

Estudio preliminar con respecto a los efectos en la salud de trabajadores y su relación con la exposición a emisiones gaseosas volcánicas. Un caso de estudio en dos volcanes activos de Costa Rica

Preliminary study on health effects and their relation to volcanic gas emissions exposure. A case study of two active volcanoes in Costa Rica

Estudo preliminar sobre os efeitos na saúde dos trabalhadores e sua relação com a exposição a emissões gasosas vulcânicas.

Um estudo de caso de dois vulcões ativos na Costa Rica

Erick Ortiz Apuy^{1,*}, José Carlos Mora Barrantes², Jose Pablo Sibaja Brenes²


Resumen

[Objetivo] El objetivo del presente trabajo de investigación fue generar un diagnóstico preliminar entre las emisiones gaseosas volcánicas y los efectos en la salud presentes en los funcionarios del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) de los volcanes Poás y Turrialba de Costa Rica. **[Metodología]** Se evaluó la calidad del aire ambiental por presencia de emisiones gaseosas ($\text{SO}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$, $\text{HCl}_{(g)}$, $\text{HNO}_{3(ac)}$ y $\text{HF}_{(g)}$), para lo cual se realizaron muestreos en 7 puntos estratégicos durante 7 meses. Los análisis se realizaron mediante diferentes técnicas analíticas (cromatografía de iones, espectrofotometría, medidores portátiles). Paralelamente, se realizaron entrevistas a una muestra compuesta por 16 funcionarios de los sitios de estudios y se analizaron sus expedientes médicos, con el fin de generar una relación preliminar entre la exposición a las emisiones gaseosas y las patologías reportadas. **[Resultados]** Los principales resultados (contaminantes por encima del límite de detección) reportados para los dos parques nacionales indican que el valor más elevado del presente estudio corresponde al SO_2 (media de 3 h) y proviene del volcán Poás ($1,90 \pm 0,11$) mg/m^3 . Por su parte, la mayor concentración de SO_2 en Turrialba corresponde a ($0,40 \pm 0,04$) mg/m^3 durante el mismo periodo. Con respecto al proceso de evaluación de salud de los trabajadores, las patologías más frecuentemente reportadas y que impactan la salud de la población de estudio corresponden a irritación de mucosas-ojos ($n = 9$), dolores de cabeza ($n = 8$) y fatiga ($n = 8$). **[Conclusión]** Los resultados obtenidos producto de las emisiones gaseosas reportadas y su relación con las patologías indicadas por parte de los trabajadores y de los expedientes médicos son una línea base para futuros estudios de investigación

*Autor de correspondencia

Erick Ortiz Apuy, ✉ eortizap@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-6387-0634>

José Carlos Mora Barrantes, ✉ jose.mora.barrantes@una.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>

Jose Pablo Sibaja Brenes, ✉ jose.sibaja.brenes@una.cr,  <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>

1 Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica

2 Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA), Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica



en el tema. Se recomienda una mayor cantidad de mediciones en periodos de tiempos más extensos. Paralelamente, es necesario el uso de encuestas y la realización de controles médicos que incluyan exámenes en especímenes como sangre, orina, cabello, saliva, así como el uso de indicadores biológicos y químicos que permitan relacionar de forma más directa una patología con determinado contaminante químico.

Palabras claves: Volcanes; contaminantes atmosféricos; salud; emisiones; gases; tóxicos; Costa Rica.

Abstract

[Objective] The objective of this research was to carry out a preliminary diagnosis of the relationship between volcanic gaseous emissions and health effects present among workers of the National System of Conservation Areas (SINAC) of the Poás and Turrialba volcanoes of Costa Rica. **[Methodology]** Ambient air quality was measured by the presence of gaseous emissions ($\text{SO}_2(\text{g})$, $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$, $\text{HCl}(\text{g})$, $\text{HNO}_3(\text{ac})$ and $\text{HF}(\text{g})$), with sampling carried out in 7 strategic points during 7 months. Analyses were performed using different analytical techniques (ion chromatography, spectrophotometry, portable meters). At the same time, interviews were conducted with a sample consisting of 16 park rangers from the study sites, and their medical records were analyzed to detect a preliminary relationship between exposure to gaseous emissions and reported pathologies. **[Results]** The principal results (pollutants above the detection limit) reported for the two national parks indicated that the highest value in this study was that of SO_2 (average of 3 h) in the Poás Volcano (1.90 ± 0.11) mg/m^3 . The highest concentration of SO_2 in Turrialba was (0.40 ± 0.04) mg/m^3 during the same period. During the evaluation of park rangers' health, it was found that the most frequently reported pathologies that impact health in the study population were irritation of the mucous membranes-eyes ($n = 9$), headaches ($n = 8$), and fatigue ($n = 8$). **[Conclusion]** The results obtained for the gaseous emissions and their possible relationship with pathologies and medical records indicated by park rangers provide a baseline for future research on the subject. A greater number of measurements over longer periods of time is recommended. At the same time, it is necessary to use surveys and carry out medical controls that include tests on specimens such as blood, urine, hair, and saliva, as well as the use of biological and chemical indicators that allow a pathology to be more directly related to a specific chemical contaminant.

Key Words: Volcanoes; atmospheric pollutants; health; emissions; gases; toxins; Costa Rica.

Resumo

[Objetivo] O objetivo desta pesquisa foi gerar um diagnóstico preliminar entre as emissões gasosas vulcânicas e os efeitos sobre a saúde dos trabalhadores do Sistema Nacional de Áreas de Conservação (SINAC) dos vulcões Poás e Turrialba, na Costa Rica. **[Metodologia]** A qualidade do ar ambiente foi avaliada quanto à presença de emissões gasosas ($\text{SO}_2(\text{g})$, $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$, $\text{HCl}(\text{g})$, $\text{HNO}_3(\text{ac})$ e $\text{HF}(\text{g})$), para as quais a amostragem foi realizada em 7 pontos estratégicos durante 7 meses. As análises foram realizadas utilizando diferentes técnicas analíticas (cromatografia de íons, espectrofotometria, medidores portáteis). Em paralelo, foram realizadas entrevistas com uma amostra de 16 funcionários dos locais do estudo e seus registros médicos foram analisados a fim de gerar uma relação preliminar entre exposição a emissões gasosas e patologias relatadas. **[Resultados]** Os principais resultados (poluentes acima do limite de detecção) relatados para os dois parques nacionais indicam que o valor mais alto no presente estudo corresponde a SO_2 (média de 3 h) e vem do vulcão Poás ($1,90 \pm 0,11$) mg/m^3 . Por outro lado, a maior concentração de SO_2 em Turrialba



corresponde a $(0,40 \pm 0,04)$ mg/m³ durante o mesmo período. Com relação ao processo de avaliação da saúde dos trabalhadores, as patologias mais frequentemente relatadas com impacto na saúde da população estudada foram irritação da mucosa dos olhos ($n = 9$), dores de cabeça ($n = 8$) e fadiga ($n = 8$). **[Conclusão]** Os resultados obtidos com as emissões gasosas relatadas e sua relação com as patologias descritas pelos trabalhadores e os registros médicos são uma linha de base para futuros estudos de pesquisa sobre o assunto. Recomendam-se mais medidas em períodos de tempo mais longos. Em paralelo, é necessário utilizar pesquisas e controles médicos que incluam exames de amostras de sangue, urina, cabelos, saliva, assim como o uso de indicadores biológicos e químicos que permitam uma ligação mais direta entre uma patologia gerada por poluente químico específico.

Palavras-chave: Vulcões; poluentes atmosféricos; saúde; emissões; gases; tóxicos; Costa Rica.

Introducción

Costa Rica se sitúa sobre la interacción de tres grandes placas: Cocos, Caribe y Nazca, lo que provoca la actividad sísmica y volcánica periódica en la zona (Rodríguez *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 2007; González *et al.*, 2015), presenta, además, una actividad volcánica superficial distribuida en los conos de los volcanes denominados Poás, Turrialba y Rincón de la Vieja (CNE, 2019; SINAC, 2019).

Para antes del 2017, el Parque Nacional Volcán Poás (PNVP) es el parque nacional más visitado de Costa Rica, alcanzando su récord de visitas en el 2007 con una cifra de 307 000 turistas (Bermúdez *et al.*, 2008; Gobierno de Costa Rica, 2018; FUNDECOR, 2018). El PNVP tiene una extensión de 6 506 hectáreas (ha) constituidas por un terreno irregular con depresiones tipo caldera, conos volcánicos y cráteres. Su altura máxima es de 2 700 m s.n.m. y se ubica en la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica, a escasos 16 km de la ciudad de Alajuela (Bermúdez *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2015).

Por su parte, el volcán Turrialba tiene una extensión de 1 257 ha, estando compuesto por 3 focos eruptivos distribuidos a lo largo de un complejo elíptico con 125 m

de longitud y 700 m de ancho (Bermúdez *et al.*, 2008; Campion *et al.*, 2012). Tiene una altitud máxima de 3 340 m s.n.m. y se ubica al sureste de la Cordillera Volcánica Central, a 35 km al este de San José. El clima del lugar tiene una temperatura promedio de 16 °C y las precipitaciones fluctúan entre 3 000 mm y 4 000 mm anuales (Bermúdez *et al.*, 2008; Campion *et al.*, 2012).

