

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA CIVIL**



**ESTIMACIÓN DE LA CARGA VIVA POR CAÍDA DE CENIZA EN LAS ZONAS  
SUSCEPTIBLES DE LOS VOLCANES COTOPAXI, GUAGUA PICHINCHA,  
REVENTADOR Y TUNGURAHUA Y COMPARACIÓN CON LA NORMA  
ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (NEC-SE-CG)**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**AUTOR:**

**ANDRADE AYALA NICOLE ANDREA**

**TUTOR**

**ING. PABLO JOSÉ DAZA DONOSO**

**QUITO**

**Agosto, 2022**

**DEDICATORIA**

*A mi madre, Silvia Ayala, por brindarme su amor, paciencia, apoyo incondicional y porque siempre hizo lo imposible para que continúe este camino.*

*A mis hermanas, Melanie Andrade, Verónica Andrade y Adriana Andrade, por su cariño y motivación para ser mejor cada día.*

*A mi padre, Ramiro Andrade que seguramente me cuida desde el cielo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios por guiar cada uno de mis pasos para culminar esta gran etapa de mi vida y comenzar una nueva.*

*A todos los docentes que me acompañaron a lo largo de mi formación académica.*

*A mi director Ing. Daza Pablo, por toda la paciencia, tiempo y conocimiento para el desarrollo de esta investigación.*

*A mis profesores Ing. Castro Patricio y Ing. Lara Lauro, por enfocar de mejor manera mi estudio.*

*Y un agradecimiento especial al vulcanólogo italiano Tadini Alessandro, por la ayuda prestada y nuevos conocimientos adquiridos.*

## **RESUMEN**

El presente proyecto de titulación tiene como objetivo estimar la carga viva por caída de ceniza para cubiertas de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua con base a información de los mapas probabilísticos o semi probabilísticos de riesgo del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) y compararla con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-CG. Con la finalidad de determinar la cobertura geográfica de las zonas susceptibles a la caída de ceniza y pueda ser considerado en las distintas combinaciones de cargas en la NEC-SE-CG. La investigación se sustentó con buenas prácticas internacionales para determinar la carga viva en cubiertas por caída de ceniza volcánica.

## **ABSTRACT**

The objective of this degree project is to estimate the live load due to ash fall for roofs of the Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador and Tungurahua volcanoes based on information from the probabilistic or semi-probabilistic risk maps of the Geophysical Institute of the National Polytechnic School (IGEPN) and compare it with the Ecuadorian Construction Standard NEC-SE-CG. In order to determine the geographic coverage of the areas susceptible to ash fall and to be considered in the different load combinations in the NEC-SE-CG. The research was supported by international best practices to determine the live load in roofs due to volcanic ash fall.

## ÍNDICE

1	CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Justificación .....	9
1.2	Planteamiento del problema.....	10
1.3	Alcance .....	11
1.4	Hipótesis .....	11
1.5	Objetivos.....	12
1.5.1	Objetivo general .....	12
1.5.2	Objetivos específicos.....	12
2	CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	13
2.1	Gestión de riesgo de desastre.....	13
2.2	Amenazas volcánicas y sus efectos en la infraestructura.....	15
2.3	Cálculo de sobrecargas en cubiertas .....	22
3	CAPITULO III: IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR CAÍDA DE CENIZA .....	26
3.1	Volcanismo y distribución de ceniza volcánica en Ecuador.....	30
3.2	Descripción de los volcanes de estudio y sus patrones eruptivos .....	35
3.2.1	Volcán Cotopaxi .....	36
3.2.2	Volcán Guagua Pichincha .....	37
3.2.3	Volcán Reventador .....	39
3.2.4	Volcán Tungurahua .....	41
3.3	Mapas probabilísticos y semi probabilísticos por caída de ceniza de los volcanes de estudio.....	42
3.3.1	Mapa de amenaza volcánica .....	43
3.3.2	Mapa de Umbral de Ceniza .....	46
3.3.3	Mapa cantonal de amenaza volcánica .....	48
3.3.4	Mapa de Flujo de Vientos en el Ecuador.....	51
4	CAPITULO IV: PRÁCTICAS INTERNACIONALES PARA CONSIDERAR LA CAÍDA DE CENIZA EN LA ESTIMACIÓN DE SOBRECARGAS EN CUBIERTAS ...	53
4.1	Evaluación de riesgos .....	53
4.2	Cálculo de carga en cubiertas .....	53
4.3	Diseño y construcción ante amenaza de caída de ceniza .....	54
4.4	Estudio de caso .....	55

5	CAPITULO V: ESTIMACIÓN DE LA CARGA VIVA DE CENIZA EN CUBIERTAS .....	57
5.1	Fundamentación para la estimación de carga viva por caída de ceniza.....	57
5.2	Resultados de cálculo de sobrecarga.....	60
5.3	Análisis comparativo .....	63
6	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	67
6.1	Conclusiones .....	67
6.2	Recomendaciones .....	69
7	Bibliografía.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de la generación de caída de piroclastos / cenizas (IG-EPN, 2019). .....	16
Figura 2 Esquema de algunos impactos de caída de ceniza con la distancia desde un volcán. Esto asume una gran erupción explosiva con espesores significativos de caída de ceniza (G. Wilson, 2014) .....	18
Figura 3 Rosas de los vientos con altura sobre el nivel del mar para una selección de seis ciudades en áreas volcánicas activas. La dirección estándar de la brújula se utiliza con el norte en la parte superior y el este a la derecha de las rosas de los vientos (Loughlin C. Susan, 2015). .....	19
Figura 4 Distribución de cubiertas de viviendas en el área de Galeras que colapsan con diferentes espesores de depósitos de ceniza húmeda (Torres, 2001) (Roberto Armando, 2017).....	21
Figura 5 Perfil esquemático desde el occidente hacia el oriente de la zona de subducción en el Ecuador con sus respectivos arcos volcánicos. CO = Cordillera Occidental; VIA = Valle Interandino; CR = Cordillera Real; SA = Sub Andina (Toulkeridis, 2018).....	26
Figura 6 Cuadro de los distintos estilos eruptivos y la altura que puede alcanzar la columna eruptiva (Alberto Caselli, 2011). .....	28
Figura 7 Mapa con la distribución de volcanes activos del Ecuador (Toulkeridis, 2018) ...	29
Figura 8 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Cotopaxi. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021) .....	31
Figura 9 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Guagua Pichincha. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021). .....	32
Figura 10 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Reventador. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021).....	33
Figura 11 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Tungurahua. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021).....	34
Figura 12 Dirección principal y alcance predominante de las cenizas volcánicas (color gris claro) en Ecuador con base en la actividad de los volcanes Tungurahua (TUN), Reventador (REV), Sangay (SAN), Cotopaxi (COT) y Guagua Pichincha (PIC), con las 3 ciudades más pobladas Quito (Q), Guayaquil (G) y Cuenca (C). Los triángulos rojos son otros volcanes activos (Theofilos Toulkeridis, 2021). .....	35
Figura 13 Mapa del peligro potencial del volcán Cotopaxi (IGEPN, 2022) .....	37
Figura 14 Mapa del peligro potencial del volcán Guagua Pichincha (IGEPN, 2022).....	38
Figura 15 Mapa del peligro potencial del volcán Reventador (IGEPN, 2022). .....	40
Figura 16 Mapa del peligro potencial del volcán Tungurahua (IGEPN, 2022) .....	42
Figura 17 Mapa de amenaza volcánica. Autoría propia .....	43
Figura 18 Mapa de Umbral de Ceniza. Autoría propia .....	46
Figura 19 Mapa cantonal de amenaza volcánica. Autoría propia.....	48
Figura 20 Mapa de Flujo de Vientos en el Ecuador. Autoría propia.....	51

