, R., Aguayo, A., Inguaggiato, S., Morales, P. y Cienfuegos, E. (2002). Influence of volcanic activity on spring water chemistry at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Chemical Geology*, 190, 207-229. <https://www->

[sciedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0009254102001171?via%3Dihub](https://sciedirect-com.pbidi.unam.mx:2443/science/article/pii/S0009254102001171?via%3Dihub)

Martin del Pozzo, A. L., Cifuentes, G., Cabral-Cano, E., Bonifaz, R., Correa, F. y Mendiola, I. F. (2003). Timing magma ascent at Popocatepetl Volcano, Mexico, 2000-2001. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 125(1-2), 107-120. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00091-X)

Martin del Pozzo, A. L., Espinasa-Peña, R., Armienta, M. A., Aguayo, A., Reyes, M., Sánchez, G., Cruz, O., Ceniceros, N., Lugo, J., González, V., Butrón, M. A. y Villarreal, M. (1995). *La emisión de cenizas y variaciones geoquímicas durante diciembre-marzo en el volcán Popocatépetl*. CENAPRED, UNAM: 285-294. <http://cidbimena.desastres.hn/pdf/spa/doc8625/doc8625-contenido.pdf>

Martínez, E. (2013). *Test de medianas (Mood) para dos o más muestras independientes*. El Departamento de Matemática de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires [https://www.dm.uba.ar/materias/optativas/metodos\\_no\\_parametricos\\_1/2013/2/Test\\_de\\_Medianas.pdf](https://www.dm.uba.ar/materias/optativas/metodos_no_parametricos_1/2013/2/Test_de_Medianas.pdf)

Marín, R. (2003). *Regulación de sustancias químicas en medios acuáticos*. Ediciones Díaz de Santos.

Mascot, E. (2013). *Azufre en el sistema agua-sedimento-suelo para ambientes ribereños asociados a diferentes condiciones de suelo* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Méndez, J.C. y Bertsch, F. (2011). Contenido total y disponibilidad de nutrimentos en dos muestras de cenizas expulsadas en enero del 2010 por el volcán Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 35(2), 97-104.

Metcalf y Eddy (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and reuse*. Fourth Edition. Mc Graw Hill.

Miguel, J. D. (2013). *Cobertura vegetal, materia orgánica y pH en suelo y su relación con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Monfil, L. F. (2020). *Calidad ecológica de dos sistemas ribereños de montaña y su relación con el uso de suelo* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Morales G. y Reyes A. N. (2023). *Limnología fluvial y su relación con el uso del suelo en la subcuenca del Río Nexapa* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

Morel, A. (2005). *Greywater treatment on household level in developing countries - a state of the art review*. ETH DUWIS

Narváez, O. y Cano, F. (2004). Cenizas Volcánicas. *Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias*, 17(3), 232-238. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-75852004000300009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-75852004000300009)

Navarro, A., Herrera, J., Caso, L. y Marrugo, J. (2013). *Calidad del agua del río Nexapa: Tendencias espacio - temporales y sus implicaciones*. ECORFAN <https://www.ecorfan.org/handbooks/pdf/CNc8.pdf>

Nieto-Torres, A. y Martin del Pozzo, A. L. (2021). Ash emission from a long-lived eruption at Popocatepetl volcano and mapped respiratory effects. *Bulletin of Volcanology*, 83(68). <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s00445-021-01490-z>

Nixon, G. T. (1989). The Geology of Iztaccíhuatl Volcano and Adjacent Areas of The Sierra Nevada and Valley of Mexico. *Geological Society of America* <https://doi.org/10.1130/SPE219>

NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua. - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-074-SCFI-2014. Análisis de agua – medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.

NMX-AA-084-1982. Análisis de agua, - determinación de sulfuros.

NOM-127-SSA1-2021 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. DOF.

Obenholzner, J. H., Schröttner, H., Golob, P. y Delgado, H. (2003). Particles from the plume of Popocatepetl volcano, Mexico - the FESEM/EDS approach. In *Volcanic Degassing. Geological Society London, Special Publications*, 213, (pp. 123-148).