Los volcanes (Poás y Turrialba), además de ser un centro de atracción turística, pueden interactuar con el ambiente de manera mecánica (lahares, expulsión de rocas o avalanchas de escombros), térmica (roca fundida o lava y gases a elevadas temperaturas), química ($\text{SO}_{2(g)}$, $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$, $\text{HCl}_{(g)}$, $\text{HF}_{(g)}$ y aerosoles), eléctrica (relámpagos) e incluso con radiación ionizante ($\text{Rn}_{(g)}$); cada una de estas interacciones, en ciertas condiciones, puede ser letal para la vida (Hansell *et al.*, 2006). Los volcanes pueden emitir en forma pasiva, pero persistente, gases, aerosoles y partículas al ambiente e influenciar la calidad de este mismo y la vida de las personas (Williams-Jones y Rymer, 2015).

Las emisiones gaseosas de los volcanes, por lo general, suelen tener una liberación de varias sustancias, los cuales han sido estudiadas por años, se identifican principalmente: vapor de agua ($\text{H}_2\text{O}_{(g)}$),



dióxido de azufre ($\text{SO}_{2(g)}$), dióxido de carbono ($\text{CO}_{2(g)}$), sulfuro de hidrógeno ($\text{H}_2\text{S}_{(g)}$), hidrógeno ($\text{H}_{2(g)}$), monóxido de carbono ($\text{CO}_{(g)}$) y pequeñas concentraciones de otros gases como radón (Rn) y helio (He) (Baxter y Horwell, 2015). Además, se ha registrado la emisión de especies fuertemente ácidas como el fluoruro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno ($\text{HF}_{(g)}$ y $\text{HCl}_{(g)}$, respectivamente) y aerosoles como ácido nítrico ($\text{HNO}_{3(ac)}$) y ácido sulfúrico ($\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)}$) (Williams-Jones y Rymer, 2015).

Las emisiones gaseosas de los volcanes generan efectos varios en la salud de las personas; no obstante, el impacto de las sustancias químicas sobre el ser humano depende de la naturaleza del compuesto químico, las concentraciones emitidas y la influencia del viento y las precipitaciones. Entre las principales emisiones gaseosas con efectos negativos en la salud de las personas están los siguientes gases: $\text{SO}_{2(g)}$ (asfixiante, muy tóxico), $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ (asfixiante, muy inflamable), $\text{HCl}_{(g)}$, $\text{HF}_{(g)}$ (corrosivo, muy irritante) y $\text{HNO}_{3(ac)}$ (tóxico, corrosivo) (Baxter y Horwell, 2015; Williams-Jones y Rymer, 2015).

La calidad del aire en zonas urbanas se puede ver afectada por emisiones gaseosas antropogénicas, así como de fuentes naturales como lo son los volcanes. En el caso particular de las emisiones de material particulado, existen hipótesis significativas sobre el gran potencial de efecto negativo sobre la salud de las personas, principalmente debido a la compleja y variada composición del material particulado (tamaño, forma, solubilidad) (Silva *et al.*, 2020). Otros estudios han investigado sobre el impacto de los volcanes en la calidad del aire, observándose una importante cantidad de concentraciones de dióxido de azufre a lo largo de la pluma volcánica (Carn *et al.*,

2017; Cuesta *et al.*, 2018, Cuesta *et al.*, 2020; Longo, 2013). Un estudio realizado por Carn *et al.* (2017) durante el 2015 en el volcán más activo de Colombia (Nevado de Ruiz) demostró que este sitio fue el quinto mayor emisor anual de emisiones de dióxido de azufre. Otras investigaciones, como la realizada por Velasco (2015), detectó la presencia de sulfato en el material particulado (PM_{10}) asociado con emisiones gaseosas de volcanes. De acuerdo con investigaciones recientes, las emisiones gaseosas de volcanes pueden emitir una gran cantidad de material particulado de diferentes tamaños (Buseck y Adachi, 2008; Businger *et al.*, 2015, Schäfer *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2020). En general, las fuentes naturales (por ejemplo, volcanes) pueden incrementar los niveles de contaminación en la calidad del aire y por ende inferir negativamente en la salud de las personas, principalmente sobre las más cercanas a estos sitios volcánicos (Silva *et al.*, 2020).

Particularmente, con el dióxido de azufre ($\text{SO}_{2(g)}$), las cantidades que puede emitir un volcán de este compuesto por día son enormes, esto lo convierte en uno de los responsables más significativos de causar impactos negativos en la salud de los habitantes de ambientes volcánicos. Aproximadamente el 90 % del gas se absorbe en el sistema respiratorio, donde reacciona inicialmente para formar ácido sulfuroso y, posteriormente, se oxida para formar ácido sulfúrico (Williams-Jones y Rymer, 2015). Las personas que se exponen esporádicamente al $\text{SO}_{2(g)}$ conciben los primeros indicios de su presencia alrededor de los 5 ppm (13 mg/m^3) debido a síntomas como: tos, sequedad y picor de garganta, aceleración de la respiración (jadeo) y del pulso (Amdur *et al.*, 1953). Las personas que conviven usualmente con el gas sufren inflamación



crónica de las vías respiratorias, lo que a su vez causa la secreción de una mucosa que induce cierta tolerancia en el individuo (Ishigami *et al.*, 2008; IVHHN, 2019).

En el caso del sulfuro de hidrógeno ($H_2S_{(g)}$), este inhibe mecanismos enzimáticos indispensables en el cuerpo humano y potencia otros, aunque no está claro si sucede de la misma manera que durante la falta de oxígeno. Se ha demostrado que su exposición puede alterar neurotransmisores cerebrales encargados del pensamiento cognitivo en individuos adultos, así como el desarrollo adecuado del tejido neuronal en niños y neonatos (Reiffenstein, 1992). Cuando las concentraciones exceden los 500 ppm es fatal, debido a que provoca pérdida de conciencia inmediata, y si el individuo finalmente no es retirado del ambiente contaminado puede morir de asfixia (Doujaiji y Al-Tawfiq, 2010).

En relación con el cloruro de hidrógeno ($HCl_{(g)}$), la exposición aguda a bajas concentraciones de esta sustancia ha demostrado provocar jadeo y tos persistente, así como irritación de mucosas, piel, ojos y otras zonas expuestas. Concentraciones alrededor de los 35 ppm provocan grave irritación de nariz, garganta, y laringe, con valores cercanos a 100 ppm puede resultar en daño agudo permanente de la laringe o un edema pulmonar, incluso ante una breve exposición (Heggie, 2009; Van Sickle *et al.*, 2009). Por su parte, la inhalación del fluoruro de hidrógeno ($HF_{(g)}$) puede generar un decrecimiento de la capacidad pulmonar en individuos expuestos por ambientes laborales. Incluso 5 minutos de contacto son suficientes para ser fatales, producto de los severos daños que provoca en el tracto respiratorio (Mager, 1998). El efecto agudo más notorio es la irritación inmediata de nariz y ojos, por la rápida disminución

del pH, siendo capaz de producir ceguera permanente, si no se remueve rápidamente (USPHS, 1993).

Con respecto a las emisiones de ácido nítrico ($HNO_{3(ac)}$), sus efectos más importantes por exposición aguda son: irritación, corrosión, vómito sanguinolento, tos, ardor de garganta, edema pulmonar, insuficiencia respiratoria, sofocación, ceguera, dolor de estómago, visión borrosa, ulceraciones e, inclusive, la muerte (UNA, 2016; Merck, 2018).

No obstante, a pesar de los riesgos en la salud que generan las emisiones gaseosas volcánicas, existen motivos como: la ubicación de los establecimientos urbanos, la belleza escénica para explotación turística (abundante flora y fauna, aguas termales, paisajismo), el estudio científico y las fértiles laderas, que inducen la innegable convivencia entre personas y volcanes; sin embargo, asimismo se genera la gran necesidad de controlar los riesgos hacia la salud de las personas (funcionarios y visitantes de parques nacionales) de manera que no se sacrifique el aprovechamiento del recurso (Berrocal, 2008).

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la calidad del aire ambiental por presencia emisiones gaseosas ($SO_{2(g)}$, $H_2S_{(g)}$, $HCl_{(g)}$, $HNO_{3(ac)}$ y $HF_{(g)}$) y su respectivo riesgo para la salud de los funcionarios del Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) en los volcanes Poás y Turrialba de Costa Rica.

Metodología

2.1 Sitios de estudio

Se establecieron un total de 3 sitios de muestreo en el PNVP (A-Casa de guardaparques, B-Casetillas de cobre y C-Mirador del cráter) para las emisiones gaseosas (Figura



1). Los muestreos se realizaron entre junio del 2018 y febrero 2019. Con respecto al PNVT, se definieron 4 sitios para el muestreo de las emisiones gaseosas en el (Figura 2) A-Camper de guardaparques, B-Centro Educativo El Volcán, C-Casa de guardaparques en ruinas, D-Mirador del cráter). Los muestreos se realizaron entre junio del 2018 y abril 2019, con mediciones al menos cada 2 meses de forma aleatoria durante los días de análisis.

