

Análisis estadístico de simulaciones numéricas de dispersión y caída de ceniza del volcán Cayambe para la estimación del impacto en el sector florícola, Cantón Cayambe, Ecuador

Statistical analysis of numerical simulations of dispersion and ash fall from the Cayambe volcano for the estimation of the impact in the floricultural sector, Canton Cayambe, Ecuador

Fernando Mauricio Pavón Cevallos¹

Diana Contreras²

Recibido 25 de octubre de 2020; aceptado 30 de abril de 2021

RESUMEN

El complejo volcánico Cayambe representa una amenaza para los 85 795 habitantes a sus alrededores que basan su economía en la floricultura. Hasta el momento no se han hecho estimaciones automatizadas del impacto económico que tendría una eventual erupción del volcán Cayambe en la zona. La delimitación de zonas de afectación por caída de ceniza se obtuvo mediante análisis estadístico de simulaciones numéricas de escenarios eruptivos. Se digitalizaron 39 006 edificaciones a partir de fotografía aérea para identificar y cuantificar la infraestructura que potencialmente podría ser afectada ante la ocurrencia de este fenómeno. El procesamiento y análisis de los datos censales permitió caracterizar el área de estudio y describir el impacto que un evento de este tipo tendría sobre la población local. Así se determinaron espesores de ceniza de 15 a 45 mm que cubren el 97.83% de la superficie con pérdidas estimadas que ascienden los 140 millones de dólares americanos en plantas e invernaderos. La superficie del cantón Cayambe en su totalidad se vería afectada por caída de ceniza. Esto afectaría a más de 100 poblados, 21 844 hogares y 7

¹ Escuela Politécnica Nacional. Comisión de Geofísica, Sección Nacional del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ecuador, correo electrónico: fernando.pavon@outlook.es.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6695-8076>

² School of Engineering, Newcastle University, UK. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2852-6015>

611 plazas de trabajo en las florícolas. A mediano y largo plazo, las economías de al menos 3 500 familias se verían afectadas por el desempleo a causa de las pérdidas económicas que sufriría la industria florícola.

Palabras clave: *volcán Cayambe, caída de ceniza, Sistemas de Información Geográfica (SIG), sector florícola, Ecuador.*

ABSTRACT

The Cayambe volcanic complex represents a hazard to the 85 795 inhabitants in their surroundings who base their economy on floriculture. To our best knowledge, no automated estimates have been made of the economic impact that an eventual eruption of the Cayambe volcano in the area would cause. The delineation of areas affected by ashfall were obtained through a statistical analysis of numerical simulations of eruptive scenarios. 39 006 buildings were digitalized from aerial photography to identify and quantify the infrastructure that could be affected by this phenomenon's occurrence. The processing and analysis of the census data allowed characterizing the study area and describing the impact that an event of this type would have on the local population. Thus, ash thicknesses of 15 mm to 45 mm covering 97.83% of the surface with estimated losses of up to USD 140 million in plants and greenhouses. The surface of the canton would be affected by ashfall. This effect would affect more than 100 villages, 21 844 homes and 7 611 jobs in floriculture. In the medium and long term, the economies of at least 3 500 families would be affected by unemployment because of the economic losses that the floriculture industry would suffer.

Key words: *Cayambe volcano, ashfall, Geographic information System (GIS), floriculture, Ecuador.*

1. Introducción

A pesar de la reducción de la mortalidad en algunos países, las pérdidas económicas causadas por el riesgo de desastre al 2015 ascienden en promedio de 250 000 millones y 300 000 millones de dólares americanos a nivel mundial (EIRD/ONU, 2015). Es por esta razón que en los últimos años se han incrementado los esfuerzos para caracterizar la vulnerabilidad social asociada a los peligros volcánicos (Alcorn *et al.*, 2013; Contreras *et al.*, 2020; Maharani *et al.*, 2016) en diferentes localidades y enfoques por el impacto que han tenido estos eventos a lo largo de la historia (Wood & Soulard, 2009). A manera de ejemplo, entre julio del 2001 y octubre del 2002 la erupción del Etna, en Italia, occasionó serios inconvenientes a la población que vivía en las zonas aledañas al volcán sumado a las pérdidas económicas ocasionadas por la cancelación de vuelos de los aeropuertos de Catania y Reggio Calabria (Costa *et al.*, 2006) al igual que la erupción del volcán Eyjafjallajökull en Islandia el 20 de marzo de 2010, que llevó al cierre del espacio aéreo sobre la mayor parte del norte de Europa entre el 14 y el 20 de abril de ese mismo año, afectando aproximadamente a 10 millones de

pasajeros (Volcano Discovery, 2010). Por esta razón, la comunidad científica ha explorado este campo con la adopción de metodologías que simulan y modelan la caída de ceniza de escenarios pasados para determinar el alcance e impactos que tendrían los asentamientos humanos ubicados en zonas proximales a volcanes activos (Chester *et al.*, 2000; Franco-Ramos *et al.*, 2013; Gogu *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2021).

En la región, la actividad volcánica y en particular la caída de ceniza, no está exenta a generar pérdidas económicas en los elementos expuestos como la actividad agrícola y pecuaria que se desarrolla alrededor de volcanes (Campos-Durán & Alvarado, 2019; Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020) por la fertilidad que presentan los suelos (Contreras, 2006). Por otro lado, la caída de ceniza no solo afecta a sectores de ganadería y agricultura, considerando el impacto que tienen las erupciones volcánicas en el tránsito aéreo como los ocasionados por el volcán Turrialba en Costa Rica que recae en pérdidas económicas (Campos-Durán & Alvarado, 2018) y los casos mencionados anteriormente.

En el Ecuador, desde la década de los ochenta, se asiste a un proceso de profundización de las relaciones capitalistas de producción en el sector agrario, lo que tiene dos efectos claros en las zonas de producción agrícola. Por un lado, el desplazamiento del eje productivo hacia la agroindustria y la exportación, y por otro la diversificación ocupacional (Martínez, 1996).

El Cayambe es un volcán activo que se ubica en la parte norte de la Cordillera Oriental de los Andes del Ecuador (latitud 00° 02' norte; longitud 77° 99' oeste; altura 5 790 metros), a 60 km al nororiente de la capital del Ecuador, Quito y a apenas 15 km al oriente de la ciudad de Cayambe (Figura 1). Durante los últimos cuatro milenios, el volcán Cayambe tuvo tres períodos eruptivos de cerca de 700 años cada uno, separados por fases de descanso del orden de 500 a 600 años (Samaniego *et al.*, 1998). La última erupción del volcán Cayambe sucedió entre los años 1785 y 1786; Samaniego *et al.* (1998) la describen como una erupción subglaciar con caídas moderadas de ceniza en la ciudad de Cayambe; la cual terminó con un lahar en 1786 (Ascázubi, 1982).

El tiempo transcurrido después de la última erupción, registrada entre 1785 y 1786, no resulta suficiente para poder afirmar que el último periodo de actividad ya terminó (Samaniego *et al.*, 2004b). Los registros históricos y geológicos evidencian que los productos de las erupciones volcánicas de la actividad del Cayambe corresponden a flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y caídas de lapilli y ceniza (Samaniego *et al.*, 2004a), todos ellos fenómenos que pueden afectar de forma importante el normal desenvolvimiento de la actividad de cultivos de flores y consecuentemente, la disponibilidad de empleos y la estabilidad económica del sector.

