

Zonificación de la amenaza por dispersión y caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha, Ecuador

Zoning of the Threat by Dispersion and Fall of Ash From The Guagua Pichincha Volcano, Ecuador

Fernando Pavón* ** y Diana Contreras***

Recibido: 10/01/2021. Aceptado: 01/03/2021. Publicado: 29/06/2021.

Resumen. El volcán Guagua Pichincha es considerado el tercer volcán más peligroso en el Ecuador continental, y representa una amenaza potencial para la población expuesta. En esta investigación se modela, mediante un análisis estadístico de simulaciones numéricas, la dispersión y caída de ceniza al 75% de probabilidad de ocurrencia para zonificar la amenaza volcánica a través de escenarios eruptivos y datos censales con ayuda de herramientas computacionales. Así, se estimó la cantidad de población rural-urbana y categorías de uso de suelo que se verían afectadas. Estos escenarios de impacto tendrían diferentes efectos en función de los espesores máximos esperados, que van desde los 5 mm para el escenario con un índice de explosividad volcánica 2 (VEI, por sus siglas en inglés) y de 150 mm de acumulación de ceniza para el escenario con un VEI5; incrementando significativamente el número de poblados, zonas urbanas y categoría de uso de suelo afectados en cada escenario planteado. Los mapas obtenidos muestran, para el evento VEI2 (menor), siete parroquias con un impacto bajo, mientras que para el escenario VEI5 (extenso–muy extenso) se tendría un impacto alto en 33 parroquias, incluida la capital del Ecuador.

Palabras clave: Guagua Pichincha, depósitos de caída de ceniza, zonificación de amenaza, SIG, Ecuador.

Abstract. Volcanic activity in the equator is concentrated in the continental volcanic arc of the central-north portion of the Andes resulting from the subduction of the Nazca plate underneath the South American plate. This produces a high risk, evidenced in recent decades as an increased volcanic activity and a high impact on the population — especially those in poverty and extreme poverty — and on the country's economy. The Guagua Pichincha volcano developed in three periods during the late Pleistocene and Holocene; together with the Rucu Pichincha, it forms the Pichincha volcanic complex. This complex recorded its latest eruption between 1999 and 2001 through the Crystal Dome with vulcanian-subplinian explosions. Guagua Pichincha is considered the third most dangerous volcano in continental Ecuador, posing a threat mainly to vulnerable rural population settled in areas close to the volcano and dedicated to agriculture and livestock raising. This research has used general parameters such as height of the eruptive column, duration of the eruption, volume of magma, and a statistical distribution of wind profiles. We obtained four eruption events that are consistent with events that occurred in the past recorded by several authors. Using a statistical analysis, we modeled 120 numerical simulations per event with the Ash 3D code. Using algorithms produced with digital tools, the dispersal and fall of ash was defined under a 75% probability of occurrence for the period 2008 - 2017, for zoning

* Escuela Politécnica Nacional, Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía, Quito, Ecuador.

**Sección Nacional del Ecuador del Instituto Panamericano de Geografía e Historia – IPGH – Comisión de Geofísica, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6695-8076>. Correo-e: fernando.pavon@outlook.es. Autor de correspondencia.

*** Newcastle University, School of Engineering, Newcastle upon Tyne, NE1 7RU, Gran Bretaña. <https://orcid.org/0000-0003-2852-6015>. Correo-e: diana.contreras-mojica@newcastle.ac.uk

volcanic threat through the eruptive scenarios suggested. Census data of the 15 indicators (eight for vulnerability and seven for resilience) for the year 2010 were processed separately. As a result, we obtained a cover with parochial disaggregation at country level using the weights assigned in the Index for Risk Management (INFORM) methodology. Following this procedure, we estimated the magnitudes of rural-urban population and land-use categories that would be affected by using spatial analysis and automation processes through Python programming. Impact scenarios would have different effects according to the maximum expected thickness values estimated. The lower limit of the range is 5 mm assuming the most frequent scenario within the yearly eruptive cycle, with a volcanic explosiveness index (VEI) of 2; the upper limit is 150 mm of ash accumulation in a scenario with a VEI5, which occurs every 25 eruptive cycles and has been recorded every 2,500–21,250 years; the latter involves a significant increase in the number of villages, urban areas and, land-use categories affected. The maps obtained show the following. 1) For the VEI2 (minor) event, some 23,435 hectares dedicated to agriculture would be directly affected by the different ash thicknesses, representing one parish with moderate impact and seven

parishes with low impact; for this scenario, the experience derived from the latest activity event recorded may be used to quantify the potential impact of the Guagua Pichincha volcano in the country. 2) A VEI3 (moderate) event, which occurs with a frequency between one and two events within an eruptive cycle, would result in 1,101,847 ha of farming land directly affected by ash fall, with thicknesses reaching 45 mm; 20 parishes would have a high impact, 119 parishes a moderate impact, and 78 parishes a low impact. 3) For a major event (VEI4) of the Guagua Pichincha volcano, which occurs every three to five eruptive cycles, recorded every 300–4,250 years, the expected ash thicknesses would range between 0.01 mm and 90 mm, affecting 1,130,405 ha of farmland; 98 parishes would suffer moderate impact and 66 low impact; a total of 4,240,559 inhabitants would be directly affected. 4) For scenario VEI5, 1,899,861 ha of farming land would be directly affected, including 33 parishes with a high impact, 235 parishes with moderate impact and 139 with a low impact. A VEI5 event would affect 30% of the population of Ecuador.

Key Words: Guagua Pichincha, ash deposits, threat zoning, GIS, Ecuador.

INTRODUCCIÓN

La actividad volcánica en Ecuador se concentra en el arco volcánico continental del centro-norte de los Andes producto de la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana. Al menos 25 volcanes han presentado erupciones muy grandes durante los últimos 10 mil años (Santamaría *et al.*, 2017), lo que representa una amenaza para el país, especialmente en el valle interandino en donde la densidad poblacional es alta, al encontrarse centros poblados como Ibarra, Otavalo, Cayambe, Quito, Latacunga, Ambato, Baños, Riobamba, entre otros.

A esta realidad hay que añadirle conjuntamente que estos poblados se encuentran ocupados por población rural vulnerable, de bajos ingresos, que se ha asentado en zonas aledañas a complejos volcánicos activos (Bernard y Andrade, 2011) que, en caso de una erupción, se verían afectadas por la caída de ceniza en la agricultura y la ganadería, su principal fuente de ingresos.

El Ecuador, al igual que Colombia, Perú y Chile en Suramérica, se caracteriza por su alto grado de vulnerabilidad y riesgo ante amenazas de tipo geológicas endógenas (sismos, tsunamis y erupciones volcánicas) y exógenas (deslizamientos, erosión

del suelo y degradación del terreno) (Contreras *et al.*, 2020), con un alto impacto en la población, especialmente a aquella en situación de pobreza y pobreza extrema (UNISDR, 2015) y en la economía nacional.

En ese marco, es claro que el Ecuador es un país de alto riesgo volcánico, registrándose en las últimas dos décadas un aumento de la actividad volcánica con las erupciones de El Reventador (2002), Guagua Pichincha (1999), Tungurahua (2014), Cotopaxi (2015), y Sangay (2016) (Andrade *et al.*, 2005; Eychenne *et al.*, 2011; Gaunt *et al.*, 2016; Hall *et al.*, 1999; IGEPN, 2003, 2007, 2015a, 2015b, 2020a, 2020b; Le Pennec *et al.*, 2013; PARRA *et al.*, 2016). Estos eventos han tenido un alto impacto tanto a nivel local como nacional, de allí la necesidad de plantear mecanismos de acción y alerta temprana para evitar desastres.

El potencial impacto de los desastres, requiere de un abordaje integral del tema que involucre no solamente la respuesta a la emergencia sino también actividades de prevención orientadas a generar y disseminar información de manera oportuna en todos los niveles del Estado y en la sociedad en su conjunto (EIRD/ONU, 2004), y de preparativos con el diseño de planes de respuesta a emergencias.

De esta manera, se debe considerar que la caída

de ceniza del volcán Guagua Pichincha, tendría diferentes efectos en función de sus espesores, los cuales impactarían tanto a la salud de la población y de los animales, la infraestructura productiva y el medio ambiente. Autores como Jenkins *et al.* (2015) han establecido parámetros generales, considerados a nivel internacional para caracterizar posibles daños que la ceniza podría causar de acuerdo con sus espesores (Tabla 1).

ANTECEDENTES ERUPTIVOS Y DEFINICIÓN DE ESCENARIOS

El volcán Guagua Pichincha (latitud 0.17° Norte, longitud - 78°61' Oeste) se desarrolló en tres periodos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno, junto con el Rucu Pichincha, forma el complejo volcánico Pichincha (Monzier *et al.*, 2002; Robin *et al.*, 2008, 2010). El primer periodo corresponde al Basal Guagua Pichincha, construido por flujos de lava del Ruco Pichincha hace aproximadamente

50 000-60 000 años, seguido por extrusiones de domo y actividad explosiva relacionada hace 20 000-30 000 años (Monzier *et al.*, 2002). Finalmente, hace aproximadamente 11 000 años, se registra un gran colapso sectorial con la formación de un anfiteatro hacia el suroeste. En el Holoceno medio, hace 4 000 años aproximadamente, se registra el segundo periodo, con la formación de un nuevo edificio (Toaza) con la extrusión de flujos de lava viscosa y de domos dentro del anfiteatro, y que termina con un colapso parcial. El tercer periodo corresponde al actual centro activo del complejo volcánico, desarrollado en el Holoceno Tardío y conocido como Domo Cristal (Monzier *et al.*, 2002), el cual se encuentra orientado hacia el oeste dentro del anfiteatro, producto del colapso parcial del edificio Toaza. Según Robin *et al.* (2008), el Domo Cristal ha presentado cuatro fases eruptivas con formaciones de domos y erupciones plinianas en los últimos 3 000 años, reactivándose entre 1999 y 2001 con explosiones de tipo vulcaniano-subplinianas (Figura 1).

Tabla 1. Daños causados por la ceniza volcánica según los espesores.

Espesores de ceniza	Posibles afectaciones
Espeor > 0.1 mm	Salud: irritación a causa de la ceniza. Ambiente: contaminación de fuentes de agua. Infraestructura y actividades productivas: cierre de aeropuertos por posibles daños a las aeronaves.
Espeor > 1 mm	Además de los expuestos por los espesores > 0.1 mm: Actividades productivas: pérdidas de cultivos, la ceniza abrasiva fina causaría daños menores en las edificaciones y vehículos a motor.
Espeor > 10 mm	Además de los expuestos por los espesores > 1 mm: Salud: afecciones a las vías respiratorias como secreción nasal, dolor de garganta, entre otros. Actividades productivas: afectación al ganado con problemas de desnutrición o desgaste de piezas dentales por contaminación de pastos. Ambiente: contaminación severa de fuentes de agua por acumulación de químicos.
Espeor > 100 mm	Además de los expuestos por los espesores > 10 mm: Salud: afecciones severas de las vías respiratorias, además de lagrimeo, dolor ocular. Actividades productivas: deshidratación severa del ganado por consumo de ceniza y obstrucciones intestinales. Pérdida de cultivos y pastos con acumulaciones superiores a los 50 mm de ceniza. Infraestructura: pérdidas económicas por cierre de aeropuertos por labores de limpieza.

Fuente: adaptado de Jenkins *et al.* (2015).

Los parámetros que definen los escenarios eruptivos del Guagua Pichincha utilizados para las simulaciones fueron tomados de los criterios técnicos para la construcción del plan de acción temprana para caída de ceniza en Ecuador (Ber-

nard *et al.*, 2018), que toman como base, a su vez, parámetros eruptivos generales definidos por Mastin *et al.* (2009), y que concuerdan con eventos ocurridos en el pasado y registrados por varios autores (IGEPN, 2003; Robin *et al.*, 2008, 2010;

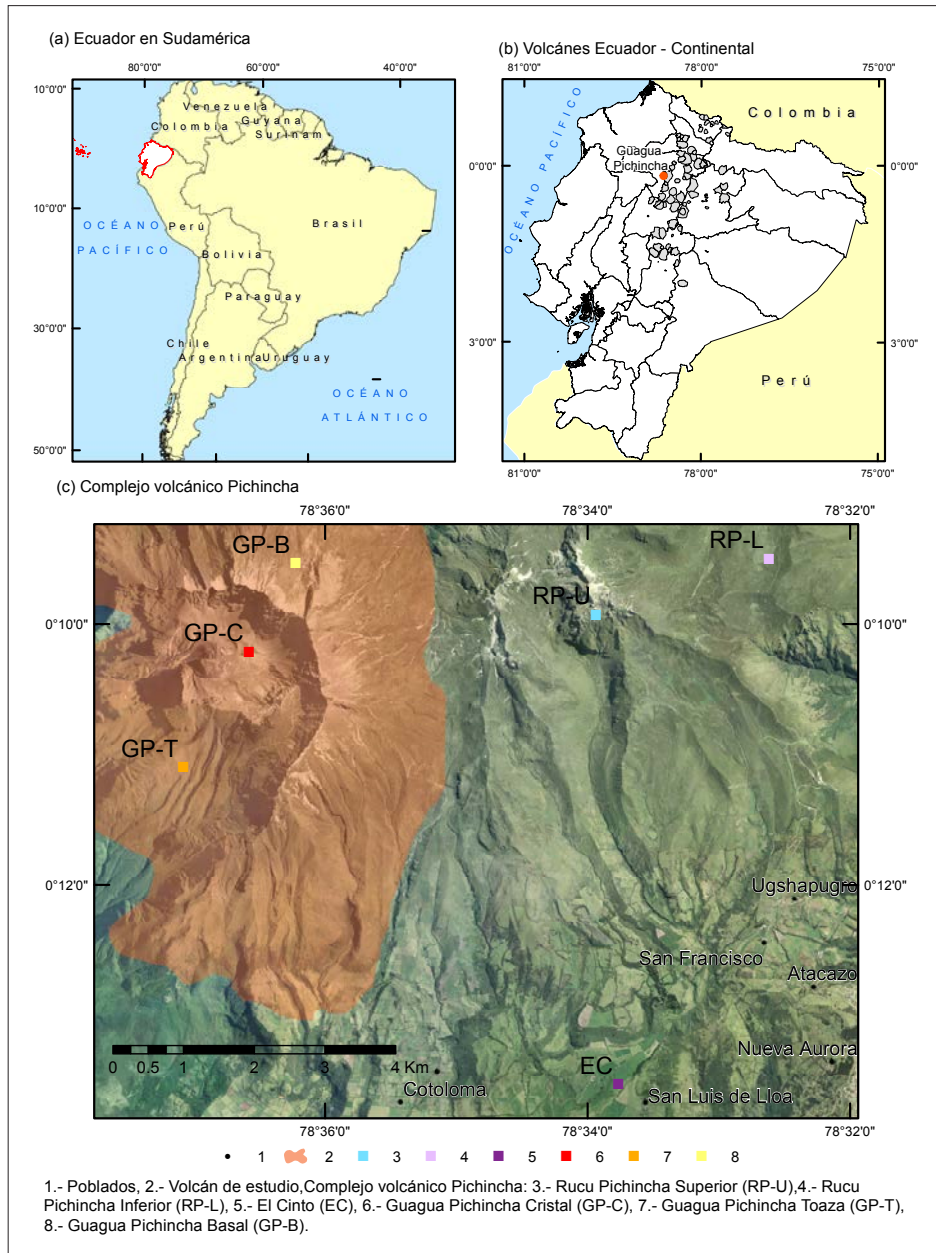


Figura 1. a y b) Ubicación del área de estudio y c) Ortofoto (IGM, 2019) en donde se muestra las ubicaciones de los principales centros eruptivos que ha caracterizado la evolución del Complejo Volcánico Guagua Pichincha. Fuente: adaptado de Robin *et al.* (2008).

Washington VAAC, 1999). A continuación, en la Tabla 2, se resumen los parámetros definidos para los cuatro escenarios del Guagua Pichincha.

MATERIALES Y MÉTODOS

Amenaza volcánica por caída de ceniza

Las simulaciones de dispersión de ceniza fueron realizadas con el código *Ash 3D*. Además de los parámetros vulcanológicos indicados en la Tabla 2, el código utiliza los datos de velocidad y dirección de los vientos proporcionados por el Servicio Meteorológico de los Estados Unidos (NWS, por su acrónimo en inglés).

Ash 3D es un modelo atmosférico euleriano en tres dimensiones que simula el transporte, dispersión y sedimentación de la ceniza (Mastin *et al.*, 2013). El código *Ash 3D* no simula la dinámica de una pluma ascendente, en lugar de ello, inyecta ceniza con una descarga constante, en una columna de celdas sobre el volcán. EL usuario establece si las partículas se distribuyen uniformemente a través de la columna o verticalmente siguiendo la ecuación (1) de Suzuki (Carey, 1996; Carey y Sigurdsson, 1982; Suzuki, 1983):

$$\frac{dQ_m}{dy} = Q_m \frac{k^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right) \exp\left(k\left(\frac{z}{H} - 1\right)\right)}{H[1 - (1+k)\exp(-k)]} \quad (1)$$

Donde:

Q_m : masa total de material expulsado en un lapso de tiempo y tamaño de partículas dado

H: altura total de la pluma o columna

Z: elevación asignada a la pluma o columna

K: Constante ajustable para controlar la distribución de la ceniza con respecto a la altura (valores bajos de la constante k da una distribución uniforme de la masa con la elevación; mientras que valores altos concentran la masa en la parte superior de la pluma).