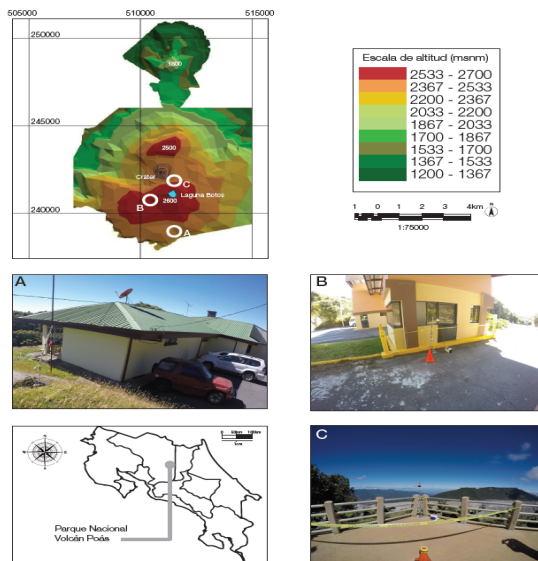


Figura 1. Ilustración del terreno comprendido por el Parque Nacional Volcán Poás y los puntos de muestreo definidos. A) Casa de guardaparques. B) Casetillas de cobro. C) Mirador del cráter. Fuente: Propia de la investigación.

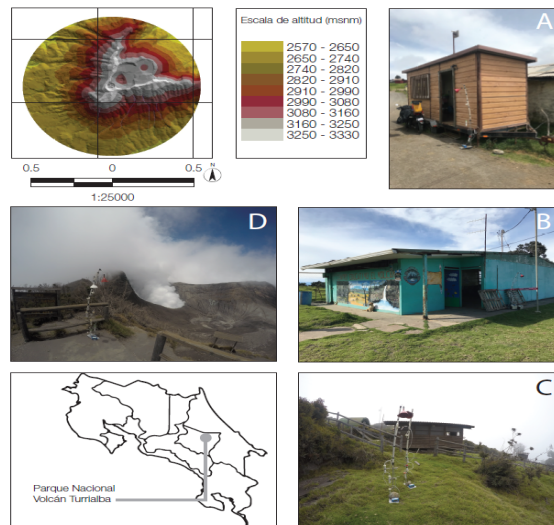


Figura 2. Ilustración del terreno comprendido por el Parque Nacional Volcán Turrialba y los puntos de muestreo definidos. A) Camper de guardaparques. B) Centro Educativo El Volcán C) Casa de guardaparques en ruinas. D) Mirador del cráter.

Fuente: Propia de la investigación.

La distribución de muestras recolectadas en cada parque, por punto de muestreo y analito de interés, se representa en la Tabla 1.



Tabla 1
 Cantidad de muestras recopiladas (por analito) en cada sitio de muestreo definido en el
 Parque Nacional Volcán Poás y el Parque Nacional Volcán Turrialba

Punto de muestreo		Coordenadas	Distancia del cráter activo (km)	Cantidad de muestras recopiladas				
				H ₂ S _(g)	SO _{2(g)}	HCl _(g)	HF _(g)	HNO _{3(ac)}
PNVP	Casa de guardaparques	10°10'4,4" N 84°13'57,2" O	3,3	2	3	1	1	1
	Casetilla de cobro	10°10'52,9" N 84°14'16,4" O	2,0	3	3	3	3	3
	Mirador del cráter	10°11'26,0" N 84°13'57,0" O	0,7	4	4	4	4	4
PNVT	Escuela	10°00'17,7" N 83°46'49,1" O	2,3	2	4	2	2	2
	Ruinas de casa de guardaparques	10°00'52,2" N 83°45'33,0" O	0,7	2	3	2	2	2
	Mirador del cráter	10°01'05,0" N 83°45'37,0" O	0,3	3	6	3	3	3

Nota: Propia de la investigación.

2.2 Materiales y métodos

Custodia, transporte y conservación de muestras

La manipulación y la custodia de las muestras se limitó únicamente a funcionarios del Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT) de la Universidad Nacional (UNA), de Costa Rica. El transporte de las muestras se realizó en un recipiente tipo hielera (a temperatura ambiente) para proteger el contenido de alguna contaminación externa. Una vez en el laboratorio, las muestras se almacenaron bajo refrigeración (0 °C a 4 °C) hasta el momento de su análisis.

Muestreo y análisis de muestras

Se utilizó un sistema de tubos absorbentes para la recolección de las muestras de SO_{2(g)} y H₂S_(g), en el cual los gases se absorben en diferentes burbujeadores

localizados a distintas alturas del nivel del suelo. El sistema de absorción utiliza materiales auxiliares como una bomba de membrana, válvulas de punto crítico, portafiltras, prensas y un medidor de flujo de aire. Una vez que el analito ingresa al sistema de recolección atraviesa un filtro (0,2 μm) de fibra de vidrio para partículas, conduciéndose el analito posteriormente a los diferentes burbujeadores que contienen la disolución absorbente correspondiente para cada analito. Las interconexiones de todos los sistemas utilizados involucraron mangueras de polipropileno. El sistema de muestreo se detalla en la Figura 3 (Valdés y Sibaja, 2015).

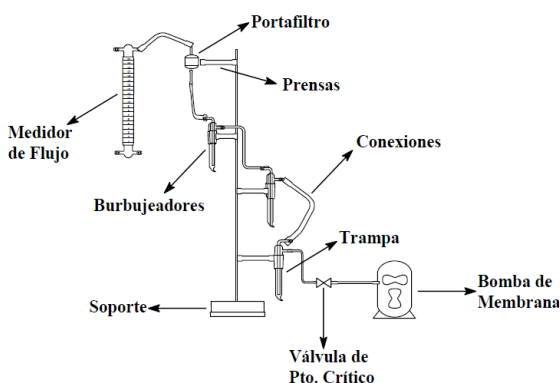


Figura 3. Sistema de muestreo de tubos absorbentes para la determinación de $\text{SO}_2(\text{g})$ y $\text{H}_2\text{S}(\text{g})$. (Valdés y Sibaja, 2015).

Determinación de $\text{SO}_{2(\text{g})}$

Para recolectar la muestra de $\text{SO}_{2(\text{g})}$ se utilizó una disolución diluida (0,6 % v/v) de peróxido de hidrógeno ligeramente ácida para oxidar el $\text{SO}_{2(\text{g})}$ a $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{ac})}$. Una vez recogida la muestra en el burbujeador se trasvasó a un recipiente de polipropileno para su transporte y almacenamiento. Las muestras de $\text{SO}_{2(\text{g})}$ en forma de $\text{SO}_{4^{2-}(\text{ac})}$ se analizaron por cromatografía de iones, utilizando un cromatógrafo marca DIONEX®, modelo ICS-5000 DUAL, con una pre-columna aniónica IonPac AG23 (4 mm X 50 mm), una columna analítica aniónica IonPac AS23 (4 mm X 50 mm), un detector de conductividad eléctrica suprimida y una fase móvil de 0,8 mmol/L NaHCO_3 / 4,5 mmol/L Na_2CO_3 (Valdés y Sibaja, 2015).

Determinación de $\text{H}_2\text{S}_{(\text{g})}$

El $\text{H}_2\text{S}_{(\text{g})}$ se muestreó burbujeadando el volumen medido de aire en una solución alcalina de sulfato de cadmio (CdSO_4 0,012 mol/L) e hidróxido de sodio (NaOH 0,10 mol/L). La disolución absorbente y el precipitado fueron trasvasados a un recipiente oscuro de polipropileno para evitar su foto-descomposición. Las muestras de $\text{H}_2\text{S}_{(\text{g})}$ se tratan

con 3,0 mL de una disolución fuertemente ácida de *N,N*-dimetil-*p*-fenilendiamina (DM-PFD) junto con otros reactivos para liberar nuevamente el gas y realizar una determinación espectrofotométrica con el método del azul de metileno a una longitud de onda de 670 nm (Valdés y Sibaja, 2015).

Determinación de ácidos ($\text{HCl}_{(\text{g})}$, $\text{HNO}_{3(\text{ac})}$ y $\text{HF}_{(\text{g})}$)

Para el muestreo de ácidos ($\text{HCl}_{(\text{g})}$, $\text{HNO}_{3(\text{ac})}$ y $\text{HF}_{(\text{g})}$) se aprovechó la técnica de tubos de difusión Denuders. Finalizado el muestreo de ácidos, los tubos Denuders se sellaron con parafina y tapones para su transporte. En el laboratorio, los ácidos fueron extraídos con 3,0 mL de agua para ser analizados posteriormente por cromatografía de iones, en un cromatógrafo marca DIONEX®, modelo ICS-5000 DUAL, con una precolumna aniónica IonPac AG23 (4 mm X 50 mm), una columna analítica aniónica IonPac AS23 (4 mm X 50 mm), un detector de conductividad eléctrica y una fase móvil de NaHCO_3 / Na_2CO_3 (Valdés y Sibaja, 2015).