Figura 21 El tamaño de las partículas de ceniza generalmente disminuye con la distancia desde la ventilación (USGS, 2015).....	52
Figura 22. Valores de sobrecarga distribuida en $\text{kN/m}^2$ (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Cotopaxi .....	61
Figura 23. Valores de sobrecarga distribuida en $\text{kN/m}^2$ (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Guagua Pichincha.....	61
Figura 24. Valores de sobrecarga distribuida en $\text{kN/m}^2$ (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Reventador .....	62
Figura 25. Valores de sobrecarga distribuida en $\text{kN/m}^2$ (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Tungurahua.....	62
Figura 26. Valores de sobrecarga distribuida en $\text{kN/m}^2$ (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcanes de estudio .....	63
Figura 27. Casos de sobreestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por volcán. ....	64
Figura 28. Casos de sobreestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por región.....	65
Figura 29. Casos de sobreestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por escenario.....	66

## ÍNDICE DE TABLA

<b>Tabla 1</b> Factor de sobrecarga del elemento de soporte $K_{LL}$ (MIDUVI, 2014) .....	23
<b>Tabla 2.</b> Factores de reducción $R_1$ (MIDUVI, 2014).....	24
<b>Tabla 3.</b> Factores de reducción $R_2$ (MIDUVI, 2014).....	25
<b>Tabla 4.</b> El índice de explosividad volcánica (IEV) con volcanes típicos del Ecuador (y de Estados Unidos) donde sus erupciones se representan para cada escala (Toulkeridis, 2018). .....	27
<b>Tabla 5:</b> Distribución en el mapa de volcanes activos del Ecuador (Toulkeridis, 2018) ....	30
<b>Tabla 6.</b> Cantidad de ceniza por umbral y por volcán .....	47
<b>Tabla 7.</b> Cantones afectados por la ceniza proveniente de los volcanes en estudio .....	49
<b>Tabla 8.</b> Comparación de densidad y carga, 100 mm de nieve y 100 mm de ceniza volcánica (USGS, 2015). ....	54
<b>Tabla 9</b> Gravedad de caída de ceniza en función del espesor acumulado (USGS, 2015). ..	55
<b>Tabla 10.</b> Levantamiento de datos en cubiertas.....	56
<b>Tabla 11.</b> Cantidad de ceniza en los cantones de estudio del Ecuador .....	58
<b>Tabla 12</b> Cantidad de ceniza por umbral y por volcán con su respectivo VEI.....	67
<b>Tabla 13.</b> Características geográficas y cálculo de Lc-IGEPN y Lc-NEC ( $\text{kN/m}^2$ ) para cada volcán.....	73

# 1 CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1 *Justificación*

La actividad volcánica de la Sierra ecuatoriana ha dejado daños en la superficie en forma de depósitos de cenizas y pómez, flujos incandescentes y rocosos, es decir, transformando la morfología preexistente en menor o mayor impacto de este volcanismo explosivo, que se extiende desde Riobamba al sur hasta la frontera con Colombia al norte (Loughlin C. Susan, 2015).

El volcán Sangay, uno de los más activos del mundo, cuya primera erupción registrada data de 1628, está recientemente en erupción desde septiembre del 2020 y debido a la caída de ceniza hubo daños en 80 000 hectáreas, en un balance inicial. Las provincias más afectadas fueron Chimborazo, Bolívar, Los Ríos y Guayas. Allí existió daño en los tejados de viviendas y negocios, y los habitantes optaron por no abrir sus negocios, pues el espesor de la ceniza lo cubría todo (Ponce, 2020). En 2021 se reportaron varios daños. Por ejemplo, la caída de ceniza afectó a la ciudad de Guayaquil obligando a suspender operaciones en su aeropuerto internacional (El Comercio, 2021).

Por otro lado, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), únicamente considera la carga viva en cubiertas para prevenir caídas de ceniza en la región andina en elevaciones mayores a 1000 metros sobre el nivel del mar; sin embargo, en el caso antes citado se destaca que esta norma puede no ser suficientemente segura porque Guayaquil, que está al nivel del mar, no cumple los criterios considerados en la NEC para considerar medidas de protección contra la caída de ceniza.

La amenaza de dispersión y caída de cenizas volcánicas en el Ecuador es un fenómeno que amerita ser estudiado y monitoreado a profundidad. Este trabajo podría ser utilizado para actualizar o mejorar la NEC y así contribuir a la reducción de la vulnerabilidad de las edificaciones y, en consecuencia, el riesgo de desastres.

## 1.2 *Planteamiento del problema*

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), Cargas (No sísmicas), código NEC-SE-CG, existen escasos apartados correspondientes a la carga viva en las cubiertas para prevenir el colapso estructural por la caída de la ceniza. Únicamente establece lo siguiente: “En la región andina y sus estribaciones, desde una cota de 1000 m sobre el nivel del mar, no se permite la reducción de carga viva en cubiertas para prevenir caídas de granizo o ceniza” (MIDUVI, 2014). Sin embargo, el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias del Ecuador (SNGRE) en su atlas de amenazas naturales y antrópicas muestra que incluso zonas costeras son susceptibles a la caída de ceniza. Además, esta medida es arbitraria, no se basa en el conocimiento del riesgo y, por lo tanto, puede sobreestimar o subestimar la carga viva real. En consecuencia, una subestimación de la carga viva podría incrementar la vulnerabilidad de una edificación ante esta amenaza o, por el contrario, una sobreestimación generaría sobrecostos por sobredimensionamiento de la estructura.

En el país han ocurrido eventos volcánicos de gran magnitud en los que la caída de ceniza ha afectado a la población y ha causado estragos en la infraestructura. Ejemplos de esto son la erupción del volcán Guagua Pichincha en septiembre de 1575, en la que se estimó una acumulación de ceniza en Quito cercana a 30 centímetros; colapsaron muchos techos por el peso de las tefras. En diciembre de 1742 la erupción del volcán Cotopaxi destruyó puentes, obrajes y molinos, desaparecieron telares y obrajes; quedaron destruidas casas y haciendas (Egred, s.f.).

En el Ecuador no se cuenta con información probabilística de caída de ceniza para todos los volcanes. Sin embargo, sí se han desarrollado mapas probabilísticos y semi probabilísticos de la caída de ceniza de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Tungurahua y Reventador (Tadini A. , 2021). Esto quiere decir que es posible obtener una estimación más cierta de la carga viva en cubierta al menos para las zonas susceptibles de caída de ceniza de estos volcanes.

De forma general, es necesario conocer a los riesgos para que los códigos de construcción sean efectivos para reducir la vulnerabilidad ante una amenaza. Por ejemplo, la NEC cubre extensivamente el riesgo sísmico, una de las principales amenazas que afecta al país, pero apenas trata otros riesgos como la caída de ceniza, inundaciones u otros.