Modelaciones de dispersión y caída de ceniza

Las modelaciones se realizaron para el período 2008-2017, una simulación por mes cada año (Figuras 2a, 3a, 4a y 5a), alternando el inicio del evento cada seis horas (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00) el día 15 de cada mes, obteniendo con esto un total de 120 modelaciones (Tablas 3 y 4) para cada uno de los eventos descritos en la Tabla 2. Los resultados fueron automatizados mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizando la metodología descrita en los trabajos realizados en el volcán Cayambe, los cuales fueron tratados para la actualización del mapa de amenazas del volcán por parte del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) (Bernard *et al.*, 2017). A partir de herramientas de análisis espacial y programación en *Python*, se utilizaron las modelaciones y una cobertura generada de 40 000 puntos con una separación de 200 m entre cada punto para cada evento; esto con el objetivo de mejorar las interpolaciones de los datos (Pavón, 2017; Pavón *et al.*, 2019) para la generación de isopacas del volcán Guagua Pichincha a diferentes probabilidades, según el VEI.

Mediante un análisis espacial (mostrado en las

Tabla 2. Parámetros generales definidos por Mastin *et al.* (2009) y modificados para el volcán Guagua Pichincha.

Escenario	Tamaño	Erupción de referencia	VEI*	Altura columna sobre el cráter (km)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)
Guagua Pichincha – S2	Menor moderada	1999	VEI 2-3	6	24	0.005
Guagua Pichincha – S3	Moderada extensa	1660	VEI 3-4	23	1	0.06
Guagua Pichincha – S4	Extensa	1 000 años A.P	VEI4	26	2	0.25
Guagua Pichincha – S5	Muy extensa	11 000 años A.P	VEI5	30	4	0.75

* Índice de explosividad volcánica (VEI, por sus siglas en inglés).

Tabla 3. Parámetros utilizados en las simulaciones para los escenarios VEI2 y VEI3.

Simulación VEI2	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mn/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI3	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mn/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
1	6	15/1/2008 6:00	24	0.005	2 982	1	23	15/1/2008 6:00	1	0.06	2 548
2	6	15/2/2008 12:00	24	0.005	4 988	2	23	15/2/2008 12:00	1	0.06	4 338
3	6	15/3/2008 18:00	24	0.005	1 674	3	23	15/3/2008 18:00	1	0.06	1 438
4	6	15/4/2008 0:00	24	0.005	1 039	4	23	15/4/2008 0:00	1	0.06	1 588
5	6	15/5/2008 6:00	24	0.005	2 298	5	23	15/5/2008 6:00	1	0.06	2 330
6	6	15/6/2008 12:00	24	0.005	1 711	6	23	15/6/2008 12:00	1	0.06	2 712
7	6	15/7/2008 18:00	24	0.005	2 461	7	23	15/7/2008 18:00	1	0.06	3 470
8	6	15/8/2008 0:00	24	0.005	2 310	8	23	15/8/2008 0:00	1	0.06	3 476
9	6	15/9/2008 6:00	24	0.005	1 830	9	23	15/9/2008 6:00	1	0.06	1 957
10	6	15/10/2008 12:00	24	0.005	2 307	10	23	15/10/2008 12:00	1	0.06	2 718
11	6	15/11/2008 18:00	24	0.005	2 190	11	23	15/11/2008 18:00	1	0.06	1 600
12	6	15/12/2008 0:00	24	0.005	1 279	12	23	15/12/2008 0:00	1	0.06	2 714
13	6	15/1/2009 6:00	24	0.005	1 636	13	23	15/1/2009 6:00	1	0.06	3 539
14	6	15/2/2009 12:00	24	0.005	2 825	14	23	15/2/2009 12:00	1	0.06	3 745
15	6	15/3/2009 18:00	24	0.005	1 870	15	23	15/3/2009 18:00	1	0.06	3 070
16	6	15/4/2009 0:00	24	0.005	2 124	16	23	15/4/2009 0:00	1	0.06	2 809
17	6	15/5/2009 6:00	24	0.005	1 104	17	23	15/5/2009 6:00	1	0.06	1 966
18	6	15/6/2009 12:00	24	0.005	2 374	18	23	15/6/2009 12:00	1	0.06	2 392
19	6	15/7/2009 18:00	24	0.005	1 966	19	23	15/7/2009 18:00	1	0.06	2 228
20	6	15/8/2009 0:00	24	0.005	2 694	20	23	15/8/2009 0:00	1	0.06	3 646
21	6	15/9/2009 6:00	24	0.005	2 039	21	23	15/9/2009 6:00	1	0.06	3 026
22	6	15/10/2009 12:00	24	0.005	2 716	22	23	15/10/2009 12:00	1	0.06	2 660
23	6	15/11/2009 18:00	24	0.005	3 027	23	23	15/11/2009 18:00	1	0.06	2 629
24	6	15/12/2009 0:00	24	0.005	4 968	24	23	15/12/2009 0:00	1	0.06	4 242
25	6	15/1/2010 6:00	24	0.005	2 406	25	23	15/1/2010 6:00	1	0.06	2 222
26	6	15/2/2010 12:00	24	0.005	1 478	26	23	15/2/2010 12:00	1	0.06	2 896
27	6	15/3/2010 18:00	24	0.005	2 232	27	23	15/3/2010 18:00	1	0.06	1 636
28	6	15/4/2010 0:00	24	0.005	2 705	28	23	15/4/2010 0:00	1	0.06	2 449
29	6	15/5/2010 6:00	24	0.005	2 635	29	23	15/5/2010 6:00	1	0.06	4 167

Tabla 3. Continúa.

Simulación VE12	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VE13	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
30	6	15/6/2010 12:00	24	0.005	3 074	30	23	15/6/2010 12:00	1	0.06	1 843
31	6	15/7/2010 18:00	24	0.005	2 432	31	23	15/7/2010 18:00	1	0.06	2 688
32	6	15/8/2010 0:00	24	0.005	2 569	32	23	15/8/2010 0:00	1	0.06	2 295
33	6	15/9/2010 6:00	24	0.005	1 794	33	23	15/9/2010 6:00	1	0.06	1 703
34	6	15/10/2010 12:00	24	0.005	2 437	34	23	15/10/2010 12:00	1	0.06	2 235
35	6	15/11/2010 18:00	24	0.005	2 023	35	23	15/11/2010 18:00	1	0.06	2 358
36	6	15/12/2010 0:00	24	0.005	1 991	36	23	15/12/2010 0:00	1	0.06	3 105
37	6	15/1/2011 6:00	24	0.005	3 114	37	23	15/1/2011 6:00	1	0.06	2 389
38	6	15/2/2011 12:00	24	0.005	2 137	38	23	15/2/2011 12:00	1	0.06	3 672
39	6	15/3/2011 18:00	24	0.005	2 218	39	23	15/3/2011 18:00	1	0.06	1 821
40	6	15/4/2011 0:00	24	0.005	1 176	40	23	15/4/2011 0:00	1	0.06	1 934
41	6	15/5/2011 6:00	24	0.005	2 801	41	23	15/5/2011 6:00	1	0.06	2 497
42	6	15/6/2011 12:00	24	0.005	3 081	42	23	15/6/2011 12:00	1	0.06	3 154
43	6	15/7/2011 18:00	24	0.005	2 584	43	23	15/7/2011 18:00	1	0.06	2 306
44	6	15/8/2011 0:00	24	0.005	3 144	44	23	15/8/2011 0:00	1	0.06	2 393
45	6	15/9/2011 6:00	24	0.005	1 817	45	23	15/9/2011 6:00	1	0.06	2 386
46	6	15/10/2011 12:00	24	0.005	2 682	46	23	15/10/2011 12:00	1	0.06	3 341
47	6	15/11/2011 18:00	24	0.005	1 509	47	23	15/11/2011 18:00	1	0.06	3 174
48	6	15/12/2011 0:00	24	0.005	2 954	48	23	15/12/2011 0:00	1	0.06	2 347
49	6	15/1/2012 6:00	24	0.005	2 612	49	23	15/1/2012 6:00	1	0.06	2 645
50	6	15/2/2012 12:00	24	0.005	2 356	50	23	15/2/2012 12:00	1	0.06	3 712
2	6	15/3/2012 18:00	24	0.005	2 227	51	23	15/3/2012 18:00	1	0.06	3 185
52	6	15/4/2012 0:00	24	0.005	3 014	52	23	15/4/2012 0:00	1	0.06	1 853
53	6	15/5/2012 6:00	24	0.005	2 467	53	23	15/5/2012 6:00	1	0.06	2 548
54	6	15/6/2012 12:00	24	0.005	2 620	54	23	15/6/2012 12:00	1	0.06	4 517
55	6	15/7/2012 18:00	24	0.005	2 362	55	23	15/7/2012 18:00	1	0.06	2 606
56	6	15/8/2012 0:00	24	0.005	1 790	56	23	15/8/2012 0:00	1	0.06	2 084
57	6	15/9/2012 6:00	24	0.005	1 481	57	23	15/9/2012 6:00	1	0.06	3 148
58	6	15/10/2012 12:00	24	0.005	2 720	58	23	15/10/2012 12:00	1	0.06	5 288
59	6	15/11/2012 18:00	24	0.005	1 537	59	23	15/11/2012 18:00	1	0.06	2 677
60	6	15/12/2012 0:00	24	0.005	5 396	60	23	15/12/2012 0:00	1	0.06	2 739
61	6	15/1/2013 6:00	24	0.005	1 103	61	23	15/1/2013 6:00	1	0.06	3 825
62	6	15/2/2013 12:00	24	0.005	886	62	23	15/2/2013 12:00	1	0.06	1 703
63	6	15/3/2013 18:00	24	0.005	2 562	63	23	15/3/2013 18:00	1	0.06	2 541

Tabla 3. Continúa.

Simulación VEI2	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI3	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
64	6	15/4/2013 0:00	24	0.005	1 943	64	23	15/4/2013 0:00	1	0.06	2 212
65	6	15/5/2013 6:00	24	0.005	2 100	65	23	15/5/2013 6:00	1	0.06	2 697
66	6	15/6/2013 12:00	24	0.005	893	66	23	15/6/2013 12:00	1	0.06	1 320
67	6	15/7/2013 18:00	24	0.005	3 781	67	23	15/7/2013 18:00	1	0.06	3 724
68	6	15/8/2013 0:00	24	0.005	2 393	68	23	15/8/2013 0:00	1	0.06	2 024
69	6	15/9/2013 6:00	24	0.005	1 944	69	23	15/9/2013 6:00	1	0.06	2 250
70	6	15/10/2013 12:00	24	0.005	1 478	70	23	15/10/2013 12:00	1	0.06	2 084
71	6	15/11/2013 18:00	24	0.005	2 118	71	23	15/11/2013 18:00	1	0.06	1 832
72	6	15/12/2013 0:00	24	0.005	1 928	72	23	15/12/2013 0:00	1	0.06	2 568
73	6	15/1/2014 6:00	24	0.005	3 083	73	23	15/1/2014 6:00	1	0.06	3 659
74	6	15/2/2014 12:00	24	0.005	1 522	74	23	15/2/2014 12:00	1	0.06	2 130
75	6	15/3/2014 18:00	24	0.005	2 960	75	23	15/3/2014 18:00	1	0.06	2 352
76	6	15/4/2014 0:00	24	0.005	2 297	76	23	15/4/2014 0:00	1	0.06	3 520
77	6	15/5/2014 6:00	24	0.005	2 581	77	23	15/5/2014 6:00	1	0.06	4 168
78	6	15/6/2014 12:00	24	0.005	1 814	78	23	15/6/2014 12:00	1	0.06	1 612
79	6	15/7/2014 18:00	24	0.005	1 941	79	23	15/7/2014 18:00	1	0.06	2 128
80	6	15/8/2014 0:00	24	0.005	2 245	80	23	15/8/2014 0:00	1	0.06	2 701
81	6	15/9/2014 6:00	24	0.005	2 210	81	23	15/9/2014 6:00	1	0.06	1 468
82	6	15/10/2014 12:00	24	0.005	2 712	82	23	15/10/2014 12:00	1	0.06	2 270
83	6	15/11/2014 18:00	24	0.005	4 520	83	23	15/11/2014 18:00	1	0.06	3 503
84	6	15/12/2014 0:00	24	0.005	1 284	84	23	15/12/2014 0:00	1	0.06	2 083
85	6	15/1/2015 6:00	24	0.005	3 775	85	23	15/1/2015 6:00	1	0.06	5 959
86	6	15/2/2015 12:00	24	0.005	3 905	86	23	15/2/2015 12:00	1	0.06	7 151
87	6	15/3/2015 18:00	24	0.005	4 933	87	23	15/3/2015 18:00	1	0.06	2 425
88	6	15/4/2015 0:00	24	0.005	1 726	88	23	15/4/2015 0:00	1	0.06	3 051
89	6	15/5/2015 6:00	24	0.005	3 667	89	23	15/5/2015 6:00	1	0.06	3 973
90	6	15/6/2015 12:00	24	0.005	1 153	90	23	15/6/2015 12:00	1	0.06	1 695
91	6	15/7/2015 18:00	24	0.005	1 800	91	23	15/7/2015 18:00	1	0.06	2 155
92	6	15/8/2015 0:00	24	0.005	2 259	92	23	15/8/2015 0:00	1	0.06	1 586
93	6	15/9/2015 6:00	24	0.005	3 282	93	23	15/9/2015 6:00	1	0.06	2 837
94	6	15/10/2015 12:00	24	0.005	2 383	94	23	15/10/2015 12:00	1	0.06	6 496
95	6	15/11/2015 18:00	24	0.005	3 294	95	23	15/11/2015 18:00	1	0.06	2 815
96	6	15/12/2015 0:00	24	0.005	2 221	96	23	15/12/2015 0:00	1	0.06	4 001
97	6	15/1/2016 6:00	24	0.005	1 245	97	23	15/1/2016 6:00	1	0.06	1 922

Tabla 3. Continúa.

Simulación VEI2	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/m/a/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI3	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/m/a/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
98	6	15/2/2016 12:00	24	0.005	3 304	98	23	15/2/2016 12:00	1	0.06	4 059
99	6	15/3/2016 18:00	24	0.005	2 533	99	23	15/3/2016 18:00	1	0.06	2 971
100	6	15/4/2016 0:00	24	0.005	4 240	100	23	15/4/2016 0:00	1	0.06	2 190
101	6	15/5/2016 6:00	24	0.005	3 410	101	23	15/5/2016 6:00	1	0.06	2 210
102	6	15/6/2016 12:00	24	0.005	2 277	102	23	15/6/2016 12:00	1	0.06	2 453
103	6	15/7/2016 18:00	24	0.005	2 534	103	23	15/7/2016 18:00	1	0.06	2 816
104	6	15/8/2016 0:00	24	0.005	3 444	104	23	15/8/2016 0:00	1	0.06	3 151
105	6	15/9/2016 6:00	24	0.005	2 131	105	23	15/9/2016 6:00	1	0.06	1 382
106	6	15/10/2016 12:00	24	0.005	3 061	106	23	15/10/2016 12:00	1	0.06	2 943
107	6	15/11/2016 18:00	24	0.005	3 616	107	23	15/11/2016 18:00	1	0.06	2 595
108	6	15/12/2016 0:00	24	0.005	1 774	108	23	15/12/2016 0:00	1	0.06	2 298
109	6	15/1/2017 6:00	24	0.005	1 103	109	23	15/1/2017 6:00	1	0.06	4 876
110	6	15/2/2017 12:00	24	0.005	4 153	110	23	15/2/2017 12:00	1	0.06	5 136
111	6	15/3/2017 18:00	24	0.005	1 240	111	23	15/3/2017 18:00	1	0.06	2 166
112	6	15/4/2017 0:00	24	0.005	1 103	112	23	15/4/2017 0:00	1	0.06	1 493
113	6	15/5/2017 6:00	24	0.005	2 132	113	23	15/5/2017 6:00	1	0.06	4 098
114	6	15/6/2017 12:00	24	0.005	2 295	114	23	15/6/2017 12:00	1	0.06	2 535
115	6	15/7/2017 18:00	24	0.005	2 905	115	23	15/7/2017 18:00	1	0.06	3 624
116	6	15/8/2017 0:00	24	0.005	2 580	116	23	15/8/2017 0:00	1	0.06	2 267
117	6	15/9/2017 6:00	24	0.005	2 957	117	23	15/9/2017 6:00	1	0.06	2 823
118	6	15/10/2017 12:00	24	0.005	4 224	118	23	15/10/2017 12:00	1	0.06	4 645
119	6	15/11/2017 18:00	24	0.005	3 266	119	23	15/11/2017 18:00	1	0.06	2 263
120	6	15/12/2017 0:00	24	0.005	4 411	120	23	15/12/2017 0:00	1	0.06	4 150

Tabla 4. Parámetros utilizados en las simulaciones para los escenarios VEI4 y VEI5.

