

## Afectación por ceniza volcánica distal a grande ciudad: el caso Sangay - Guayaquil (Ecuador)

Daniel Moran-Zuloaga<sup>1,7</sup>, Maurizio Mulas<sup>2</sup>, Wilson Merchan-Merchan<sup>3</sup>, Emilio Rodríguez-Caballero<sup>4,5</sup>, David Walter<sup>6</sup>, Julio Cáceres<sup>7</sup>, Mauricio Cornejo<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemistry, Pharmacy and Geoscience. Johannes Gutenberg University Mainz. Saarstrasse 21, 55122 Mainz, Germany.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil- Ecuador.

<sup>3</sup> School of Aerospace and Mechanical Engineering. University of Oklahoma, Norman, OK 73019 USA.

<sup>4</sup> Agronomy Department, University of Almeria, Almeria, Spain.

<sup>5</sup> Research Centre for Scientific Collections from the University of Almeria (CECOUAL), 04120 Almeria, Spain.

<sup>6</sup> Multiphase Chemistry Department. Max Planck Institute for Chemistry, 55128 Mainz, Germany

<sup>7</sup> Centro de investigación y Desarrollo en Nanotecnología. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador.

**Palabras clave:** Sangay, transporte distal, análisis de cluster.

El Ecuador continental está rodeado por ~85 volcanes cuaternarios de los cuales una cuarta parte aún se encuentran activos (Parra et al. 2016). En los últimos veinte años, Tungurahua y Reventador se encontraban entre los volcanes más activos y alertan constantemente a las comunidades circundantes sobre las columnas de ceniza volcánicas que se disipan en la atmósfera y sus emisiones volcánicas suelen precipitarse en poblaciones aledañas (Carn et al. 2011). El Volcán Sangay, es un volcán activo ubicado en la parte suroeste de Ecuador, tiene una altitud de 5286 m snm y ha sido un tema de atención debido a su dinámica eruptiva en los últimos cuatro años.

En el año 2020 el volcán Sangay tuvo una actividad volcánica débil desde desgasificación hasta débil emisiones de ceniza. Eventualmente incrementó la actividad volcánica, con emisiones de ceniza volcánica que alcanzaron Guayaquil, una ciudad de 3 millones de habitantes ubicada en el sur -Sector occidental del Ecuador, y que se vio afectada por caída de ceniza volcánica fina. Durante todos estos eventos, la ciudad estuvo cubierta por una capa de ceniza volcánica de un espesor promedio menor de 1 mm.

El grado de fragmentación de las partículas depende del grado de explosividad. La ceniza volcánica puede alcanzar cientos de kilómetros y convertirse en penachos volcánicos si las condiciones meteorológicas son favorables (Lettino et al. 2012) o dar una vuelta completa al mundo como en el caso de la erupción del Pinatubo en 1991 (McCormick et al. 1995) y Tonga Hunga (Zuo et al. 2022). La inhalación

de cenizas volcánicas puede causar irritación de la piel y los ojos, enfermedades respiratorias como asma y bronquitis (Forbes et al. 2003) hasta silicosis y cáncer de pulmón (Lelieveld et al. 2015). Además, la ceniza volcánica suele tener elementos tóxicos como Cl, S, Na, Ca, K, Mg, F, Pb, Hg, Cu, Zn, Cd y As. La enfermedad respiratoria puede ocurrir sólo si las partículas son lo suficientemente pequeñas como para entrar en el sistema respiratorio hasta los bronquios y llegar a los pulmones (Lelieveld et al. 2015). En general, las partículas de ceniza con un tamaño de entre 10 y 15  $\mu\text{m}$  pueden causar irritación solo en la garganta, mientras que las partículas con diámetros inferiores a 10  $\mu\text{m}$  causan asma y bronquitis (Pohlker et al. 2021). Las partículas finas tienen diámetros inferiores a 2.5  $\mu\text{m}$  y causan enfermedades respiratorias graves y el análisis del tamaño de grano podría ayudar a revelar si la ceniza es un peligro potencial para la salud (Horwell 2007). Además, altas concentraciones de SO<sub>2</sub> pueden producir daño a la vegetación (i.e. Weiser et al. 2022) e inflamación e irritación del sistema respiratorio. La comprensión de la morfología puede ser útil para comprender los peligros que presenta la ceniza a medida que se desplaza hacia áreas más pobladas, como los efectos nocivos para la salud de la población, la seguridad y el daño irreversible de maquinaria. El presente estudio tiene como objetivo el estudio de la relación de parámetros de material particulado PM<sub>2.5</sub> y su relación meteorológica con eventos de largo alcance como las emisiones volcánicas de Sangay. Adicionalmente se busca realizar una descripción de las partículas depositadas, estudiar su tamaño, y morfología de muestras seleccionadas durante trece

meses continuos y determinar el análisis de las trayectorias de la ceniza desde el volcán hacia la ciudad de Guayaquil.