### ***1.3 Alcance***

El desarrollo de la estimación de carga viva por caída de ceniza para cubiertas se basará en información secundaria relativa a la amenaza del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), del Servicio de Gestión de Riesgos y Emergencia (SNGRE) e investigaciones científicas actuales. La cobertura geográfica del estudio será las zonas susceptibles de caída de ceniza de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua, que son los volcanes de los cuales existen mapas probabilísticos o semi probabilísticos de la amenaza. La comparación de la carga viva basada en la amenaza y la estimada con base a la NEC se realizará usando las combinaciones de carga ya determinadas en la NEC-SE-CG. No se realizará un análisis estructural, sino apenas una estimación de cargas vivas en cubierta, lo cual es independiente del material del que se vaya a construir una estructura.

### ***1.4 Hipótesis***

Es posible estimar un valor de carga viva por caída de ceniza para ser incluido en las distintas combinaciones de cargas en la NEC-SE-CG, para las zonas susceptibles de caída de ceniza de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua, con base en modelos probabilísticos o semi probabilísticos del riesgo que ya existen para esos volcanes.

## **1.5 *Objetivos***

### **1.5.1 *Objetivo general***

Estimar la carga viva por caída de ceniza en las zonas susceptibles de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua y compararla con la carga viva según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-CG).

### **1.5.2 *Objetivos específicos***

- Recabar información acerca de la amenaza por caída de ceniza en los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua.
- Identificar las zonas expuestas a la amenaza por caída de ceniza de dichos volcanes.
- Revisar buenas prácticas internacionales para determinar la carga viva en cubiertas por caída de ceniza volcánica.
- Realizar un análisis comparativo entre carga viva de ceniza volcánica estimada basada en mapas probabilísticos o semi probabilísticos de riesgo y la actual Norma Ecuatoriana de la Construcción.

## 2 CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 *Gestión de riesgo de desastre*

La evaluación y gestión de riesgos son esenciales para identificar y minimizar pérdidas asociadas a los desastres causados por peligros naturales. Para gestionar la evaluación del riesgo de peligros naturales se debe comprender evaluaciones de amenazas, exposición y vulnerabilidad (G. Wilson, 2014). El uso de una evaluación de riesgos cuantitativa proporciona estimaciones numéricas del mismo, lo que facilita las comparaciones entre los distintos peligros naturales y ubicación (G. Wilson, 2014). A su vez permite la priorización de estrategias de mitigación de riesgos.

Las estrategias de mitigación de riesgos se clasifican como (G. Wilson, 2014):

1. Planificación del uso de la tierra utilizada para disminuir la exposición de las personas, los edificios y la infraestructura a los peligros naturales.
2. Diseño de sistemas y componentes para mejorar la resiliencia si se exponen a peligros naturales
3. Planificación de contingencia (es decir, preparación y respuesta) utilizada para reducir los impactos de los peligros naturales y disminuir los tiempos de restauración y recuperación.

En este caso, el presente trabajo se enfocará en el segundo ítem, que es un desafío para la evaluación del riesgo volcánico debido a variedad de peligros asociados a éste. Los daños por peligros volcánicos de mayor preocupación son aquellos que afectan a infraestructura crítica, que se define como una red de sistemas y procesos creados por el hombre que funcionan en colaboración para producir y distribuir bienes y servicios esenciales (G. Wilson, 2014).

La primera estrategia depende de los procedimientos de evaluación de peligros que son similares para todos los peligros naturales. Para el análisis de amenazas, se utilizan modelos de peligros deterministas o probabilísticos, cuya elección está determinada por la disponibilidad de datos y el tipo de evaluación requerida. Los resultados de la evaluación de

peligros se presentan mediante mapas de peligros que indican la intensidad de estos (G. Wilson, 2014).

La segunda estrategia demanda de una evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras para (G. Wilson, 2014):

1. Identificar las estructuras que pueden beneficiarse de las medidas de mitigación.
2. Cuantificar el daño potencial luego de una evacuación exitosa.
3. Apoyar el desarrollo de pautas de construcción mejoradas para las estructuras.

En el caso particular de los peligros volcánicos, existen aspectos al evaluar la vulnerabilidad física que hacen que los enfoques cuantitativos sean difíciles de lograr. Estos son (Douglas., 2007) (G. Wilson, 2014):

1. Las erupciones volcánicas son eventos de riesgos múltiples, por ende, los sitios de infraestructura crítica pueden verse afectados. Esto puede generar una gama de diferentes mecanismos de impacto, lo que agrega complejidad.
2. Las amenazas volcánicas pueden causar distintos tipos de daños activo. Por ejemplo, la caída de tefras o ceniza puede dañar una cubierta de metal, ya que al aumentar la carga estática y provocar su colapso, se daña por corrosión y abrasión.
3. No existen códigos de construcción volcánica ampliamente desarrollados y adoptados; tampoco pautas de desempeño de construcción que regulen el diseño de las cubiertas en zonas de riesgo volcánico.
4. Las escalas de tiempo de las erupciones volcánicas pueden ser largas en comparación con los sismos.
5. Con el enfoque en las vulnerabilidades de pérdida de vidas, la medida mitigadora de evacuaciones obligatorias reduce la presión social para evaluar la fragilidad de las cubiertas.
6. Las erupciones volcánicas son eventos poco frecuentes, por lo que existe una falta de datos cuantitativos de impacto observacional. Las evaluaciones posteriores al suceso volcánico se enfocan en el peligro y no en los impactos que este puede ocasionar.

## 2.2 Amenazas volcánicas y sus efectos en la infraestructura

La creación mapas de amenazas de volcanes activos o potencialmente activos es un paso fundamental para reducir el riesgo para las comunidades e infraestructuras vulnerables.

Ecuador tiene 34 volcanes activos y potencialmente activos. El Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN) ha estado produciendo mapas de amenaza para los principales volcanes desde la década de 1980. Cuenta con mapas de amenaza para los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua. (IGEPN, 2022).

Estos mapas existentes informan acerca de las distintas amenazas volcánicas que incluyen (IGEPN, 2022):

- Caída de tefra (cenizas)
- Lahares (flujos de lodo volcánico)
- Flujos de lava, corrientes de densidad piroclástico y avalanchas de escombros (deslizamientos de tierra volcánicos).

La huella de amenaza de cada uno depende de lo siguiente:

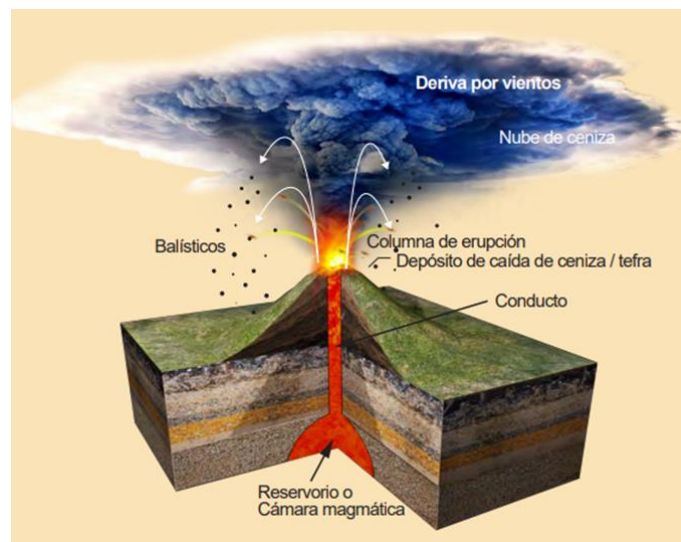
1. Si se encuentra en erupción en la atmósfera o presencia de lahares que fluyen por la superficie de la tierra alejándose del volcán.
2. Para cada escenario volcánico de amenaza, el tamaño (volumen) y la fuerza (tasa de descarga) del suceso también determinan la prolongación de la huella.