Simulación VEI4	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI5	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
1	26	15/1/2008 6:00	2	0.025	3 399	1	30	15/1/2008 6:00	4	0.75	2 982
2	26	15/2/2008 12:00	2	0.025	5 771	2	30	15/2/2008 12:00	4	0.75	4 988
3	26	15/3/2008 18:00	2	0.025	1 792	3	30	15/3/2008 18:00	4	0.75	3 432
4	26	15/4/2008 0:00	2	0.025	1 998	4	30	15/4/2008 0:00	4	0.75	2 772
5	26	15/5/2008 6:00	2	0.025	3 457	5	30	15/5/2008 6:00	4	0.75	3 419
6	26	15/6/2008 12:00	2	0.025	3 047	6	30	15/6/2008 12:00	4	0.75	4 864
7	26	15/7/2008 18:00	2	0.025	2 282	7	30	15/7/2008 18:00	4	0.75	5 561
8	26	15/8/2008 0:00	2	0.025	2 210	8	30	15/8/2008 0:00	4	0.75	3 132
9	26	15/9/2008 6:00	2	0.025	2 913	9	30	15/9/2008 6:00	4	0.75	5 168
10	26	15/10/2008 12:00	2	0.025	3 739	10	30	15/10/2008 12:00	4	0.75	4 251
11	26	15/11/2008 18:00	2	0.025	2 025	11	30	15/11/2008 18:00	4	0.75	3 057
12	26	15/12/2008 0:00	2	0.025	2 326	12	30	15/12/2008 0:00	4	0.75	3 793
13	26	15/1/2009 6:00	2	0.025	5 022	13	30	15/1/2009 6:00	4	0.75	8 017
14	26	15/2/2009 12:00	2	0.025	5 541	14	30	15/2/2009 12:00	4	0.75	5 224
15	26	15/3/2009 18:00	2	0.025	2 364	15	30	15/3/2009 18:00	4	0.75	2 787
16	26	15/4/2009 0:00	2	0.025	2 387	16	30	15/4/2009 0:00	4	0.75	3 985
17	26	15/5/2009 6:00	2	0.025	3 999	17	30	15/5/2009 6:00	4	0.75	4 416
18	26	15/6/2009 12:00	2	0.025	3 270	18	30	15/6/2009 12:00	4	0.75	4 334
19	26	15/7/2009 18:00	2	0.025	3 621	19	30	15/7/2009 18:00	4	0.75	4 673
20	26	15/8/2009 0:00	2	0.025	2 504	20	30	15/8/2009 0:00	4	0.75	4 084
21	26	15/9/2009 6:00	2	0.025	4 528	21	30	15/9/2009 6:00	4	0.75	8 889
22	26	15/10/2009 12:00	2	0.025	3 528	22	30	15/10/2009 12:00	4	0.75	4 460
23	26	15/11/2009 18:00	2	0.025	4 317	23	30	15/11/2009 18:00	4	0.75	5 380
24	26	15/12/2009 0:00	2	0.025	5 147	24	30	15/12/2009 0:00	4	0.75	5 684
25	26	15/1/2010 6:00	2	0.025	2 515	25	30	15/1/2010 6:00	4	0.75	4 378
26	26	15/2/2010 12:00	2	0.025	2 484	26	30	15/2/2010 12:00	4	0.75	3 376
27	26	15/3/2010 18:00	2	0.025	1 686	27	30	15/3/2010 18:00	4	0.75	2 875
28	26	15/4/2010 0:00	2	0.025	3 762	28	30	15/4/2010 0:00	4	0.75	4 803
29	26	15/5/2010 6:00	2	0.025	6 562	29	30	15/5/2010 6:00	4	0.75	6 735

Tabla 4. Continúa.

Simulación VEI4	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI5	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
30	26	15/6/2010 12:00	2	0.025	2.394	30	30	15/6/2010 12:00	4	0.75	3.228
31	26	15/7/2010 18:00	2	0.025	3.421	31	30	15/7/2010 18:00	4	0.75	3.972
32	26	15/8/2010 0:00	2	0.025	2.898	32	30	15/8/2010 0:00	4	0.75	3.927
33	26	15/9/2010 6:00	2	0.025	1.644	33	30	15/9/2010 6:00	4	0.75	2.844
34	26	15/10/2010 12:00	2	0.025	4.374	34	30	15/10/2010 12:00	4	0.75	5.856
35	26	15/11/2010 18:00	2	0.025	3.219	35	30	15/11/2010 18:00	4	0.75	3.598
36	26	15/12/2010 0:00	2	0.025	2.956	36	30	15/12/2010 0:00	4	0.75	5.308
37	26	15/1/2011 6:00	2	0.025	6.729	37	30	15/1/2011 6:00	4	0.75	6.255
38	26	15/2/2011 12:00	2	0.025	1.509	38	30	15/2/2011 12:00	4	0.75	3.439
39	26	15/3/2011 18:00	2	0.025	2.497	39	30	15/3/2011 18:00	4	0.75	3.451
40	26	15/4/2011 0:00	2	0.025	2.694	40	30	15/4/2011 0:00	4	0.75	3.474
41	26	15/5/2011 6:00	2	0.025	2.292	41	30	15/5/2011 6:00	4	0.75	3.696
42	26	15/6/2011 12:00	2	0.025	4.779	42	30	15/6/2011 12:00	4	0.75	4.884
43	26	15/7/2011 18:00	2	0.025	3.410	43	30	15/7/2011 18:00	4	0.75	5.592
44	26	15/8/2011 0:00	2	0.025	3.281	44	30	15/8/2011 0:00	4	0.75	4.641
45	26	15/9/2011 6:00	2	0.025	3.745	45	30	15/9/2011 6:00	4	0.75	6.074
46	26	15/10/2011 12:00	2	0.025	4.551	46	30	15/10/2011 12:00	4	0.75	3.655
47	26	15/11/2011 18:00	2	0.025	2.806	47	30	15/11/2011 18:00	4	0.75	5.022
48	26	15/12/2011 0:00	2	0.025	2.356	48	30	15/12/2011 0:00	4	0.75	4.536
49	26	15/1/2012 6:00	2	0.025	2.302	49	30	15/1/2012 6:00	4	0.75	4.889
50	26	15/2/2012 12:00	2	0.025	4.497	50	30	15/2/2012 12:00	4	0.75	4.709
51	26	15/3/2012 18:00	2	0.025	2.770	51	30	15/3/2012 18:00	4	0.75	5.044
52	26	15/4/2012 0:00	2	0.025	2.880	52	30	15/4/2012 0:00	4	0.75	4.502
53	26	15/5/2012 6:00	2	0.025	3.275	53	30	15/5/2012 6:00	4	0.75	4.074
54	26	15/6/2012 12:00	2	0.025	5.274	54	30	15/6/2012 12:00	4	0.75	4.539
55	26	15/7/2012 18:00	2	0.025	3.357	55	30	15/7/2012 18:00	4	0.75	3.945
56	26	15/8/2012 0:00	2	0.025	3.118	56	30	15/8/2012 0:00	4	0.75	4.616
57	26	15/9/2012 6:00	2	0.025	4.994	57	30	15/9/2012 6:00	4	0.75	5.607
58	26	15/10/2012 12:00	2	0.025	3.304	58	30	15/10/2012 12:00	4	0.75	5.409
59	26	15/11/2012 18:00	2	0.025	3.568	59	30	15/11/2012 18:00	4	0.75	4.524
60	26	15/12/2012 0:00	2	0.025	3.291	60	30	15/12/2012 0:00	4	0.75	5.448
61	26	15/1/2013 6:00	2	0.025	5.333	61	30	15/1/2013 6:00	4	0.75	5.519
62	26	15/2/2013 12:00	2	0.025	2.386	62	30	15/2/2013 12:00	4	0.75	4.327
63	26	15/3/2013 18:00	2	0.025	3.461	63	30	15/3/2013 18:00	4	0.75	3.951

Tabla 4. Continúa.

Simulación VEI4	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI5	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
64	26	15/4/2013 0:00	2	0.025	2 470	64	30	15/4/2013 0:00	4	0.75	4 451
65	26	15/5/2013 6:00	2	0.025	2 613	65	30	15/5/2013 6:00	4	0.75	3 917
66	26	15/6/2013 12:00	2	0.025	1 716	66	30	15/6/2013 12:00	4	0.75	2 419
67	26	15/7/2013 18:00	2	0.025	3 169	67	30	15/7/2013 18:00	4	0.75	5 036
68	26	15/8/2013 0:00	2	0.025	2 557	68	30	15/8/2013 0:00	4	0.75	4 326
69	26	15/9/2013 6:00	2	0.025	2 022	69	30	15/9/2013 6:00	4	0.75	3 405
70	26	15/10/2013 12:00	2	0.025	2 913	70	30	15/10/2013 12:00	4	0.75	3 519
71	26	15/11/2013 18:00	2	0.025	2 686	71	30	15/11/2013 18:00	4	0.75	4 726
72	26	15/12/2013 0:00	2	0.025	3 194	72	30	15/12/2013 0:00	4	0.75	3 462
73	26	15/1/2014 6:00	2	0.025	3 379	73	30	15/1/2014 6:00	4	0.75	5 305
74	26	15/2/2014 12:00	2	0.025	1 950	74	30	15/2/2014 12:00	4	0.75	3 747
75	26	15/3/2014 18:00	2	0.025	2 889	75	30	15/3/2014 18:00	4	0.75	4 850
76	26	15/4/2014 0:00	2	0.025	3 403	76	30	15/4/2014 0:00	4	0.75	5 034
77	26	15/5/2014 6:00	2	0.025	4 958	77	30	15/5/2014 6:00	4	0.75	3 124
78	26	15/6/2014 12:00	2	0.025	2 281	78	30	15/6/2014 12:00	4	0.75	3 528
79	26	15/7/2014 18:00	2	0.025	2 948	79	30	15/7/2014 18:00	4	0.75	5 228
80	26	15/8/2014 0:00	2	0.025	2 404	80	30	15/8/2014 0:00	4	0.75	4 347
81	26	15/9/2014 6:00	2	0.025	2 060	81	30	15/9/2014 6:00	4	0.75	4 117
82	26	15/10/2014 12:00	2	0.025	3 408	82	30	15/10/2014 12:00	4	0.75	4 472
83	26	15/11/2014 18:00	2	0.025	4 812	83	30	15/11/2014 18:00	4	0.75	5 080
84	26	15/12/2014 0:00	2	0.025	2 755	84	30	15/12/2014 0:00	4	0.75	4 070
85	26	15/1/2015 6:00	2	0.025	3 964	85	30	15/1/2015 6:00	4	0.75	4 324
86	26	15/2/2015 12:00	2	0.025	4 509	86	30	15/2/2015 12:00	4	0.75	6 098
87	26	15/3/2015 18:00	2	0.025	3 231	87	30	15/3/2015 18:00	4	0.75	4 172
88	26	15/4/2015 0:00	2	0.025	2 191	88	30	15/4/2015 0:00	4	0.75	3 082
89	26	15/5/2015 6:00	2	0.025	2 913	89	30	15/5/2015 6:00	4	0.75	4 714
90	26	15/6/2015 12:00	2	0.025	2 518	90	30	15/6/2015 12:00	4	0.75	3 767
91	26	15/7/2015 18:00	2	0.025	2 744	91	30	15/7/2015 18:00	4	0.75	4 407
92	26	15/8/2015 0:00	2	0.025	2 116	92	30	15/8/2015 0:00	4	0.75	3 899
93	26	15/9/2015 6:00	2	0.025	3 002	93	30	15/9/2015 6:00	4	0.75	4 225
94	26	15/10/2015 12:00	2	0.025	4 363	94	30	15/10/2015 12:00	4	0.75	6 414
95	26	15/11/2015 18:00	2	0.025	3 112	95	30	15/11/2015 18:00	4	0.75	4 308
96	26	15/12/2015 0:00	2	0.025	4 436	96	30	15/12/2015 0:00	4	0.75	6 017
97	26	15/1/2016 6:00	2	0.025	2 462	97	30	15/1/2016 6:00	4	0.75	5 195

Tabla 4. Continúa.

Simulación VEI4	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados	Simulación VEI5	Altura columna sobre el cráter (Km)	Hora inicio (d/mm/yyyy h:mm)	Duración (horas)	Volumen caída DRE (km ³)	Depósitos de ceniza procesados
98	26	15/2/2016 12:00	2	0.025	5 226	98	30	15/2/2016 12:00	4	0.75	6 418
99	26	15/3/2016 18:00	2	0.025	2 653	99	30	15/3/2016 18:00	4	0.75	3 293
100	26	15/4/2016 0:00	2	0.025	2 573	100	30	15/4/2016 0:00	4	0.75	3 896
101	26	15/5/2016 6:00	2	0.025	2 758	101	30	15/5/2016 6:00	4	0.75	3 625
102	26	15/6/2016 12:00	2	0.025	2 091	102	30	15/6/2016 12:00	4	0.75	2 477
103	26	15/7/2016 18:00	2	0.025	2 999	103	30	15/7/2016 18:00	4	0.75	4 951
104	26	15/8/2016 0:00	2	0.025	4 217	104	30	15/8/2016 0:00	4	0.75	5 312
105	26	15/9/2016 6:00	2	0.025	1 936	105	30	15/9/2016 6:00	4	0.75	4 859
106	26	15/10/2016 12:00	2	0.025	2 006	106	30	15/10/2016 12:00	4	0.75	5 784
107	26	15/11/2016 18:00	2	0.025	3 407	107	30	15/11/2016 18:00	4	0.75	3 490
108	26	15/12/2016 0:00	2	0.025	2 871	108	30	15/12/2016 0:00	4	0.75	3 107
109	26	15/1/2017 6:00	2	0.025	4 492	109	30	15/1/2017 6:00	4	0.75	6 924
110	26	15/2/2017 12:00	2	0.025	2 274	110	30	15/2/2017 12:00	4	0.75	4 124
111	26	15/3/2017 18:00	2	0.025	3 450	111	30	15/3/2017 18:00	4	0.75	3 725
112	26	15/4/2017 0:00	2	0.025	2 010	112	30	15/4/2017 0:00	4	0.75	3 725
113	26	15/5/2017 6:00	2	0.025	4 174	113	30	15/5/2017 6:00	4	0.75	5 746
114	26	15/6/2017 12:00	2	0.025	2 815	114	30	15/6/2017 12:00	4	0.75	4 390
115	26	15/7/2017 18:00	2	0.025	2 302	115	30	15/7/2017 18:00	4	0.75	3 842
116	26	15/8/2017 0:00	2	0.025	2 886	116	30	15/8/2017 0:00	4	0.75	3 652
117	26	15/9/2017 6:00	2	0.025	3 854	117	30	15/9/2017 6:00	4	0.75	6 820
118	26	15/10/2017 12:00	2	0.025	3 733	118	30	15/10/2017 12:00	4	0.75	5 979
119	26	15/11/2017 18:00	2	0.025	3 153	119	30	15/11/2017 18:00	4	0.75	5 280
120	26	15/12/2017 0:00	2	0.025	6 239	120	30	15/12/2017 0:00	4	0.75	5 734

Figuras 2a, 3a, 4a, 5a) y estadístico utilizando la mediada de los datos interpolados siguiendo la metodología descrita en el estudio realizado por Pavón *et al.* (2019), se obtuvieron mapas de pro-

babilidad de acumulación de espesores de ceniza (Figuras 2 b, c, d, e; Figuras 3 b, c, d, e; Figuras 4 b, c, d, e y Figuras 5 b, c, d, e) asociada a los escenarios eruptivos planteados. El resultado final de