OPS. (2005). *Salud Ambiental y Riesgo Volcánico*. OMS <http://helid.digicollection.org/pdf/s8259s/s8259s.pdf>

Ortega-Gutiérrez, F. (1974). Nota Preliminar Sobre las Eclogías de Acatlán, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 35, 1-6. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/300-sitio/articulos/tercera-epoca/3501/1473-3501-1-ortega>

Paez, P. A., Caselli, A. T., Cogliati, M. G. y Monasterio, A. M. (2017). Estudio del impacto de emisiones de cenizas volcánicas provenientes del volcán Copahue. *PROIMCA*, 1-12. [http://www.edutecne.utn.edu.ar/prodeca-proimca/actas-proimca-2017/MCA21\\_Estudio-del-Impacto-de-E.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/prodeca-proimca/actas-proimca-2017/MCA21_Estudio-del-Impacto-de-E.pdf)

Panagiotaras, D., Koulougliotis, D., Nikolopoulos, D., Kalarakis, A. N., Yiannopoulos, A. C. y Pikios, K. (2015). Biogeochemical Cycling of Nutrients and Thermodynamic Aspects. *Journal of J Thermodynamics & Catalysis*, 6(2), 1-7. doi:10.4172/2157-7544.1000144

Pérez, Y. (2017). *Contenidos de azufre en diferentes componentes del ambiente en un sistema fluvial del Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia en la cuenca Alta Balsas* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

- Ramírez, A. y San José, C. (2006). El azufre en la naturaleza. *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, 10, 33-46. <https://www.radoctores.es/doc/1V10N2-ramirez-san%20jose-azufre.pdf>
- Rivera-Tapia, A., Yáñez-Santos, A. y Cedillo-Ramírez, L. (2005). Emisión de ceniza volcánica y sus efectos. *Ecosistemas*, 14(3), 107-115. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=140>
- Rivera, J. (2004). La actividad volcánica y su relación con el medio ambiente y salud. *Revista de Facultad de Medicina UNAM*, 47(5), 200-2003. <https://www.medigraphic.com/pdfs/facmed/un-2004/un045e.pdf>
- Robles, C. A. (2011). *Consecuencias de la erupción volcánica sobre la salud del ganado en la región Patagónica*. Sitio Argentino de Producción Anima <https://www.produccion-animal.com.ar/inundacion/70-saludganado.pdf>
- Rodríguez, F. (2006). Cuencas Hidrográficas, Descentralización y Desarrollo Regional Participativo. *Revista de las Sedes Regionales*, 7(12), 113-125. <https://www.redalyc.org/pdf/666/66612867008.pdf>
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. CONABIO [https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx\\_Cont.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf)
- Rzedowski, G. y Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A. C. y CONABIO [https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora\\_del\\_Valle\\_de\\_Mx1.pdf](https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/Flora_del_Valle_de_Mx1.pdf)
- Schaaf, P., Stimac, J., Siebe, C. y Macías, J. L. (2005). Geochemical Evidence for Mantle Origin and Crustal Processes in Volcanic Rocks from Popocatépetl and Surrounding Monogenetic Volcanoes, Central Mexico. *Journal of Petrology*, 46(6), 1243-1282. <https://doi.org/10.1093/petrology/eqi015>
- Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T. E. y Meza-Figueroa, D. (2021). Emisiones volcánicas: origen e impacto en la atmósfera. *EPISTEMUS*, 15(30), 1-14. <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.160>
- SEDU. (1989). *Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua CE-CCA-001/89*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecológico, Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (2019). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2018*. SEMARNAT [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX\\_web.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX_web.pdf)
- SEMARNAT. (2005). *Programa de ordenamiento ecológico y por riesgo eruptivo del territorio del volcán Popocatépetl y su zona de influencia*. Secretaría de Ecología del estado de México <https://dgoia.edomex.gob.mx/sites/dgoia.edomex.gob.mx/files/files/POER%20VOLCAN%20POPOCATEPETL.pdf>