Otras amenazas, como la tefra o la ceniza, pueden tener consecuencias locales o regionales y, en casos extremos, globales. Durante la erupción del volcán la ceniza forma parte de una columna eruptiva que puede alcanzar varios kilómetros de altura. Las partículas más pequeñas son movilizadas por el viento y caen a mayor distancia de este, cubriendo grandes áreas cercanas al volcán (Samaniego. P, 2019).

Actualmente, se utiliza una amplia gama de métodos para generar mapas de amenazas para los numerosos volcanes del país, así como el reconocimiento de que ningún modelo puede adaptarse a todas las situaciones (IGEPN, 2022). La peligrosidad de este fenómeno es

proporcional a la cantidad de material emitido, la distancia al centro de emisión, la intensidad y duración de la erupción sumados a la dirección y velocidad del viento, que se traduce en la acumulación de ceniza en zonas habitadas pudiendo alcanzar varios centímetros (Patricia A. Mothes, 2019).

En general, las caídas de tefras causan la interrupción a las distintas infraestructuras, reduciendo su funcionalidad, mientras que los peligros de flujo más destructivos y que causan un daño permanente considerable son: corrientes de densidad piroclástica, flujos de lava y lahares (G. Wilson, 2014). La generación de algunos de estos peligros se ilustra en la siguiente figura:



*Figura 1 Esquema de la generación de caída de piroclastos / cenizas (IG-EPN, 2019).*

La caída de ceniza puede alcanzar lugares lejanos, cubriendo áreas extensas. La acumulación de gruesos espesores puede provocar el colapso de cubiertas de viviendas con mala calidad de construcción (IG-EPN, 2019). Debido a que en la mayoría de los casos no es posible reducir el peligro natural, en este caso de tipo volcánico ocasionado por la caída de ceniza, minimizar el riesgo implica reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Gemma Gómez Castillo, 2017).

Históricamente, el espesor de los depósitos de caída de ceniza ha sido el parámetro más común utilizado para evaluar la gravedad de ésta en un sitio (la intensidad del peligro) en relación con el daño, porque se considera fácil de medir en el campo o interpretar a partir de

relatos de testigos. La medida de intensidad de la carga de cenizas es la masa por unidad de área, típicamente medida en  $\text{kg/m}^2$ . Las mediciones de la carga se complican cuando por efecto de la compactación de las cenizas o la lluvia que sigue a la deposición se altera la capa de ceniza que originalmente se asienta de forma homogénea en una cubierta. Por ejemplo, un depósito de ceniza saturado de agua puede ser tener hasta el doble de la carga comparada una capa de ceniza seca del mismo espesor (Loughlin C. Susan, 2015)

En la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC), Cargas (No sísmicas), código NEC-SE-CG, la evaluación del efecto de la caída de ceniza es un campo poco desarrollado en comparación con, por ejemplo, la evaluación de los efectos sísmicos. Esto se debe en parte a que las grandes erupciones explosivas que impactan en áreas pobladas son relativamente raras y las zonas afectadas pueden ser peligrosas y, a veces, inaccesibles durante largos períodos, por lo que se han llevado a cabo pocos estudios cuantitativos completos de dicho riesgo.

De acuerdo con Loughlin (2015) en términos generales, se pueden esperar tres zonas principales de impacto de caída de ceniza, cada una de las cuales requiere un enfoque diferente para la gestión y planificación de una emergencia:

1. Destructiva y potencialmente mortal (Zona I)
2. Daños y/o perturbaciones (Zona II)
3. Ligeramente disruptivo y/o molesto (Zona III).

Estas zonas según Loughlin están ilustradas en la Figura 2, donde se resume los impactos físicos de las cenizas en activos sociales (Loughlin C. Susan, 2015).

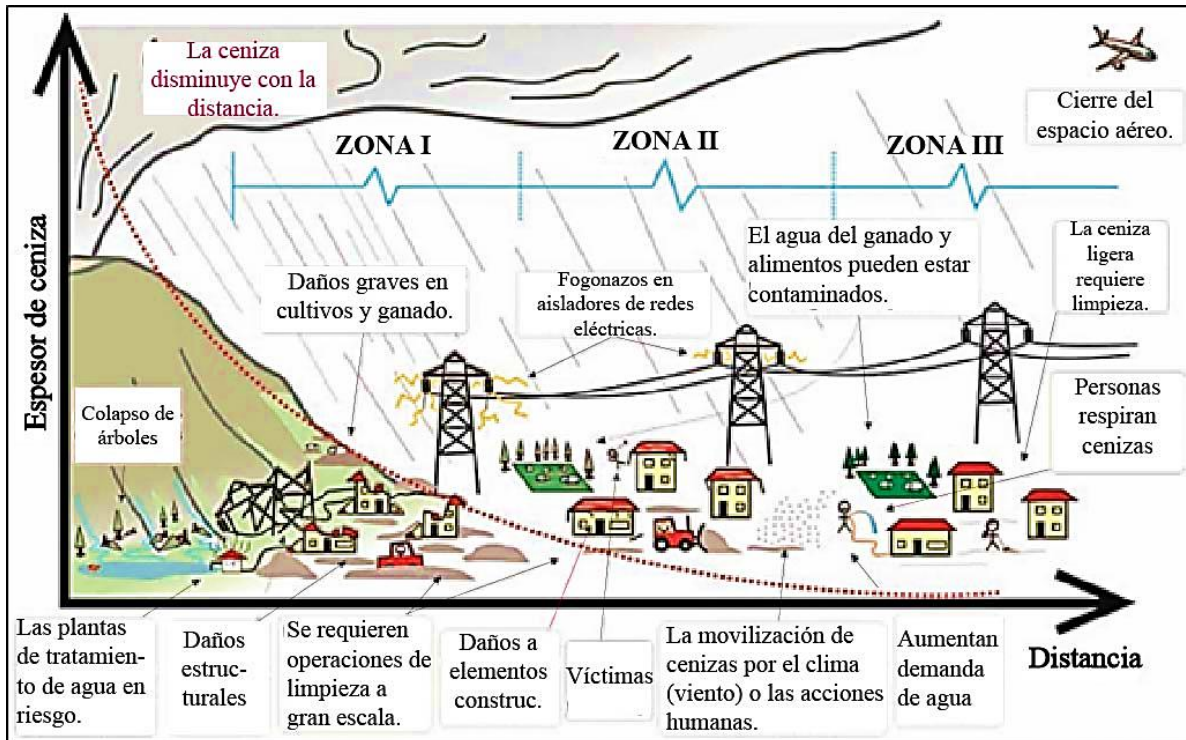


Figura 2 Esquema de algunos impactos de caída de ceniza con la distancia desde un volcán. Esto asume una gran erupción explosiva con espesores significativos de caída de ceniza (G. Wilson, 2014)

La caída de ceniza produce depósitos no consolidados que requieren remoción y limpieza para evitar interrupciones continuas y prolongadas. Algunos sectores del país que sufren de la caída de ceniza limpian los depósitos de sus cubiertas y equipos. Sin embargo, otros sectores cierran parcial o completamente para llevar a cabo la limpieza (G. Wilson, 2014).