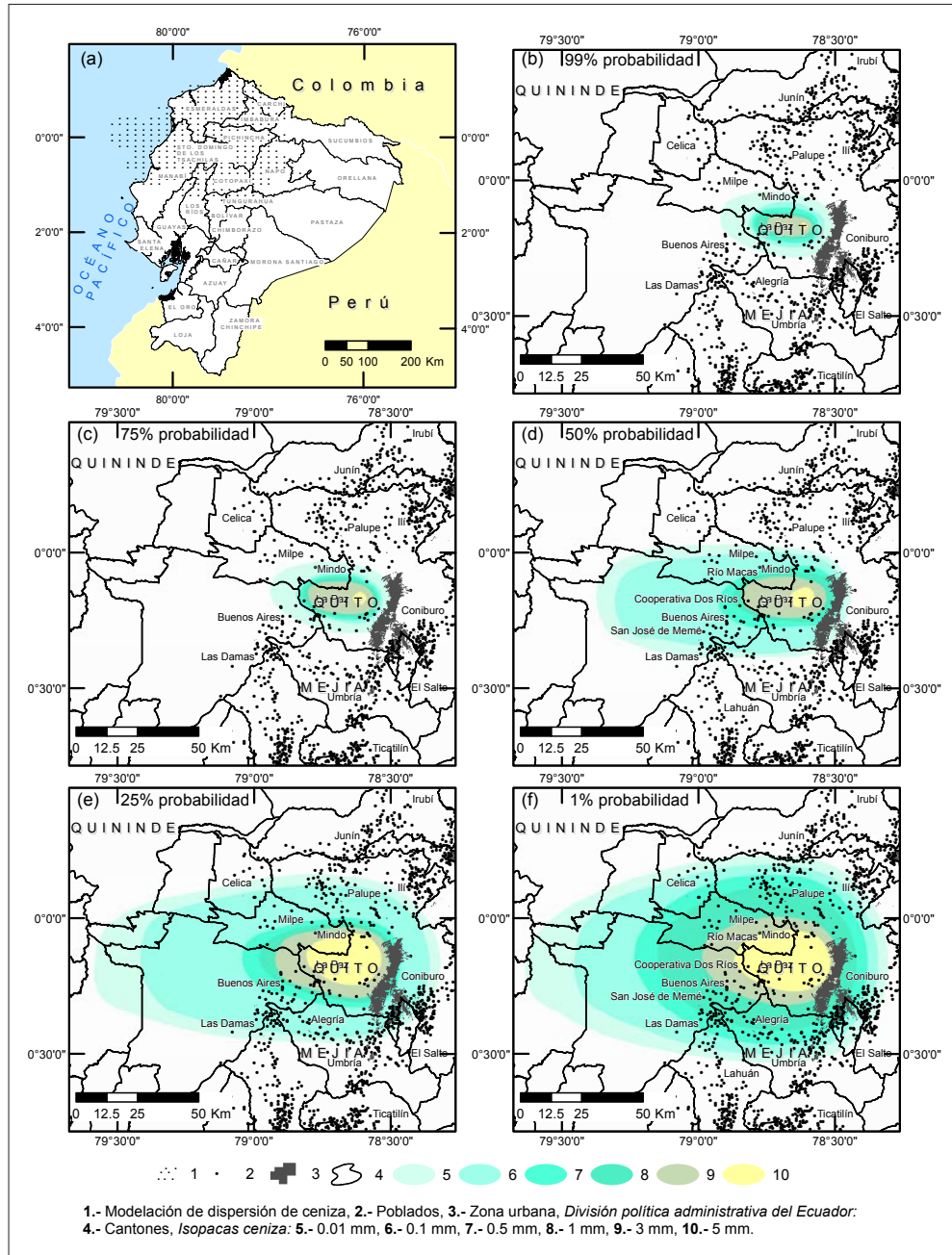


Figura 2. Resultado de las 120 simulaciones utilizadas para el análisis probabilístico (a). Mapas de amenazas (b, c, d, e, f) para el escenario VEI2 – Guagua Pichincha a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25%, 1%).

este proceso es un archivo *shapefile* en el cual los polígonos representan las zonas potencialmente afectadas por ceniza, según distintos espesores validados con las muestras de los depósitos de

ceniza del IGEPN que dispone de información de los eventos ocurridos en los últimos 11 000 años de actividad del Guagua Pichincha (Robin *et al.*, 2008, 2010). Los espesores de estas muestras

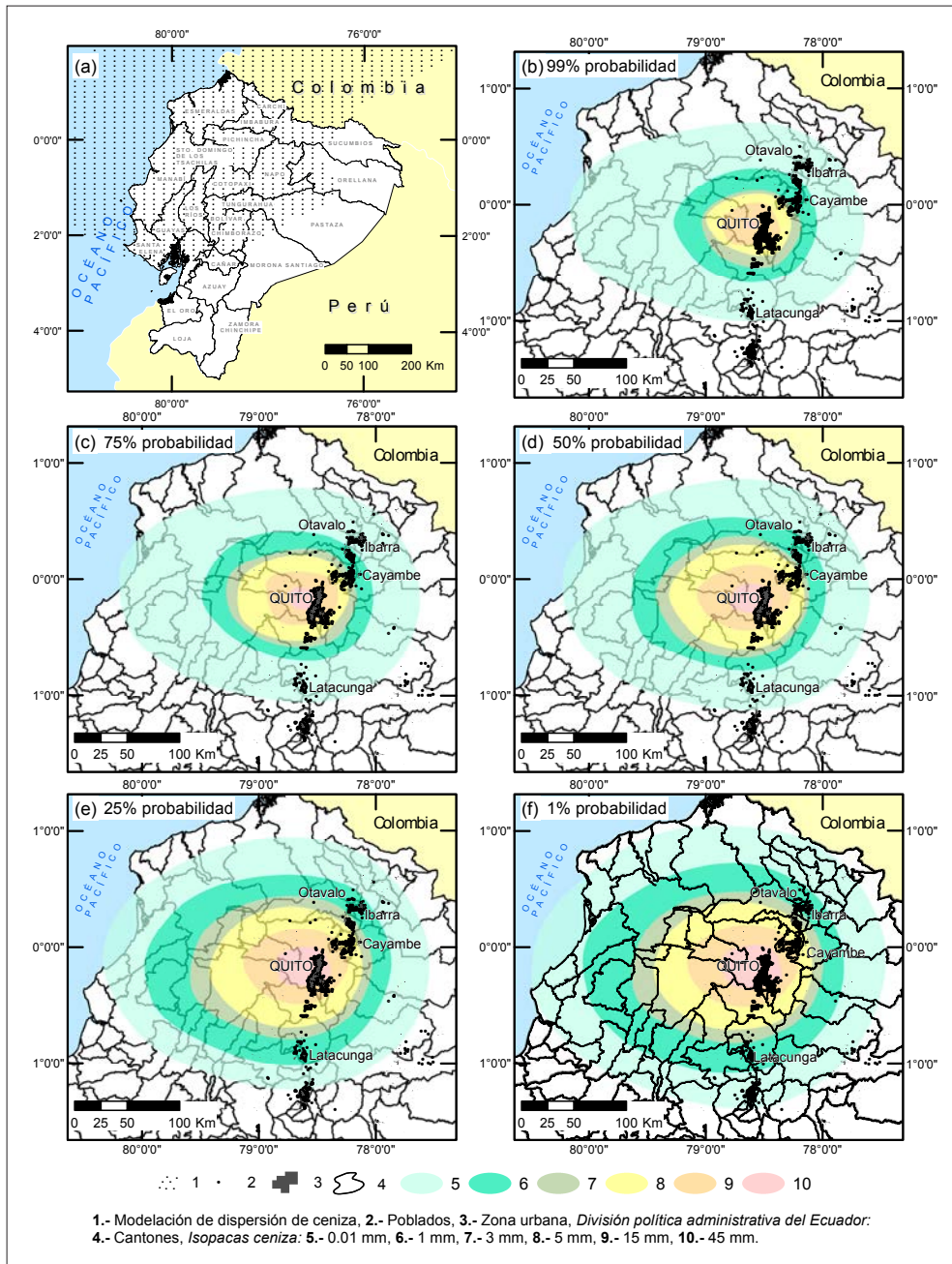


Figura 3. Resultado de las 120 simulaciones utilizadas para el análisis probabilístico (a). Mapas de amenazas (b, c, d, e, f) para el escenario VEI3 – Guagua Pichincha a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25%, 1%).

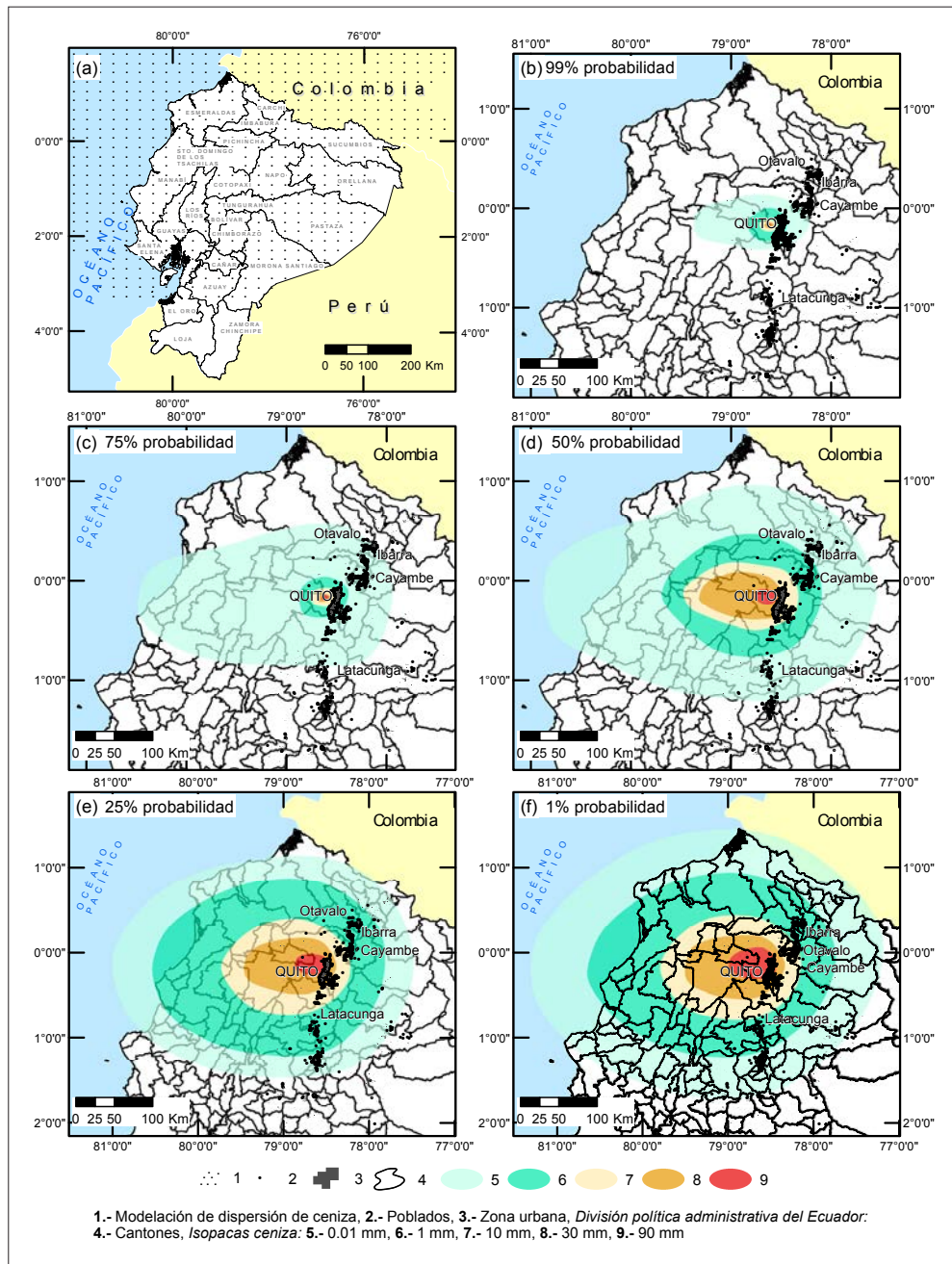


Figura 4. Resultado de las 120 simulaciones utilizadas para el análisis probabilístico (a). Mapas de amenazas (b, c, d, e, f) para el escenario VEI4 – Guagua Pichincha a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25%, 1%).

han sido comparados con el estudio estadístico, resultado de las simulaciones de los escenarios (Figura 6). Ninguna muestra obtenida en campo se ubica fuera del rango de los espesores alcan-

zados con las modelaciones (0.01-3.9 mm) y la mayoría de los eventos se ubica cerca de la mediana de la distribución de los resultados de las modelaciones (3 mm), lo que concuerda con lo

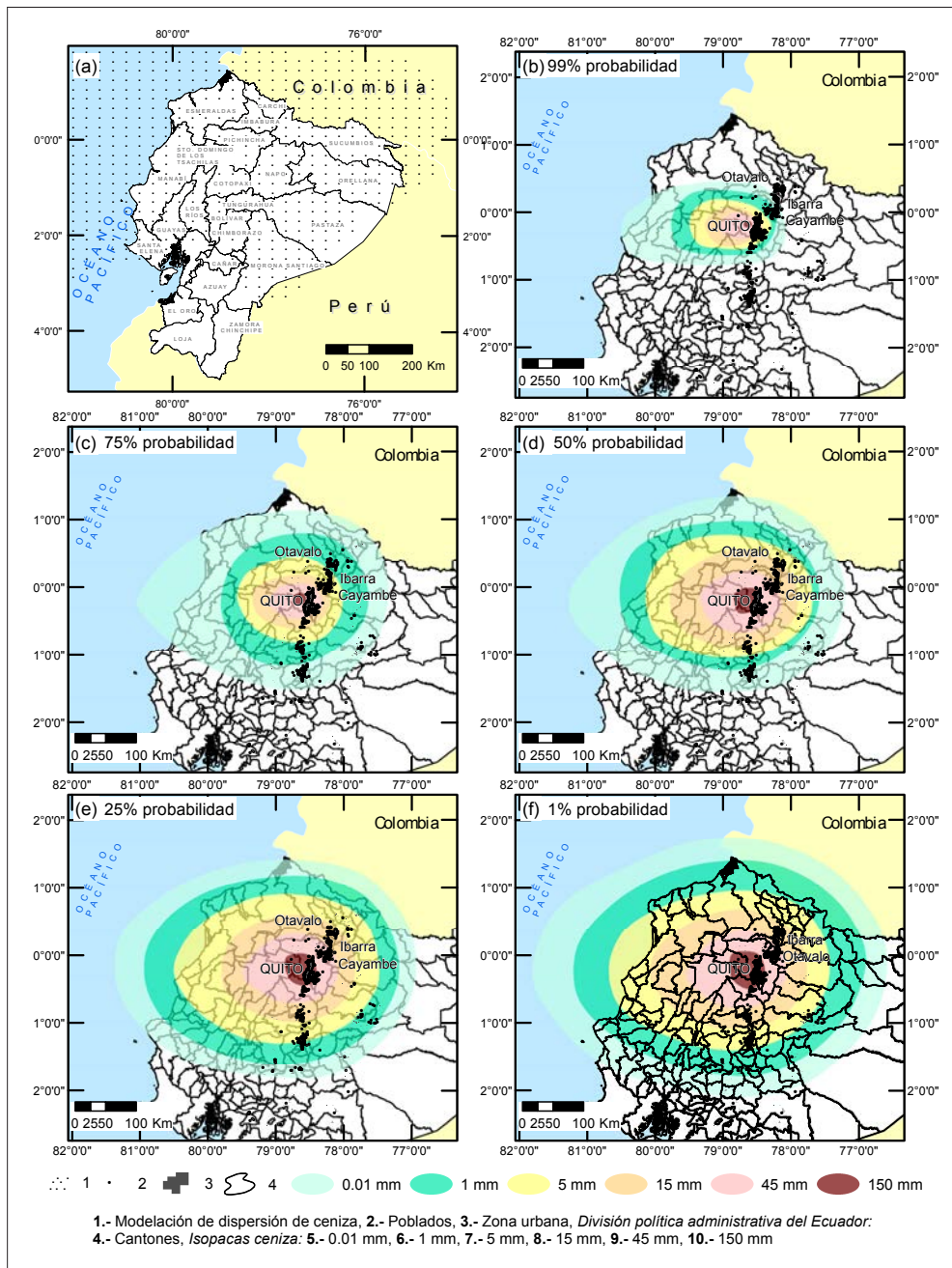


Figura 5. Resultado de las 120 simulaciones utilizadas para el análisis probabilístico (a). Mapas de amenazas (b, c, d, e, f) para el escenario VEI5 – Guagua Pichincha a diferentes probabilidades (99%, 75%, 50%, 25%, 1%).

reportado en el mapa de amenazas del volcán Guagua Pichincha en su tercera versión (IGEPN, IGM, IRD, 2019).

Mapas de amenazas por caída de ceniza

Considerando el análisis probabilístico de las modelaciones, se obtuvieron diferentes mapas de amenaza de dispersión y caída de ceniza para los escenarios

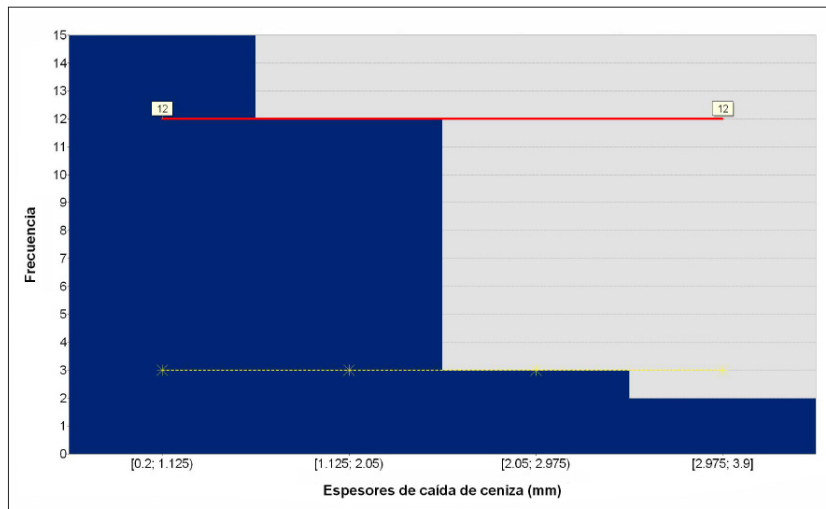


Figura 6. Histograma de frecuencia de caída de ceniza de simulaciones volcán Guagua Pichincha VEI2 (barras azules) comparado con el espesores de ceniza y lapilli identificadas en campo (estrellas amarillas).

planteados. De esta manera, se representaron los mapas al 99%, 75%, 50%, 25%, 1% de probabilidad, observando diferencias marcadas entre ellos. Así, el mapa más pesimista corresponde al de 1% de probabilidad de caída de ceniza máxima esperada en los diferentes sectores; mientras que el mapa al 99% de probabilidad refleja un escenario más conservador, al considerar una caída mínima de ceniza esperada según los diferentes sectores.

