

Monitoreo de la concentración de SO₂ en el aire y características físicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú

Monitoring of SO₂ concentration in the air and physicochemical characteristics of rainwater in the Irazú Volcano

Kevin David Chaves-Solano¹, José Pablo Sibaja-Brenes²,
Esteban Pérez-López³

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2020
Fecha de aprobación: 27 de octubre de 2020

Chaves-Solano, K.D; Sibaja-Brenes, J.P; Pérez-López, E.
Monitoreo de la concentración de so2 en el aire y caracte-
rísticas físicoquímicas del agua de lluvia en el Volcán Irazú.
Tecnología en Marcha. Vol. 34-4 Octubre-Diciembre 2021.
Pág 146-162.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i4.5113>

- 1 Bachiller en Laboratorista Químico. Universidad de Costa Rica, recinto Grecia, Costa Rica. Correo electrónico: kevinchavessolan@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-8540-6023>
- 2 Magister Scientiae en Gestión y Estudios Ambientales, Licenciado en Química Industrial, Académico Escuela de Química, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jose.sibaja.brenes@una.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Máster en Sistemas Modernos de Manufactura y Bach. en Laboratorista Químico. Académico Universidad de Costa Rica, recinto Grecia, Costa Rica. Correo electrónico: esteban.perezlopez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-6379-7139>



Palabras clave

Dióxido de azufre; cromatografía de iones; agua de lluvia; parámetros fisicoquímicos; lluvia ácida.

Resumen

El dióxido de azufre y otros contaminantes químicos pueden llegar a la naturaleza y el ambiente por medio de la actividad volcánica. Debido a esto, en Costa Rica, las zonas cercanas a los volcanes se encuentran afectadas con estos contaminantes. Por ello, se realizó un monitoreo de la concentración del dióxido de azufre en aire, y la determinación del pH y la concentración de fluoruro, cloruro, bromuro, fosfato y sulfato en agua de lluvia en el Volcán Irazú, en el 2019. Inicialmente se evaluaron los parámetros de desempeño analítico: linealidad, repetibilidad, precisión intermedia, límite de detección y cuantificación en el método empleado. Se utilizaron muestreadores o recolectores húmedos especiales en puntos específicos de la zona, luego las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), donde se determinó por medio de cromatografía de iones la concentración de los aniones en agua. El pH fue determinado con un pH-metro calibrado. Los resultados obtenidos indican que el dióxido de azufre no sobrepasa los límites permitidos. Además, los resultados de pH de las muestras de agua de lluvia (3,55 a 5,33) indican presencia de lluvia ácida en las zonas cercanas al cráter del Volcán, por lo que, para utilizarla se debe efectuar un tratamiento que disminuya la acidez. Así mismo, los resultados de los aniones en el agua de lluvia presentaron valores bajos (menores a 6,58 mg/l), además, no fue posible detectar bromuro y fosfato en las muestras. La concentración de dióxido de azufre presente no se considera perjudicial para la salud de los visitantes y para los trabajadores de la zona.

Keywords

Sulfur dioxide; ion chromatography; rainwater; physicochemical parameters; acid rain.

Abstract

Sulfur dioxide and other chemical pollutants can reach nature and the environment through volcanic activity. Due to this, in Costa Rica, the areas near the volcanoes are affected with these pollutants. Therefore, a monitoring of the concentration of sulfur dioxide in air was carried out, and the determination of the pH and concentration of fluoride, chloride, bromide, phosphate and sulfate in rainwater at the Irazú Volcano, in 2019. Initially, Analytical performance parameters were evaluated: linearity, repeatability, intermediate precision, limit of detection and quantification in the method used. Special wet samplers or collectors were used at specific points in the area, then the samples were analyzed in the Laboratory of Atmospheric Chemistry (LAQAT), where the concentration of the anions in water was determined by means of ion chromatography. The pH was determined with a calibrated pH-meter. The results obtained indicate that the sulfur dioxide does not exceed the permitted limits. In addition, the pH results of the rainwater samples (3.55 to 5.33) indicate the presence of acid rain in the areas near the crater of the volcano, therefore, to use it, a treatment that reduces the acidity. Likewise, the results of the anions in the rainwater presented low values (less than 6.58 mg / l), in addition, it was not possible to detect bromide and phosphate in the samples. The concentration of sulfur dioxide present is not considered detrimental to the health of visitors and workers in the area.

Introducción

El dióxido de azufre se origina en la naturaleza por medio de la actividad volcánica. Cuando el dióxido de azufre se encuentra en altas concentraciones en el ambiente, genera problemas respiratorios y cardiovasculares, además, puede reaccionar, ocasionando lluvia ácida por la formación de ácido sulfúrico [1]. También, el agua de lluvia puede encontrarse contaminada por aniones que afectan la calidad y pueden ser perjudiciales para la salud. Aniones como el fluoruro, el cloruro y el sulfato se encuentran presente de forma natural por erosión o actividad volcánica. El fluoruro es un anión que no debe exceder 1,5 mg/l en agua de consumo, cantidades mayores pueden causar problemas de salud como la fluorosis dental [2].

Por otro lado, los sulfatos presentes en el agua en cantidades mayores a los 500 mg/l afecta considerablemente la potabilidad de esta, generando problemas gastrointestinales, por lo que, la OMS recomienda que no se exceda este límite para el agua de consumo y notificar a las autoridades cuando se supere este límite. Así mismo, a partir de 250 mg/l de sulfatos en agua, se percibe el sabor, por lo que, disminuye la calidad del agua [3].

En Colombia, Garzón et al [4], efectuaron un estudio de las estrategias de medición de gases volcánicos utilizando sensores ópticos. El estudio consistió en realizar mediciones en el volcán Nevado de Huilas. Los resultados indican que el volcán arroja 35,4 kg/s de dióxido de azufre el 1 de junio del 2007; y se registró un flujo de entre 5,6 kg/s a 7,9 kg/s del 23 al 24 de mayo del 2008. Asimismo, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [5] realizó un monitoreo de las emisiones del volcán Popocatépetl en México. El monitoreo consistió en recolectar muestras de aire por medio de muestreadores de depósito atmosférico para luego determinar las partículas presentes en el aire por medio de análisis gravimétrico. Los resultados obtenidos demuestran que la cantidad de partículas suspendidas en el aire que corresponden a óxidos de azufre, no generan problemas de salud.