2.3 Evaluación de la salud de las personas

Con el fin de generar un diagnóstico preliminar de los potenciales efectos en la salud de los guardaparques (12 funcionarios del Parque Nacional Volcán Poás y 4 funcionarios del Parque Nacional Volcán Turrialba) producto de la exposición a las emisiones gaseosas volcánicas, se utilizaron durante el periodo comprendido entre el 5 y el 15 de mayo del 2019 las siguientes dos herramientas. Primeramente, se aplicó una encuesta mediante entrevista personal a los funcionarios de los parques, en la cual se evaluó aspectos relativos a edad, sexo y su permanencia en el parque, así como hábitos



de consumo de medicamentos, antioxidantes, tabaco en ingesta de alcohol. Similarmente la entrevista permitió identificar potenciales síntomas hacia la salud (tos, dolor torácico, disnea, irritación cutánea, irritación de mucosas y de ojos, faringitis, náuseas, mareos, dolores de cabeza, pérdida del sueño, fatiga, presión arterial anormal, hiporexia) relacionados con las actividades de trabajo desarrolladas por los trabajadores. La segunda herramienta fue la revisión de las epicrisis (Facilitadas por el Área Rectora de Salud de Poás del Ministerio de Salud) del personal entrevistado, lo cual se utilizó para diagnosticar una posible relación entre los padecimientos más comunes observados en el grupo y las principales emisiones gaseosas generadas en los sitios de estudio.

Análisis y resultados

3.1 Calidad del aire en el volcán Turrialba

Los resultados más relevantes de este estudio se relacionan con el dióxido de azufre, el rango de concentraciones encontrado en el PNVT osciló desde debajo del límite de detección ($0,01 \text{ mg/m}^3$) hasta ($0,40 \pm 0,04$) mg/m^3 en una media de 3 horas. De acuerdo con la Figura 4, los resultados más importantes corresponden al antiguo centro de operaciones del parque (700 m al suroeste en línea recta del cráter activo), para el cual durante los días 22 de agosto y 05 de octubre del 2018 se obtuvieron datos de ($0,10 \pm 0,01$) mg/m^3 y ($0,40 \pm 0,04$) mg/m^3 , respectivamente. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de las concentraciones de dióxido de azufre en los tres lugares de muestreo en el PNVT.

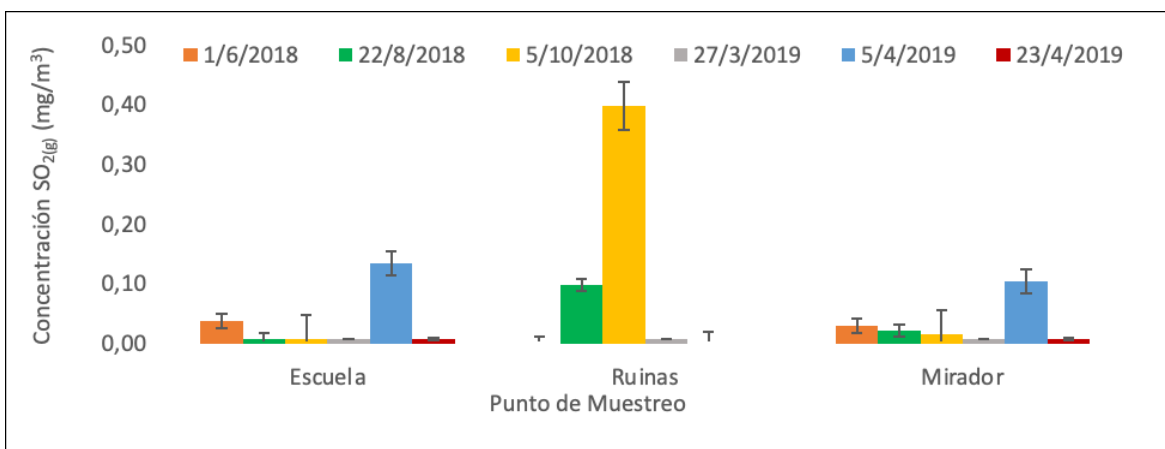


Figura 4. Comportamiento de las concentraciones en el PNVT por ubicación a través de los distintos muestreos. Nota: Fuente propia de la investigación.



Según la Figura 4, en el mirador (a escasos 300 m hacia el sur del cráter) se mantuvieron cercanos al límite de detección ($0,01 \text{ mg/m}^3$), exceptuando el 05 de abril del 2019 (color azul), alcanzando ($0,11 \pm 0,01$) mg/m^3 ; por su parte, dentro de los terrenos de la escuela (a 2,3 km al oeste del cráter) se detectaron concentraciones de ($0,14 \pm 0,01$) mg/m^3 durante este mismo muestreo (azul).

Es esperable encontrar concentraciones elevadas en zonas tan próximas al volcán como la finca La Central (~ 2 km), donde se ubica el centro educativo El Volcán, no obstante, esto es finalmente determinado por diversos factores, como, por ejemplo: la altura de la columna eruptiva, duración de la erupción, volumen de gases, temperatura de emisión, composición, condiciones meteorológicas, entre otros (PAHO, 2012).

Los flujos de gases emitidos diariamente por el Volcán Turrialba son los principales responsables sobre las concentraciones ambientales del $\text{SO}_{2(g)}$ en la zona. La bibliografía indica que se han alcanzado a emitir hasta 4 000 ton/día de este gas entre el 2009 y el 2015 (de Moor *et al.*, 2016). Una vez en la atmósfera, la estabilidad gobierna en sentido vertical, depositando los contaminantes más densos primero. No obstante, los factores meteorológicos (viento principalmente) cumplen una influencia determinante, tanto en la distribución y el transporte, como en la remoción de los contaminantes por medio de la formación de contaminantes secundarios, o precipitación seca y húmeda. El viento es el encargado de transportar a los gases y a las partículas cuando son emitidas (Morales y Liao, 1999).

En el volcán Turrialba, los vientos que predominan se generan por sistemas de alta presión en el Atlántico norte, los cuales provocan el contacto de las emisiones con

la ladera suroeste y oeste del volcán (Lizano, 2007). Los modelos de dispersión de contaminantes en el aire (Figura 5) muestran los diversos sentidos encontrados en la dirección del viento, no obstante, estas fechas concuerdan con las concentraciones más elevadas. El 22 de agosto del 2018 (A) el viento se dirige principalmente hacia el noroeste (Finca Silvia) y suroeste (Finca La Central), mientras que el 05 de abril del 2019 (B) y el 05 de octubre del 2018 (C) gobernaba principalmente hacia el noreste (hacia Limón) y sureste (Tajo). La posición del mirador del cráter está muy poca influenciada por las emanaciones del cráter activo del volcán Turrialba, ya que al encontrarse al sureste del punto de emisión y el viento predominante hacia el oeste, hace que los visitantes y los guardaparques tengan muy pocas afectaciones por los gases expulsados debido a la actividad volcánica. En ciertos días y meses del año, la dirección del viento puede cambiar (como en la transición entre la época seca y la época lluviosa), dando una emanación de gases hacia el sur o el sureste del cráter, por lo que es necesario su constante vigilancia, en términos de velocidad, dirección de viento y concentración de gases como el dióxido de azufre. De lo anterior puede concluirse que fuentes tan grandes de emisión pueden impactar terrenos aledaños, a pesar de que el viento transporte el mayor porcentaje de las emisiones hacia otros sitios (Morales y Liao, 1999).