La dispersión de cenizas depende del tamaño, la forma y la densidad de las partículas de ceniza, el estilo y la magnitud de la erupción, pero sobre todo depende de las condiciones del viento, las cuales deben estudiarse cuidadosamente. Loughlin (2015) estudió los patrones de viento en seis ciudades específicas en áreas volcánicas durante el período 2000 a 2009, definiendo rosas de los vientos, antigua forma de dividir el círculo para señalar los diferentes rumbos (norte, sur, este, oeste) (Fernández, s.f.), que muestran la frecuencia y rango de velocidades a distintas elevaciones (Loughlin C. Susan, 2015).

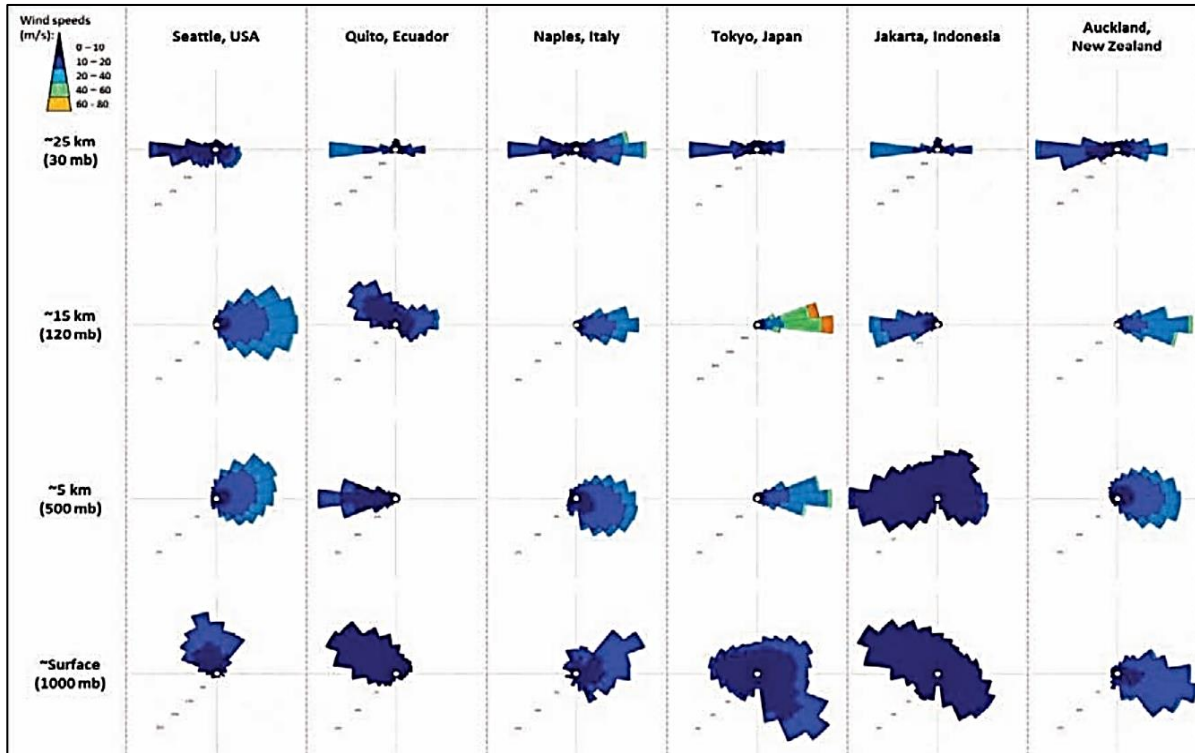


Figura 3 Rosas de los vientos con altura sobre el nivel del mar para una selección de seis ciudades en áreas volcánicas activas. La dirección estándar de la brújula se utiliza con el norte en la parte superior y el este a la derecha de las rosas de los vientos (Loughlin C. Susan, 2015).

Los efectos de las cargas de ceniza en los edificios varían de acuerdo con su diseño y construcción, incluida la pendiente de la cubierta, los materiales de construcción, la extensión, el sistema de soporte, la antigüedad y el mantenimiento de este. En general, las cubiertas planas son más susceptibles a daños y colapso que las cubiertas inclinadas (USGS, 2015). Las cubiertas planas presentan una inclinación menor de  $10^\circ$  del plano horizontal. El agua de la lluvia necesita como mínimo una pendiente de  $2^\circ$  y los vientos fuertes tienen a levantar las cubiertas por succión, por ello los techos planos son menos adecuados (Slutz, 1980).

Estudios realizados en otros países sobre edificaciones dañadas por la acumulación de ceniza, por ejemplo, durante las erupciones del Monte Pinatubo en Filipinas y Rabaul Caldera en Papúa Nueva Guinea, indican que las cubiertas con luces anchas son más vulnerables al colapso que los edificios con luces cortas típicas de casas pequeñas (USGS, 2015). Los edificios que han sido diseñados para soportar una gran carga de nieve invernal soportarán claramente acumulaciones de ceniza más espesas que los edificios que no están diseñados

para ningún tipo de carga o esfuerzo cortante (no aplicable al Ecuador dadas las condiciones climáticas del país). Además, la acumulación desigual de cenizas en las cubiertas puede provocar una carga desequilibrada en la misma, lo que aumenta el potencial de falla de la cubierta (USGS, 2015).

El depósito de ceniza puede causar daños estructurales, agrietamiento de paredes laterales, sobrecarga y colapso en edificaciones. Es vital tomar en cuenta que, dependiendo del tamaño de la ceniza y su nivel de hidratación, puede causar daños materiales y de equipos dentro de los edificios. Además, las superficies exteriores de viviendas y negocios, particularmente aquellas que son más vulnerables a las inundaciones, pueden sufrir como resultado de las cenizas contaminadas emitidas por los volcanes y que reaccionan con el agua (Roberto Armando, 2017).

Las cenizas volcánicas en las infraestructuras críticas permiten conocer la vulnerabilidad relativa de las infraestructuras en una serie de escenarios de caída de cenizas. Identificar y cuantificar estos impactos es un paso esencial para crear resiliencia en estos sistemas críticos (Roberto Armando, 2017).

CORPOSSO (2009) realizó un estudio de vulnerabilidad en cubiertas ante la presencia de cenizas volcánicas como parte de un estudio de vulnerabilidades físicas y funcionales por eventos volcánicos en la Zona del Volcán Galeras, estableciendo probabilidades de daño a diversas estructuras teniendo en cuenta los estudios de (López, 1997), (INGEOMINAS, 1998), (Spence, 2005) y (Zuccaro, 2008) (Roberto Armando, 2017) (CORPOSSO, 2009).

El estudio de INGEOMINAS (1998) se basó en una investigación de la vulnerabilidad presente en las viviendas en la zona de Galeras, basado en estudios analíticos de respuesta y estimaciones de resistencia de los elementos a las cargas solicitadas en función de los tipos de materiales, configuraciones geométricas, ensamblajes-conexiones, y la transferencia de cargas a diferentes elementos estructurales de la cubierta, estado y antigüedad, entre otros (Roberto Armando, 2017).

INGEOMINAS desarrollo un estudio sobre el colapso de cubiertas ante presencia de carga de ceniza, basado en investigaciones realizadas en la región de Galeras; un minucioso análisis demostró el colapso de cubiertas colapso para diversos escenarios de espesores de ceniza (Roberto Armando, 2017).