Castruccio y Rondanelli [6] efectuaron un estudio de SO₂ en penachos volcánicos de los volcanes Láscar, Ollagüe e Irruputuncu. El estudio consistió en determinar la cantidad de dióxido de azufre emanados en penachos volcánicos utilizando una cámara ultravioleta. Los resultados se encuentran entre 400 ppm/m y 1700 ppm/m. Las concentraciones se encontraban en el rango esperado.

De igual modo, Ponce [7] realizó una estimación de dióxido de azufre en el volcán Galeras en Colombia. La cuantificación se realizó para comparar el crecimiento de un domo de lava en el Volcán Galeras con la emanación de dióxido de azufre. Se obtuvo como resultado que a una velocidad promedio de 5 m/s, el volcán emanó 334 947 toneladas de SO₂.

Por otro lado, existen estudios relacionados con los aniones presentes en agua para verificar la calidad de la misma, ya sea agua de consumo, superficial, de lluvia o volcánica. En este sentido, Pérez et al [8] realizaron un estudio de caracterización química de aguas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán. El estudio consistió en realizar muestreos en 11 puntos estratégicos, para luego analizar 28 parámetros fisicoquímicos. Los resultados obtenidos indican que posee bajos niveles de sodio, potasio, sulfatos y cloruros, además, los niveles de metales pesados son más bajos de lo que indica la normativa, excepto por el arsénico, el cual se encuentra a niveles sumamente altos. El pH se encuentra en los límites establecidos por la normativa.

Asimismo, Galicia et al [9] realizaron una indagación acerca de la concentración de fluoruro en el agua potable de la delegación de Tláhuac en México. El estudio consistió en realizar una determinación de la concentración de fluoruro mediante el método potenciométrico en 144 muestras recolectadas en pozos y zonas vecinas de la delegación. Los resultados obtenidos

varían desde 0,44 ppm a 1,28 ppm de fluoruro, con una media de 0,86 ppm, en los cuales, la mayoría de los resultados se encuentran por encima de la normativa en relación con el consumo de sal fluorada.

Erazo et al [10] realizaron una investigación en Colombia acerca del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná. Para ello, realizaron un monitoreo en los puntos claves donde pueda existir influencia volcánica. Los resultados obtenidos evidenciaron influencia por parte del volcán Nevado de Ruíz debido a los valores altos de los iones de sulfato, nitrato, cloruros, sodio y potasio. El pH se encontró entre 6,98 y 7,90.

Por su parte en Costa Rica, Alvarado [11] realizó un análisis sobre el impacto en la salud de las emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal en la población de la fortuna en San Carlos. El estudio consistió en observar si las concentraciones de las emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal pueden representar una amenaza a la salud de los habitantes de los alrededores. Los resultados indican que cuando el volcán emite 120 ton/día de dióxido de azufre no existe riesgo en la salud, cuando emite 800 ton/día y 12 000 ton/día existe un riesgo considerable en la salud, sobre todo en problemas respiratorios y cardíacos.

En relación con los iones en agua, Beita [12] efectuó un estudio de caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del Río Rincón, en la Península de Osa. El estudio consistió en realizar muestreos en 11 puntos definidos en el río Rincón, luego se determinó las características fisicoquímicas como temperatura, pH, alcalinidad parcial y total, dureza, conductividad, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, concentración de calcio, cloruro, fósforo, magnesio, nitratos, nitritos, potasio, sodio y sulfatos. Los resultados indican que el agua de la cuenca se clasifica como bicarbonatada, además que, las actividades humanas no han tenido impacto negativo sobre la cuenca, si no, a las características geogénicas de la misma.

Por su parte, Herrera y Rodríguez [13] realizaron una determinación de iones en el agua pluvial recolectada en San José. Se recolectó agua de seis sitios de la ciudad de San José entre julio y septiembre del 2006, luego se determinó el pH, concentración de SO_4^{-2} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , Br^- , PO_4^{-3} y F^- y conductividad. La concentración de los iones se cuantificó mediante cromatografía de intercambio iónico. Los resultados obtenidos indican que el 45 % de las muestras presentan valores de pH entre 4,0 y 5,6, mientras que el 26 % de las muestras fueron básicas. También se aprecia una contribución de origen antrópico en la concentración de iones nitrato y nitrito, mientras que para los sulfatos y cloruros hay una contribución de fuentes antrópicas y marinas.

También, Bolaños et al [14] efectuó un estudio preliminar sobre la composición del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional Volcán Poás. El estudio consistió en evaluar la composición atmosférica del agua de lluvia, se evaluaron parámetros como el pH, conductividad y concentración de aniones (F^- , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{-2}). Los resultados más significativos se encontraron cerca del foco o en el mirador, con valores de pH de 2,50, concentraciones de iones de 66,3 mg/l de fluoruro, 308,1 mg/l para cloruros y 249,1 mg/l para los sulfatos.

En relación con las emanaciones volcánicas, Sibaja et al [15] efectuó una medición y un modelaje del dióxido de azufre en los alrededores del Volcán Poás durante el 2019. El estudio consistió en determinar la concentración de dióxido de azufre presente en y los alrededores del Volcán Poás, para ello se recolectaron muestras mediante sistemas de burbujeo, luego se almacenó en filtros a 4 °C y se cuantificó la concentración de sulfato. Los resultados indicaron que en la casa de los guardaparques hay 49 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 4 h y en el centro de visitantes 10 171 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 4 h.

Importante indicar que, Costa Rica define parámetros para el control de la calidad del agua de consumo, para el fluoruro el valor máximo admisible es de 0,7 mg/l a 1,5 mg/l; para el nitrato es de 50 mg/l, el cloruro 250 mg/l y para los sulfatos el valor máximo es de 250 mg/l. Estos parámetros deben cumplirse, de lo contrario el Ministerio de Salud de Costa Rica aplica sanciones y hasta el cierre de instalaciones de potabilización [16].