Los 20 vestigios de las erupciones volcánicas en el pasado (Samaniego *et al.*, 2004a) evidencian el riesgo que una erupción en la actualidad representaría para las zonas de producción de cultivos de flores por la acumulación de ceniza y, dependiendo de los espesores podrían afectar considerablemente las plantas e invernaderos (Jenkins *et al.*, 2015; Pavón *et al.*, 2019) en esta zona.



Figura 1. a) Localización de Ecuador en Sudamérica, b) ubicación del área de estudio en Ecuador y, c) área de estudio.

Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía (Instituto Geográfico Militar —IGM, 2012a).

De allí que frente a una eventual erupción del volcán Cayambe, es importante conocer los potenciales impactos y efectos sobre la actividad de cultivos de flores, base económica del cantón en la actualidad. El propósito de este estudio es determinar probables escenarios de afectación de caída de ceniza del volcán Cayambe, evaluar el grado de exposición de la actividad florícola y comparar el grado de susceptibilidad de caída de ceniza en las zonas de actividad florícola en el cantón Cayambe.

2. Materiales y métodos

2.1 Impacto socioeconómico de los desastres en la región

De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD/ONU, 2015), en América Latina las pérdidas económicas para los países por causa de los desastres cada vez son mayores, lo que tiene un efecto directo en el crecimiento de su Producto Interno Bruto (PIB). Pese a ello, en la región son pocos los países que han logrado cuantificar de manera al menos aproximada el impacto real de estos eventos sobre su sistema económico.

En general los estudios realizados muestran que en la región se han producido tanto desastres de tipo intensivo como extensivo¹ (EIRD/ONU, 2011). En la región los datos muestran que menos del 1% son manifestaciones intensivas del riesgo, con un promedio de ocurrencia de 23 por año, cada uno de ellos con 37 vidas humanas perdidas en promedio, 21 mil personas afectadas, 1 064 viviendas destruidas y 1 302 viviendas afectadas. Por otro lado, en la región, las manifestaciones extensivas del riesgo son muy frecuentes y aunque el impacto económico de cada una es mucho menor, en conjunto es muy representativo para los países y sus economías.

2.2 Escenario eruptivo potencial para el volcán Cayambe

Estudios realizados por Samaniego (1996), Samaniego *et al.* (1998), Samaniego *et al.* (2004a) y Samaniego *et al.* (2004b) describen que los escenarios eruptivos del volcán Cayambe se basan en el conocimiento geológico, geofísico y geoquímico del volcán Cayambe y, las investigaciones realizadas en volcanes de comportamiento similar al complejo volcánico del Cayambe. Estos escenarios eruptivos fueron construidos por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (Bernard & Samaniego, 2017).

Para el presente estudio, se utilizó una erupción magmática moderada (Escenario S2), correspondiente a una erupción volcánica de tamaño moderado VEI 3–4. Esta erupción es caracterizada por la formación de un domo o un flujo de lava viscosa en los flancos norte y oriental (Samaniego *et al.*, 2002). La afectación en las zonas urbanas por caída de ceniza está directamente relacionada con la velocidad y dirección del viento (Samaniego *et al.*, 1998).

Este escenario corresponde a una erupción de tipo peleana datada hace 380 años (Samaniego *et al.*, 1998) y se lo conoce como San Marcos por los productos acumulados en las zonas proximales al volcán, los cuales formaron la laguna conocida con el mismo nombre ubicada en el flanco norte en el Parque Nacional Cayambe Coca. Los depósitos de tipo bloques y ceniza cubren una superficie

¹ Intensivo cuando en una unidad político administrativa local hubo 25 o más vidas humanas perdidas y/o 300 o más viviendas destruidas. Extensivo es cuando los registros son inferiores a estos umbrales. Este resultado se obtuvo tomando en consideración cuatro variables básicas: pérdida de vidas humanas, personas afectadas, viviendas destruidas y viviendas dañadas.

aproximada de 6.9 km² y un volumen estimado de 0.4 km³ (Samaniego, 1996). Al suroeste de la cumbre del volcán se tiene depósitos que superan los 150 mm de acumulación de caída de ceniza, este evento (San Marcos) ha ocurrido en cuatro ocasiones con erupciones de tamaño similar en los últimos 4 000 años. Bernard y Samaniego (2017) mencionan que en Ecuador se tiene como ejemplo de tamaño y dinamismo la erupción del volcán Guagua Pichincha en octubre de 1999 (umbral bajo) y del volcán Reventador en noviembre de 2002 (umbral alto).

2.3 Recolección de datos

Tomando en consideración la falta de información volcanológica del complejo volcánico del Cayambe, se utilizaron parámetros eruptivos generales definidos por Mastin et al. (2009) modificados para ajustar los resultados a los obtenidos en las turberas en los estudios de Samaniego *et al.* (2002). Los parámetros utilizados corresponden a los descritos en el estudio de Pavón *et al.* (2019), propio a un crecimiento y posterior destrucción de domos de lava para obtener la tasa de descarga conocida de 4×10^6 kg/s y un volumen de magma 0.03 km³ (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros adaptados para el escenario San Marcos-S2 del volcán Cayambe

Dinamismo	Ejemplo Mundo	VEI	Altura columna	Duración	Descarga	Volumen magma DRE
Peleano Subpliniano	Spurr, 1992	3-4	11 km	6 hrs.	4×10^6 kg/s	0.03 km ³

2.4 Zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza

Se realizaron diferentes modelaciones con una ventana de tiempo de diez años, alternando el inicio del evento entre los meses. Con esto, lo que se obtiene son 120 modelaciones que fueron interpoladas utilizando análisis espacial para mejorar las isopacas generadas por el código *Ash 3D* y validadas con el mapa de amenazas del volcán Cayambe. Las 120 simulaciones fueron comparadas con los trabajos de campo de Samaniego *et al.* (1998) en el corte de la turbera Cayambe (34-47), la cual contiene 12 depósitos de ceniza que corresponden a erupciones de tamaño similar al evento San Marcos ocurridos en los últimos 4 500 años.

Esta comparación entre los espesores de erupciones pasadas con el análisis estadístico de los resultados de las 120 simulaciones, arrojan que ningún espesor de las modelaciones se encuentran fuera del rango de espesores del corte (30-190 mm) y que la mayoría de los eventos ocurridos se ubica cerca de la mediana de distribución de los resultados de las modelaciones (70 mm). La coherencia entre los datos de campo y los resultados de las modelaciones (Figura 2) establecen que los productos depositados (ceniza y lapilli) en la turbera de Cayambe corresponden a erupciones de tamaño similar o más pequeñas que el escenario S2.

Validación con trabajos de campo

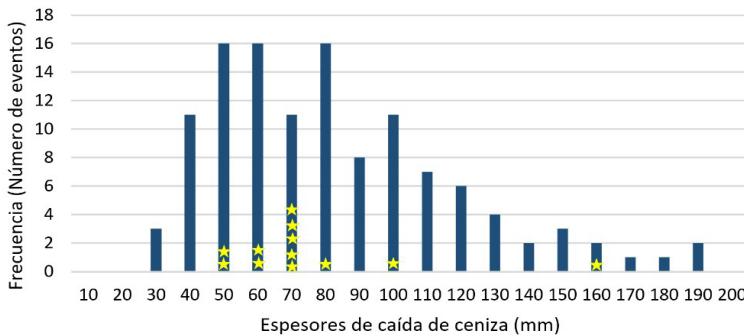


Figura 2. Histograma de frecuencia de caída de ceniza de simulaciones (barras azules) comparado con el espesor de las 12 capas de ceniza y lapilli identificadas en la turbera de Cayambe (estrellas amarillas).