- Siebe, C., Salinas, S., Arana-Salinas, L., Macías, J. L., Gardner, J. Y Bonasia, R. (2017). The ~ 23,500 y <sup>14</sup>C BP White Pumice Plinian eruption and associated debris avalanche and Tochmilco lava flow of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333-334, 66-95. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.01.011>
- Sierra, M. P. (2012). Las cenizas, gases volcánicos y la salud respiratoria. *Neumol Cir Torax*, 71(2), 132-138.
- Sievert, S., Kiene, R. y Schulz-Vogt, H. (2007). The sulfur cycle. *Oceanography*, 20(2), 117-123, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2007.55>.
- Simó, R. (2001). Production of atmospheric sulfur by oceanic plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(6), 287-294. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(01\)02152-8](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(01)02152-8)
- Soledad, A. (2013). *Comportamiento nutrimental del sistema agua-suelo en la zona occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl*(Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Soria, R. A. (2016). *Calidad del agua y uso de suelo en la subcuenca de San Matín Texmelucan* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Sosa-Ceballos, G., Gardner, J. E., Siebe, C. y Macías, J. L. (2012). A caldera-forming eruption ~ 14,100 <sup>14</sup>C yr BP at Popocatepetl volcano, México: Insights from eruption dynamics and magma mixing. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.11.001>
- Soto, V. H., Pech, J. M. y Alanís, J. L. (2021). Altitud del límite superior de bosque en el Eje Neovolcánico Mexicano, un referente climático de la alta montaña en México. *Estudios Geográficos*, 82(290). <https://doi.org/10.3989/estgeogr.202075.075>
- Sperling, M. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA
- Sruoga, P. (2021). *Contaminación por vulcanismo*. Breve Enciclopedia del Ambiente <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/ContamVulc.htm>
- Stewart, C., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T. y Cronin, S. J. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158, 296–306. [doi:10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002)
- Tarback, E. J. y Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*. Pearson
- Tomás, A., Vélez, M. L. y Agosto, M. R. (2011). *Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires
- UNAM. (2017). *Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl*. SEGOB. <https://www.geofisica.unam.mx/assets/monografias22.pdf>

Universidad de Alicante (12 de abril del 2021). *Atlas Digital de Petrología Ígnea y Metamórfica*. <https://web.ua.es/es/pim/atlas-digital-de-petrologia-ignea-y-metamorfica.html>

Vargas, F. (1997). *Parques Nacionales de México*. SEMARNAT <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN07.pdf>

Veres, P. R., Neuman, J. A., Bertram, T. H., Assaf, E., Wolfe, G. M., Williamson, C. J., Weinzierl B., Tilmes, S., Thompson, C. R., Thames, A. B., Schroder, J. C., Saiz-Lopez, A., Rollins, A. W., Roberts, J. M., Price, D., Peischl, J., Nault, B. A., Møller, K. H., Miller, D. O., Meinardi, S., Li, Q., Lamarque, J. F., Kupc, A., Kjaergaard, H. G., Kinnison, D., Jimenez, J. L., Jernigan, C. M., Hornbrook, R. S., Hills, A., Dollner, M., Day, D. A., Cuevas, C. A., Campuzano-Jost, P., Burkholder, J., Bui, T. P., Brune, W. H., Brown, S. S., Brock, C. A., Bourgeois, I., Blake, D. R., Apel, E. C. y Ryerson, T. B. (2020). Global airborne sampling reveals a previously unobserved dimethyl sulfide oxidation mechanism in the marine atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States America*, 117(9), 4505-4509. <https://doi.org/10.1073/pnas.1919344117>

Vidal, R. (2005). *Las Regiones Climáticas de México*. Instituto de Geografía, UNAM. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/42/42/128-1>

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystem*. Academic Press.

WHO e International Programme on Chemical Safety. (1996). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization

Zak, D., Hupferb, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S. M., Petersen, R. J., Liu, H. y Goldhammer, T. (2021). Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation. *Earth-Science Reviews*, 212, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446>