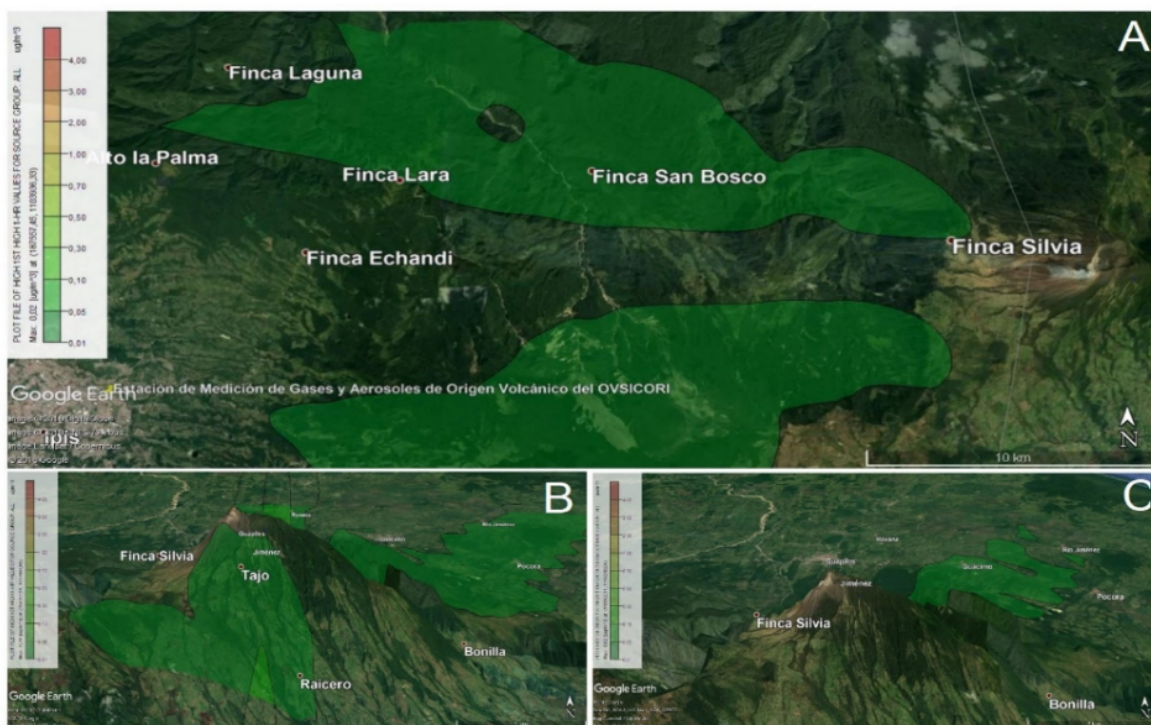


Figura 5. Modelos de dispersión de gases y partículas (AERMOD) del Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT-UNA) de los muestreos del 22/08/2018 (A), 05/10/2018 (C) y 05/04/2018 (B).

Durante el muestro realizado el 05 de abril del 2019 se observó la salida de gases directamente del cráter, evidenciada a través de una fuerte coloración azul de la pluma volcánica producto de una alta carga de gases azufrados como el dióxido de azufre y aerosoles líquidos de ácido sulfúrico y partículas finas de silicatos (Figura 6), que con una alta temperatura (mayor a 300 °C). En horas posteriores del mismo día fue percibido, de manera olfativa, el olor a gases azufrados, tanto por pobladores de la Finca La Central como por el equipo de trabajo del LAQAT-UNA. Para este día, se presentó un cambio en la dirección del viento, pasando de una pluma hacia el noreste antes de las 7:00 a.m., a una pluma hacia el oeste después de las 9:00 a.m. Estos cambios en la dirección del viento provocan una mayor

percepción y afectación para los lugares cercanos a la fuente de emisión y al poblado de la Finca La Central y la Finca Silvia.



Figura 6. Vista del cráter desde el mirador durante el muestreo del 05 de abril del 2019.

Nota: Fuente propia de la investigación.



Los resultados referentes a las demás sustancias analizadas se mantuvieron por debajo del límite de detección; sin embargo, esto no descarta la posible existencia de emisiones importantes por parte del volcán. El $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ ($\text{LD} = 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) por su densidad y naturaleza reducida, es más común de encontrar cercano a la fuente de emisión, asimismo, su corto tiempo de residencia en la atmósfera (24 h) no le permite moverse demasiado lejos ni por mucho tiempo (IVNNH, 2019). Por su parte, las sustancias ácidas estudiadas ($\text{HCl}_{(g)}$ ($\text{LD} = 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $\text{HF}_{(g)}$ ($\text{LD} = 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $\text{HNO}_{3(ac)}$ ($\text{LD} = 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)) presentan solubilidades tan elevadas que les permite interactuar rápidamente con el agua y moverse en esta, por ende, el monitoreo de estas especies puede evidenciarse con el análisis de los aniones respectivos en cuerpos de agua circundantes.

3.2 Calidad del aire en el volcán Poás

El volcán Poás es otro parque nacional que recibe la prolongada influencia de los vientos alisios que predominan en la región Caribe. Esta corriente conduce normalmente las emisiones (hacia el oeste y el suroeste) por callejones bien definido en el terreno, hasta el valle de Bajos del Toro y San Luis de Grecia (Tacaes). Cambios de dirección en la orientación del viento hacia el sur o el suroeste propician el contacto con los funcionarios y sus sitios más concurridos (mirador, casetilla de cobre y casa de guardaparques), como sucedió durante los muestreos del 01 de febrero y 02 de marzo del 2018 (datos más significativos, representados por color amarillo y verde de la Figura 7). Los datos de febrero y marzo del 2018 evidencian el transporte de masas de aire con gases emitidos por el cráter desde el volcán hasta las zonas de interés y de

visitación, principalmente si las concentraciones en el mirador (700 m al sur del cráter activo) fueron $(1,90 \pm 0,11) \text{ mg}/\text{m}^3$ y $(0,80 \pm 0,06) \text{ mg}/\text{m}^3$.

En el marco de la salud ocupacional, la información destacada durante estos días de muestreo concuerda con los valores encontrados, debido a que son los lugares donde se encuentran al menos 3 de los funcionarios de SINAC, durante toda la jornada laboral diaria. Los valores reportados en la casetilla de cobre fueron $(0,85 \pm 0,08) \text{ mg}/\text{m}^3$ y $(0,35 \pm 0,04) \text{ mg}/\text{m}^3$. La casetilla se ubica a 2 km al sur del cráter activo. La casa de guardaparques obtuvo valores de $(1,50 \pm 0,10) \text{ mg}/\text{m}^3$ y $(0,33 \pm 0,03) \text{ mg}/\text{m}^3$, ubicada a 3,3 km al sur del foco emisor. Estos altos valores superan las concentraciones descritas en reglamentos internacionales (IVNNH, 2019).

Similarmente que el volcán Turrialba, durante los muestreos en el PNVP no se presentaron precipitaciones, no obstante, la presencia de la nubosidad característica de la zona, de igual manera pueden aprovechar las emisiones del volcán como fuente de núcleos de condensación (Morales y Liao, 1999).

Los muestreos realizados en el PNVP mediante el sistema de tubos absorbentes descrito en la metodología se complementaron con el uso de medidores portátiles (medidores de $\text{SO}_{2(g)}$ y $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ en tiempo real MultiRAE). Estos medidores han registrado datos en el mirador de hasta 18,30 ppm ($47,95 \text{ mg}/\text{m}^3$) (8 de octubre del 2018) que se mantuvo por al menos 1 h. Otros puntos de interés como la casa de guardaparques y la caseta de cobre alcanzaron sus respectivos máximos de 5,80 ppm ($15,20 \text{ mg}/\text{m}^3$) y 1,50 ppm ($3,93 \text{ mg}/\text{m}^3$) durante el 31 de agosto del 2018. Estos valores han demostrado ser capaces de provocar fuerte irritación de zonas de piel expuestas y problemas respiratorios. Si las

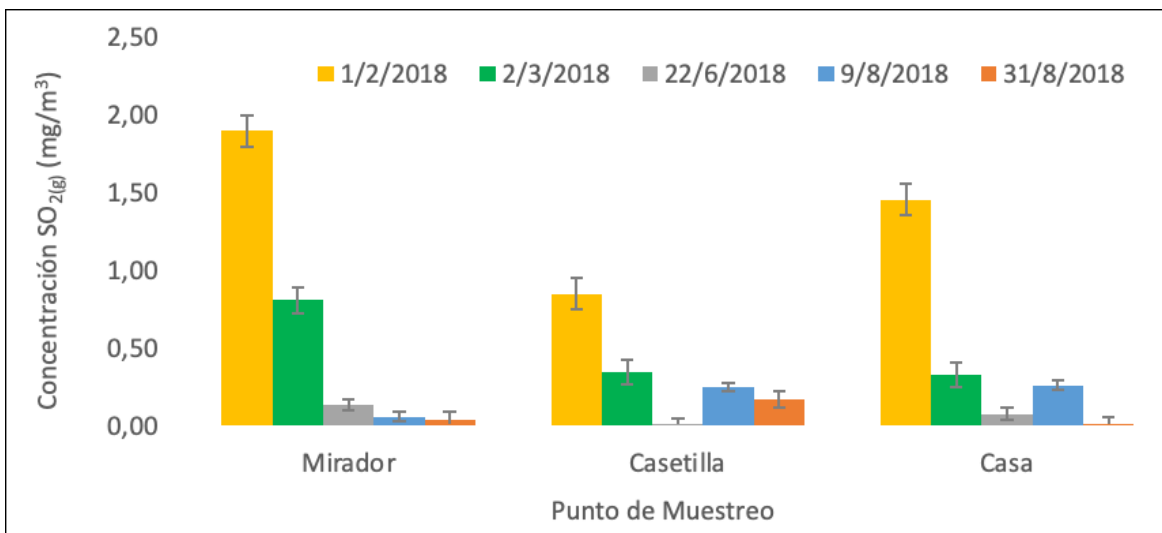


Figura 7. Comportamiento de las concentraciones en el PNVP por ubicación a través de los distintos muestreos.

Nota_ Fuente propia de la investigación.

concentraciones continuaran aumentando (+ 20 ppm) podrían inducir parálisis, e incluso la muerte (+ 150 ppm) en menos de 5 minutos (IVNNH, 2019).