De esta manera, a partir de la automatización de procesos (Figura 3), validación de las modelaciones con los datos obtenidos en campo y el análisis probabilístico de los resultados (Figura 4a), que representan las zonas potencialmente afectadas por ceniza en distintos espesores (> 80 mm, 45 mm, 30 mm, 15 mm, 10 mm, 5 mm, 3 mm, 1 mm, > 0), se pudo generar cinco mapas de amenazas (Figuras 4b, c, d, e, f) para el escenario S2 a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25% y 1%).

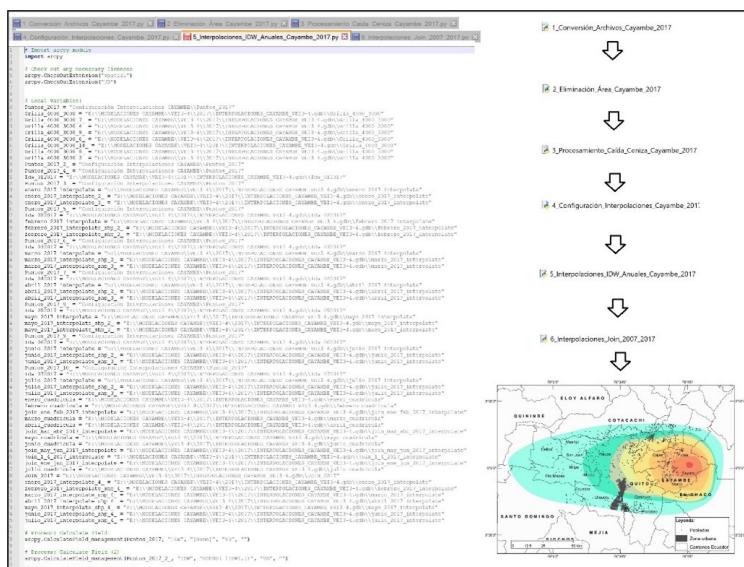
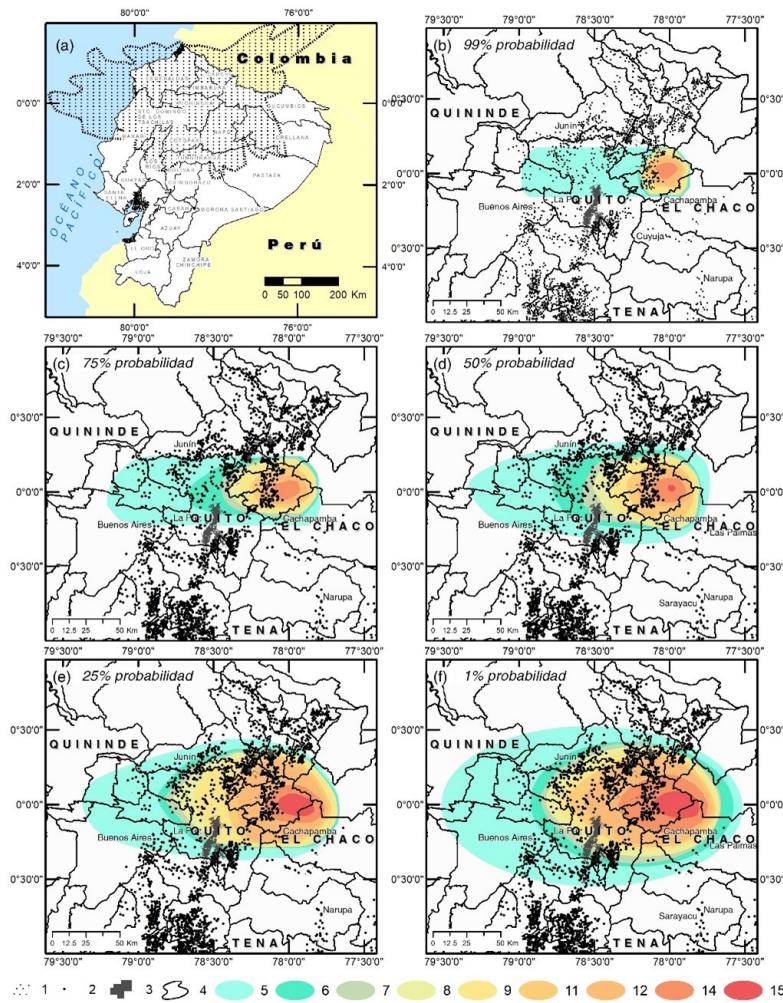


Figura 3. Automatización de procesos y generación automática de isopacas del volcán Cayambe – VEI3-4.



1.- Modelación de dispersión de ceniza, 2.- Poblados, 3.- Zona Urbana, División política administrativa del Ecuador: 4.- Cantones, Isopacas ceniza: 5.- 0.01 mm, 6.- 1 mm, 7.- 3 mm, 8.- 5 mm, 9.- 10 mm, 10.- 20 mm, 11.- 30 mm, 12.- 50 mm, 13.- 80 mm

Figura 4. Resultado de las 120 simulaciones utilizadas para el análisis probabilístico (a). Mapas de amenazas (b, c, d, e, f) para el escenario San Marcos - S2 a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25%, 1%).

Existen diferencias considerables entre cada uno de los mapas, siendo el mapa de 99% el más optimista (correspondiente a la caída mínima esperada en diferentes sectores) y el de 1% el más conservador (correspondiente a la caída máxima esperada en diferentes sectores). Las isopacas fueron analizadas para obtener la probabilidad de ocurrencia al 50% de caída de ceniza y con esto generar el archivo final de las zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza del volcán que será utilizado para el análisis de resultados, considerando

que la probabilidad de ocurrencia al 50% es una de la más utilizada en la comunidad científica (Biass *et al.*, 2016; Bonadonna *et al.*, 2005).

2.5 Zonas vulnerables a caída de ceniza en el cantón Cayambe

Para el estudio han sido considerados factores como elementos expuestos la población, infraestructura y actividad económica del cantón Cayambe para la definición de la vulnerabilidad ante caída de ceniza; considerando que la población representa el factor más frágil y susceptible frente una amenaza (Stieltjes & Mirgon, 1998; Torrieri *et al.*, 2002; Yokoyama *et al.*, 1984).

2.5.1 Actividad florícola afectada por caída de ceniza

Utilizando la ortofotografía del Instituto Geográfico Militar (IGM) (2012b), foto identificación y verificación en campo, se digitalizaron las edificaciones relacionadas a la actividad de cultivos de flores en la zona de estudio (Tabla 2). Los datos digitalizados fueron unificados con los archivos levantados por el IGM por restitución fotogramétrica (Figura 5), dando un total de 17 916 y 21 090 edificaciones de tipo punto (menores a 6 m²) y polígono (mayores a 6 m²) respectivamente. Para el estudio no se ha considerado técnicas alternativas como la generación de ortoimágenes a partir de drones o imágenes de satelitales de alta resolución para la captura de las edificaciones por métodos fotogramétricos o digitalización por los costos que implicaría el procesamiento de la información a la escala requerida tomando en cuenta la superficie. Superficies menores a 35 ha haría viable esta técnica considerando los costos de generación del insumo que bordea los USD 3 000 (Granados-Bolaños *et al.*, 2021).