La actividad volcánica es una de las principales fuentes naturales de contaminantes atmosféricos. Los gases emitidos por un volcán dependen de la naturaleza del mismo, sin embargo, regularmente emiten vapor de agua, dióxido de carbono, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno y cloruro de hidrógeno. Otros gases que se pueden encontrar, pero en menor medida son el disulfuro de carbono, sulfuro de carbonilo y fluoruro de hidrógeno. Además, la emisión de gases de dióxido de carbono y azufre ayuda a predecir si existe una posible erupción inminente [17].

Así mismo, los gases volcánicos pueden producir lluvia ácida mediante la reacción del trióxido de azufre con el agua. Esto sucede cuando emiten cantidades elevadas de SO_2 , este se oxida con el aire formando SO_3 mediante dos procesos, uno por el cual se combina el dióxido de azufre con el ozono atmosférico y otro cuando el dióxido de azufre se combina con el oxígeno. Luego el trióxido de azufre reacciona con el agua de las nubes, generando ácido sulfúrico que precipita en forma de lluvia [18]. El agua de lluvia regularmente posee un pH de 5,6, lo que se puede considerar ligeramente ácido, cuando posee un valor de pH menor a 5, se considera lluvia ácida. La acidez del agua depende de la interacción de las sustancias alcalinas y ácidas [19].

El agua de lluvia no solo puede estar contaminada con ácido sulfúrico, también se pueden encontrar contaminantes como metales pesados, iones, partículas en suspensión y microorganismos. Los contaminantes pueden ser aportados antropológicamente o de forma natural por medio de la actividad volcánica. Dentro de los contaminantes presentes en el agua de lluvia podemos encontrar óxidos de nitrato y azufre, metales pesados como cadmio, cobre, hierro, arsénico, cromo, vanadio, plomo, zinc, manganeso, hierro, mercurio, aluminio, rodio, paladio, rubidio y níquel. Por esta razón es indispensable realizar análisis en caso que el agua sea destinada para consumo [20].

En las montañas, el agua puede estar contaminada con iones provenientes de la actividad volcánica y antropogénica. Sin embargo, al encontrarse lejos de la ciudad, el agua pluvial no posee cantidades significativas de metales pesados, pero contiene NO_x , SO_2 , NH_3 , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ [21]. Para analizar los iones presentes en agua o aire, una de las técnicas más comunes es la cromatografía iónica, ya que, permite la determinación simultánea de iones como F^- , ClO_2^- , BrO_3^- , Cl^- , NO_2^- , ClO_3^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} . La cromatografía de intercambio iónico con supresión utiliza un sistema supresor para detectar iones a partir de la conductividad eléctrica de los mismos. [22].

La presente investigación contempló el monitoreo de la concentración de dióxido de azufre en el aire, así como de algunos aniones y características fisicoquímicas en el agua de lluvia en el Volcán Irazú, con miras a determinar una eventual influencia del Volcán Turrialba, debido al traslado de material volcánico por vía aérea, dado por el marcado efecto de los vientos entre los dos macizos que ha llevado a estudios previos a intuir tal afectación. A su vez, se buscó determinar la posibilidad de emplear el agua de lluvia, con o sin un tratamiento previo, para fines domésticos en los quehaceres de los guardaparques del Volcán Irazú, según los resultados de la caracterización efectuada a las muestras del agua de lluvia. Esto es de suma importancia debido a que, el Volcán Irazú es un sector turístico del país que recibe una gran cantidad de personas, por lo que, es necesario efectuar análisis de agua y aire periódicamente para asegurar el bienestar de los visitantes y de los trabajadores del sitio. Además, el agua de

lluvia es utilizada para las baterías de los baños y para uso doméstico de los guardaparques, por lo que, es necesario efectuar un análisis de los iones presentes en el agua de lluvia para garantizar la seguridad de su consumo.

Metodología

Con respecto al muestreo previo a la obtención de datos, todos los puntos de muestreo se establecieron fuera del alcance de elementos que pudieran alterar los datos, como árboles, cables, vegetación y animales. Los cuatro puntos de muestreo para la obtención de agua pluvial se encuentran estratégicamente ubicados en zonas cercanas donde se obtiene agua para uso doméstico, así como en la zona cercana al volcán para observar la afectación del mismo. De igual forma, los puntos para el muestreo de gases se encuentran de forma estratégica, sin embargo, estos se establecieron de acuerdo a la posible afectación a los visitantes del volcán.

De esta forma, los puntos de muestreo 1, 3 y 4 para la recolección de agua pluvial se encuentran cercanos a las tomas de agua para uso doméstico, mientras que el punto de muestreo 2 se encuentra dispuesto para observar la influencia del volcán en la zona más cercana posible.

Asimismo, los puntos 1 y 2 para la recolección de SO_2 se encuentran en dos zonas donde hay un tránsito de personas bastante importante. Tanto en la cafetería y el mirador es donde se encuentra el cúmulo más importante de personas, por lo que, se escogieron específicamente estos dos puntos para determinar si existe una afectación significativa sobre los visitantes y trabajadores del lugar.

Por consiguiente, previo a los muestreos y con miras a garantizar la idoneidad y la confiabilidad del método analítico empleado por cromatografía de iones, en vista de la intervención por primera vez del analista de laboratorio que realizó las pruebas de laboratorio; se verificaron los parámetros de desempeño analítico del método aportado por Thermo Scientific, modificado y validado previamente por el OVSICORI, lugar donde se realizaron las pruebas pertinentes de esta investigación. La verificación contempló los siguientes parámetros de desempeño: precisión intermedia, linealidad, repetibilidad, límite de detección y de cuantificación.