Durante los días donde la recolección de datos se realizó con medidores portátiles y los tubos absorbentes, se encontró la diferencia de datos esperada, debido a que el muestreo con tubos absorbentes funciona a partir de la recolección de un volumen conocido de aire en un periodo definido que posteriormente se analiza en el laboratorio.

Los medidores portátiles funcionan a través de la recolección puntual de concentraciones de $\text{SO}_{2(g)}$ por segundo, lo que permite observar picos puntuales de concentración oscilantes entre 1 ppm ($2,62 \text{ mg/m}^3$) y 3 ppm ($7,86 \text{ mg/m}^3$) que se mantuvieron por algunos segundos. No obstante, utilizando como ejemplo el 31 de agosto del 2018 para comparar los datos en el mismo periodo (3 h), la técnica de tubos absorbentes arrojó un resultado de $\text{SO}_{2(g)}$ ($0,037 \pm 0,004 \text{ mg/m}^3$), mientras que los medidores portátiles de 0,049 ppm ($0,128 \text{ mg/m}^3$). Caso contrario

sucedió el 15 de febrero del 2019 cuando la concentración fue de ($0,09 \pm 0,01 \text{ mg/m}^3$) por tubos absorbentes y los medidores durante este periodo detectaron concentraciones de 0,01 ppm ($0,03 \text{ mg/m}^3$).

Es relativamente normal reportar siempre mayores concentraciones a través del muestreo activo con tubos absorbentes, debido a la potencia de la bomba; no obstante, existen factores como la ubicación del sistema y la dirección del viento que pueden estar causando un factor determinante.

El uso de medidores en tiempo real permitió implementar un sistema de alerta de concentración de contaminantes para la administración del acceso al PNVP (Tabla 2). Esta herramienta tiene como objetivo principal proteger la salud de funcionarios y turistas.

La información utilizada para su confección comprende límites recomendados, datos históricos del LAQAT-UNA e información del Centro Vulcanológico de Hawaii. La implementación de esta herramienta conlleva a una disminución en el



tiempo de respuesta ante eventualidades de emanación de gases, resulta de utilidad tanto en cierres temporales del mirador (como por ejemplo el cierre del 08 de octubre del 2018), como cierre definitivo de toda el área del parque (23 y 24 de setiembre del 2019) (Blunda, 2006; CNE, 2019).

Similarmente que en el PNVT, las demás sustancias analizadas en el PNVP se mantuvieron por debajo del límite de detección para los puntos muestreados (casa guardaparques, casetilla de cobro y mirador del cráter). $\text{HCl}_{(g)}$ ($< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $\text{HF}_{(g)}$ ($< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $\text{HNO}_{3(ac)}$ ($< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ ($< 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Al comparar los resultados reportados para los dos parques nacionales, se tiene que, el valor más elevado del presente estudio corresponde al SO_2 (media de 3 h) y proviene del volcán Poás ($1,90 \pm 0,11 \text{ mg}/\text{m}^3$). Por su parte, la mayor concentración de SO_2 en Turrialba corresponde a ($0,40 \pm 0,04 \text{ mg}/\text{m}^3$) durante el mismo periodo.

Los valores obtenidos en Poás son lo suficiente altos como para superar las concentraciones recomendadas por los gobiernos de Colombia ($0,75 \text{ mg}/\text{m}^3$), Ecuador ($1,50 \text{ mg}/\text{m}^3$), Estados Unidos ($1,30 \text{ mg}/\text{m}^3$) y el Decreto N.º 39951-S Reglamento De Calidad del Aire para Contaminantes Criterio de Costa Rica, el cual define el límite de SO_2 para $0,50 \text{ mg}/\text{m}^3$ para periodos de exposición de 3 h (Poder Ejecutivo, 2016; MINAMBIENTE, 2010; IVHHN, 2019).

Al considerar que se realizaron únicamente 4 muestreos, el reporte de un valor sobre lo permitido indica que la exposición de los funcionarios puede ser significativa y que se encuentra latente la posibilidad de enfrentar situaciones adversas. Mientras tanto, los resultados encontrados en el volcán Turrialba para el SO_2 durante esta investigación no superan el valor recomendado

($0,50 \text{ mg}/\text{m}^3$ para periodos de exposición de 3 h) (IVHHN, 2019; MINAMBIENTE, 2010; Poder Ejecutivo, 2016). Pero no se descarta que, en otros periodos del año, por cambios en la actividad del volcán o con diferentes condiciones atmosféricas se llegue a valores iguales o superiores a los encontrados en el PNVP.

3.3 Análisis del efecto de los gases en la salud de los funcionarios de SINAC

Producto de la entrevista personal realizada a los 16 guardaparques de los parques volcánicos, la mayoría ($n = 11$) de los participantes reveló que la problemática principal está relacionada con la irritación de mucosas-ojos, un total de 9 funcionarios indican sentir irritación de la piel, por su parte 8 de los entrevistados manifiestan tener dolores de cabeza y sentir fatiga. No obstante, el impacto real en cada individuo depende de la concentración de las sustancias a las que se presenta y del tiempo de exposición, así como la tolerancia del cuerpo ante los gases (Williams-Jones y Rymer, 2015; Alvarado, 2006). En la Tabla 2 se muestra una ampliación de las sintomatologías expresadas por los entrevistados, extraídas de los expedientes médicos (epicrisis), evidencian que las patologías más frecuentadas por los participantes son aquellas desarrolladas en vías respiratorias superiores (faringitis, laringitis, rinitis, sinusitis y epistaxis). Por su parte, las vías respiratorias inferiores son también afectadas con casos de bronquitis y broncoespasmos.



Tabla 2.
Patologías más frecuentes presentadas en los guardaparques de los volcanes Poás y Turrialba

Patología	Cantidad de funcionarios con la patología
Tos	6
Dolor torácico	4
Disnea	2
Irritación cutánea	2
Irritación de mucosas/ojos	9
Faringitis	7
Náuseas	2
Mareos	3
Dolores de cabeza	8
Pérdida del sueño	7
Fatiga	8
Presión arterial	7
Hiporexia	2

Nota: Información de expedientes médicos.

En el histórico de muestreos (generado por LAQAT-UNA) del volcán Poás, la mayor concentración registrada del $\text{SO}_{2(g)}$ alcanzó los $49,36 \text{ mg/m}^3$ en la casa de los guardaparques durante el 11 de junio del 2017, en un periodo de 4 horas. Durante la noche de ese día, los tres funcionarios ubicados en el recinto fueron evacuados de emergencia por acción de la Cruz Roja, debido al constante vómito y sangrado nasal que ocasionó la irritación extrema del tracto respiratorio (Bolaños *et al.*, 2018).

Cuando el $\text{SO}_{2(g)}$ ingresa al organismo se absorbe en su mayoría (40 % a 90 %) en la parte superior de las vías respiratorias debida a su solubilidad en el agua. La reacción con agua produce especies oxidadas de azufre (SO_2^- , SO_3^{2-} , HSO_3^- , H_2SO_3 y H_2SO_4) capaces de provocar sequedad e irritación del tracto respiratorio. La mucosa nasal es capaz de remover efectivamente gran cantidad del $\text{SO}_{2(g)}$ inhalado; sin embargo, cuando ingresa a través de la cavidad bucal, la concentración es demasiado elevada o la persona se expone por periodos prolongados, el gas

ingresa hasta la mucosa pulmonar, derivando en broncoconstricción, con lo cual, se obstruyen las vías respiratorias y aumenta la dificultad para respirar (disnea) (Chen *et al.*, 2007).

En lo que respecta a los guardaparques del PNVT, suelen ubicarse en la mayoría de su tiempo en los alrededores del camper en La Central, con ciclos ocasionales de vigilancia en el parque, por lo tanto, su exposición y los posibles efectos en la salud, depende del transporte de los gases hasta la zona en la que se encuentren. Los resultados de este estudio indican bajas concentraciones de $\text{SO}_{2(g)}$ durante los días muestreados; no obstante, el valor de $(0,40 \pm 0,04) \text{ mg/m}^3$ reportado durante el 05 de octubre del 2018 revela que la concentración puede aumentar. La implementación de medidores en tiempo real similares a los del PNVP en el PNVT es indispensable para garantizar la protección del trabajador mediante la implementación de planes rotativos del personal, así como sistemas de alarma y cierre del parque. Y con una posible apertura del PNVT para los visitantes, se debe tener



medición y cuantificación de los gases, para evitar problemas a los turistas. Además, con la apertura, los guardaparques permanecerían más tiempo en un lugar más cerca al cráter, por lo que se deben tomar las medidas necesarias para evitar que los síntomas identificados se intensifiquen.

En relación con el PNVP, tanto los datos de este estudio para el $\text{SO}_{2(g)}$ ($1,90 \pm 0,11$) mg/m^3 recopilado el 01 de febrero del 2018, como las cifras de los medidores en tiempo real (18,3 ppm) (08 de octubre de 2018) son indicadores de las concentraciones importantes a las que se pueden exponer las personas. Cuando el medidor alerte superar incluso $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ (0,2 ppm) durante un periodo de 10 min es recomendable sustituir el personal del mirador sea sustituido por uno no expuesto, como especifican las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2018).