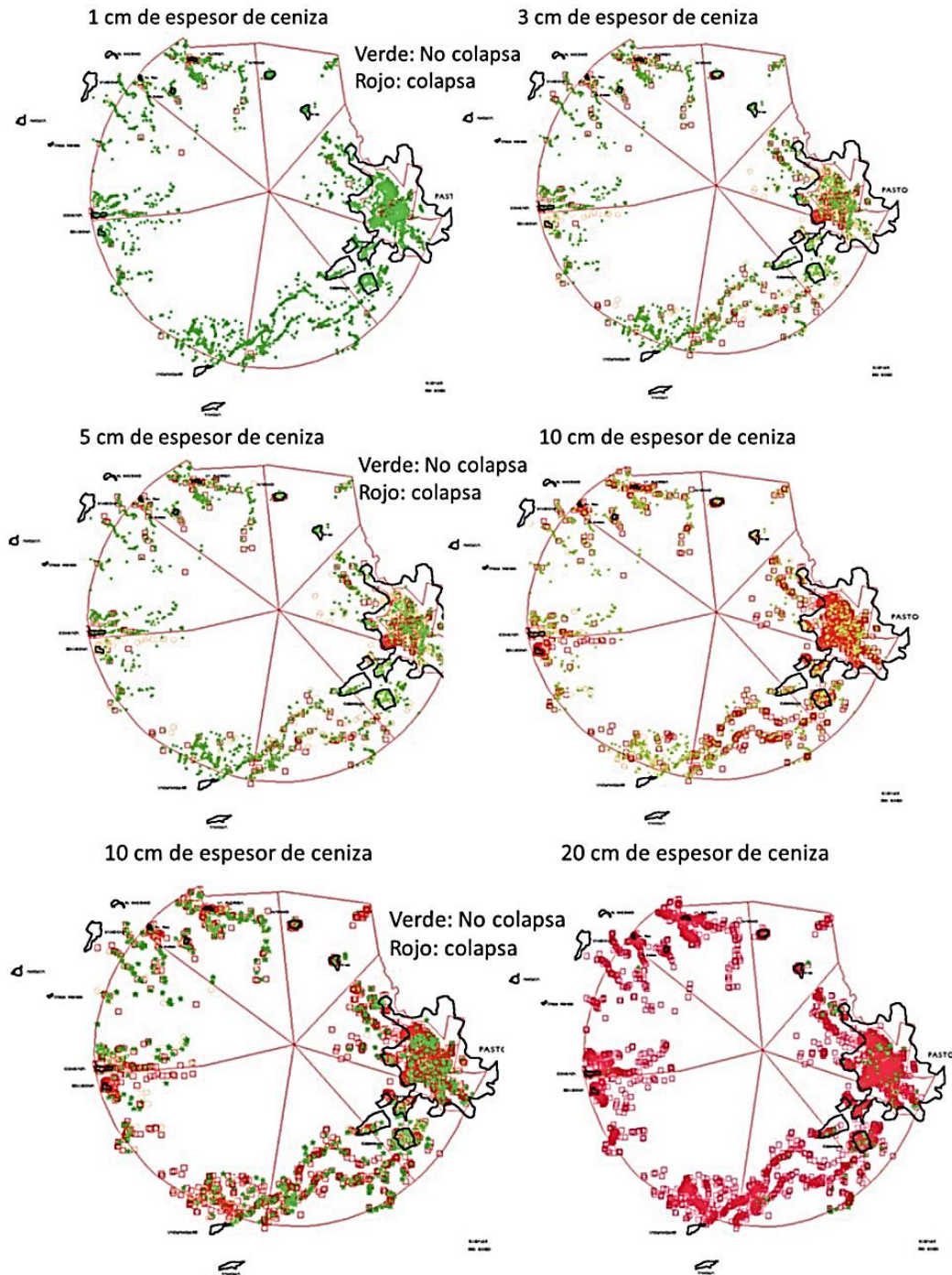


Figura 4 Distribución de cubiertas de viviendas en el área de Galeras que colapsan con diferentes espesores de depósitos de ceniza húmeda (Torres, 2001) (Roberto Armando, 2017)

Con base en este estudio CORPOSSO (2009) presentó como objetivo de investigación, brindar soporte técnico para el desarrollo de “escenarios de riesgos”, medidas de mitigación, ajuste, reorientación de procesos, planificación, desarrollo y gestión. Este estudio fue de naturaleza semicuantitativa, sin análisis numérico del comportamiento estructural de los elementos ensayados (CORPOSSO, 2009).

El impacto más significativo es la transmisión de cargas verticales a elementos con orientación horizontal o subhorizontal, como las cubiertas de diversas estructuras. El estado general de la estructura se refiere a la clasificación del estado de conservación, es decir, para un buen estado, no presenta grietas ni fisuras, y existe un buen acople entre los elementos estructurales y las uniones entre la cubierta y el resto de la estructura (Roberto Armando, 2017).

En general, la ausencia de mecanismos de limpieza o la falta de una pendiente adecuada son factores que aumentan la vulnerabilidad de las cubiertas. Sin embargo, el efecto de la pendiente sobre las estructuras puede ser ineficaz debido a la humedad de la ceniza en relación con el ángulo de reposo, la falta de una pendiente adecuada y correcto mecanismo de limpieza en las cubiertas livianas y pesada hace que estas presenten susceptibilidad de colapsar por la acumulación de ceniza (Roberto Armando, 2017).

### ***2.3 Cálculo de sobrecargas en cubiertas***

La Norma Ecuatoriana de la Construcción para cargas no sísmicas (NEC-SE-CG), clasifica las cargas como:

- Permanentes
- Variables
- Accidentales

Para las distintas combinaciones de cargas, se debe investigar cada estado límite de resistencia. Al referirse a una carga de ceniza, es considerada como carga variable, es decir una carga viva (sobrecargas de uso). Las sobrecargas que se emplean en el desarrollo del cálculo de una estructura dependen de la ocupación a la que está destinada la edificación; en este caso se presentan valores de carga uniforme en  $\text{kN/m}^2$  en la sección 3.3.2 del código NEC-SE-CG (MIDUVI, 2014).

Según la NEC-SE-CG, es posible reducir la sobrecarga en cubiertas, salvo ciertas excepciones, como se resume a continuación.

El código permite la reducción de cargas vivas en elementos estructurales, siempre que la sobrecarga no sea mayor que  $4.8 \text{ kN/m}^2$ . Las losas en una o dos direcciones se consideran elementos estructurales y podrían estar expuestas a la caída de ceniza en caso de ubicarse en la cubierta. Para tales elementos, la reducción de cargas vivas se estima con la siguiente expresión (MIDUVI, 2014):

$$L = L_o \left( 0.25 + \frac{4.57}{\sqrt{K_{LL}A_T}} \right), \text{ para } K_{LL}A_T \geq 35 \text{ m}^2$$

Donde:

- $L$  : Sobrecarga distribuida en  $\text{kN/m}^2$ , aplicada sobre el área tributaria del elemento de soporte.
- $L_o$  : Sobrecarga distribuida sin reducir, aplicada sobre el área tributaria del elemento de soporte, según la [Tabla 13](#)
- $K_{LL}$  : Factor de sobrecarga según el elemento de soporte ([Tabla 1](#))
- $A_T$  : Área tributaria en metros cuadrados

(MIDUVI, 2014)

**Tabla 1** Factor de sobrecarga del elemento de soporte  $K_{LL}$  (MIDUVI, 2014)

<b>Elemento</b>	<b><math>K_{LL}</math></b>
<b>Columnas</b>	
Columnas interiores	4
Columnas exteriores sin losas en volado	4
Columnas de borde con losas en volado	3
Columnas esquineras con losas en volado	2
Vigas de borde sin losas en volado	2
Vigas interiores	2
<b>Todos los demás elementos no identificados incluyendo:</b>	

---

Vigas de borde con losas en volado	
Vigas en volado	
Losas en una dirección*	1
Losas en dos direcciones*	
Elementos que no tengan mecanismos de transferencia de cortante normal a la dirección de la luz	

---

\*Estos son elementos estructurales potencialmente expuestos a caída de ceniza.