- *Repetibilidad*: se evaluó a través de siete mediciones consecutivas de la misma muestra. Se cuantificó el desvío relativo estándar (DSR), el cual debe ser menor a 1,5 % y el coeficiente de variación (CV) debe ser menor a 2 % para asegurar repetibilidad.
- *Precisión intermedia*: se cuantificó una muestra definida en el mismo equipo, en días diferentes, con el mismo método y el mismo analista. La condición que varía en este caso es el día de análisis, por cuestiones de logística no se pudo cambiar otra condición del análisis. El coeficiente de variación debe ser menor a 2,5 % y el desvío relativo promedio menor a 2,5 %.
- *Linealidad*: se confeccionaron tres curvas de calibración con al menos cinco puntos de concentraciones diferentes, luego se graficó tomando en el eje x las concentraciones de los patrones y en el eje y los resultados obtenidos. El valor obtenido de r^2 debe ser mayor a 0,995 para que posea validez estadística. Se verificó que se cumpla la ecuación de la recta mediante la fórmula $y = mx + b$. Por último, se presentan los resultados de regresión lineal que contenga coeficientes de variación, de determinación, intersección con el eje, pendiente de la recta y cálculo de residuales.
- *Límite de detección y cuantificación*: se cuantificaron mediante el uso de un modelo matemático de ajuste aplicando mínimos cuadrados a las curvas de calibración empleadas para la determinación de linealidad. El límite de detección se define mediante

la fórmula $3 \cdot S_B/m$, donde S_B es la desviación estándar de las áreas de los blancos y m es la pendiente de la recta. El límite de cuantificación se calcula de la misma forma, pero con la fórmula $10 \cdot S_B/m$.

La toma de muestras de aire se realizó por medio de recolectores que absorben una cantidad de aire específico y lo transportan a través de una disolución diluida de peróxido de hidrógeno en medio ácido. Se cuantificó la cantidad de dióxido de azufre mediante un cromatógrafo de iones marca Dionex. Las condiciones experimentales del muestreo fueron: velocidad del flujo 750 l/h, tiempo de recolección 3 h a 4 h, temperatura ambiental, alícuota del burbujeador 25 ml.

Para que el muestreo de lluvia se efectúe de forma adecuada, se requiere que las muestras representen la precipitación natural integrada en la ventana de tiempo de interés. También, el equipo de muestreo debe estar adecuado a la zona, colocarse en un campo abierto lejos de la influencia de edificios. Además, en zonas abiertas el dispositivo se debe colocar a 30 cm sobre el suelo para reducir el efecto del viento, en zonas con estructuras o con mucha vegetación, el dispositivo se debe colocar de 100 cm a 120 cm sobre el suelo para reducir el efecto de la vegetación o las estructuras. El instrumento utilizado es un pluviómetro que capta el agua de lluvia a través de un cono y se deposita en un recipiente adecuado [23].

En los cuadros 1, 2 y 3 se muestran los datos obtenidos en el sitio de muestreo por medio de los equipos recolectores y del GPS. Además, los sitios de muestreo específicos donde se recolectaron las muestras.

Cuadro 1. Datos *in situ* de los dos puntos del primer muestreo de SO_2

	Punto de muestreo 1: Cafetería	Punto de muestreo 2: Mirador
Fecha del muestreo	17/09/2019	17/09/2019
Altitud	3337 m	3334 m
Coordenadas	N: 09°58'40,8" O: 83°50'42,0"	N: 09°58'47,3" O: 83°50'51,5"
Presión atmosférica promedio	513 mmHg	518 mmHg
Temperatura promedio	15,0 °C	26,0 °C
Humedad relativa	80 %	60 %
Viento	(12 a 28) km/h al noroeste	> 12 km/h al norte
Flujo	750 ml/min	750 ml/min
Tiempo del muestreo	4 h	4 h
Volumen de aire aspirado	115,599 l	119,498 l

Cuadro 2. Datos *in situ* de los dos puntos del segundo muestreo de SO₂

	Punto de muestreo 1: Cafetería	Punto de muestreo 2: Mirador
Fecha del muestreo	26/10/2019	26/10/2019
Altitud	3337 m	3334 m
Coordenadas	N: 09°58'40,8" O: 83°50'42,0"	N: 09°58'47,3" O: 83°50'51,5"
Presión atmosférica promedio	517 mmHg	515 mmHg
Temperatura promedio	15,5 °C	16,0 °C
Humedad relativa	70 %	60 %
Viento	> 12 km/h al este	> 12 km/h al este
Flujo	750 ml/min	750 ml/min
Tiempo del muestreo	3 h	3 h
Volumen de aire aspirado	97,060 l	100,663 l

Cuadro 3. Datos *in situ* de los cuatro puntos del primer y segundo muestreo de agua de lluvia.

Primer muestreo				
	Punto 1: Letrero de la entrada	Punto 2: Mirador	Punto 3: División entre cráteres	Punto 4: Prusia
Coordenadas	N:09°58'42,6" O:83°50'43,5"	N:09°58'47,6" O:83°50'51,5"	N:09°58'50,2" O:83°50'51,6"	N:09°57'23,1" O:83°52'42"
Altura	3349 m	3334 m	3303 m	2736 m
Segundo muestreo				
	Punto 1: Letrero de la entrada	Punto 2: Mirador	Punto 3: División entre cráteres	Punto 4: Prusia
Coordenadas	N:09°58'42,6" O:83°50'43,5"	N:09°58'47,6" O:83°50'51,5"	N:09°58'50,2" O:83°50'51,6"	N:09°57'23,1" O:83°52'42"
Altura	3349 m	3334 m	3303 m	2736 m

La recolección del agua de lluvia se llevó a cabo mediante un sistema constituido por una botella de polietileno ámbar de 1 litro y un embudo de 7,7 cm de diámetro de polietileno de espiga corta. El embudo se sujetó a la botella con un tapón de hule perforado. En el extremo inferior del embudo se colocó un cedazo de polietileno para evitar la entrada de partículas grandes. Las botellas recolectoras del agua de lluvia se colocaron en un soporte de madera, a un metro de altura con respecto al suelo, para prevenir la contaminación de las muestras por

salpicaduras. Luego se midió el pH por medio de un pH-metro marca Oakton, calibrado con anterioridad, y los iones fluoruro, cloruro, bromuro, fosfato y sulfato, se cuantificaron mediante un cromatógrafo de iones marca DIONEX. Para introducir las muestras en el equipo se filtraron a través de una jeringa con un filtro de 0,5 µm.

Se realizaron curvas de calibración para cada ión analizado y se interpoló el resultado. Las condiciones cromatográficas fueron: columna Dionex IonPac AS9-HC, detector de conductividad eléctrica, flujo 0,250 ml/min, fase móvil NaHCO₃/ Na₂CO₃, volumen de inyección 40 µl.