Resaltar que, aunque la exposición al $\text{SO}_{2(g)}$ pueda inducir efectos en la salud indicados anteriormente, no es la única fuente capaz de generarlos, ya que existen otras posibles variables a considerar como: la alimentación, las enfermedades hereditarias o el estilo de vida que pueden derivar en padecimientos similares. Además, la potencial presencia de otras sustancias emitidas por el volcán reportadas por debajo del límite de detección ($\text{HCl}_{(g)}$, $\text{HF}_{(g)}$, $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$, $\text{HNO}_{3(ac)}$ y $\text{H}_2\text{SO}_{4(ac)}$) puede generar una contribución importante, incluso de manera sinérgica, dada su naturaleza, a los problemas en el ser humano expuesto.

Se debe recalcar que el presente trabajo de investigación es un estudio preliminar en cuanto a la relación directa que pueda existir entre las emisiones gaseosas de los volcanes y sus efectos directos en la salud de los trabajadores en los sitios de estudio. Existen patologías presentes en la población de estudio

(Tabla 3) que pueden presentar una relación directa con las emisiones de dióxido de azufre y del material particulado en los volcanes evaluados, no obstante, es necesario más procedimientos investigativos que impliquen una mayor cantidad de mediciones, tanto en tiempo como en cantidad de las concentraciones gaseosas emitidas. Paralelamente, es necesario la realización de mediciones de exposición mediante el uso de encuestas higiénicas que permitan valorar asertivamente el nivel de exposición de los trabajadores a las sustancias químicas. Finalmente, los datos resultantes de las entrevistas y de la revisión de las epicrisis de los trabajadores deben ser complementados con la realización de controles médicos que incluyan exámenes en especímenes como sangre, orina, cabello, saliva, entre otros; así como el uso de indicadores biológicos y químicos que permitan relacionar de forma más directa una patología con determinado contaminante químico. Históricamente se recomiendan la realización de distintos análisis bioquímicos como: prueba de óxidos de silicio, perfil de metales y metales pesados en sangre, determinación de mercurio bioacumulable (pelo y uñas) u otras pruebas como: espirometría, prueba de esfuerzo, prueba de función hepática, prueba de función renal y el registro de la evolución de la presión arterial pueden proporcionar información relevante para evaluar la incidencia volcánica en la salud de las personas (Baxter *et al.*, 1986).

Sin embargo, los resultados obtenidos constituyen un diagnóstico de carácter preliminar que puede servir como línea de base para futuros estudios de investigación, que tengan como objetivo restablecer una relación directa entre los efectos en la salud y las emisiones volcánicas. Por lo tanto, los resultados del presente proyecto de investigación requieren de mayores pesquisas,



debido a que los datos obtenidos no permiten establecer un patrón común entre las epicrisis y una correlación directa exposición-enfermedad, principalmente por la limitada cantidad de población de estudio evaluada (número de epicrisis disponible y funcionarios del parque).

Conclusiones

Las concentraciones más elevadas corresponden con el $\text{SO}_{2(g)}$, el cual, alcanzó una concentración máxima de $(0,40 \pm 0,04) \text{ mg/m}^3$ y $(1,90 \pm 0,11) \text{ mg/m}^3$ en el PNVT y en el PNVP, respectivamente (media de 3 h). Otras especies se mantuvieron por debajo del límite de detección: $\text{HCl}_{(g)}$ ($< 30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), $\text{HF}_{(g)}$ ($< 30 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), $\text{HNO}_{3(ac)}$ ($< 10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$) y $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ ($< 2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

Monitorear las condiciones ambientales en tiempo real por presencia de sustancias específicas es la manera más efectiva de prevenir la exposición a concentraciones nocivas de las emisiones volcánicas tanto para los guardaparques, como para los turistas que visitan estos atractivos sitios.

Tanto las epicrisis recopiladas como la percepción de los propios funcionarios evidencian y señalan los síntomas descritos por literatura, relacionados principalmente con el carácter tóxico y corrosivo de las emisiones volcánicas, no obstante, no es posible relacionarlos directamente mediante la información producida durante esta investigación.

Se incita a replicar investigaciones en el tema, especialmente desde un enfoque epidemiológico más detallado, con la realización de encuestas higiénicas y con mayor apoyo en diseños experimentales enfocados en la recopilación de las condiciones enfrentadas a lo largo de un periodo prolongado (varios años) y la respuesta observada en el organismo de las personas expuestas.

Financiamiento

Universidad Nacional, Costa Rica.
Laboratorio Química de la Atmósfera, Fundación: 056811-0100, SIA: 0596-11.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a María Martínez Cruz, del Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA por su dedicación en las giras de campo, compartir conocimiento y apoyo en los análisis de muestras cuando se enfrentaron complicaciones con los instrumentos del LAQAT-UNA. Al personal del Laboratorio de Química de la Atmósfera, por el apoyo prestado durante el desarrollo del trabajo de campo y en el laboratorio. A Danilo Umaña, Mario Cambrero, Lisseth Sandoval. A la Dra. Yeli Viquez Rodríguez por su cooperación y su disposición en los temas relacionados con la salud de los funcionarios. Al Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) por su apoyo y colaboración con los permisos de muestreo en los parques nacionales.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

Declaración de la contribución de los autores

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo. El porcentaje total de contribución para la conceptualización, la preparación y la corrección de este artículo fue el siguiente: E.O.A. 33 %, J.C.M.B. 34 %, J.P.S.B. 33 %.



Declaración de disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por los autores correspondientes, previa solicitud razonable.

Referencias

- Alvarado, X. (2006). 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*, 15(29), 25-34. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-14292006000200004.
- Amdur, M.; Melvin, W.; & Drinker, P. (1953). Effects of inhalation of sulphur dioxide by man. *Lancet*, 2, 758-759. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(53\)91455-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(53)91455-x)
- Baxter, P., & Horwell, C. (2015). Impacts of Eruptions on Human Health: The Encyclopedia of Volcanoes, *Sigurdsson. Academic Press*, 1035-1047. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00060-2>
- Baxter, P., Bernstein, R., & Buist, S. (1986). Preventive Health Measures in Volcanic Eruptions. *American Journal of Public Health*, 76, 84-90. <https://doi.org/10.2105/ajph.76.suppl.84>.
- Bermúdez, F., Rodríguez, M., Herrera, H., Vaillancourt, L., Fuchs, R., Preston, C., & Akiko, A. (2019). *Plan de Manejo del Parque Nacional Volcán Turrialba*. <http://www.sinac.go.cr/ES/planmanejo/Plan%20Manejo%20ACC/Parque%20Nacional%20Volc%C3%A1n%20Turrialba.pdf>.
- Berrocal Vargas, M. (2008). *Análisis y evaluación de la vulnerabilidad de la población de la Fortuna de San Carlos a la actividad volcánica del volcán Arenal, Costa Rica*. Universitat De Girona. <http://hdl.handle.net/10803/7918>.
- Blunda, Y. (2006). *Actualización del Plan de Emergencias del Volcán Poás y el Uso de la Sismología Volcánica como una Herramienta Preventiva*. Universidad de Costa Rica. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/871/1/27445.pdf>.
- Bolaños, K., Sibaja, J., Umaña, D., Rodríguez, B., Mora, J., Martínez, M., Sandoval, L., &

- Valdés, J. (2017). Medición y modelaje de la concentración del dióxido de azufre y de la composición del agua de lluvia en los alrededores del volcán Poás. *Congreso Centroamericano de Ciencias de la Tierra y el Mar*. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional, Costa Rica.
- Buseck, P. R., Adachi, K. (2008). Nanoparticles in the Atmosphere. *Elements*, 4 (6), 389–394.
- Businger, S., Huff, R., Pattantyus, A., Horton, K., Sutton, A. J., Elias, T., Cherubini, T. (2015). Observing and Forecasting Vog Dispersion from Kīlauea Volcano, Hawaii. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(10), 1667–1686. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00150.1>
- Campion, R., Martínez-Cruz, M., Lecocq, T., Caudron, C., Pacheco, J., Pinardi, G., Hermans, C., Carn, S., & Bernard, A. (2012). Space- and Ground-Based Measurements of Sulphur Dioxide Emissions from Turrialba Volcano (Costa Rica). *Bulletin of Volcanology*, 74(7), 1757–1770. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0631-z>
- Carn S.; Fioletov V., Mclinden C., Li C., Krotkov N. (2017). A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space. *Scientific Reports*, 7, 44095. <https://doi.org/10.1038/srep44095>
- Chen, T., Gokhale, J., Shofer, S., & Kuschner, W. (2007). Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *American Journal of Medical Sciences*, 333(4), 249-56. <https://doi.org/10.1097/maj.0b013e31803b900f>
- CNE-Comisión Nacional de Emergencias. (2019). *Se solicita a la población el no ingreso a zonas de restricción volcánica*. <https://www.cne.go.cr/noticias/2019/04/2020190114%20CNE%20solicita%20a%20la%20poblacion%20el%20no%20ingreso%20a%20zonas%20de%20restriccion%20volcanica.aspx#:~:text=CNE%20solicita%20a%20la%20poblaci%C3%B3n%20el%20no%20ingreso%20a%20zonas%20de%20restricci%C3%B3n%20volc%C3%A1nica,-Pantalla%20de%20protecci%C3%B3n&text=Volc%C3%A1n%20Turrialba%20permanece%20con%20actividad%20constante%20desde%20hace%209%20a%C3%B1os.&text=Costa%20Rica%20es%20>