L no será menor que (MIDUVI, 2014):

- $0.5L_o$  para elementos que soportan un solo piso.
- $0.4L_o$  para elementos que soportan dos pisos o más.

Además, el código permite reducir la sobrecarga de cubierta según este cálculo (MIDUVI, 2014):

$$L_r = L_o R_1 R_2$$

Donde:

- $L_r$  : Sobrecarga reducida de cubierta en proyección horizontal, en  $\text{kN/m}^2$ ;  $0.60 \leq L_r \leq 1$
- $L_o$  : Sobrecarga no reducida de cubierta en proyección horizontal, en  $\text{kN/m}^2$ .
- $R_1$  y  $R_2$  : Factores de reducción de acuerdo con las siguientes tablas.

**Tabla 2.** Factores de reducción  $R_1$  (MIDUVI, 2014).

Condición	$R_1$
$A_T \leq 18.00 \text{ m}^2$	1
$18.00 \text{ m}^2 < A_T < 56.00 \text{ m}^2$	$1.2 - 0.011 A_T$
$A_T \geq 56.00 \text{ m}^2$	0.6

Donde:

- $A_T$  : Área tributaria en metros cuadrados soportada por el elemento

**Tabla 3.** Factores de reducción  $R_2$  (MIDUVI, 2014)

<b>Condición</b>	<b><math>R_2</math></b>
<b><math>F \leq 33.33\%</math></b>	<b>1</b>
<b><math>33.33\% &lt; F &lt; 100\%</math></b>	<b><math>1.2 - 0.006F</math></b>
<b><math>F \geq 100\%</math></b>	<b>0.6</b>

Donde:

- **F:** Pendiente de la cubierta (%).  
(MIDUVI, 2014)

La reducción de sobrecarga en cubiertas está delimitada en la región andina y sus estribaciones, sobre la cota de 1000 metros sobre el nivel del mar (msnm), donde no se permite la reducción de carga viva en cubiertas para prevenir caída de ceniza o granizo (MIDUVI, 2014).

### 3 CAPITULO III: IDENTIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR CAÍDA DE CENIZA

La República del Ecuador es un país ubicado en la región noroccidental de América del Sur, compuesto por veinticuatro provincias. Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico. La presencia, del gran eje montañoso meridiano que constituye la Cordillera de los Andes, dio origen a la separación del país en tres regiones (Winckell, 1997).

Ecuador cuenta con 20 volcanes continentales activos, con un índice de explosividad volcánica (VEI) entre 2 y 7 (Toulkeridis, 2018). A continuación, se presenta un perfil esquemático desde el occidente hacia el oriente de la zona de subducción en el Ecuador de acuerdo con los volcanes

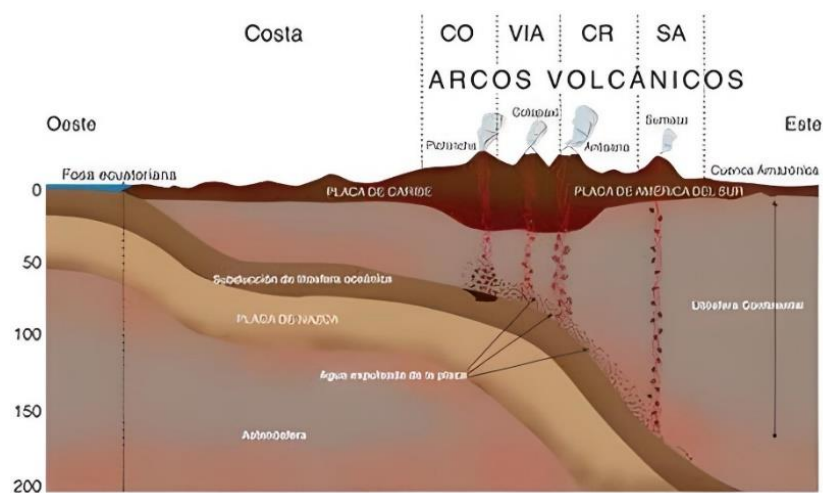


Figura 5 Perfil esquemático desde el occidente hacia el oriente de la zona de subducción en el Ecuador con sus respectivos arcos volcánicos. CO = Cordillera Occidental; VIA = Valle Interandino; CR = Cordillera Real; SA = Sub Andina (Toulkeridis, 2018).

**Tabla 4.** El índice de explosividad volcánica (IEV) con volcanes típicos del Ecuador (y de Estados Unidos) donde sus erupciones se representan para cada escala (Toulkeridis, 2018).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9*	
<b>Descripción</b>	No explosivo	Gentil	Explosivo	Severo	Cataclísmica	Paroxismal	Colosal	Super colosal	Mega colosal	Ultra colosal	
<b>Volumen</b>	1x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	1x10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	1x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	1x10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	1x10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	1 km <sup>3</sup>	10 km <sup>3</sup>	100 km <sup>3</sup>	1000 km <sup>3</sup>	10 000 km <sup>3</sup>	
<b>Altura de la columna de erupción</b>	< 100 m	100 m - 1 km	1 - 5 km	3 - 5 km	10 - 25 km	> 25 km	> 25 km	> 25 km	> 25 km	> 25 km	
<b>Tipo de erupción</b>		Estromboliana		Pliniana							
	Hawaiana		Vulcaniana			Ultra Pliniana					
<b>Duración</b>	< 1 hora			1 - 6 horas		> 12 horas					
				6 - 12 horas							
<b>Periodicidad</b>	Diaria	Diaria	Semanal	Anual	c/10 años	c/100 años	c/100 años	c/1000 años	c/1000 años		
<b>Ejemplo</b>	Cerro Azul	Sangay	Pichincha	Tungurahua	Reventador	Cotopaxi	Pululahua	Chalupas	Yellowstone U.S.A	Fish Canyon	

**Nota:** El IEV (*Índice de Explosividad Volcánica VEI*) es una escala logarítmica (de 0 a 10) avalada y empleada, basada en el volumen, duración y altura del material expulsado durante la fase eruptiva. Una cantidad elevada de IEV indica un potencial más destructivo en una erupción volcánica que un número inferior de IEV. En síntesis, se supone que los volcanes con índices superiores a 3 producirán víctimas mortales (Toulkeridis, 2018).