Para el propósito de este estudio, los mapas de amenaza al 75% (Figura 7) que cubren la superficie afectada y representada en los mapas de amenazas elaborados en el Ecuador (IGEPN, IGM, IRD, 2019), han sido utilizados en la aplicación de la metodología *Index For Risk Management* (INFORM por su acrónimo en inglés), desarrollada para entender el riesgo en catástrofes y crisis humanitarias (INFORM, 2020), en respuesta a varias recomendaciones de organizaciones como el Banco Mundial (BM) (2012).

Vulnerabilidad y falta de afrontamiento o respuesta

Para obtener el impacto de caída de ceniza se utilizó la metodología de INFORM y datos de población a nivel parroquial¹ (INEC, 2010). Estos datos permi-

¹ Niveles de organización territorial. El Estado ecuatoriano se organiza territorialmente en regiones, provincias, cantones y parroquias.

tieron identificar y priorizar a los habitantes de mayor riesgo y determinar los peligros asociados. Esta información es vital para la toma de decisiones, activación de sistemas de alerta temprana y adopción de medidas para aumentar la resiliencia de la población más vulnerable (EIRD/ONU, 2004). Las modelaciones de caída de ceniza, corresponden al indicador de peligro y exposición de la amenaza volcánica, planteada en la metodología INFORM. Con respecto a los indicadores propuestos de vulnerabilidad y falta de respuesta (Tabla 5), se recopiló información oficial disponible a nivel parroquial en el Ecuador.

Procesamiento de datos y espacialización de indicadores

El procesamiento consistió en la organización de los datos censales a nivel parroquial tomados del Sistema Integrado de Consultas-REDATAM (INEC, 2010), así como las coberturas recopiladas por los organismos generadores de información a nivel nacional.

Mediante herramientas de análisis espacial de los SIG se enlazó la información de las tablas generadas para su espacialización y posterior almacenamiento en una base de datos geográfica, obteniendo como resultado una cobertura con desagregación parroquial para cada uno de los indicadores priorizados.

Para su simbolización y representación, cada una de las coberturas espacializadas fue clasificada

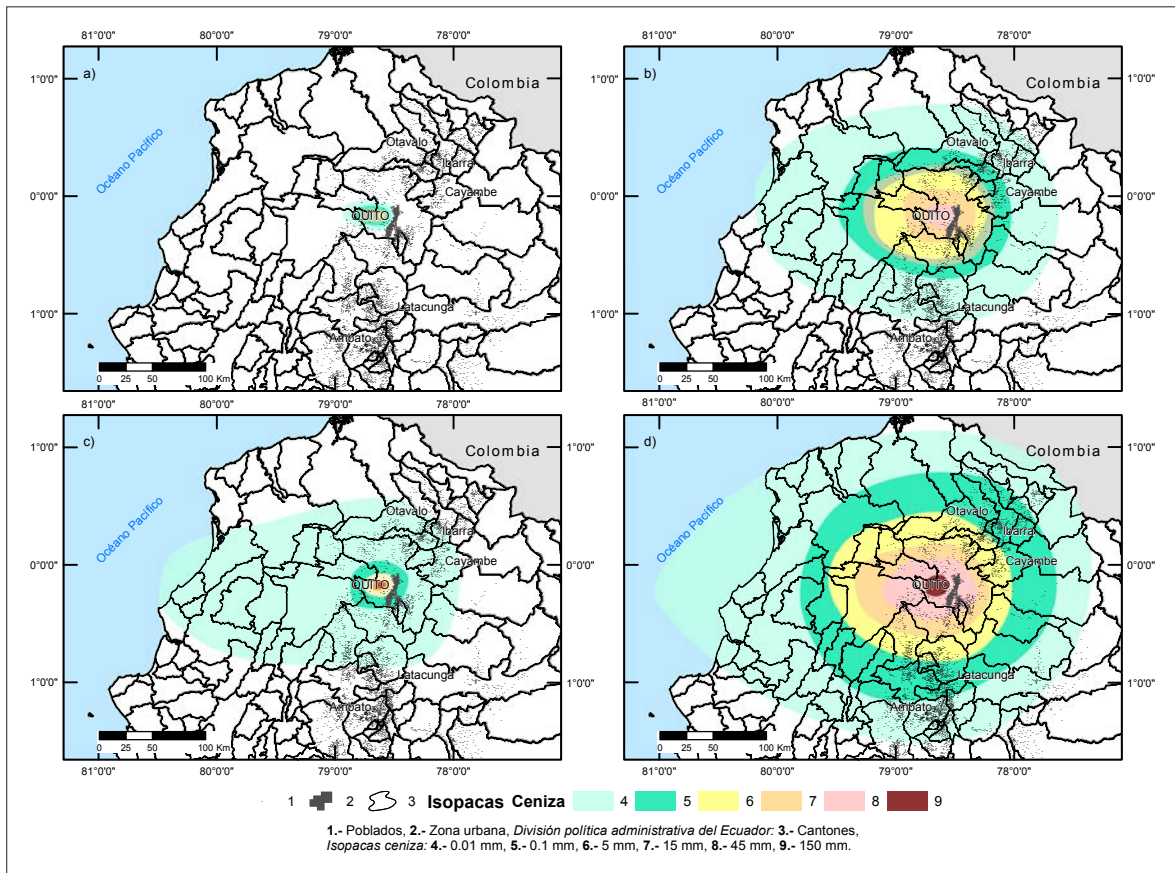


Figura 7. Mapa de amenazas al 75% de probabilidad para los escenarios planteados del volcán Guagua Pichincha: VEI2 (a), VEI3 (b), VEI4 (c), VEI5 (d).

en cinco grupos con intervalos definidos en función de los datos de cada cobertura. Para esta clasificación se utilizó el método de cortes naturales (*natural breaks*), el cual se basa en las agrupaciones de los datos de manera natural (Longley *et al.*, 2005). Estos cortes se caracterizan por la agrupación de valores similares, maximizando las diferencias entre clases, es decir, los límites entre clases se dan cuando existen diferencias considerables entre los valores de los datos de cada una de las variables analizadas. A manera de ejemplo, en la Figura 8 se aprecia la clasificación y simbología utilizada para el indicador de porcentaje de población dedicada a la agricultura y ganadería; en este caso, los tonos claros representan las parroquias con menor proporción de población dedicada a la agricultura, mientras que, en tonos oscuros se simbolizan las

parroquias con mayor concentración de población dedicada a esta actividad.

Ponderación y síntesis de indicadores

El procesamiento de la información disponible permitió contar con mapas que representan por separado los 15 indicadores priorizados de la situación al 2010 por parroquia a nivel nacional. Sin embargo, para un análisis completo de la vulnerabilidad de los territorios potencialmente afectados por caída de ceniza fue necesario construir un mapa síntesis que muestre la vulnerabilidad y resiliencia en función del análisis integrado de los indicadores considerados.

Para el análisis integrado, mediante SIG se generaron modelos cartográficos para la automatización del proceso tomando en consideración los paráme-

Tabla 5. Indicadores adaptados de la metodología INFORM (2020) y utilizados para la determinación del riesgo por caída de ceniza.

<i>Peso metodología INFORM</i>	<i>Categoría</i>	<i>Indicador</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>	<i>Porcentaje asignado</i>
3	Amenaza	Exposición a caída de ceniza	IGEPN	2018	100%
		Porcentaje tipo de cubierta (hormigón)	INEC	2010	17%
	Vulnerabilidad física	Porcentaje tipo de cerramiento (hormigón)	INEC	2010	-
		Zona agrícola	MAGAP	2017	17%
	Vulnerabilidad social	Porcentaje de analfabetismo	INEC	2010	-
		Porcentaje de población dedicada a la agricultura y ganadería	INEC	2010	17%
		Porcentaje de población con algún grado de discapacidad	INEC	2010	11%
		Grupos etarios vulnerables (niños menores de 5 años y mayores de 65)	INEC	2010	17%
	Vulnerabilidad social	Índice de GINI	INEC	2014	6%
		Índice de pobreza	INEC	2014	11%
		Población	INEC	2015	-
		Kilómetros de ríos principales	IGM	2013	4%
		Porcentaje de acceso a agua potable	INEC	2010	23%
		Porcentaje de hogares con acceso a internet	INEC	2010	8%
		Porcentaje de hogares con telefonía móvil	INEC	2010	-
		Postas de Salud por cada 10 000 personas	MSP	2014	23%
		2	Resiliencia	Tiempo de viaje a la ciudad más cercana	MAGAP SIGTIERRAS
Conexión a redes eléctricas	INEC			2010	8%
Número de centros educativos por cada 10 000 personas	MINEDUC			2014	23%
Voluntarios de la Cruz Roja Ecuatoriana (CRE)	CRE			2018	-

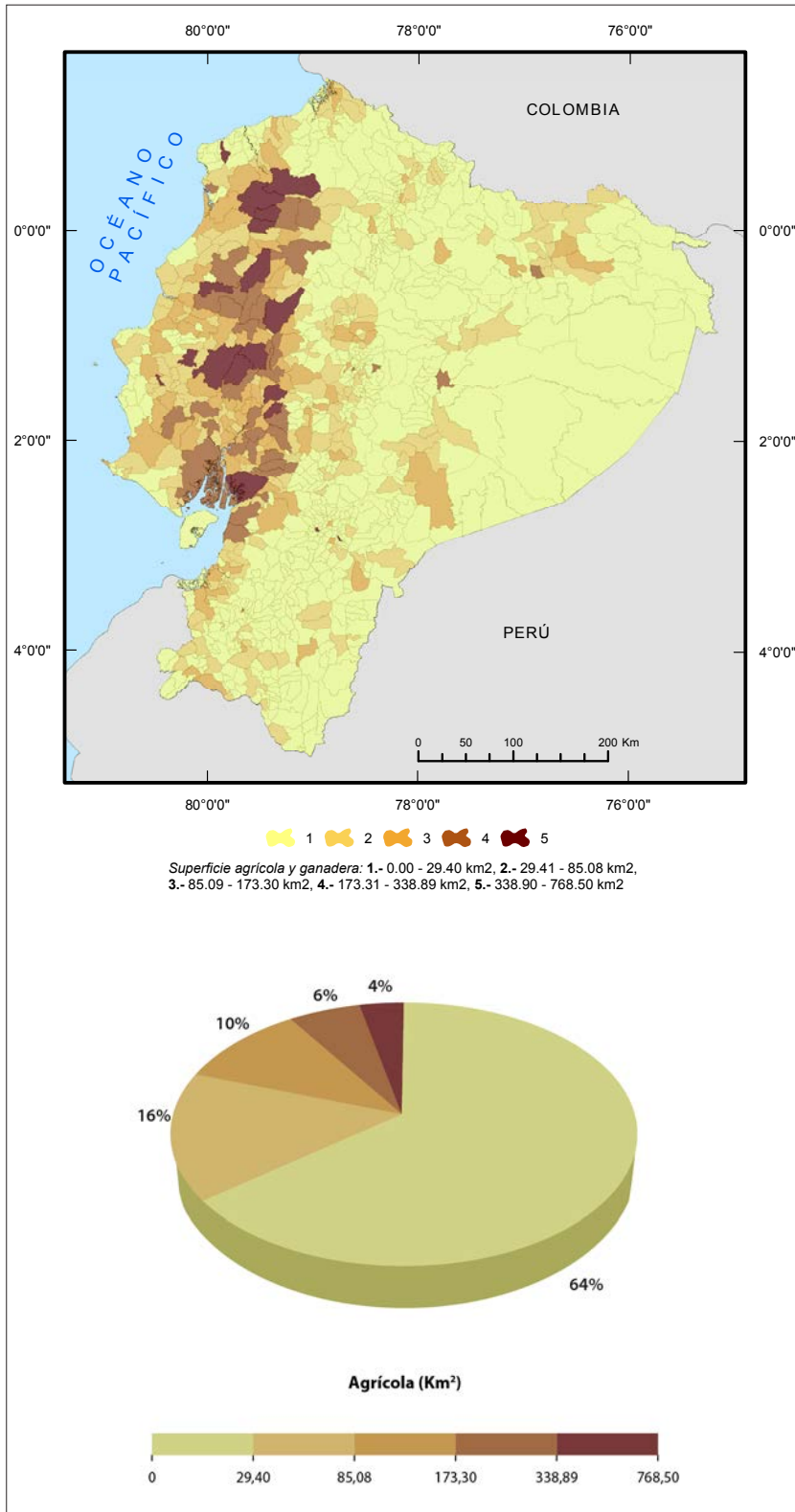


Figura 8. Clasificación y simbolización de la población dedicada a la agricultura. Datos censales (INEC, 2010), Uso de suelo (MAGAP, 2014).

tros previamente establecidos mediante los cuales, se asignaron pesos a cada una de las categorías o clases de los indicadores priorizados. Tomando como punto de partida un archivo de tipo vector, se transformaron a formato ráster las coberturas de los indicadores conservando la información de la variable analizada, la cual queda almacenada en el valor del píxel o celda. Estos valores posteriormente son utilizados para la reclasificación del archivo en cinco clases, considerando la ponderación previamente establecida.

La asignación de pesos se realizó en función de la variable o indicador analizado; así, por ejemplo, en el caso de la variable “tipo de cubierta”, se le asignó un menor peso a las parroquias que concentran edificaciones con cubierta de hormigón (valor 1), mientras que un mayor peso le fue asignado a las parroquias con mayor concentración de viviendas con el tipo de cubierta de palma (valor 5) (Figura 9).

Una vez obtenidos los archivos ráster de cada una de las categorías por indicador con sus respectivos pesos, se realizó, mediante álgebra de mapas, la suma de las coberturas ráster para su integración y síntesis. El mapa resultante constituye la sumatoria de cada uno de los archivos reclasificados, en una única cobertura con valores de píxel que sintetizan los pesos asignados por variable (Figura 10). En este sentido, en tonos rojos se representan las parroquias con mayor vulnerabilidad a la caída de ceniza por tener mayor concentración de viviendas con un tipo de cubierta de palma, mientras que, en color verde, se aprecian aquellas parroquias que concentran viviendas menos vulnerables por el tipo de cubierta de hormigón.

Los indicadores procesados y analizados fueron el insumo en la determinación de la vulnerabilidad y poca resiliencia de las parroquias afectadas por caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha.

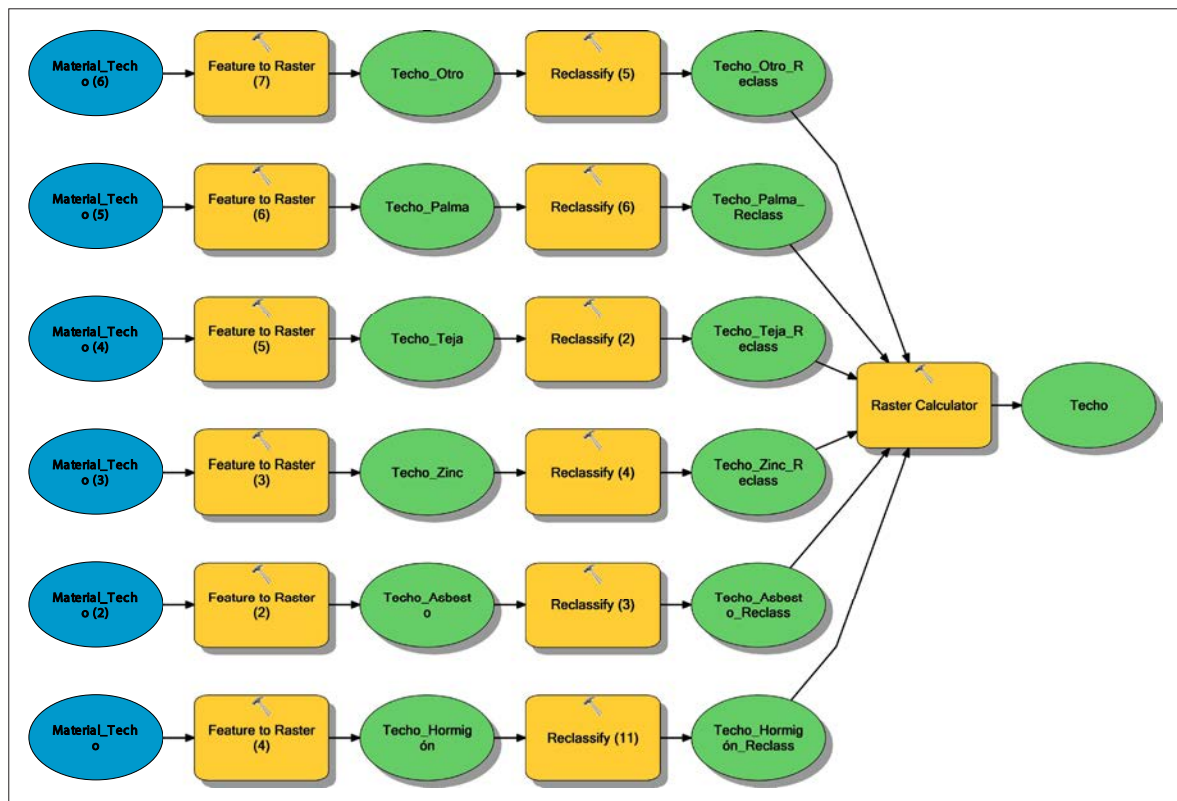


Figura 9. Automatización de procesos-modelo cartográfico utilizado para análisis del indicador: Porcentaje de tipo de cubierta.