- el%20primer,con%20este%20tipo%20de%20protecciones
- Cuesta, A., González, C., Velasco, M., Aristizábal, B. (2018). Distribución espacial de concentraciones de SO₂, NO_x y O₃ en el aire ambiente de Manizales. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34, 489-504. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03.11>
- Cuesta, A., Wahl M., Acosta, J. García, A., Aristizábal, B. (2020). Mixing layer height and slope wind oscillation: Factors that control ambient air SO₂ in a tropical mountain city. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101-852. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>
- de Moor, J. M., Aiuppa, A., Pacheco, J., Avard, G., Kern, C., Liuzzo, M., Martínez, M., Giudice, G., & Fischer, T. P. (2016). Short-Period Volcanic Gas Precursors to Phreatic Eruptions: Insights from Poás Volcano, Costa Rica. *Earth and Planetary Science Letters*, 442, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.056>
- Doujajji, B., & Al-Tawfiq, J. (2010). Hydrogen sulfide exposure in an adult male. *Annals of Saudi Medicine*, 30(1), 76-80. <https://doi.org/10.5144/0256-4947.59379>
- Fischer, T. P., Ramírez, C., Mora-Amador, R. A., Hilton, D. R., Barnes, J. D., Sharp, Z. D., Le Brun, M., de Moor, J. M., Barry, P. H., & Furi, E. (2015). Temporal Variations in Fumarole Gas Chemistry at Poás Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 294, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.02.002>
- FUNDECOR. (2019). *Poás en la élite de volcanes activos con refugios tipo bunker*. <https://www.fundecor.org/post/2018/09/06/poas-volcan-activo-con-refugios-tipo-bunker>.
- Gobierno de Costa Rica. (2018). *Poás en la élite de volcanes activos que cuentan con refugios tipo bunker*. <https://presidencia.go.cr/comunicados/2018/09/poas-en-la-elite-de-volcanes-activos-que-cuentan-con-refugios-tipo-bunker/>.
- González, G., Mora-Amador, R., Ramírez, C., Rouwet, D., Alpizar, Y., Picado, C., & Mora, R. (2015). Historic Activity and Hazard Analysis of Turrialba Volcano, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 52, 129–149. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i52.19033>.
- Hansell, A., Horwell, C. J., & Oppenheimer, C. (2006). The Health Hazards of Volcanoes and Geothermal Areas. *Occupational and Environmental Medicine*, 63, 149–156. <https://doi.org/10.1136/oem.2005.022459>.
- Heggie, T. (2009). Geotourism and volcanoes: Health hazards facing tourists at volcanic and geothermal destinations. *Travel Medicine and Infectious Disease*, 7(5), 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2009.06.002>.
- Hernández, P. A., Pérez, N. M., Varekamp, J. C., Henriquez, B., Hernández, A., Barrancos, J., Padrón, E., Calvo, D., & Melián, G. (2007). Crater Lake Temperature Changes of the 2005 Eruption of Santa Ana Volcano, El Salvador, Central America. *Pure and applied geophysics*, 164, 2507–2522. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0275-7>.
- Ishigami, A., Kikuchi, Y., Iwasawa, S., Nishiwaki, Y., Takebayashi, T., Tanaka, S., Omae, K. (2008). Volcanic sulfur dioxide and acute respiratory symptoms on Miyakejima island. *Occupational and Environmental Medicine*, 65, 701-707. <https://doi.org/10.1136/oem.2007.033456>.
- IVHHN-International Volcanic Health Hazard Network. (2019). *Sulfur dioxide (SO₂)*. <https://www.ivhnn.org/es/guidelines/guia-sobre-gases-volcanicos/dioxido-de-azufre>.
- Lizano, O. (2007). *Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica*. *Ciencia y Tecnología*, 25(1-2), 43-56. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2215>.
- Longo, B. M. (2013). Adverse Health Effects Associated with Increased Activity at Kīlauea Volcano: A Repeated Population-Based Survey. *ISRN Public Health*, 475-962. <https://doi.org/10.1155/2013/475962>
- Mager, J. (1998). Encyclopaedia of Occupational Health and Safety. *International Labour Organization*, 4.
- Merck Group. (2018). *Ficha de datos de seguridad de HNO₃*. http://www.merckmillipore.com/INTERSHOP/web/WFS/Merck-INTL-Site/en_US/-/USD/ShowDocument-File?ProductSKU=MDA_CHEM-100456&DocumentType=MSD&Language=ES&Country=ES.
- MINAAMBIENTE- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento de Calidad de Aire de la República de Colombia*. <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/>



- bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf.
- Moraes, R., & Liao, A. (1999). Amenazas volcánicas en Costa Rica: Una estrategia de prevención. *Revista Costarricense de Salud Pública, 15*(8), 37-56. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-14291999000200005.
- Organización Panamericana de la Salud (PAHO) (2012). *Los Impactos a la Salud Asociados con las Cenizas de los Volcanes*. 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
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (2016). *Ley N.º 39951-S: Reglamento de la Calidad del Aire Para Contaminantes Criterio*. http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/reglamento_calidad_del_aire_contaminantes_criterio.pdf.
- Reiffenstein, R., Hulbert, W., & Roth, S. (1992). Toxicology of Hydrogen Sulfide. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology, 32*, 109-134. <https://doi.org/10.1146/annurev.pa.32.040192.000545>.
- Rodríguez, L. A., Watson, I. M., Rose, W. I., Branan, Y. K., Bluth, G. J. S., Chigna, G., Matías, O., Escobar, D., Carn, S. A., & Fischer, T. P. (2004). SO₂ Emissions to the Atmosphere from Active Volcanoes in Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 138* (3), 325-344. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.07.008>.
- Schäfer, K., Thomas, W., Peters, A., Ries, L., Obleitner, F., Schnelle-Kreis, J., Birmili, W., Diemer, J., Fricke, W., Junkermann, W., Pitz, M., Emeis, S., Forkel, R., Suppan, P., Flentje, H., Gilge, S., Wichmann, H. E., Meinhardt, F., Zimmermann, R., Weinhold, K., Soentgen, J., Munkel, C., Freuer, C., Cyrys, J. (2011). Influences of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic plume on air quality in the northern Alpine region. *Atmospheric Chemistry and Physics, 11*, 8555-8575. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8555-2011>.

- Silva, L., Pinto, D., Neckel, A., Oliveira, M. L. S., Sampaio, C. (2020). Atmospheric nanocompounds on Lanzarote Island: Vehicular exhaust and igneous geologic formation interactions. *Chemosphere, 254*, 126-822. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126822>.
- SINAC- Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2019). *Parque Nacional Volcán Turrialba*. <http://www.sinac.go.cr/ES/ac/accvc/pnvt/Paginas/default.aspx>.
- UNA-Universidad Nacional de Costa Rica (2019). *Hoja de seguridad Ácido Nítrico, 2016*. <http://www.quimica.una.ac.cr/index.php/documentos-electronicos/category/13-hojas-de-seguridad?download=120:acido-nitrico&start=20>.
- USPHS -U.S. Department of Health and Human Services. (1993). *Toxicological Profile for Fluorides, Hydrogen Fluoride and Fluorine (F)*. DIANE Publishing. https://books.google.co.cr/books?id=I6RwOKkPX28C&printsec=frontcover&hl=es&source=gsb_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
- Valdés, J., & Sibaja, J. (2015). *Manual de Laboratorio de Química Atmosférica*. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica.
- Van Sickle, D., Wenck, M., Belflower, A., Drociuk, D., Ferdinands, J., Holguin, F., Svendsen, E., Bretous, L., Jankelevich, S., Gibson, J., Garbe, P., & Moolenaar, R. (2009). Acute Health Effects After Exposure to Chlorine Gas Released After a Train Derailment. *American Journal of Emergency Medicine, 1*(1), 1-7. <https://doi:10.1016/j.ajem.2007.12.006>.
- Velasco, M. (2015). Evaluación de la concentración y caracterización preliminar del PM₁₀ en la ciudad de Manizales [Tesis maestría. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia].
- WHO-World Health Organization. (2018). *Calidad del aire y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- Williams-Jones, G., & Rymer, H. (2015). Hazards of Volcanic Gases: The Encyclopedia of Volcanoes. *Academic Press*, 985-992. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385938-9.00057-2>.



Estudio preliminar con respecto a los efectos en la salud de trabajadores y su relación con la exposición a emisiones gaseosas volcánicas. Un caso de estudio en dos volcanes activos de Costa Rica (Erick Ortiz Apuy, José Carlos Mora Barrantes, Jose Pablo Sibaja Brenes) *Uniciencia* is protected by [Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-NC-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/)