Las muestras de material particulado aerodinámico PM2.5, se recogieron a través de membranas de carbono (disco de 12 mm de diámetro marca Agar Scientific) durante aproximadamente 4-7 días. Las muestras de cenizas volcánicas fueron recolectadas en Guayaquil siguiendo la metodología de Horwell (2007). Las distribuciones de tamaño de grano se determinaron mediante un analizador de distribución de tamaño de partículas por dispersión láser (LA-300 Horiba) analizando las partículas comprendidas entre 4 a 11 (62 a 0.5 micras). Los principales parámetros estadísticos se determinaron de acuerdo con (Folk 1980) utilizando el software SFT. El análisis de datos se realizó con la versión del programa RR 3.5.1 junto con RStudio y los paquetes openair, maps, maptools (Grange et al. 2016). El contador de partículas se midió con el monitor de calidad de aire ambiental para PM2.5 acoplado a una estación climática ambiental modelo WS-2000 ubicada en Guayaquil. El FEI-SEM con espectrometría de energía integrada (EDS) se utilizó para estudiar la composición química de muestras seleccionadas utilizando el software de espectro Génesis (Baron y Willeke 2001).

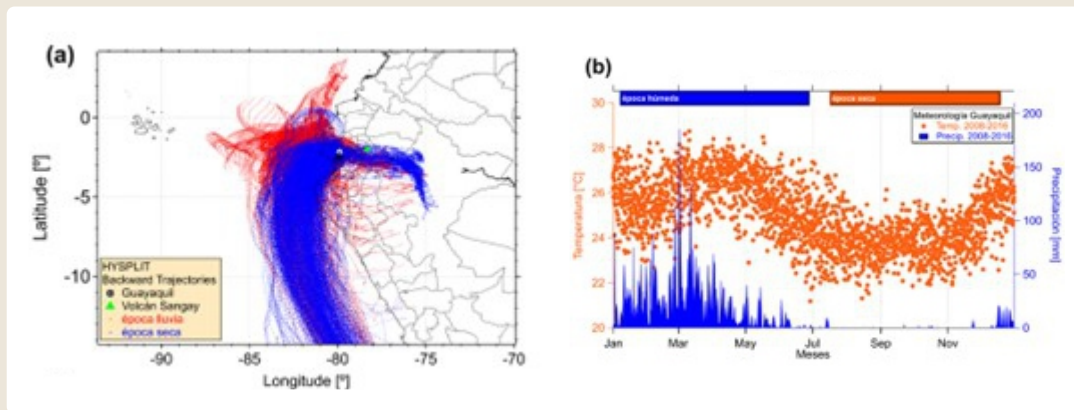
De acuerdo con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (IG-EPN), hubo al menos tres llegadas de ceniza volcánica a Guayaquil durante 2020 y 2021 (9 de junio de 2020, 20 de septiembre de 2020, 13 de abril de 2021).

La muestra de junio de 2020 es unimodal y tiene un valor medio de 55.8  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, con distribución asimétrica (-0.383  $\mu\text{m}$ ) y leptocúrtico (1.293). Las partículas de ceniza de la erupción de junio de 2020 son de dos tipos principales: un vidrio de color oscuro, baja cristalinidad, buena redondez, vesículas bien con vesículas redondeadas de 2 a 4 micrómetros (Fig. 2-a) y vesículas bajas angulares de color claro. forma de amigdaloides y baja redondez, pero con vesículas de 100 micras de tamaño (Fig. 2-b). La muestra de septiembre de 2020 es bimodal con un valor medio de 35.2  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, asimétrica hacia el muy fino (-0.382  $\mu\text{m}$ ) y mesocúrtico (1.293). Las partículas de ceniza de