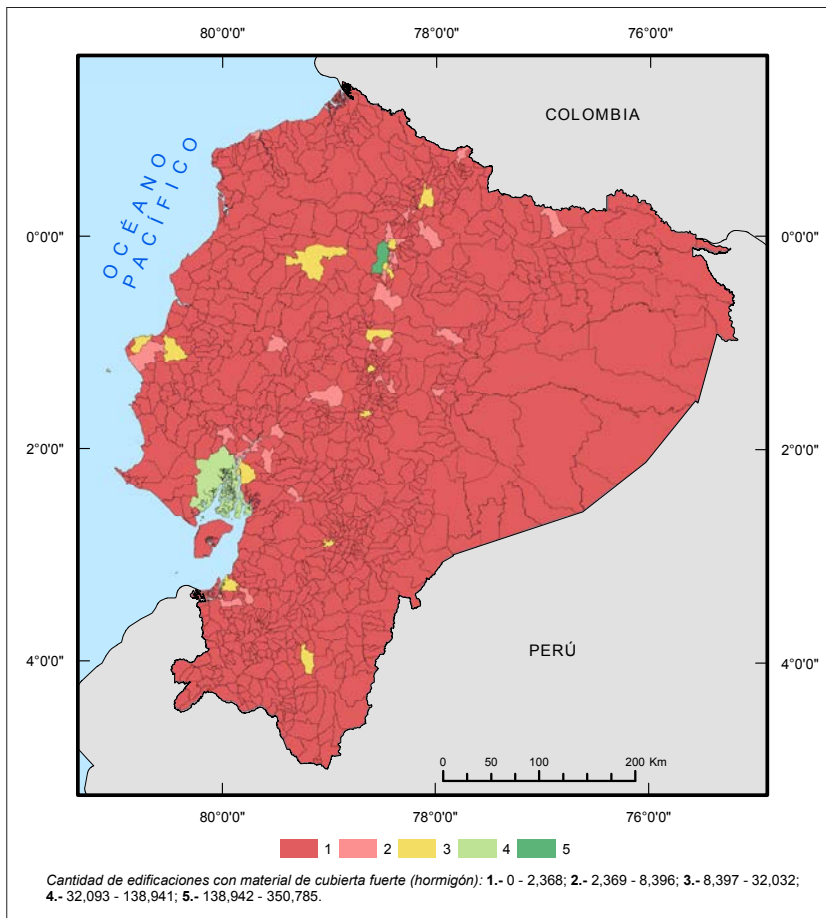


Figura 10. Síntesis del indicador porcentaje de tipo de cubierta fuerte (hormigón). Datos censales (INEC, 2010).

Para este análisis se sobrepusieron los valores de cada uno de los indicadores utilizando la herramienta *Weighted Overlay*, tomando en consideración los pesos planteados previamente (Tabla 6). Como resultado de este proceso, se obtienen archivos ráster (Figura 11) de cada una de las variables y pesos considerados en la metodología INFORM (2020) para la determinación de escenarios de impacto y zonificación de la amenaza volcánica tomando en cuenta que la información es procesada a nivel parroquial.

Escenarios de impacto y zonificación de la amenaza volcánica

Los archivos resultantes de la ponderación y síntesis de los indicadores analizados fueron el insumo para la determinación de los escenarios de impacto y zonificación de la amenaza volcánica, considerando escenarios al 75% de probabilidad de ocurrencia

de erupción del volcán Guagua Pichincha. En este sentido, se utilizó la media geométrica de cada una de las variables planteadas en la ecuación (2) de la metodología INFORM (2020). Con ayuda de los SIG y automatización de procesos, se obtuvo el impacto con desagregación parroquial de cada escenario del volcán en estudio (Tabla 7) que concuerdan con la clasificación planteada en la metodología INFORM (2020). En la Figura 12 se aprecia el impacto del volcán Guagua Pichincha VEI5 al 75% de probabilidad, resultado del proceso antes descrito.

$$\text{Riesgo} = (\text{Amenaza}^{\frac{1}{3}}) \cdot (\text{Vulnerabilidad}^{\frac{1}{3}}) \cdot (\text{Capacidad de afrontamiento}^{\frac{1}{3}}) \quad (2)$$

A partir del archivo resultante, se realizó una conversión de formato ráster a vector de las cobertu-

Tabla 6. Indicadores e intervalos utilizados para la determinación del riesgo por caída de ceniza

Categoría	Indicador	Peso asignado según rango y categoría						
		1	2	3	4	5		
Amenaza	Exposición a caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha	0	5	15.1	150	NA		
	Total peso indicador amenaza	100%						
	Porcentaje tipo de cubierta (hornisón)	17%	13 8941	32 093	8 397	2 369	0	
	Zona agrícola	17%	29.40	85.08	173.30	338.89	768.50	
Vulnerabilidad	Porcentaje de población dedicada a la agricultura y ganadería	17%	536	1 186	1 187	2 230	4 093	8 463
	Porcentaje de población con algún grado de discapacidad	11%	659	2 325	7 245	16 810	125 025	
	Grupos etarios vulnerables (niños menores de 5 años y mayores de 65)	17%	979	3 364	3 365	10 376	27 507	176 548
	Índice de GINI	6%	0.20	0.30	0.31	0.52	0.69	0.96
	Índice de pobreza	11%	0.018	0.033	0.034	0.049	0.073	0.156
	Kilómetros de ríos principales	4%	229	719	720	1 704	4 801	10 456
	Total peso indicadores vulnerabilidad	100%						

Tabla 6. Continúa.

Categoría	Indicador	Porcentaje asignado	Peso asignado según rango y categoría									
			1	2	3	4	5					
Resiliencia	Porcentaje de acceso a agua potable	23%	0	3 116	3 117	11 093	28 078	28 079	83 784	83 785	503 097	
	Porcentaje de hogares con acceso a internet	8%	0	754	755	2 953	7 294	7 295	19 700	19 701	138 938	
	Porcentaje de hogares con telefonía móvil	8%	0	1 993	1 994	7 484	20 592	20 593	75 207	75 208	500 123	
	Postas de Salud por cada 10 000 personas	23%	0	3	4	8	19	20	42	43	149	
	Tiempo de viaje a la ciudad más cercana	15%	Zona restringida	Accesibilidad reducida con barrera	Accesibilidad reducida	Accesibilidad moderada	Accesibilidad elevada					
	Conexión a redes eléctricas	8%	0	2 453	2 454	8 015	24 482	24 483	86 473	86 474	543 955	
	Número de centros educativos por cada 10 000 personas	23%	0	17	18	49	105	106	283	284	510	
	Total peso indicadores resiliencia	100%										

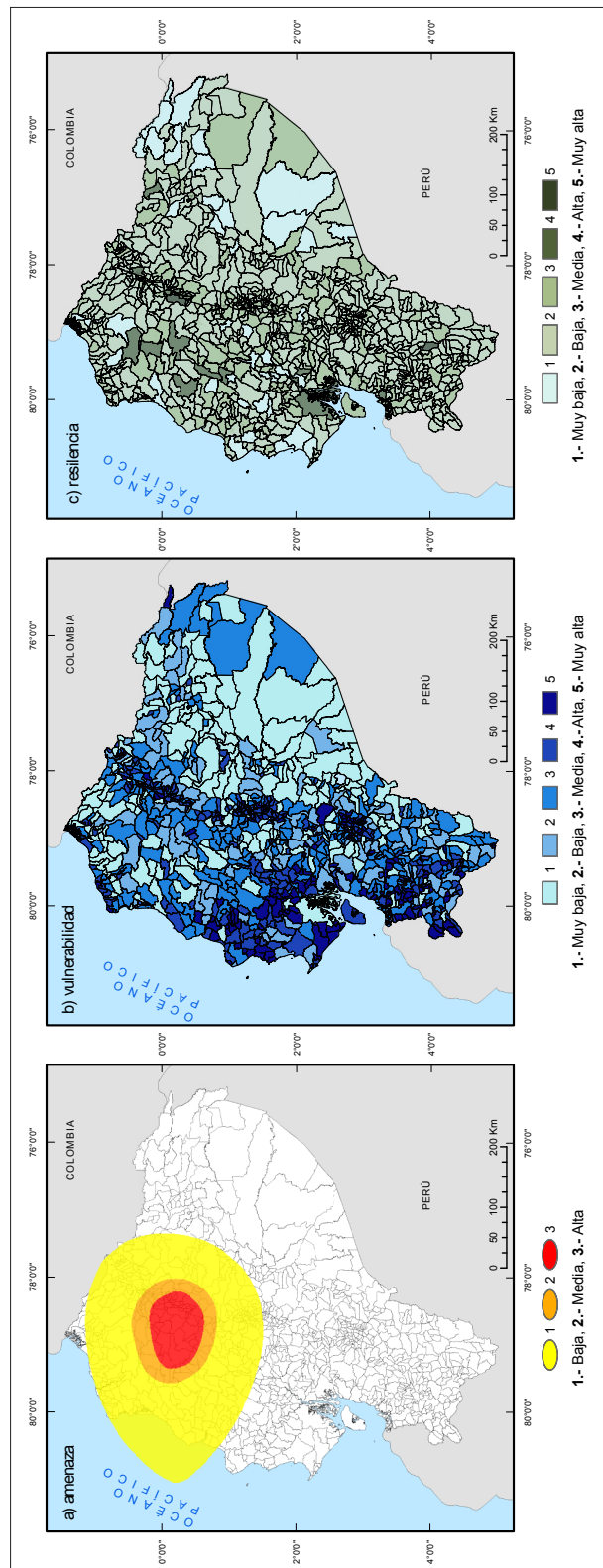


Figura 11. Variables utilizadas en la construcción de escenarios de impacto y zonificación: a) síntesis indicador amenaza por caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha, b) síntesis de los ocho indicadores de vulnerabilidad planteados (Tabla 6) y c) síntesis de los siete indicadores de resiliencia planteados (Tabla 6).

ras obtenidas (Figura 13) respecto del impacto a nivel parroquial para cada uno de los escenarios de impacto. La cobertura de puntos con información del impacto fue integrada a la cobertura de parroquias, así se pudo obtener, mediante herramientas de geoprocetamiento (Figura 14), el archivo *shapfile* de parroquias afectadas por caída de ceniza del volcán Guagua Pichincha a nivel nacional.

RESULTADOS

Modelaciones y zonificación de la amenaza por caída de ceniza

En este estudio, los escenarios de impacto y zonificación (Figura 15) sirvieron para determinar la afectación a poblaciones, utilizando como insumo la cartografía base (poblados² y zona

Tabla 7. Valores obtenidos a nivel nacional (desagregación parroquial) en la aplicación de la media geométrica de cada una de las variables planteadas.

Impacto del volcán Guagua Pichincha				
Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
0.218	0.639	1.308	2.175	3.487
				6.534

² La cartografía base toma como referencia las categorías de poblados del INEC al 2010; considerando el número de habitantes:

- Categoría 5: Menos de 1 000
- Categoría 4: 1 001 a 10 000
- Categoría 3: 10 001 a 100 000
- Categoría 2: 100 001 a 500 000
- Categoría 1: Más de 500 001

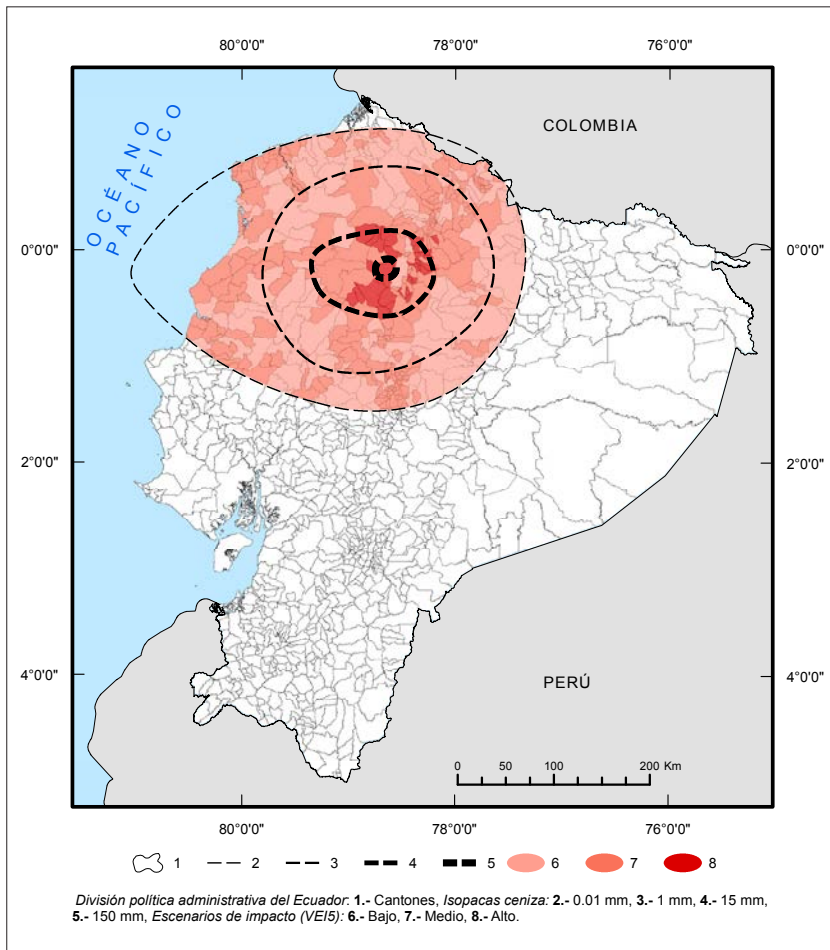


Figura 12. Impacto y zonificación de la amenaza volcánica volcán Guagua Pichincha VEI5.

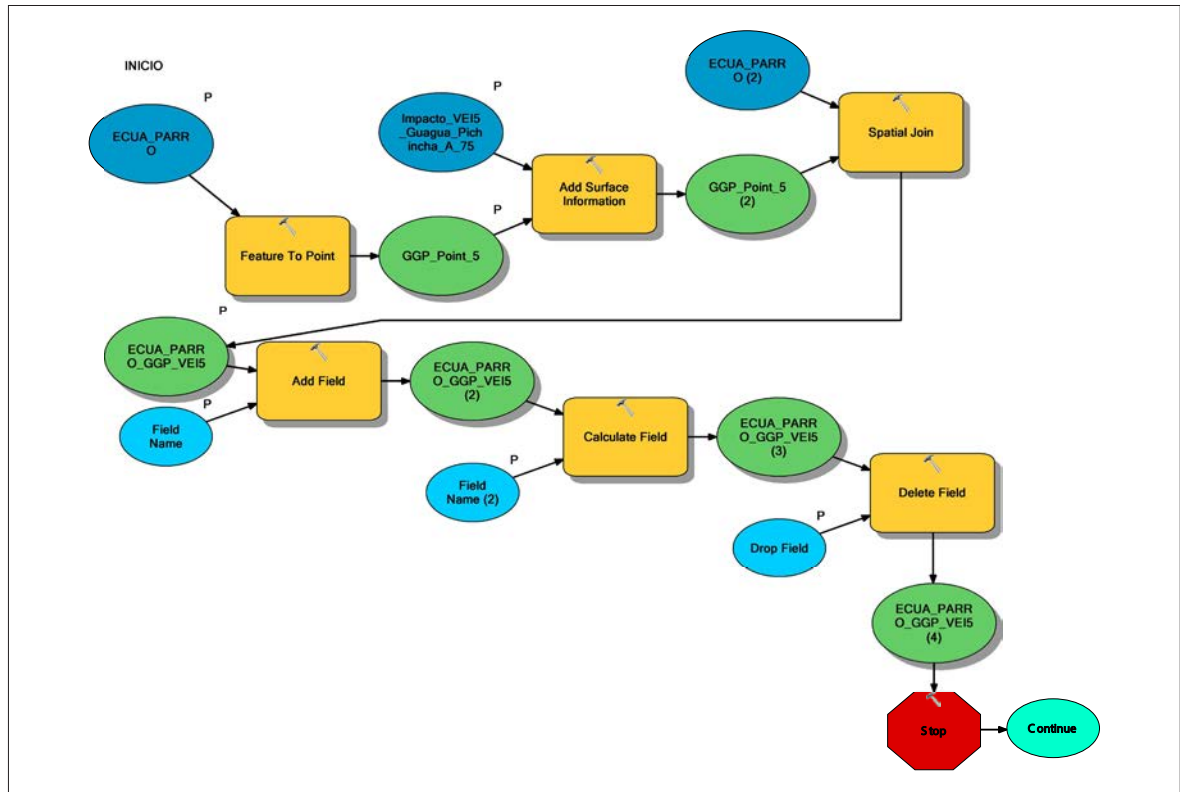


Figura 13. Proceso de vectorización del impacto y zonificación a nivel parroquial.