Por último, cabe destacar que las muestras de agua de lluvia tomadas en los diferentes puntos fueron analizadas para determinar si es posible una eventual potabilización del agua para usos domésticos y coadyuvar al uso racional del recurso hídrico en la zona.

Con respecto al análisis de los datos se emplearon pruebas estadísticas descriptivas e inferenciales con el fin de determinar el cumplimiento de la evaluación de parámetros analíticos del método empleado, así como en el análisis de los resultados para las pruebas específicas aplicadas a las muestras recolectadas.

Resultados

Con respecto a la verificación del método analítico empleado, para las pruebas de linealidad de cada analito se obtuvieron coeficientes de determinación (r^2) por arriba de lo esperado (0,995). Además, para verificar la homogeneidad de varianzas en la linealidad se realizó un análisis estadístico de homocedasticidad o prueba C de Cochran que permitió medir si se cumple la homogeneidad de las varianzas en las curvas de calibración para cada anión, siendo estas positivas con C calculada menor a la C teórica, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, excepto para el caso del sulfato.

En la prueba de homocedasticidad para el sulfato se presenta rechazo de la hipótesis nula, por lo cual se acude a aplicar la prueba de Levene (figura 1) para demostrar la homogeneidad de varianzas en la linealidad de las curvas de calibración del sulfato, y la prueba cumple con lo esperado.

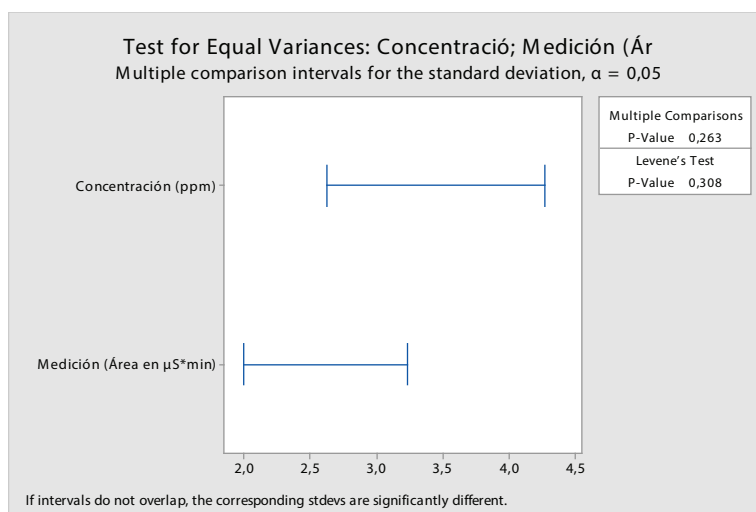


Figura 1. Prueba de Levene para la linealidad de las curvas de calibración del sulfato.

En el cuadro 4, se presentan los datos correspondientes a límite de cuantificación y límite de detección para cada anión determinado.

Cuadro 4. Resultados de los límites de cuantificación y detección por método empleado en cada anión determinado mediante la aplicación de mínimos cuadrados.

Anión	Parámetro	Valor
Fluoruro	Límite de detección	0,18
	Límite de cuantificación	0,61
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,09
	Pendiente (m)	1,4626
Cloruro	Límite de detección	0,22
	Límite de cuantificación	0,72
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,09
	Pendiente (m)	1,2643
Bromuro	Límite de detección	0,20
	Límite de cuantificación	0,65
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,03
	Pendiente (m)	0,4649
Fosfato	Límite de detección	0,21
	Límite de cuantificación	0,72
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,02
	Pendiente (m)	0,2703
Sulfato	Límite de detección	0,20
	Límite de cuantificación	0,68
	Desviación estándar del intercepto (S_b)	0,05
	Pendiente (m)	0,7567

Asimismo, se determinó la repetibilidad y precisión intermedia del método, los cuales poseen un límite de aceptación de 10 % y 5 % respectivamente, según los parámetros establecidos por el laboratorio. Los resultados de la repetibilidad se muestran en el cuadro 5 y la precisión intermedia en el cuadro 6.

Cuadro 5. Resultados del parámetro de repetibilidad para el método de cuantificación de fluoruro, cloruro y sulfato.

Anión	Concentración (mg/l)	Promedio	Desviación	DSR%	Aceptación
Fluoruro (±0,02)	0,56	0,56	0,0085	1,5	10 %
	0,55				
	0,56				
	0,55				
	0,55				
	0,57				
	0,57				
Cloruro (±0,02)	3,71	3,73	0,0182	0,5	10 %
	3,73				
	3,73				
	3,75				
	3,75				
	3,71				
	3,72				
Sulfato (±0,1)	6,56	6,59	0,0566	0,9	10 %
	6,58				
	6,63				
	6,62				
	6,48				
	6,64				
	6,62				

Cuadro 6. Resultados del parámetro de precisión intermedia para el método de cuantificación de fluoruro, cloruro y sulfato.

Anión	Concentración mg/l (día 1)	Concentración mg/l (día 2)	Promedio	Desviación	DSR%	Aceptación
Fluoruro (±0,02)	0,41	0,41	0,41	0,0045	1,1	5 %
	0,41	0,40				
	0,41	0,41				
Cloruro (±0,02)	1,28	1,36	1,32	0,0408	3,1	5 %
	1,30	1,36				
	1,28	1,35				
Sulfato (±0,1)	2,37	2,53	2,44	0,0546	2,2	5 %
	2,43	2,41				
	2,42	2,46				

Los resultados de dióxido de azufre en los dos muestreos realizados se presentan en el cuadro 7. Para la obtener la concentración de dióxido de azufre se cuantifica primeramente el sulfato, luego se convierte a dióxido de azufre por un factor de conversión.

Cuadro 7. Concentración de dióxido de azufre obtenida en los dos muestreos.

Primer muestreo	Segundo muestreo
Concentración promedio de SO ₂ ($\pm 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración promedio de SO ₂ ($\pm 1 \cdot 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$)
Punto de muestreo 1. Cafetería	
0,001041	0,001424
Punto de muestreo 2. Mirador	
0,001149	0,0007134

El pH de las muestras de agua de lluvia en ambos muestreos se presenta en el cuadro 8. Las muestras fueron medidas en el laboratorio luego de ser recolectadas.