Tabla 2. Edificaciones levantadas en el cantón Cayambe según catálogo de objetos IGM

Edificación (actividad económica)	Edificaciones	
	< 6 m ²	> 6 m ²
Granja	717	599
Establo	0	4
Invernadero	65	1 758
Cobertizo	4 023	335
Dependencia	5	1
Granero	0	1
Huerto	1	2
Vivero	0	1
No aplica	13 105	18 389
TOTAL	17 916	21 090

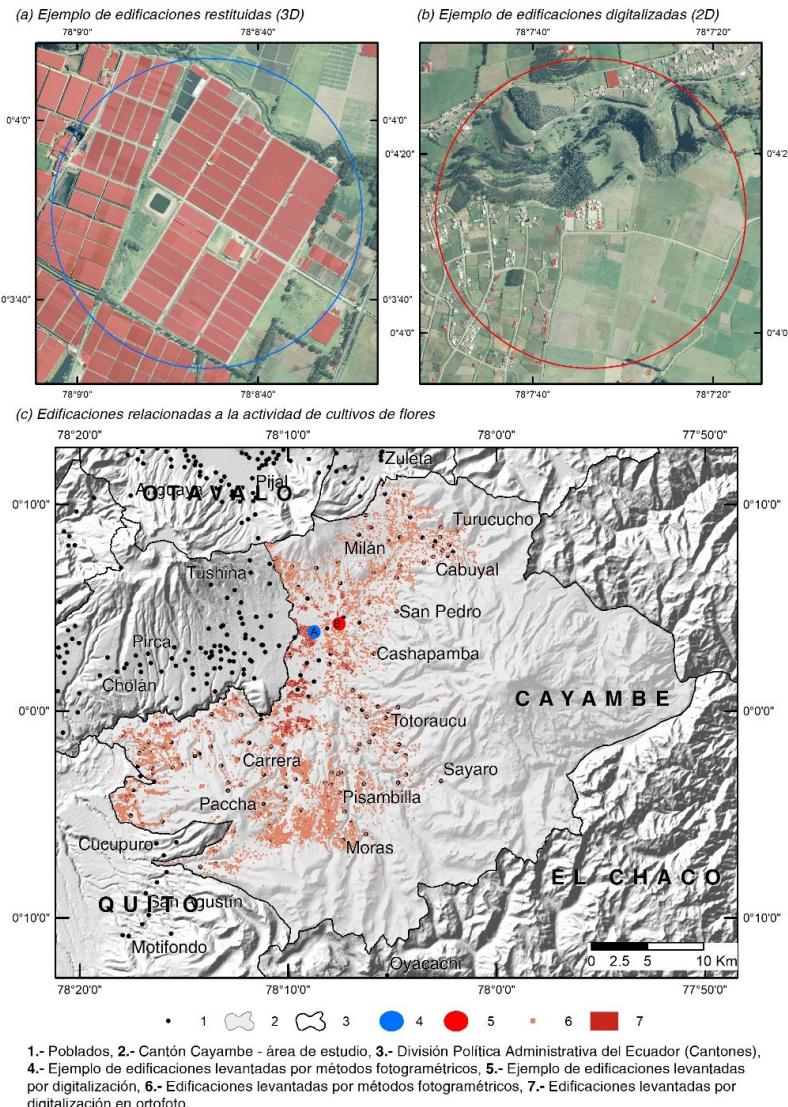


Figura 5. a) ejemplo de edificaciones levantadas por métodos fotogramétricos, b) ejemplo de edificaciones digitalizadas sobre ortofoto (IGM, 2012b) y, c) edificaciones relacionadas a la actividad de cultivos de flores.

2.5.2 Susceptibilidad por caída de ceniza

Se manejó la cartografía censal del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2010) e información levantada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP, 2009), mediante análisis espacial se determinó el número de habitantes afectados; para lo cual, se tomó en consideración el

nivel de detalle que se dispone de la cartografía censal (sectores censales) en el Ecuador, tanto en la zona urbana (sector amanzanado) como en la zona rural (sector disperso), esto con la finalidad de seleccionar por localización y evaluar la susceptibilidad de la población en cada uno de los espesores.

De igual manera, utilizando la información levantada por el MAGAP (2009) se determinó que porcentaje de la población dedicada a los cultivos de flores y sus actividades conexas se verían afectadas directa e indirectamente ante una erupción del volcán Cayambe, cuantificando el número de predios dedicados a la actividad de cultivos de flores (Tabla 3 y Tabla 4) afectados por los diferentes espesores de caída de ceniza (Tabla 5).

Tabla 3. Predios de cultivos de flores por parroquias y tamaño del cantón Cayambe

Parroquia	Cultivos de flores		Áreas	
	Número	< 3 ha	< 20 ha	> 20 ha
Otón	6	1	3	2
Santa Rosa de Cuzubamba	5	0	3	2
Cangahua	15	0	6	9
Ascázubi	6	0	4	2
Cayambe	36	2	20	14
TOTAL	68	3	36	29

Fuente: Censo Nacional Florícola (MAGAP, 2009).

Tabla 4. Diversificación de los cultivos de flores por tipo

Parroquia	Rosa	Rosa flor de verano	Rosa clavel	Flor de verano	Información no disponible	Total
	Número de cultivos					
Otón	2	0	3	0	1	6
Santa Rosa de Cuzubamba	1	0	0	2	2	5
Cangahua	13	0	0	0	2	15
Ascázubi	4	0	0	1	1	6
Cayambe	32	3	0	0	1	36
TOTAL	52	3	3	3	7	68

Fuente: Censo Nacional Florícola (MAGAP, 2009).

Tabla 5. Número de predios dedicados a la actividad de cultivos de flores afectados por caída de ceniza del volcán Cayambe

Espesores (mm)	Predios afectados (número)
15	13
30	45
45	10

2.5.3 Elementos expuestos por caída de ceniza

Considerando los estudios realizados por el MAGAP, en el año 2009 se determinó el costo aproximado que tienen los cultivos de flores encuestados, cuyos valores ascienden a 150 000 dólares por ha; de los cuales, el 45% corresponde al precio de las plantas; seguido del 25% a la infraestructura de invernaderos. El 20% pertenece al valor de la tierra y finalmente, el 10% constituyen las construcciones que existen en los cultivos de flores.

Determinado el precio promedio por ha de los cultivos de flores; mediante el cálculo del porcentaje correspondiente a cada una de las variables analizadas (plantas, invernaderos, valor de la tierra y edificaciones) se verificó el valor del riesgo de pérdidas de los elementos expuestos por caída de ceniza del volcán Cayambe (Tabla 6). Con esto lo que se obtiene es el valor de pérdida de plantas, invernaderos, tierra y construcciones afectada por caída de ceniza (espesores de 10 a 30 mm) que sumados dan la pérdida total de la amenaza analizada.

Tabla 6. Valor de riesgo de pérdidas de los elementos expuestos

Amenaza	Espesores	Costo Ha	Costo total	Pérdidas plantas	Pérdidas invernaderos	Pérdidas tierra	Pérdidas construcciones	Pérdidas total
Ceniza	10-30 mm	150 000	CT=Ha*	Pp=Ha*	Pi=Ha*	Pt=Ha*	Pc=Ha*	PT=Pp+Pi+Pc
			150 000	150 000*	150 000*	150 000*	150 000*	
				0.45	0.25	0.20	0.10	Pt+Pc

Fuente: Censo Nacional Florícola (MAGAP, 2009).