septiembre de 2020 son de color claro, angulares a esféricas (Fig. 2-c) a alargadas (Fig. 2-d) de baja redondez con vesículas de unas 10 micras. En el evento de septiembre se alcanzó un pico alto de hasta 100  $\mu\text{g m}^3$  de PM2.5, aunque se registró por un período breve (< 1 h). La muestra caída en Guayaquil en abril de 2021 es unimodal con un valor medio de 41,1  $\mu\text{m}$ . Está mal clasificada, asimétrica hacia el fino (-0.359  $\mu\text{m}$ ) y leptocúrtico (1.439). Las partículas aparecen de color claro, bien angulares (Fig. 2-e), alargadas con vesículas redondeadas de 3-4 micrones de tamaño (Fig. 2-f). Todas las muestras de las tres erupciones no tienen cristales libres y se observaron raros fragmentos líticos.

Usando un análisis de trayectorias de masas de aire con el modelo de trayectorias integrada lagrangiana híbrida HYSPLIT por sus siglas en inglés, y su interface web Real-time Environmental Application and Display System READY, para mayor información referirse al siguiente enlace:

<https://www.ready.noaa.gov/index.php>. En nuestro caso se usó la información del satélite meteorológico de datos de asimilación global GDAS de los datos de Guayaquil en el 2020 evidencia altas precipitaciones húmedas en el primer semestre de cada año (Fig 1 a), lo cual corresponde a la estacionalidad durante la época húmeda con temperaturas de  $27 \pm 2$  °C y humedad relativa de 85%. bajo determinadas condiciones, puede producir esas precipitaciones húmedas ocasionales que se refieren a la figura 1 a-b. Durante la segunda mitad del año, las temperaturas descienden y es frecuente un ambiente nublado, existe ausencia de lluvia, la temperatura es de  $25 \pm 2$  °C y la humedad relativa media 60%, relativamente inferior a la de la época de lluvias (Fig. 1 b). La velocidad y la dirección del viento rondan los 2 m/s y ocurrieron desde las direcciones oeste y norte durante la primera mitad del año, mientras que la velocidad del viento aumentó levemente a 2.5 m/s con vientos dominantes provenientes de las regiones sur y suroeste. Curiosamente, hay una alta incidencia de ráfagas de viento que suelen alcanzar hasta 12 m/s con mayo durante la segunda mitad del año. Estos datos coinciden con los presentados por el análisis de trayectorias de masas de aire usando HYSPLIT (Fig 1 a).



► Fig. 1 Análisis de las direcciones de masas de aire; b) Gráfica de la temperatura y la precipitación anual durante el 2008-2016, proyecto Lab FREE y bomberos de Guayaquil.

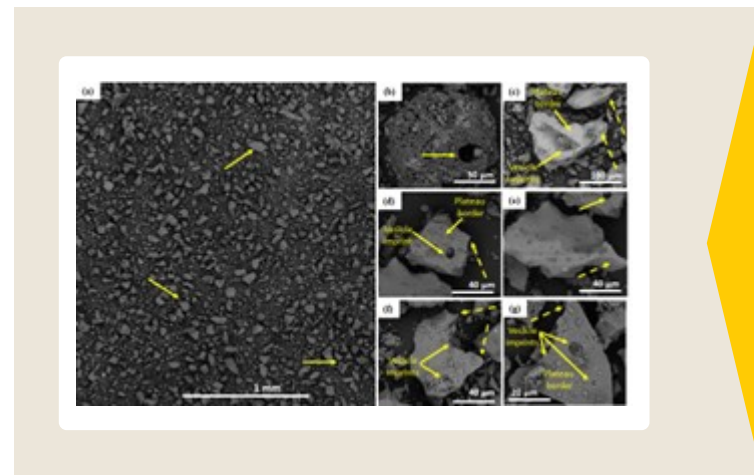
En base a lo anteriormente mencionado, nuestros resultados muestran que existe una relación directa entre la estacionalidad y el alcance de las cenizas volcánicas a larga distancia. Es decir, en la época de lluvia debido a condiciones de alta precipitación y humedad ambiental, la lluvia ayuda a la deposición de ceniza volcánica y previene que se propague a largas distancias. Por otra parte, durante la época seca, se presentan condiciones apropiadas para el desplazamiento de partículas volcánicas, debido a la ausencia de lluvia, condiciones ambientales más secas y el incremento de las corrientes de aire, a manera de depositación seca. Cabe enfatizar, que todo eso anteriormente mencionado, depende de la intensidad de las explosiones volcánicas y la energía expulsada por el volcán.