Cuadro 8. Resultados del pH de las muestras de agua de lluvia.

Punto de Muestreo	Primer muestreo	Segundo muestreo
	Lectura de pH ($\pm 0,01$)	
1. Entrada	4,20	4,20
2. Mirador	4,30	3,55
3. División de cráteres	3,74	-
4. Prusia	4,81	5,33

También, los resultados de las concentraciones de aniones obtenidos de las muestras de agua de lluvia; se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Resultados obtenidos de la concentración de aniones en las muestras de agua de lluvia recolectas.

Analito	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
	Concentración (mg/l)	
Punto de muestreo 1. Entrada		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,42	0,56
Cloruro ($\pm 0,02$)	1,08	3,72
Bromuro ($\pm 0,02$)	No cuantificable	No cuantificable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No cuantificable	No cuantificable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,2	6,6
Punto de muestreo 2. Mirador		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,44	0,66
Cloruro ($\pm 0,02$)	0,96	2,73
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,5	9,3

Analito	Primer Muestreo	Segundo Muestreo
	Concentración (mg/l)	
Punto de muestreo 3. División de cráteres		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,45	No aplica
Cloruro ($\pm 0,02$)	1,29	No aplica
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No aplica
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No aplica
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,4	No aplica
Punto de muestreo 4. Prusia		
Fluoruro ($\pm 0,02$)	0,41	0,45
Cloruro ($\pm 0,02$)	0,59	1,66
Bromuro ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Fosfato ($\pm 0,02$)	No detectable	No detectable
Sulfato ($\pm 0,1$)	2,0	3,9

Discusión

En primera instancia, para efectuar la cuantificación de las muestras de manera confiable, se verificaron los parámetros de desempeño analítico del método. La linealidad es un parámetro que se debe tomar en cuenta debido a que, verifica si el método posee validez estadística para cuantificar los analitos en un rango de concentraciones. Por lo que, el coeficiente de correlación lineal no debe ser menor a 0,995 para que sea válido estadísticamente. Así mismo, existen herramientas que permiten evaluar la linealidad global de varias curvas de calibración, como lo es la prueba de homocedasticidad o prueba C de Cochran [24].

Todas las curvas de calibración de los aniones analizados poseen un coeficiente de correlación (r^2) mayor a 0,995, por lo que, el método es lineal para el rango de concentración de 0,6 mg/l a 10,25 mg/l. Además, se evaluó la linealidad mediante la prueba de homocedasticidad o prueba C de Cochran, en la cual, se evalúa si se cumple la homogeneidad de las varianzas en las curvas de calibración, para el fluoruro, cloruro, bromuro y fosfato. En cuanto al sulfato, se efectúa una prueba de Levene, la cual indica que no existe diferencia significativa entre las desviaciones estándar. Asimismo, se determinó la repetibilidad y la precisión intermedia para el fluoruro, el cloruro y el sulfato, esto debido a que las muestras poseen una muy baja concentración de bromuro y de fosfato.

En el cuadro 5 se aprecia que, los resultados de las muestras poseen un desvío estándar relativo menor al de la especificación para el fluoruro, el cloruro y el sulfato, por lo que, se cumple con los criterios de aceptación del laboratorio. De igual forma, en el cuadro 6, se observan los resultados obtenidos para la evaluación de la precisión intermedia, los cuales indican un DSR% menor al establecido por los criterios de aceptación del laboratorio para el fluoruro, cloruro y sulfato, por lo que, se puede decir que el método es preciso para la cuantificación de los aniones.

Ya propiamente en cuanto a los muestreos realizados, en el cuadro 7 se observan los resultados obtenidos de la concentración de dióxido de azufre. Según García *et al* [25] el dióxido de azufre posee implicaciones sobre la salud cuando se encuentra en concentraciones desde los 0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o más. Los resultados de la concentración del dióxido de azufre son inferiores a 0,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que, el aire del Volcán Irazú, para los días de muestreo, se encuentra a niveles aptos de dióxido de azufre para los trabajadores y los visitantes. Los gases volcánicos se clasifican en irritantes y no irritantes según los efectos a la salud. Los gases irritantes

son los que pueden provocar sus efectos a muy baja concentración y a mayor distancia del volcán. Ejercen su efecto en el sistema respiratorio y mucosas, causando irritación en los ojos, lagrimeo, estornudos, entre otros. Entre los gases irritantes se encuentran el dióxido de azufre, el sulfuro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y el fluoruro de hidrógeno. Mientras que los gases no irritantes o asfixiantes no provocan lesiones a nivel local, son absorbidos en sangre, desplazando al oxígeno del aire inspirado. Los gases asfixiantes más representativos son el dióxido de carbono y el nitrógeno [16].

Los resultados del primer muestreo indican una mayor concentración de dióxido de azufre en el mirador del parque, Esto debido a que, cuando se comenzó la recolección del segundo muestreo hubo precipitación, afectando mayoritariamente al recolector del mirador. El dióxido de azufre es altamente soluble en agua, por lo que, al existir precipitación, este gas se disuelve y el recolector no puede aspirarlo [26].

Otro aspecto importante para recalcar es la concentración de SO_2 en el segundo muestreo, el cual en el primer punto se aprecia un aumento, en el primer muestreo, el viento se dirige hacia al este como se observa en el cuadro 2, lo que infiere que hubo poca influencia del Volcán Turrialba, el cual se encuentra al este del Volcán Irazú y tiene una actividad mayor. En el mirador no se observa el incremento debido a la precipitación cuando se efectuaba el muestreo.