3. Resultados

En lo concerniente a las zonas vulnerables a caída de ceniza, el uso de suelo con mayor superficie en el cantón Cayambe corresponde a la vegetación arbustiva y herbácea, cuya superficie alcanza las 66 293 ha del total y los espesores esperados serían de al menos 10 mm hasta los 80 mm de acumulación (Figura 6). 25 737 edificaciones estarían afectadas con espesores de ceniza entre los 10 mm hasta los 45 mm de acumulación con diferentes grados de afectación en las viviendas considerando, el peso que ejerce la ceniza sobre los techos.

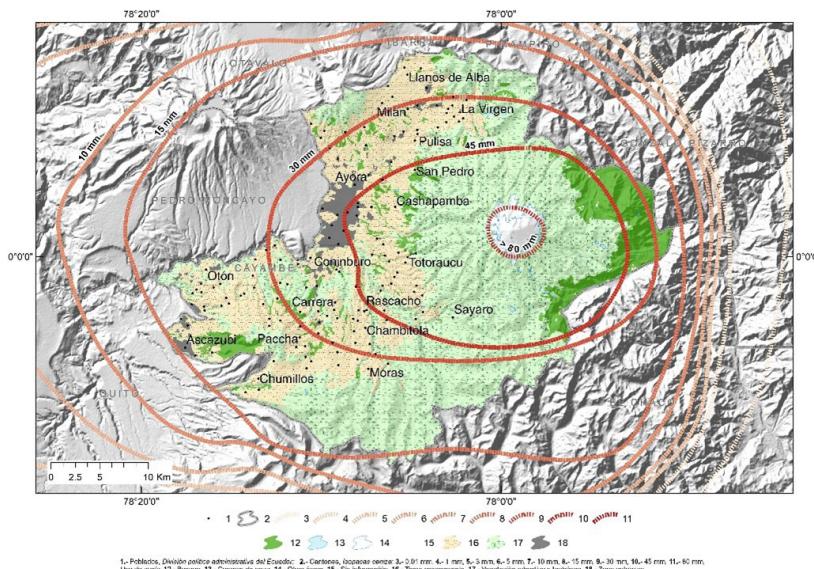


Figura 6. Escenario S2, 50% de probabilidad de caída de ceniza del Cayambe.

Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía (IGM, 2012a). Uso de suelo (MAGAP, 2014).

Del total de edificaciones afectadas por caída de ceniza, 1 821 invernaderos y 4 357 cobertizos estarían directamente relacionados con la actividad florícola con espesores que van desde los 10 mm hasta los 45 mm de acumulación (Tabla 7), distribuidas en cinco de las seis parroquias del cantón; de las cuales la parroquia de Cayambe tiene 68 florícolas con una superficie total 700 ha dedicadas a los cultivos de flores, que según los datos obtenidos del Censo Nacional Florícola alcanzan el 53% de la producción de flores en el cantón.

Tabla 7. Probable afectación de edificaciones por ceniza del volcán Cayambe

Edificio	Altura capas de ceniza				
	45 mm	30 mm	15 mm	10 mm	Total
Granja	277	16	1 022	0	1 315
Establo	2	0	2	0	4
Invernadero	1 370	13	436	2	1 821
Cobertizo	854	659	2 834	10	4 357
Dependencia	1	0	5	0	6
Granero	0	0	1	0	1
Huerto	1	1	1	0	3
Vivero	0	0	1	0	1
No aplica	6 098	5 156	6 955	20	18 229

La población del cantón Cayambe afectada alcanzarían los 85 795 habitantes distribuidos en 113 poblados (Tabla 8). El 51 % de la población corresponden a mujeres, 29 381 habitantes en edades de escolarización, 51 391 habitantes en edades de producción y 5 023 personas de la tercera edad. 7 611 trabajadores están directamente relacionados a los cultivos de flores en los trabajos de post-cosecha, cargos administrativos y de vigilancia (Figura 7). La afectación por caída de ceniza estaría desde los 5 mm de acumulación hasta los 80 mm, tomando en consideración los sectores censales que se encuentran en zonas proximales al volcán (Figura 8).

Tabla 8. Probables poblados y habitantes afectados por ceniza del volcán Cayambe

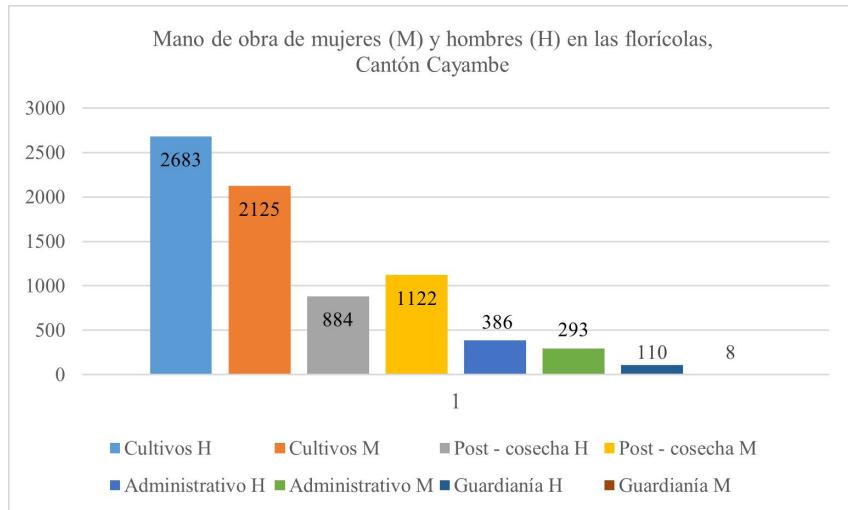


Figura 7. Cantidad de mano de obra por género en los cultivos de flores del cantón Cayambe.

Fuente: Censo Nacional Florícola (MAGAP, 2009).

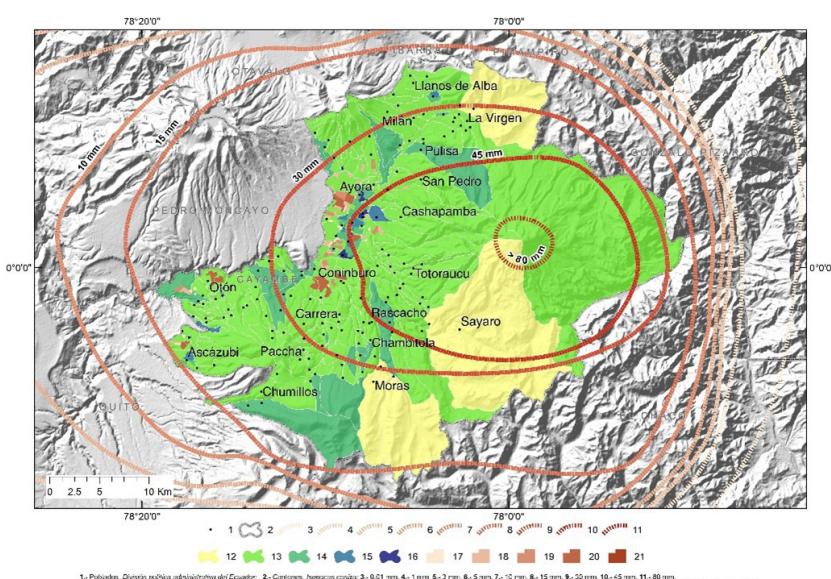


Figura 8. Escenario S2, 50 % de probabilidad de caída de ceniza del Cayambe.