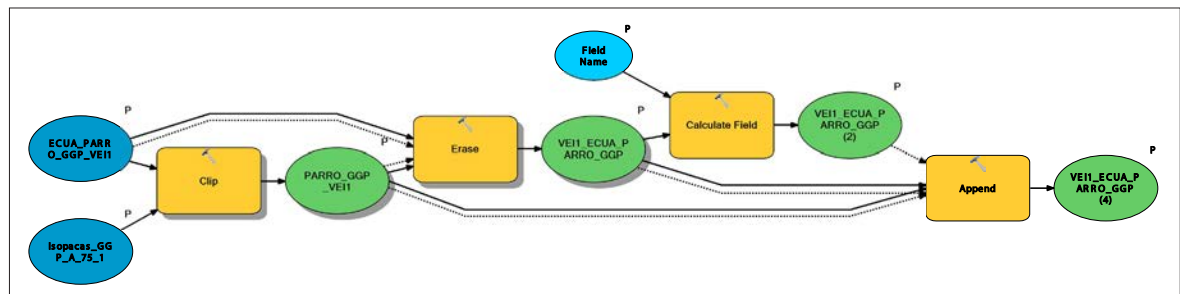


Figura 14. Herramientas de geoprocresamiento.

urbana³) del Instituto Geográfico Militar (IGM) (IGM, 2016), datos censales (INEC, 2010) e información del uso de suelo disponible del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGAP, 2014); con

el objetivo de cuantificar el número de población rural - urbana (impacto a la población) y el impacto al uso del suelo que se verían afectados por los diferentes escenarios planteados (VEI2, VEI3, VEI4, VEI4 y VEI5) al 75% de probabilidad de ocurrencia.

³ Representa la mancha urbana capturada por métodos fotogramétricos al año 2016 e integración de la toponimia en zonas catalogadas como urbanas (INEC, 2010).

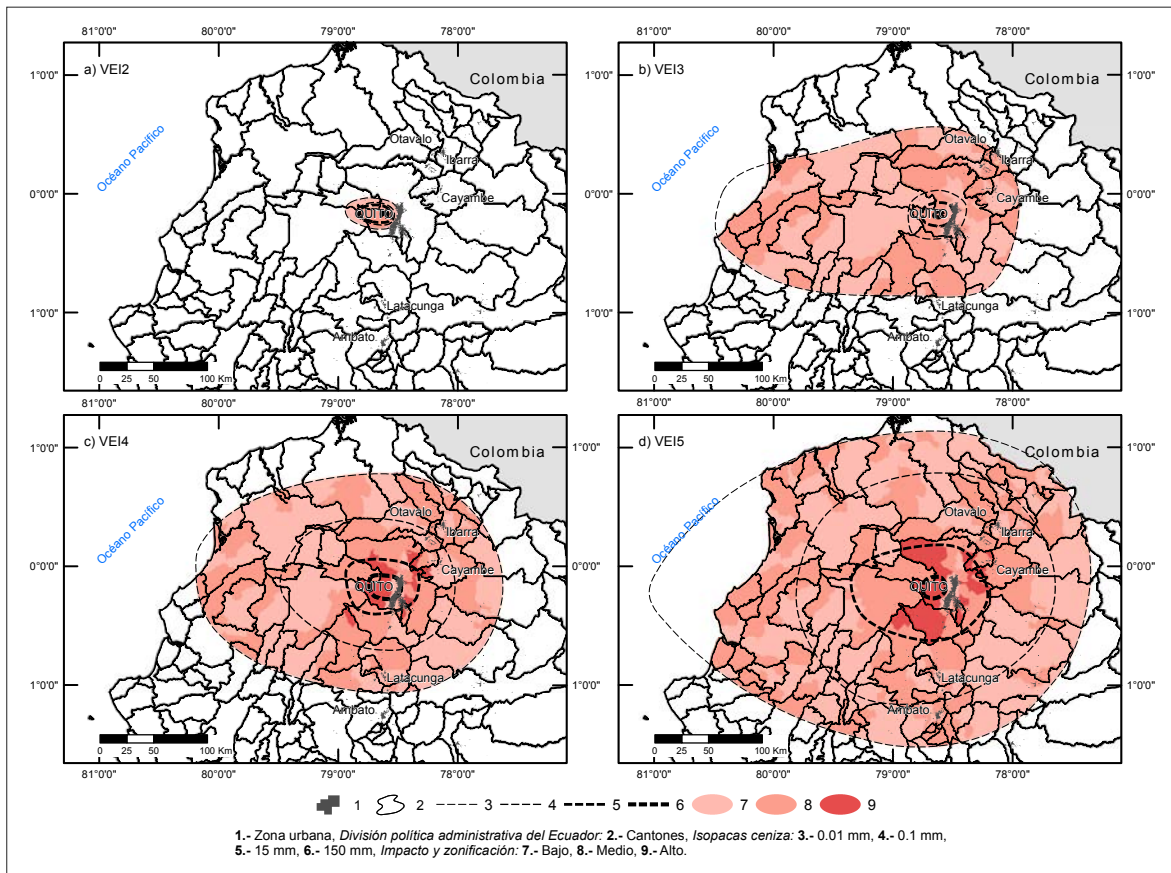


Figura 15. Impacto y zonificación de la amenaza volcánica del volcán Guagua Pichincha por parroquias y VEI planteados.

Impacto en la población

La última erupción del volcán Guagua Pichincha en 1999 registró múltiples consecuencias por caída de ceniza en las zonas afectadas (D’Ercole y Metzger, 2000); entre ellas se pueden mencionar evacuación de la población del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), y de la comunidad rural de Lloa, pérdidas económicas, cierre del aeropuerto y exportaciones desde la capital, entre otras. En este sentido, a medida que se incrementa el VEI; el número afectados lo haría también (Figuras 16 y 17).

Guagua Pichincha VEI2: los resultados del análisis espacial realizado, ante una erupción pequeña del volcán Guagua Pichincha (VEI2), la cual es frecuente dentro de un ciclo eruptivo cada año (IGEPN, 2003), al 75% de probabilidad de ocurrencia, revelan que un total de 57 poblados se

verían afectados por la caída de ceniza con espesores de 0.01 mm hasta 5 mm de acumulación. De estos posibles poblados afectados, 15 corresponden a cabeceras parroquiales y 11 son zonas urbanas. Considerando el impacto y su zonificación, en una parroquia el impacto sería medio y en siete parroquias el impacto registrado sería bajo; contabilizando 1 958 963 habitantes afectados, según los datos disponibles al 2010 (INEC, 2010).

Guagua Pichincha VEI3: una erupción moderada del volcán Guagua Pichincha (VEI3), la cual es frecuente entre uno y dos eventos dentro de un ciclo eruptivo cada 100-850 años (Robin *et al.*, 2008, 2010), con un 75% de probabilidad de ocurrencia, daría como resultado un total de 3 678 poblados y 318 zonas urbanas afectadas por caída de ceniza con espesores de 0.01 mm hasta 45 mm

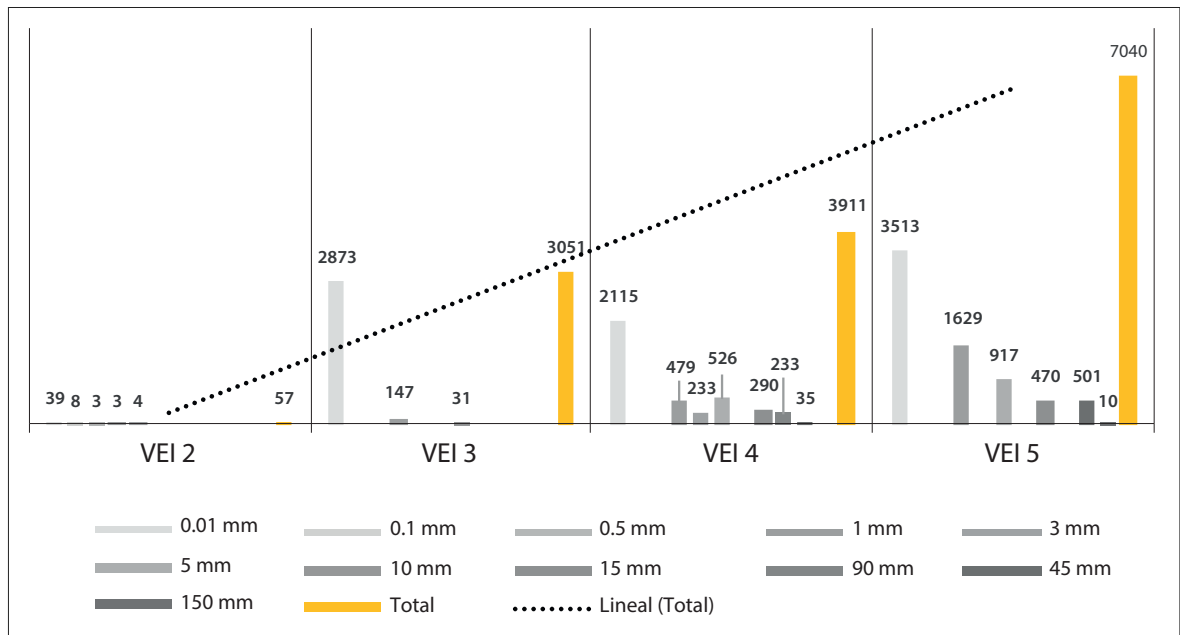


Figura 16. Número de posibles poblados afectados clasificados por espesor de ceniza y evento analizado del volcán Guagua Pichincha.

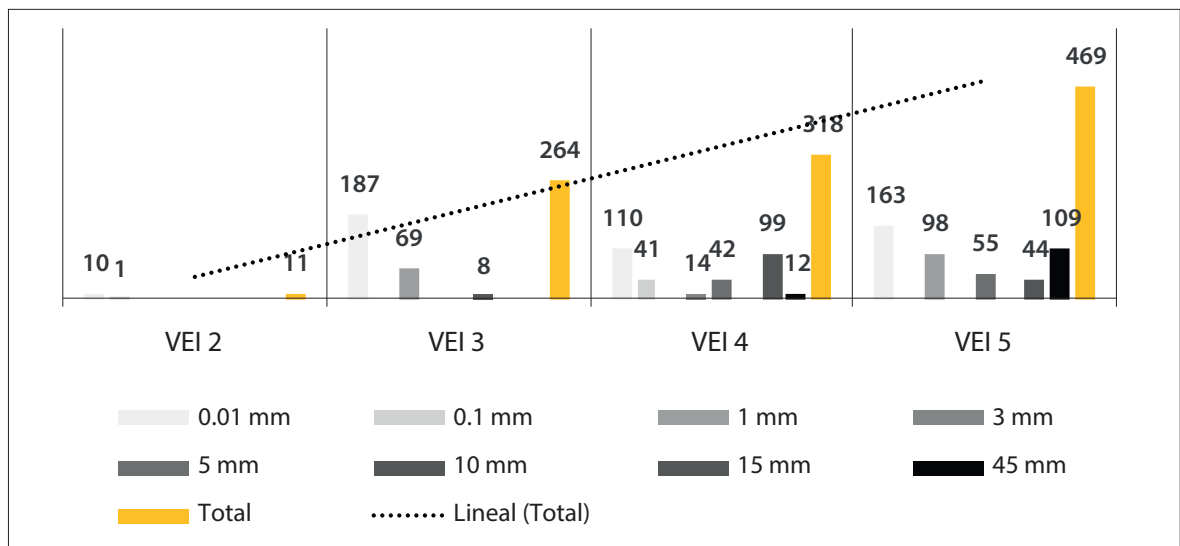


Figura 17. Número de posibles zonas urbanas afectadas clasificados por espesor de ceniza y evento analizado del volcán Guagua Pichincha.

de acumulación. De estos posibles poblados afectados, 50 corresponden a cabeceras parroquiales. Considerando el impacto y su localización territorial, 20 parroquias registrarían un impacto alto,

119 parroquias impacto medio y 78 parroquias tendrían un impacto bajo; dando un total de 4 520 750 habitantes afectados, considerando los datos disponibles (INEC, 2010).

Guagua Pichincha VEI4: un total de 3 051 posibles poblados serían los afectados ante la caída de ceniza de un evento grande del volcán Guagua Pichincha (VEI4), el cual es frecuente cada tres a cinco ciclos eruptivos registrados cada 300-4 250 años (Robin *et al.*, 2008, 2010). Los espesores esperados se encontrarían entre los 0.01 mm y 90 mm de acumulaciones, afectando a 56 cabeceras parroquiales y 264 zonas urbanas. Considerando el impacto y su localización territorial, en 98 parroquias se obtendría un impacto medio y en 66 el impacto sería bajo; registrando 4 240 559 habitantes directamente afectados, acorde a los datos disponibles (INEC, 2010).

Guagua Pichincha VEI5: el escenario más pesimista analizado del volcán Pichincha, corresponde a un evento grande a muy grande (VEI5), el cual es frecuente cada 25 ciclos eruptivos y ha sido registrado cada 2 500-21 250 años (Robin *et al.*, 2010). Al 75% de probabilidad de ocurrencia afectaría a un total de 7 040 poblados, 71 cabeceras parroquiales y 469 zonas urbanas. Esta afectación presentaría acumulaciones de ceniza de al menos 0.01 mm hasta espesores que alcanzarían los 150 mm en zonas proximales al volcán. Considerando el impacto y su localización territorial, 33 parroquias registrarían un impacto alto, 235 parroquias un impacto medio y 139 parroquias un impacto bajo; con un total de 6 470 176 habitantes afectados, tomando en cuenta los datos analizados (INEC, 2010).

Impacto en el uso del suelo

La caída de ceniza sobre zonas agrícolas se traduce en importantes pérdidas económicas para la población que vive de estas actividades; asimismo, la afectación en infraestructuras y el normal desenvolvimiento en las zonas urbanas, también representan un alto impacto para su economía dada la interrupción en la continuación de sus negocios. De allí la importancia de un análisis de los modelos de localización del impacto por caída de ceniza y su cruce con información de uso del suelo para la implementación de mecanismos de alerta temprana pertinentes y oportunos y planes de continuidad de negocio, según la zona y la actividad económica.

En ese marco, en la presente investigación se realizó un estudio del impacto por uso de suelo de

la caída de ceniza ante una erupción del Guagua Pichincha; considerando que espesores mayores o iguales a 1 mm de acumulación, tendrían afectaciones a la actividad productiva por pérdidas de cultivos (Jenkins *et al.*, 2015). Con este fin, se utilizó la información de uso de suelo generada por el MAGAP (2014); arrojando los siguientes resultados para cada uno de los escenarios planteados y resumidos en la Figura 18 y Tabla 8.

Guagua Pichincha VEI2: se determinó una superficie total de 114 605 hectáreas afectadas con espesores de 0.01 mm hasta 5 mm de acumulación ante un evento VEI2 del volcán Guagua Pichincha al 75% de probabilidad. De las cuales, el uso de suelo predominante es bosque nativo con una superficie de 67 511 ha que representan el 59% del total afectado. La superficie dedicada a agricultura y ganadería corresponde a 23 436 ha, lo que constituye el 20% de afectación.

Guagua Pichincha VEI3: la superficie que sería afectada por la caída de ceniza alcanza un total de 3 386 879 hectáreas con espesores que van desde 0.01 mm hasta 45 mm de acumulación ante un evento VEI3 del volcán Guagua Pichincha al 75% de probabilidad. De la superficie total afectada, el uso de suelo predominante es bosque nativo con 836 929 ha que representan el 25% del total afectado. La superficie dedicada a agricultura y ganadería que sería afectada alcanza las 1 101 848 ha, correspondiente al 33% del total.

Guagua Pichincha VEI4: ante un evento VEI4 del volcán Guagua Pichincha al 75% de probabilidad; 4 572 656 hectáreas se encontrarían afectadas por caída de ceniza con espesores de 0.01 mm hasta 90 mm de acumulación. De las cuales, el uso de suelo predominante es bosque nativo con una superficie de 1 559 642 ha que representan el 34% del total afectado. La superficie dedicada a agricultura y ganadería se encuentra en 1 130 406 ha; correspondiente al 25% del total.