Con respecto a los análisis de agua de lluvia, en el cuadro 8 se observan los resultados de pH para ambos muestreos realizados. Se puede apreciar que los valores, en los puntos del volcán, se encuentran por debajo de 5, por lo que, se considera ácida. Esto se puede deber mayoritariamente a la influencia del Volcán Turrialba, el cual, produce erupciones frecuentes de ceniza que llegan al Volcán Irazú a través del viento, y cuando precipita, los componentes de la ceniza, incluyendo al dióxido de azufre y los aerosoles ácidos, se disuelven y disminuyen el pH. También, se aprecian dos valores de pH menores a 4, esto indica la presencia de lluvia ácida en las cercanías del volcán. En cuanto al sector de Prusia, el pH es ligeramente ácido, sin embargo, se mantiene dentro de los valores aceptables. Se aprecia que existe una relación del pH con la cercanía al cráter del volcán en el segundo muestreo, esto porque el mirador presenta un valor mucho más bajo que el de la entrada y Prusia, así mismo, en el primer muestreo la división de cráteres presenta el valor más bajo. Según Solano [27] el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica ha informado de actividad del Volcán Turrialba, que arroja ceniza y material en el Valle Central, y debido a las condiciones meteorológicas, la mayor parte del material ha caído entre la región del Turrialba y del Irazú.

En cuanto al análisis de los aniones, en el cuadro 9 se observan los resultados obtenidos donde las concentraciones de fluoruro, cloruro y sulfato en el primer y segundo muestreo, tienden a ser mayores conforme se acerca al cráter del volcán, esto es un comportamiento normal, sin embargo, las concentraciones son menores a 0,7 mg/l para el fluoruro y 250 mg/l para el cloruro y sulfato, por lo que, no representan una cantidad perjudicial para la salud [16].

La concentración de iones en agua genera efectos nocivos en los ecosistemas, debido a que penetran los suelos y provocan la pérdida de nutrientes producto de un intercambio de cationes básicos con el suelo y la liberación de cationes tóxicos para las plantas, inhibiendo la captación de los nutrientes. Así mismo, la acidificación del agua de lluvia a través de iones propicia la disolución de metales pesados, además, la lluvia ácida posee una gran cantidad de nitratos y amonio que alteran el ciclo de los nutrientes en la vegetación. Aparte de afectar a los ecosistemas, la lluvia ácida corroe estructuras metálicas y daña la infraestructura de casas y edificios [14].

Por otro lado, la ley de aguas de consumo en Costa Rica indica los valores máximos admisibles de las sustancias que pueden estar presentes en el agua. El valor máximo de pH es de 8,5, los cloruros 250 mg/l, sulfatos 250 mg/l, nitratos 50 mg/l y fluoruro 0,7 mg/l a una temperatura

entre 25 °C y 30 °C, y 0,15 mg/l a una temperatura entre 8 °C y 12 °C. El cumplimiento de estos parámetros es de suma importancia debido a que se puede incurrir en una falta a la ley, además puede representar un riesgo a la salud humana y los sistemas de abastecimiento de agua [16].

También, se puede apreciar que, el primer muestreo de agua posee una menor concentración en todos los aniones determinados, esto se debe a la dirección del viento, como se aprecia en los cuadros 3 y 4, en el primer muestreo el viento se dirigía hacia el norte, por lo que, la influencia del Volcán Turrialba es mínima, durante el transcurso del mes el viento cambia de dirección, y en el segundo muestreo se dirigía hacia el este y se mantuvo durante la semana, incrementando la concentración de aniones en el agua de lluvia por la influencia del Turrialba.

Con base en los resultados obtenidos en el cuadro 8 y 9, el agua de lluvia de los puntos 1, 2 y 3, se encuentra con una acidez alta, y baja concentración de aniones, por lo que, se puede efectuar un tratamiento que disminuya la acidez, y realizar la potabilización para utilizarla como agua de consumo. De igual forma, el punto 4 de muestreo presenta valores bajos de aniones, sin embargo, la acidez no es alta en comparación con los otros puntos, por lo que, solo se requiere potabilización del agua para su eventual consumo.

Conclusiones

- No se puede inferir que el Volcán Irazú se encuentra inactivo, sin embargo, debido a los resultados obtenidos, la actividad volcánica se encuentra a un nivel bajo al momento de efectuados los muestreos.
- Es conveniente efectuar monitoreos sostenidos en el tiempo, para determinar con mayor certeza si el Volcán Irazú posee alguna actividad volcánica, o si principalmente se ve afectado por la influencia del Volcán Turrialba; con esto además, se puede brindar mayor seguridad a los visitantes y trabajadores del lugar.
- Con base en lo obtenido, se deduce que es posible utilizar el agua de lluvia del sector de Prusia para consumo siempre y cuando se le realice un tratamiento para potabilizarla, de acuerdo a la legislación costarricense, además, es apta para el uso en baterías de baño y lavado de las instalaciones por baja presencia de sulfatos.
- El agua de lluvia en las cercanías del cráter fue la más ácida de los muestreos, por lo que, para utilizarla para uso humano, se debe efectuar un tratamiento que neutralice la acidez y disminuya la cantidad de los aniones presentes, y de esta forma, se cumpla con los valores máximos admisibles para las aguas de consumo en Costa Rica
- Se recomienda realizar más muestreos de SO₂ y de agua de lluvia en la zona alrededor del Volcán Irazú. Además, de incluir más parámetros de medición para el agua de lluvia, tales como los metales calcio, sodio, potasio, hierro, entre otros.

Referencias

- [1] A. Fernández. "Cómo contaminan los gases de azufre". Consumer. 2009. Disponible en <https://www.consumer.es/medio-ambiente/como-contaminan-los-gases-de-azufre.html>
- [2] Organización Mundial de la Salud, "Guías para la calidad del agua potable". Primer apéndice a la tercera edición. OMS. Vol 1. 2006. Disponible en https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_low-res.pdf
- [3] Organización Mundial de la Salud, "Sulfate in drinking-water". Documento de referencia para la elaboración de las Guías de la OMS para la calidad del agua potable. Ginebra (Suiza), OMS. 2003. Disponible en http://www.bvsde.paho.org/CD-GDWQ/docs_quimicos/Sulfato.pdf