Fuente: Modelo de sombras generado a partir de cartografía (IGM, 2012a). Cartografía Censal (INEC, 2010).

En el año 2013 la actividad de cultivos de flores alcanzó la cifra de 371 millones de dólares en exportaciones (EXPOFLORES, 2015); siendo los suelos del cantón Cayambe destinados a dicha producción y con esto, la actividad de cultivos de flores representa uno de los principales ingresos económicos para la zona.

En aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm, las plantas e invernaderos tendrían una afectación considerable, así como también diferentes efectos para la salud de personas y animales, como para la infraestructura que van relacionadas con los espesores en la acumulación de ceniza (Jenkins *et al.*, 2015). De esta manera, una erupción del Cayambe podría superar los noventa millones de dólares en pérdidas de plantas y cincuenta millones de dólares en los invernaderos del área de estudio causado por la caída de ceniza.

4. Discusión

La actividad del volcán Cayambe se ha caracterizado por la formación de domos y flujos de lava viscosa, además de explosiones breves con emisión de ceniza de corto alcance; son también característicos los flujos piroclásticos por colapso del domo, flujos de lodo y escombros por fusión del casquete glaciar (Samaniego *et al.*, 2004b). Esto se evidencia en las unidades geomorfológicas predominantes que son los flujos de lava que cubren aproximadamente un 12% de la superficie del cantón; los cuales están distribuidos a lo largo de varias unidades ambientales exceptuando el medio aluvial, los fondos y relieves de cuencas con rellenos volcánico sedimentarios.

La última erupción del Cayambe ocurrió entre 1785 y 1786, lo que hace ver como probable su reactivación, considerando la actividad del volcán Cayambe que para el evento San Marcos-S2 al año 2017 registró un 55% de probabilidad de ocurrencia (IGEPN, 2017a).

En cuanto a la caída de ceniza, dado que en la zona los vientos se dirigen principalmente de oriente a occidente (IGEPN, 2020), los asentamientos humanos de la parte occidental podrían verse afectados por este fenómeno. Ante la ocurrencia del escenario en estudio, también podría producirse el crecimiento de un domo en la cumbre o en el flanco occidental, lo que pondría en amenaza a la ciudad de Cayambe con caída de ceniza cuyos espesores en algunos casos podrían superar los 45 mm, esto afectaría a las actividades económicas de la zona, entre ellas el cultivo de flores.

Los mapas generados presentan grandes diferencias en la delimitación con los límites de caída de ceniza representados en el mapa de amenazas del volcán Cayambe (IGEPN e IRD, 2002). Los escenarios plateados disminuyen considerablemente el valor de la acumulación de ceniza, por ejemplo, en Cayambe los espesores estarían en 30-50 mm a diferencia del mapa del 2002 que se tiene espesores superiores a los 200 mm (IGEPN e IRD, 2002). De igual manera, en la ciudad de Quito los espesores esperados serían de 0.1 hasta los 5 mm en el escenario planteado a diferencia de los espesores que se tienen en

el mapa del 2002, cuyos valores ascienden los 10 mm de acumulación (IGEPN e IRD, 2002).

Según su espesor, la ceniza podría afectar a las poblaciones cercanas al volcán de manera diversa (Jenkins *et al.*, 2015). Así, por ejemplo, espesores mayores a 0.1 mm pueden causar afectación a la salud de las personas (enfermedades respiratorias e irritación de las mucosas) u ocasionar un impacto en función de la dirección de los vientos con el cierre de aeropuertos cercanos.

En el caso de espesores mayores a 1 mm, además de los problemas antes citados, se pueden producir daños en los cultivos, afectación al ganado y contaminación de fuentes de agua (Campos-Durán & Alvarado, 2019). En el caso del ser humano la irritación de los ojos y las vías respiratorias junto con secreción nasal, podrían ser los principales efectos. Finalmente, espesores mayores a 100 mm ocasionarían la pérdida de ganado por deshidratación y obstrucciones intestinales, pérdida total de cultivos y pastos; con ello la quiebra de los agricultores en la zona (Jenkins *et al.*, 2015).

Con respecto a los grupos vulnerables, se evidencia que más de 40 000 habitantes de la zona corresponden al grupo de la tercera edad y de menores de 18 años. Estos grupos son los más afectados por fenómenos volcánicos como la ceniza, que puede ocasionar problemas respiratorios (Jenkins *et al.*, 2015). Asimismo, la vulnerabilidad económica de estos grupos es mayor, especialmente en el área rural porque no todos cuentan con recursos económicos suficientes para solventar posibles pérdidas de cultivos y de sus viviendas. En el caso de los niños además de la afectación en su salud, se podrían ver afectadas las actividades educativas, lo que también significaría un impacto para este grupo poblacional.

Todas las afectaciones anteriormente descritas, ponen en evidencia la importancia de la prevención y la consolidación de un sistema de gestión de riesgos que desde un abordaje integral permita preparar al cantón frente a los posibles impactos de una erupción del volcán Cayambe; tomando como referencia estudios y acciones realizadas en México que plasman el potencial peligro que representa los fenómenos volcánicos asociados al complejo volcánico Tacaná que permiten sensibilizar a las autoridades de la Protección Civil y gubernamentales con el objetivo de mejorar los planes operativos y de emergencia (Vázquez *et al.*, 2021).

Con respecto a la metodología empleada en el estudio, las simulaciones obtenidas a través del modelo *Ash 3D* e interpolaciones para caída de ceniza en la ventana de tiempo de diez años, han permitido verificar el nivel de amenaza por caída de ceniza en los alrededores del volcán Cayambe. Dichos datos fueron obtenidos a partir de insumos actualizados y de herramientas de modelamiento que permiten predecir el comportamiento de las amenazas asociadas con la erupción del volcán. Los modelos presentados en este estudio concuerdan con los valores obtenidos en campo por Samaniego *et al.* (1998) y que han sido plasmados de manera general en el mapa de amenazas disponible (IGEPN e IRD, 2002); lo que confirma la efectividad y confianza de las herramientas

utilizadas y sienta un precedente para replicar estos modelos en el análisis en otros volcanes en Ecuador y el mundo.

Así, la información obtenida es de gran utilidad para la toma de decisiones y la gestión de riesgos en beneficio de la población considerando, la disminución de tiempo en la obtención de resultados al automatizar procesos con el uso de los SIG evitando errores que se cometan en el procesamiento de grandes cantidades de datos.

Una de las dificultades del manejo de los modelos de automatización generados en esta investigación corresponde a los costos que en la actualidad tiene el *software* utilizado; con lo cual restringiría su utilización a una plataforma específica; razón por la cual, los modelos exportados a un lenguaje de programación en *Python* diversifican el uso de las automatizaciones tomando como referencia los parámetros de entrada requeridos para el análisis de escenarios de volcanes en diferentes plataformas de *software* libre.