Por otra parte, la morfología externa de los fragmentos de tamaño superior a  $2 \mu\text{m}$  varía de esférica a angulosa a altamente irregular. Otras partículas tienen aspecto rugoso, curvo y de forma irregular. Otros fragmentos tienen una morfología alargada y su superficie parece ser lisa (fluidal).

Las vesículas aparecen vacías y ocasionalmente llenas de un material de grano más fino. Además, los granos  $>2 \mu\text{m}$  tienen pegado materiales/partículas más pequeños y finos en sus superficies por efecto de aglutinación.

Las partículas más finas no tienen aspecto anguloso y sus superficies no muestran la típica morfología "esponjosa" ni "huellas de vesículas". Las partículas

en el agregado tienen una distribución de tamaño polidispersas.



► Fig. 2 Imágenes SEM de cenizas volcánicas con una amplia gama de tamaños y morfología del transporte de largo alcance erupcionado por el Sangay y recolectado en Guayaquil. 9 de junio de 2020 (b,c), 20 de septiembre de 2020 (d, e) y 13 de abril de 2021 (f,g).

En conclusión, el comportamiento de la columna volcánica del Sangay es de suma importancia debido a sus repercusiones no sólo para poblaciones aledañas sino también para sectores urbanos costeros como la ciudad de Guayaquil. Se recomienda aumentar el uso de monitoreo continuo y por varios años para poder evaluar los eventos de polución de largo alcance ocasionada por el volcán Sangay e indicar propuestas para ayudar a reducir la afectación a la población, al tráfico aéreo y demás.

## REFERENCIAS

- ▶ Cas R.A.F., Wright J.V. (1987). *Volcanic Successions – Modern and Ancient*. Allen & Unwin, London, pp 1–528
- ▶ Baron PA, Willeke K. (2001). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. Wiley,
- ▶ Carn S.A., Froyd, K. D., Anderson, B. E., Wennberg, P., Crouse, J., Spencer, K., Dibb J. E., Krotkov N. A., Browell E. V., Hair J. W., Diskin, G. Sachse G., Vay, S. A. (2011). In situ measurements of tropospheric volcanic plumes in Ecuador and Colombia during TC4 *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 doi: <https://doi.org/10.1029/2010JD014718>
- ▶ Folk R.L. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company,
- ▶ Forbes L, Jarvis D, Potts J, Baxter PJ. (2003) Volcanic ash and respiratory symptoms in children on the island of Montserrat, *British West Indies Occupational and Environmental Medicine* 60:207 doi:10.1136/oem.60.3.207
- ▶ Grange SK, Lewis AC, Carslaw DC. (2016). Source apportionment advances using polar plots of bivariate correlation and regression statistics *Atmospheric Environment* 145:128-134 doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.016>
- ▶ Horwell C. (2007). Grain size analysis of volcanic ash for the rapid assessment of respiratory health hazard. *Journal of environmental monitoring: JEM* 9:1107-1115 doi:10.1039/b710583p
- ▶ Lelieveld J, Evans JS, Fnais M, Giannadaki D, Pozzer A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*. 525:367-371 doi:10.1038/nature15371
- ▶ Lettino A, Caggiano R, Fiore S, Macchiato M, Sabia S, Trippetta S. (2012). Eyjafjallajökull volcanic ash in southern Italy. *Atmospheric Environment* 48:97-103 doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.037>
- ▶ McCormick MP, Thomason LW, Trepte CR., 1995. Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature* 373:399-404. doi:10.1038/373399a0
- ▶ Parra R, Bernard B, Narváez D, Le Pennec J-L, Hasselle N, Folch A. (2016). Eruption Source Parameters for forecasting ash dispersion and deposition from vulcanian eruptions at Tungurahua volcano: Insights from field data from the July 2013 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 309:1-13 doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.001>
- ▶ Weiser F, Baumann E, Jentsch A, Medina FM, Lu M, Nogales M, Beierkuhnlein C. (2022). Impact of Volcanic Sulfur Emissions on the Pine Forest of La Palma. Spain. *Forest* 13: 299 doi: <https://doi.org/10.3390/f13020299>
- ▶ Zuo M, Zhou T, Man W, Chen X, Liu J, Liu F, Gao C. (2022). Volcanoes and Climate: Sizing up the impact of the recent Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic eruption from historic perspective. *Advance in Atmospheric Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2034-1>