- [4] G. Garzón, C. Santacoloma, B. Galle y E. Solarte, "Estrategias De Medición De Gases Volcánicos En Colombia Utilizando Sensores Ópticos Remotos". BISTUA: Colombia. 2008. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/903/90312177005.pdf>
- [5] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Monitoreo de las Emisiones del Volcán Popocatepetl". SEMARNAT: México. 2013. Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/191433/2013_Extensi_n_de_la_cobertura.pdf
- [6] A. Castruccio y R. Rondanelli, "Estimación de la emisión de dióxido de azufre en penachos volcánicos mediante una cámara ultravioleta". Universidad de Chile. 2014. Disponible en http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117055/cf-geoffroy_cg.pdf?sequence=1
- [7] P. Ponce, "Estimación de las emisiones de dióxido de azufre - SO₂, asociadas con el crecimiento de un domo de lava en el volcán Galeras en 2008". Boletín de Geología, 39(1): 69-81. 2017.
- [8] F. Pérez, *et al.*, "Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México". Hidrobiología. 2003. Disponible en <https://pdfs.semanticscholar.org/02a5/fecea28eda1339731751069b3b6141057219.pdf>
- [9] L. Galicia, N. Molina, A. Oropeza, E. Gaona y L. Juárez, "Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México". Rev. Int. Contam. Ambie. México. 2011. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v27n4/v27n4a1.pdf>
- [10] D. Erazo, A. Londoño y B. Aristizábal, "Estudio del impacto de los fluidos volcánicos en el recurso hídrico de la cuenca del río Chinchiná". Gestión y Ambiente: Colombia. 2015. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/65496/1/50269-278702-1-PB.pdf>
- [11] X. Alvarado, "Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la fortuna de San Carlos". Revista Costarricense de Salud Pública. 2006. N°29. 25-34. Disponible en <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rcsp/v15n29/3318.pdf>
- [12] W. Beita, "Caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la cuenca del río Rincón en la Península de Osa, Puntarenas, Costa Rica". Universidad de Costa Rica. 2008. Disponible en <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/334/TFG%20%E2%80%9CCaracterizaci%C3%B3n%20fisicoqu%C3%ADmica%20de%20las%20aguas%20superficiales%20de%20la%20cuenca%20del%20r%C3%ADo%20Rinc%C3%B3n%20en%20la%20Pen%C3%ADnsula%20de%20Osa%2C%20Puntarenas%2C%20Costa%20Rica%E2%80%9D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] J. Herrera y S. Rodríguez, "Determinación de la concentración de aniones en muestras de precipitación total colectadas en San José, Costa Rica". Primera parte. Universidad Nacional: Costa Rica. 2008. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v25n2/v25n2a1.pdf>
- [14] K. Bolaños, J. Sibaja, J. Mora, D. Umaña, M. Cambroner, L. Sandoval y M. Martínez, "Estudio preliminar sobre la composición atmosférica del agua de lluvia en y los alrededores del Parque Nacional del Volcán Poás". 2019. Disponible en <http://www.eventos.academicos.una.ac.cr/index.php/cicen/ICICEN/paper/viewFile/142/57>
- [15] J. Sibaja, K. Bolaños, J. Mora, D. Umaña, M. Cambroner, L. Sandoval, E. Ortiz, y M. Martínez, "Medición y modelaje de la concentración del dióxido de azufre en los alrededores del volcán Poás durante el 2017, para la apertura del Parque Nacional". Costa Rica. 2019. Disponible en <http://www.eventos.academicos.una.ac.cr/index.php/cicen/ICICEN/paper/viewFile/70/31>
- [16] Ministerio de Salud. "Reglamento para la calidad del agua potable". Costa Rica. 2005. Disponible en https://www.ministeriodesalud.go.cr/gestores_en_salud/comision_agua_segura/legislacion/CAS_reglamento_calidad_agua_potable.pdf
- [17] A. Brunning, "Infografías Periódicas: Lava y Gases Volcánicos". Chemical & Engineering News. 2018. Disponible en <https://cen.acs.org/physical-chemistry/geochemistry/es-Infografias-Periodicas-Lava-Y-gases-volcanicos/96/i28>
- [18] F. Montalvo y D. Escobar, "Lluvia Ácida de Origen Volcánico". Servicio Nacional de Estudios Territoriales. sf. Disponible en http://cidbimena.desastres.hn/filemgmt/files/lluvia_acida.pdf
- [19] J. Seinfeld y S. Pandis, "Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change". Segunda Edición; John Wiley & Sons, Inc., EEUU. 2006.
- [20] L. Frías, "El agua de lluvia no sirve para beber". Gaceta UNAM: México. 2018. Disponible en <http://www.gaceta.unam.mx/el-agua-de-lluvia-no-sirve-para-beber/>
- [21] K. Ali, G. Momin, S. Tiwari, P. Safai, D. Chate y P. Rao, "Fog and precipitation chemistry at Delhi, North India". Atmospheric Environmental. 2003.

- [22] L. Margarit, "Determinación de halógenos y azufre en residuos orgánicos". Desarrollo de métodos y aplicación a muestras de residuos incinerables. Universitat Ramon Llull: España. 2015. Disponible en https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/360594/Tesi_Lourdes_Margarit.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [23] OIEA/GNIP, "Guía para el muestreo de la precipitación OIEA/GNIP". OIEA. 2014. Disponible en http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_es_hq.pdf
- [24] EURACHEM, "Métodos Analíticos Adecuados a su propósito". Guía de laboratorio para la Validación de Métodos y Temas Relacionados. México: Centro Nacional de Metrología. 2005.
- [25] M. García, H. Ramírez, H. Ulloa, O. García, A. Meulenert y J. Alcalá, "Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H⁺, SO₄⁻² y NO₃⁻ durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México". Universidad de Guadalajara: México. 2013. Disponible en <https://scielo.conicyt.cl/pdf/rcher/v29n2/art04.pdf>
- [26] EPA, "¿Qué causa la lluvia ácida?" United States Environmental Protection Agency. 2019. Disponible en https://www3.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish/whatcauses.html
- [27] H. Solano, "Volcán Turrialba lanzó ceniza al Valle Central en dos erupciones". La Nación: Costa Rica. 2017. Disponible en <https://www.nacion.com/sucesos/desastres/volcan-turrialba-lanzo-ceniza-fina-al-valle-central-en-dos-erupciones/XENZVBTLPFCTZEQ3EAYU3RFBUA/story/>