El nivel de detalle de los insumos cartográficos utilizados para la digitalización de las edificaciones fue el adecuado; sin embargo, se debe mencionar que en este caso el estudio solo se limitó al análisis de la densidad y número de las viviendas potencialmente afectadas. En ese sentido, un análisis de vulnerabilidad complementario debería incluir otros aspectos de la vivienda tales como su estado, año de construcción y la caracterización socioeconómica de los hogares que habitan las edificaciones (Campos-Durán & Barrantes-Castillo, 2020); esto sumado a metodologías que permitan capturar de manera actualizada la zona de interés mediante el uso de drones considerando los costos que implican (Granados-Bolaños *et al.*, 2021).

Con respecto al análisis del impacto de la erupción en la actividad florícola, si bien la información que muestra este estudio se encuentra actualizada, es necesario indicar que los datos en relación al cultivo de flores son solamente referenciales, lo que ha dificultado la cuantificación del impacto económico de una eventual erupción del volcán tanto a nivel local como nacional. Es importante considerar que la actividad florícola, representa un importante rubro para las exportaciones no tradicionales del país (D'Ercole *et al.*, 2009), de allí que los análisis de tipo geológico y geofísico deban ser complementados con análisis macroeconómicos de mayor alcance, que permitan evaluar el impacto real de estas afectaciones sobre la economía nacional, especialmente en las exportaciones y la balanza comercial (D'Ercole *et al.*, 2009).

A nivel local, son necesarios estudios económicos específicos que permitan diferenciar el impacto sobre la actividad florícola según la época del año. Esto resulta importante si se considera fechas como San Valentín, Día de la Madre o Año Nuevo, las flores registran los niveles de exportación más altos y por lo tanto una erupción en esta temporada puede tener afectaciones más graves; considerando la necesidad de vehículos frigoríficos que se encarguen del transporte en buenas condiciones a aeropuertos cercanos con el objetivo de no alterar la calidad del producto que es exportado a Estados Unidos y Europa (D'Ercole *et al.*, 2009).

Finalmente se debe reflexionar que una de las características de la floricultura es que esta actividad emplea un número considerable de mano de obra femenina. Muchos de los hogares de la zona dependen de los ingresos de estas mujeres, de allí que el impacto de una erupción volcánica tendría efectos económicos devastadores en las familias. En ese sentido es necesario indagar respecto de la importancia de la actividad de cultivo de flores a nivel local, con el fin de establecer mecanismos que protejan a la industria pero que también promuevan la diversificación económica de la población local para reducir su dependencia.

5. Conclusión

La caída de ceniza constituye uno de los principales fenómenos volcánicos que pueden afectar a los asentamientos humanos cercanos al volcán. Según los informes especiales del IGEPN el escenario más probable es un proceso eruptivo con la formación de flujos de lava viscosa en los flancos norte u oriental (IGEPN, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e, 2017a, 2017b, 2017c). Dado que en la zona los vientos se dirigen principalmente de oriente a occidente, los asentamientos humanos de la parte occidental podrían verse afectados por este fenómeno, lo que pondría en amenaza a la ciudad de Cayambe con caída de ceniza cuyos espesores en algunos casos podrían superar los 45 mm, esto afectaría a las actividades económicas de la zona, entre ellas el cultivo de flores.

La metodología utilizada en la generación de isopacas en el estudio realizado por Pavón *et al.* (2019) ha sido automatizada y mejorada para el desarrollo de la presente investigación y replicada en los volcanes Cotopaxi, Tungurahua y Guagua Pichincha; cuyos resultados, han sido validados y utilizados en la actualización de los diferentes mapas de amenazas generados por el IGEPN.

40 000 habitantes de la zona corresponden al grupo de la tercera edad y de menores de 18 años. Estos grupos son los más afectados por fenómenos volcánicos como la ceniza, que puede ocasionar problemas respiratorios. Asimismo, la vulnerabilidad económica de estos grupos es mayor, especialmente en el área rural porque no todos cuentan con recursos económicos suficientes para solventar posibles pérdidas de cultivos y de sus viviendas. En el caso de los niños además de la afectación en su salud, se podrían ver afectadas las actividades educativas, lo que aumentaría el riesgo de deserción escolar y por ende una reducción de sus oportunidades laborales a futuro.

Finalmente, mediante el uso de álgebra de mapas, datos censales y análisis espacial se cuantificó la afectación económica para una erupción del volcán Cayambe de tamaño moderado (VEI 3-4). Se estimó el costo promedio de pérdidas en las florícolas en aquellas zonas potencialmente afectadas por ceniza con espesores superiores a 10 mm, llegando a superar los noventa 90 millones de dólares en pérdidas de plantas y cincuenta millones de dólares en los invernaderos. Con respecto al empleo en las florícolas, se tendrían alrededor de 7 611 plazas de trabajo afectadas de manera directa por caída de ceniza del

volcán Cayambe, lo que a mediano y largo plazo tendría un impacto económico en al menos unas 3 500 familias.

Bibliografía

- Alcorn, R., Panter, K. S., & Gorsevski, P. V. (2013). A GIS-based volcanic hazard and risk assessment of eruptions sourced within Valles Caldera, New Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267 (November), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.09.005>
- Ascázubi, J. (1982). Letter to Baron von Humboldt. In: "von Humboldt A, *Briefe aus Amerika, 1799-1804*", herausgegeben von Ulrike Moheit, Akademie Verlag, Berlin, 1993.
- Bernard, B. & Samaniego, P. (2017). *Escenarios eruptivos en el volcán Cayambe y construcción de un árbol de eventos: Extended abstract volume of the 8th JCT*, 5.
- Biass, S., Bonadonna, C., di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M. & Lestuzzi, P. (2016). Probabilistic evaluation of the physical impact of future tephra fallout events for the Island of Vulcano, Italy. *Bulletin of Volcanology*, 78(5), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1028-1>
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. & Hincks, T. K. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(3), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- Campos-D., D. & Alvarado, G. (2018). Análisis de la distribución espaciotemporal de la caída de cenizas del volcán Turrialba (2010-2018), Costa Rica: isofrecuencia, volumen y afectación. *Revista Geológica de América Central*, 59, 22-38. <https://doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34154>
- Campos-Durán, D. & Alvarado, G. E. (2019). La percepción del riesgo volcánico por la actividad del Turrialba (2010-2017), en las comunidades de La Pastora y El Tapojo, Costa Rica. *Geo UERJ*, 35, e44819. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.44819>
- Campos-Durán, D. & Barrantes-Castillo, G. (2020). *Evaluación de la vulnerabilidad asociada a la actividad del volcán Turrialba (2010-2017) en el distrito de Santa Cruz de Turrialba*, 1-19. <https://doi.org/10.15517/rgac.v63i0.43404>
- Chester, D. K., Degg, M., Duncan, A. M. & Guest, J. E. (2000). The increasing exposure of cities to the effects of volcanic eruptions: A global survey. *Environmental Hazards*, 2(3), 89-103. <https://doi.org/10.3763/ehaz.2000.0214>
- Contreras, D. (2006). Volcán Galeras Hábitat en riesgo. *Revista de Arquitectura El Cable*, (5), 90-94.
- Contreras, D., Chamorro, A., & Wilkinson, S. (2020). Review article: The spatial dimension in the assessment of urban socio-economic vulnerability related to geohazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1663-1687. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1663-2020>
- Costa, A., Macedonio, G., & Folch, A. (2006). A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4), 634-647. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.019>
- D'Ercole, R., Metzger, P. & Sierra, A. (2009). Alerta volcánica y erupción del volcán Pichincha en Quito (1998-1999). *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 38(3), 487-499. <https://doi.org/10.4000/bifea.2290>

- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD/ONU) (2011). Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Revelar el riesgo, replantear el desarrollo.
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD/ONU) (2015). Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres. Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres.
- EXPOFLORES, A. N. de P. y E. de F. (2015). Informe anual de exportaciones de flores, Ecuador: Análisis Económico.
- Franco-Ramos, O., Stoffel, M., Vázquez-Sellem, L., & Capra, L. (2013). Spatio-temporal reconstruction of lahars on the southern slopes of Colima volcano, Mexico - A dendrogeomorphic approach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 267, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.09.011>
- Gogu, R. C., Dietrich, V. J., Jenny, B., Schwandner, F. M., & Hurni, L. (2006). A geo-spatial data management system for potentially active volcanoes - GEOWARN project. *Computers and Geosciences*, 32(1), 29-41. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.04.004>
- Granados-Bolaños, S., Quesada-Román, A., & Alvarado, G. E. (2021). Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 410. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107143>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2016a). Informe Especial - Volcán Cayambe No 1: Anomalía en la actividad sísmica. <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/15310-informe-especial-volcan-cayambe-n-1/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2016b). Informe Especial- Volcán Cayambe No 2: Disminución de actividad sísmica. <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16585-informe-especial-volcan-cayambe-n-2/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2016c). Informe Especial- Volcán Cayambe No 3: Anomalías sísmicas. <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16567-informe-especial-volcan-cayambe-n-3/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2016d). Informe Especial - Volcán Cayambe No 4: Se mantiene la actividad sísmica. <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016/16657-informe-especial-volcan-cayambe-n-4/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2016e). Informe Especial - Volcán Cayambe No 5: Actualización de la actividad. <https://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2016>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2017a). Informe Anual de la Actividad del Volcán Cayambe 2017. http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=1001
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2017b). Informe Especial- Volcán Cayambe No 2: Resumen de actividad 11-17 de Marzo, 2017. <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17425-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-2/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2017c). Informe Especial- Volcán Cayambe No 1: Actualización de la actividad y el Trabajo del IG.

- <http://www.igepn.edu.ec/cayambe-informes/cay-especiales/cay-e-2017/17196-informe-especial-volcan-cayambe-n-1-1/file>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (2020). *Informe anual de la actividad del volcán Cayambe 2019*. 22.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) y IRD, I. de R. pour le D. (2002). *Mapa de los peligros potenciales del volcán Cayambe*.
<https://drive.google.com/file/d/0B1GypW4co7KbdEszUkdEYkZrTDA/edit>
- Instituto Geográfico Militar (IGM) (2012a). *Cartografía básica oficial escala 1: 5 000*.
- Instituto Geográfico Militar (IGM) (2012b). *Modelo digital de elevaciones y Ortofoto a escala 1: 5 000 del Cantón Cayambe*.
- INEC, I. N. de E. y C. (2010). *VII Censo de Población y VI de Vivienda*.
<https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
- Jenkins, S. F., Wilson, T., Magill, C., Miller, V., Stewart, C., Blong, R., Marzocchi, W., Boulton, M., Bonadonna, C., & Costa, A. (2015). *Volcanic ash fall hazard and risk*. In *Global Volcanic Hazards and Risk*, 173-221.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>
- MAGAP (2009). *Censo Nacional Florícola*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- MAGAP (2014). *Cobertura y uso de la Tierra de Ecuador Continental 1: 25 000*.
<https://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>
- Maharani, Y. N., Lee, S., & Ki, S. J. (2016). Social vulnerability at a local level around the Merapi volcano. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20 (October), 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.012>
- Martínez, L. (1996). *Los campesinos artesanos en la Sierra Central: el caso Tungurahua Colección CAAP EC Ecuador* (C. A. de A. P. CAAP (Ed.)).
- Mastin, L. G., Guffanti, M., Servranckx, R., Webley, P., Barsotti, S., Dean, K., Durant, A., Ewert, J. W., Neri, A., Rose, W. I., Schneider, D., Siebert, L., Stunder, B., Swanson, G., Tupper, A., Volentik, A., & Waythomas, C. F. (2009). A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(1-2), 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008>
- Pavón, F., Andrade, S. D., Bernard, B. & Contreras, D. (2019). Impacto socioeconómico por lahares y caída de ceniza ante la erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en Cayambe y Pedro Moncayo. *Revista Cartográfica*, 98, 123-143.
<https://doi.org/10.35424/rccar.v5i98.144>
- Samaniego, P., Monzier, M., Robin, C., & Hall, M. L. (1998). Late Holocene eruptive activity at Nevado Cayambe volcano, Ecuador. *Bulletin of Volcanology*, 59(7), 451-459.
<https://doi.org/10.1007/s004450050203>
- Samaniego, P. (1996). *Estudio vulcanológico y petrológico de la historia reciente del volcán Cayambe [Escuela Politécnica Nacional]*. https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=2609&shelfbrowse_itemnumber=2735
- Samaniego, P., Eissen, J. P., Monzier, M., Alvarado, A., & Yepes, H. (2004a). *Los peligros volcánicos asociados con el Cayambe*.
- Samaniego, P., Martin, H., Robin, C., & Monzier, M. (2002). Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30(11), 967-970.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0967:TCFCATA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0967:TCFCATA>2.0.CO;2)
- Samaniego, P., Robin, C., Monzier, M., Eissen, J.-P., Mothes, P., & Hall, M. L. (2004b). *El complejo volcánico Cayambe: Síntesis geológica, actividad holocénica y evaluación*

- de los peligros volcánicos. Investigaciones en geociencias: Contribuciones sobre geología volcánica y volcanismo, sismología volcánica y tectónica, neotectonismo, monitoreo volcánico y sísmico y sobre gestión del riesgo frente a fenómenos naturales*, 35-43.
- Stieltjes, L., & Mirgon, C. (1998). Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques. Test d'application sur les réseaux de la Martinique. Rapport de synthèse. *Rapport BRGM*, R 40098, 218.
- Torrieri, F., Concilio, G., & Nijkamp, P. (2002). Decision Support Tools for Urban Contingency Policy. A Scenario Approach to Risk Management of the Vesuvio Area in Naples, Italy. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 10(2), 95–112. <https://doi.org/10.1111/1468-5973.00185>
- Vázquez, R., Macías, J. L., & Arce, J. L. (2021). Integrated hazards maps of the Tacaná Volcanic complex, Mexico-Guatemala: Ashfall, block-and-ash flows, and lahars. *Journal of South American Earth Sciences*, 107(April 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103146>
- Volcano Discovery. (2010). *News and activity updates from Eyjafjallajökull volcano (Iceland)*. https://www.volcanodiscovery.com/es/iceland/eyjafjallajoekull/news/1765/Volcan-Eyjafjallajkull-Islandia-actualizacion-de-erupcion-disminucion-de-la-actividad.html#google_vignette
- Wood, N., & Soulard, C. (2009). Variations in population exposure and sensitivity to lahar hazards from Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 188(4), 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.09.019>
- Yokoyama, I., Tilling, R. I., & Scarpa, R. (1984). *International Mobile Early-Warning System(s) for Volcanic Eruptions and Related Seismic Activities: report of an Unesco/UNEP sponsored preparatory study in 1982-1984*. Unesco. <https://searchworks.stanford.edu/view/1651354>