Guagua Pichincha VEI5: la superficie total potencialmente afectada en este caso alcanzaría 7 905 440 de hectáreas afectadas con espesores que van desde 0.01 mm hasta los 150 mm ante un evento VEI5 del volcán Guagua Pichincha al 75% de probabilidad. De la superficie total afectada, la mayor parte corresponde a bosque nativo con una

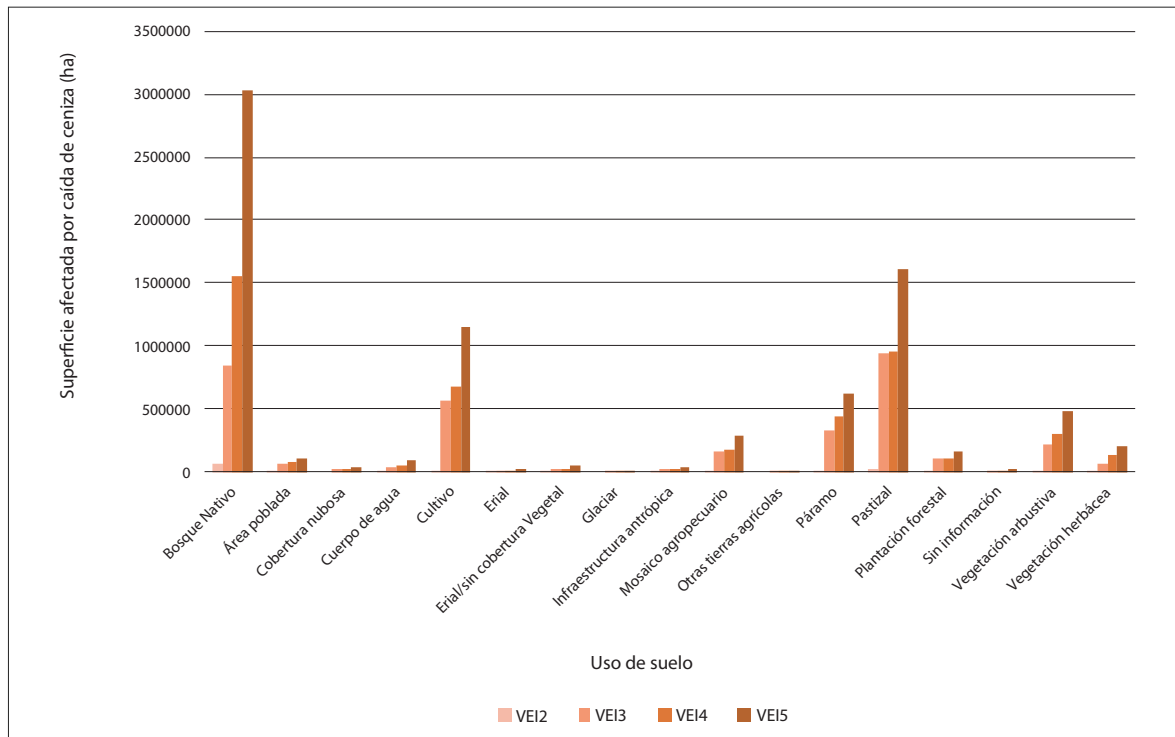


Figura 18. Superficie de uso de suelo posiblemente afectado clasificados por evento analizado del volcán Guagua Pichincha.

superficie de 3 023 863 ha que representan el 38% del total afectado. La superficie afectada dedicada a agricultura y ganadería alcanza las 1 899 861 ha, correspondiente al 24% del total.

DISCUSIÓN

Los resultados que arrojó el presente estudio son un importante insumo para el diseño de planes de prevención y mitigación en las zonas potencialmente afectadas por caída de ceniza del volcán analizado. Dicha información constituye la base para la priorización de parroquias y adopción de estrategias diferenciadas en función del nivel de afectación, número de población afectada, uso del suelo predominante y tipo de asentamiento (urbano o rural).

El estudio realizado para el volcán Guagua Pichincha muestra el impacto de la caída de ceniza en asentamientos aledaños, información útil para

la toma de decisiones en cuanto a la implementación de actividades de prevención y acciones de preparativos encaminadas a reducir el riesgo. En ese sentido, es factible realizar estudios similares o réplica para otros volcanes activos del Ecuador cercanos a zonas pobladas.

En la actualidad es fundamental que las poblaciones expuestas a peligros volcánicos cuenten con adecuados sistemas de alertas tempranas que permitan tomar decisiones pertinentes y oportunas en caso de una erupción del volcán. Esto es particularmente importante para países como el Ecuador, en donde si se consideran los criterios técnicos utilizados para la construcción del plan de acción temprana para caída de ceniza, desarrollado por CRE en colaboración con el IGEPN, se deja en evidencia que volcanes como el Guagua Pichincha constituyen un gran peligro para las poblaciones aledañas y con alto impacto a nivel nacional; razón por la cual, la importancia del IGEPN en el monitoreo continuo y emisión de

Tabla 8. Uso de suelo posiblemente afectados por evento analizado del volcán Guagua Pichincha.

<i>Uso - Cobertura</i>	Superficie afectada (ha) VEI2	Superficie afectada (ha) VEI3	Superficie afectada (ha) VEI4	Superficie afectada (ha) VEI5
<i>Bosque Nativo</i>	67 511	836 929	1 559 642	3 023 863
<i>Área Poblada</i>	5 111	69 088	76 693	105 082
<i>Cobertura Nubosa</i>	0	26 068	26 495	36 093
<i>Cuerpo de Agua</i>	232	33 584	44 754	86 484
<i>Cultivo</i>	259	559 838	680 564	1 152 298
<i>Erial</i>	1	4 672	10 964	20 962
<i>Erial/sin Cobertura Vegetal</i>	901	22 728	27 939	47 239
<i>Glaciar</i>	0	5 603	5 621	7 479
<i>Infraestructura Antrópica</i>	187	18 074	21 682	42 208
<i>Mosaico Agropecuario</i>	2 231	164 244	177 112	287 905
<i>Otras Tierras Agrícolas</i>	0	648	706	4 855
<i>Páramo</i>	8 586	322 701	439 832	618 596
<i>Pastizal</i>	21 205	936 956	952 587	1 607 102
<i>Plantación Forestal</i>	1 908	103 162	110 378	154 822
<i>Sin Información</i>	0	7 166	11 279	26 008
<i>Vegetación Arbustiva</i>	5 721	212 643	293 827	484 330
<i>Vegetación Herbácea</i>	752	62 776	132 579	200 115
<i>Total</i>	114 605	3 386 879	4 572 656	7 905 440

los informes especiales con el registro de la actividad del volcán.

La generación de mapas de riesgos y planes de acción temprana sobre la base de pronósticos y simulaciones deben incluirse en los Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de los territorios potencialmente afectados por amenazas

volcánicas. Esto permitiría institucionalizar la gestión de riesgos y brindar información eficaz para la toma de decisiones de autoridades públicas o de organismos internacionales que trabajan en este tema.

La calidad de los modelos y simulaciones que se obtengan dependerá en gran medida de la información disponible. Así, los análisis de vulnerabilidad

realizados en la presente investigación muestran como limitación la actualización de los datos demográficos, los cuales corresponden al año 2010 como única fuente de información disponible para el nivel de desagregación parroquial (INEC, 2010). De allí la importancia de la actualización periódica de las fuentes de información, con el fin de mejorar la calidad de los modelos que se obtengan.

La adopción de planes de prevención y mitigación basados en pronósticos reduce la discrecionalidad en la priorización de territorios potencialmente afectados por el peligro volcánico; por ello se recomienda profundizar en estas metodologías con el fin de generar modelos y simulaciones cada vez más exactos que permitan optimizar el uso de recursos y dirigir esfuerzos hacia los territorios más vulnerables.

CONCLUSIONES

Las herramientas computacionales y modelos matemáticos (ecuación de advección, difusión y sedimentación), constituyen insumos de mucha utilidad en experimentos teóricos como la simulación de dispersión de ceniza en la atmósfera.

Para la simulación de la dirección de los vientos en la atmósfera, la herramienta computacional de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, por su acrónimo en Inglés) ha demostrado su efectividad en conjunto con el código *Ash 3D*, el cual utiliza la base de datos de variables climáticas (vientos) registradas por el satélite Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por su acrónimo en Inglés), para obtener resultados de procesamiento y simulación de caída de ceniza en términos tolerables de tiempo.

En Ecuador, la amenaza de dispersión y caída de cenizas volcánicas es un fenómeno que merece ser ampliamente estudiado y monitoreado, considerando que, en zonas proximales a los volcanes, habita un importante número de población rural dedicada a las actividades agrícolas y ganaderas, atraídas por la fertilidad de los suelos, producto de las erupciones volcánicas ocurridas en el pasado.

El proceso de validación o calibración de resultados de las simulaciones realizadas en el presente trabajo concuerdan con los datos obtenidos en

campo por varios autores incluidos el IGEPN.

A nivel mundial, y en especial en Ecuador, los mapas de isopacas de dispersión y concentración de cenizas son un campo poco explorado y por lo tanto tema de investigación. En la práctica, la reubicación de las poblaciones aledañas a los volcanes es un proceso complejo en Ecuador y en países como Colombia (Contreras, 2006); sin embargo, la determinación de posibles escenarios de impacto y sus probabilidades de ocurrencia, como los mostrados en el presente estudio, constituyen un importante insumo para el diseño de planes de reasentamiento que permitan reducir las pérdidas tanto humanas como económicas, mediante la disminución de la vulnerabilidad de las poblaciones potencialmente afectadas.

A partir de los escenarios planteados por el IGEPN se han generado las isopacas para el volcán Guagua Pichincha en las cuales se evidencia que a medida que incrementa el VEI, el radio de afectación y acumulación de espesores lo hacen también. Considerando la jerarquización técnica de los volcanes en Ecuador realizada por el IGEPN, el volcán Guagua Pichincha alcanza los 12 puntos; ocupando de esta manera el tercer puesto. Se debe tomar en cuenta los resultados obtenidos en la toma de decisiones, analizando las poblaciones posiblemente afectadas.

Los escenarios planteados para el volcán Guagua Pichincha (VEI2, VEI3, VEI4 y VEI5), arrojan resultados en los cuales las isopacas van desde 0.01 hasta los 150 mm de acumulación en el escenario VEI5, incrementando significativamente el número de poblados, zonas urbanas y uso de suelo en cada uno. Si bien es cierto, en el escenario VEI2 los espesores máximos obtenidos a partir de las simulaciones corresponden a 5 mm, se deben considerar las evidencias de la erupción del año 1999, que registró pérdidas económicas para el país por el cierre del aeropuerto y locales comerciales en la ciudad de Quito, así como también en las exportaciones de flores. Para el escenario VEI2, una parroquia tendría un impacto medio y siete parroquias un impacto bajo, de las cuales corresponde a la capital de Ecuador y se tendría una experiencia cercana para cuantificar el impacto que el volcán Guagua Pichincha podría generar al país; con lo cual, se dimensiona el escenario VEI5 (grande-

muy grande) que afectaría con un impacto alto a 33 parroquias, 235 parroquias un impacto medio y 139 parroquias un impacto bajo, una afectación del 30% de la población de esta nación.

REFERENCIAS

- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J.-P., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., & Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Quito: Corporación Editora Nacional, CEN / Escuela Politécnica Nacional. Instituto Geofísico, IG / Institut de Recherche pour le Développement, IRD. <http://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/7198>
- Bernard, B., & Andrade, S. D. (2011). *Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental—Instituto Geofísico—EPN [Map]*. IRD-IGEPN. <https://www.igepn.edu.ec/publicaciones-para-la-comunidad/comunidad-espanol/14155-volcanes-cuaternarios-del-ecuador-continental>
- Bernard, B., Pavón, F., Samaniego, P., Encalada, M., Vásconez, F., & Andrade, D. (2017). *Actualización del mapa de peligros por caída piroclástica para el volcán Cayambe*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- Bernard, B., Santamaría, S., Encalada, M., & Telenchana, E. (2018). *Estudio técnico para la construcción de escenarios de impacto y territorialización de la amenaza ante dispersión y caída de ceniza en el Ecuador*. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.
- Carey, S. (1996). *Modeling of Tephra Fallout from Explosive Eruptions* (pp. 429-461). https://doi.org/10.1007/978-3-642-80087-0_13
- Carey, S., & Sigurdsson, H. (1982). Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B8), 7061-7072. <https://doi.org/10.1029/JB087iB08p07061>
- Contreras, D. (2006). Volcán Galeras Hábitat en Riesgo. *Revista de Arquitectura El Cable*, 5, 90 a 94-90 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>
- D'Ercole, R., & Metzger, P. (2000). La vulnérabilité de Quito (Equateur) face à l'activité du Guagua Pichincha. Les premières leçons d'une crise volcanique durable. *Cahiers Savoisiens de Géographie*, 1, 39-52.
- EIRD/ONU, S. I. de la E. I. para la R. de D., Naciones Unidas. (2004). *Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*. Naciones Unidas. <http://digitallibrary.un.org/record/583763>
- Eychenne, J., Le Pennec, J.-L., Troncoso, L., Gouhier, M., & Nedelec, J.-M. (2011). Causes and consequences of bimodal grain-size distribution of tephra fall deposited during the August 2006 Tungurahua eruption (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 74, 187-205. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0517-5>
- Gaunt, E., Bernard, B., Hidalgo, S., Proaño, A., Wright, H., Mothes, P., Criollo, E., & Kueppers, U. (2016). Juvenile magma recognition and eruptive dynamics inferred from the analysis of ash time series: The 2015 reawakening of Cotopaxi volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.10.013>
- Hall, M. L., Robin, C., Mothes, P., & Monzier, M. (1999). Tungurahua Volcano, Ecuador: Structure, eruptive history and hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 91, 1-21. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00047-5)
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2003). *Volcán Guagua Pichincha Resumen Anual de Actividad 2003*. <https://www.igepn.edu.ec/informes-volcanicos/guagua-pichincha/ggp-anales/11958-informe-anual-guagua-pichincha-2003/>
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2007). *Informe Especial del Volcán El Reventador N° 1—2007*. <https://www.igepn.edu.ec/reventador-informes/rev-especiales/rev-e-2007/2704-informe-especial-reventador-no1-2007/file>
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2015a). *Informe Especial del Volcán Cotopaxi N° 3—2015*. <https://www.igepn.edu.ec/informes-volcanicos/cotopaxi/coto-especiales/coto-e-2015/12990-informe-especial-cotopaxi-11-06-2015/file>
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2015b). *Informe Especial del Volcán Guagua Pichincha N° 6—2015*. <https://www.igepn.edu.ec/informes-volcanicos/guagua-pichincha/ggp-especiales/ggp-e-2015/13178-informe-especial-guagua-pichincha-no6>
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2020a). *Informe Especial del Volcán El Reventador N° 1—2020*. <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1823-informe-especial-del-volcan-el-reventador-n-1-2020>
- IGEPN, I. G. de la E. P. N. (2020b). *Informe Especial del Volcán Sangay N° 3—2020*. <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1818-informe-especial-del-volcan-sangay-n-3-2020>
- IGEPN, IGM, IRD. (2019). *Mapa de Peligros Volcánicos Potenciales del Volcán Guagua Pichincha 3ra. Edición [Map]*.
- IGM, I. G. M. (2016). *Cartografía básica oficial escala*

- 1: 5 000.
- IGM, I. G. M. (2019). *Ortofotografía 1: 5 000 del volcán Guagua Pichincha*.
- INEC, I. N. de E. y C. (2010). *VII Censo de Población y VI de Vivienda*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas/>
- INFORM, I. for risk M. (2020). *INFORM Risk Index 2021*. INFORM is a collaboration of the Inter-Agency Standing Committee Reference Group on Risk, Early Warning and Preparedness and the European Commission. The European Commission Joint Research Centre is the scientific lead of INFORM. <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index>
- Jenkins, S., 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* (pp. 173-221). <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>
- Le Pennec, J.-L., de Saulieu, G., Samaniego, P., & Gaillet, L.-S. (2013). A devastating plinian eruption at Tungurahua volcano reveals formative occupation at similar to 1100 CAL BC in Central Ecuador. *Radiocarbon*, 55, 1199-1214. <https://doi.org/10.1017/S0033822200048116>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2005). *Geographic Information Systems and Science* (Second). John Wiley & Sons, Ltd.
- MAGAP, M. de A., Ganadería, Acuacultura y Pesca. (2014). *Cobertura y uso de la Tierra de Ecuador Continental 1: 100 000*. <https://sni.gob.ec/mapa-cobertura-uso>
- 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>
- Mastin, L. G., Randall, M. J., Schwaiger, H. F., & Denlinger, R. P. (2013). *User's guide and reference to Ash3d—A three-dimensional model for Eulerian atmospheric tephra transport and deposition: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1122*. <https://pubs.usgs.gov/of/2013/1122/>
- Monzier, M., Samaniego, P., Robin, C., Beate, B., Cotten, J., Hall, M. L., Mothes, P., Andrade, D., Bourdon, E., Eissen, J.-P., Le Pennec, J.-L., Ruiz, G., & Toulkeridis, T. (2002). *Evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador)*.
- Parra, R., Bernard, B., Narváez, D. F., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.11.001>
- Pavón, F. (2017). *Análisis del impacto socioeconómico de los lahares y caída de ceniza ante una eventual erupción del volcán Cayambe en la actividad florícola en los cantones de Cayambe y Pedro Moncayo* [Maestría, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17457>
- 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/rcar.v5i98.144>
- Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Fornari, M., Mothes, P., & Plicht, J. (2010). New radiometric and petrological constraints on the evolution of the Pichincha volcanic complex (Ecuador). *Bulletin of Volcanology*, 72, 1109-1129. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0389-0>
- Robin, C., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., Mothes, P., & van der Plicht, J. (2008). Late Holocene phases of dome growth and Plinian activity at Guagua Pichincha volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(1), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.10.008>
- Santamaría, S., Bernard, B., & Hidalgo, S. (2017). *Análisis de la frecuencia de erupciones explosivas en el arco volcánico ecuatoriano durante el Holoceno*.
- Suzuki, T. (1983). *A theoretical model for dispersion of tephra*. In: Shimozuru D, Yokoyama I (eds) *Arc Volcanism: Physics and Tectonics. Proceedings of a IAVCEI Symposium, August–September 1981*. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB).
- The World Bank. (2012). *Disaster risk management in Latin America and the Caribbean Region: GFDRR country notes—Ecuador*. <https://documentos.bancomundial.org/es/publication/documents-reports/documentdetail>
- UNISDR, O. de las N. U. para la R. del R. de D. (2015). *Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres. Hacia el desarrollo sostenible: El futuro de la gestión del riesgo de desastres*. Naciones Unidas. https://www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/gar-pdf/GAR2015_SP.pdf
- Washington VAAC, V. A. A. (1999). *Guagua Pichincha Ecuador*. <https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/ARCH99/archive.html>