Los tipos de erupción son:

- **Estromboliana:** Son pequeñas explosiones. La columna eruptiva alcanza alturas que varían entre 1 a 15 km. Se caracterizan por tener explosiones rítmicas, separadas por periodos de menos de un segundo hasta varias horas (INGEMMET, 2022).
- **Pliniana:** Son las más violentas, el magma es de composición acida y posee alto contenido de gases. Las columnas eruptivas alcanzan alturas mayores a los 30 km. Durante las erupciones se generan voluminosas caídas de lapilli, pómez y ceniza (INGEMMET, 2022).
- **Hawaiana:** Se distingue por la emisión de lavas basálticas o andesíticas básicas con escaso contenido gaseoso. Estas lavas no son muy viscosas, tienen mucho movimiento y pueden cubrir fácilmente cientos de kilómetros (INGEMMET, 2022).
- **Vulcaniana:** Son más potentes que las erupciones estrombolianas, porque el magma es de composición intermedia y contiene una mayor cantidad de gases. La columna eruptiva alcanza alturas de 3 a 20 kilómetros. Erupciones explosivas que producen ceniza, estructuras balísticas y quizás escoria o pómez (INGEMMET, 2022).
- **Ultra Pliniana:** Son definidas como columnas de ceniza sobre 25 km de alto y un volumen de material expulsado entre 10 km<sup>3</sup> y 1000 km<sup>3</sup> (University, 2012).

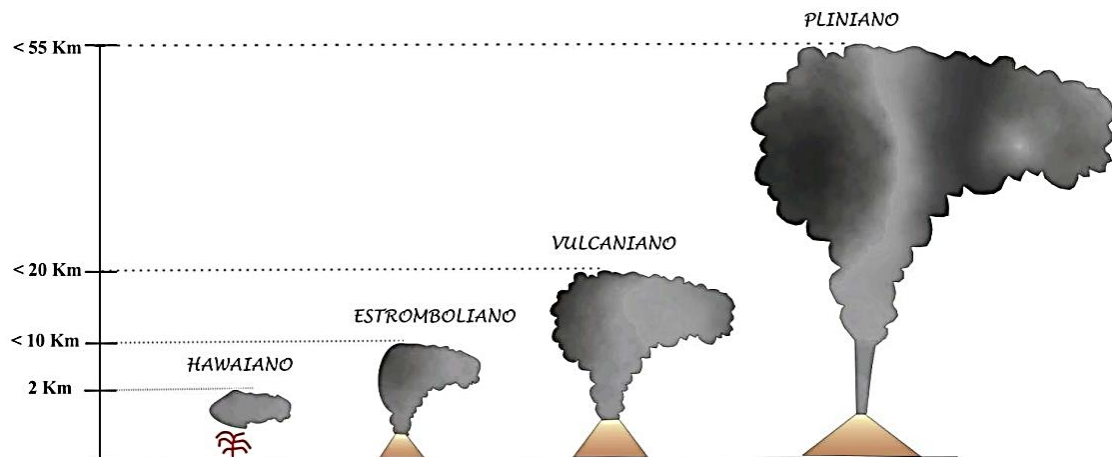


Figura 6 Cuadro de los distintos estilos eruptivos y la altura que puede alcanzar la columna eruptiva (Alberto Caselli, 2011).

En el Ecuador, hasta el presente se han contabilizado 27 volcanes potencialmente activos.

Los volcanes continentales más importantes son:

1. Cayambe
2. Reventador
3. Guagua Pichincha
4. Cotopaxi
5. Tungurahua
6. Sangay
7. Potrerillos- Chacana

De estos volcanes se tienen registros históricos, es decir, desde el año 1532 (IGEPN, 2022).

El método para determinar el grado de influencia potencial de 19 volcanes activos se estableció mediante estudios de campo, laboratorio y gabinete de las Fuerzas Armadas en materia de prevención y gestión de riesgos. Se han realizado varios estudios utilizando este conjunto de datos para determinar la duración de las nubes de ceniza y el volumen en función de los IEV conocidos (Toulkeridis, 2018). “Dentro de las diferentes amenazas volcánicas como explosiones, gases, flujos piroclásticos entre otros, la ceniza es una de las más subestimadas” (Toulkeridis, 2018).

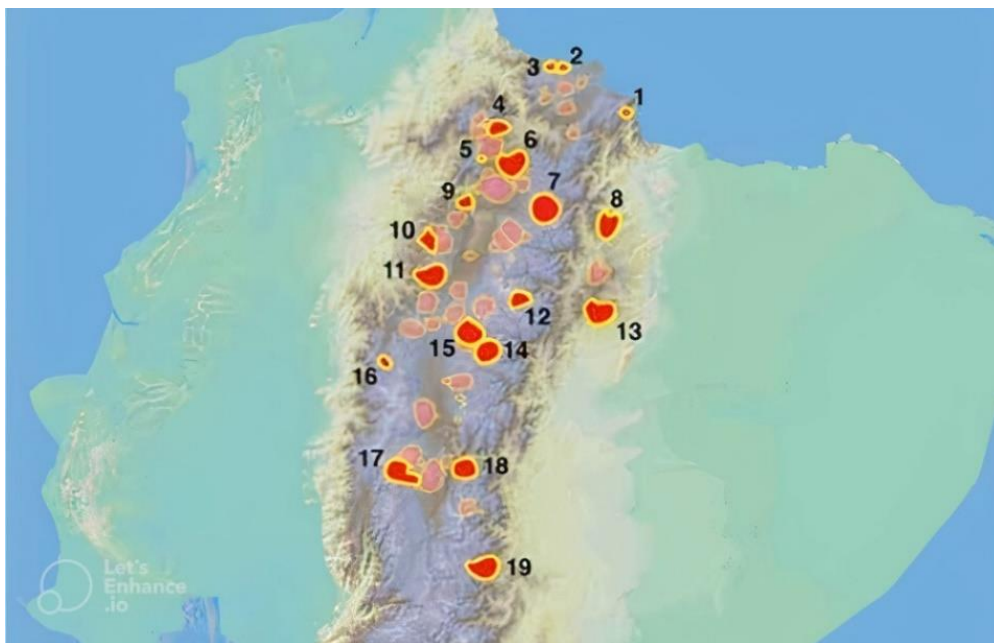


Figura 7 Mapa con la distribución de volcanes activos del Ecuador (Toulkeridis, 2018)

**Tabla 5:** *Distribución en el mapa de volcanes activos del Ecuador (Toulkeridis, 2018)*

<b>Distribución de volcanes activos del Ecuador</b>	
1:	Soche
2:	Chiles
3:	Cerro Negro de Mayasquer
4:	Chachimbiro,
5:	Cuicocha
6:	Imbabura
7:	Cayambe
8:	Reventador
9:	Pululahua
10:	Complejo volcánico de Pichincha
11:	Niñahuilca
12:	Complejo volcánico de Antisana
13:	Sumaco
14:	Chalupas
15:	Cotopaxi
16:	Quilotoa
17:	Chimborazo
18:	Tungurahua
19:	Sangay

Mediante esta investigación se escogieron los volcanes de estudio, los cuales son, volcán Cotopaxi, volcán Guagua Pichincha, volcán Reventador y volcán Tungurahua. Debido a que son volcanes activos, sus índices de explosividad volcánica y cantidad de ceniza son considerables y se encuentran en constante monitoreo por parte del IGEPN.

### ***3.1 Volcanismo y distribución de ceniza volcánica en Ecuador***

Los volcanes en erupción varias ocasiones han sido Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua. El volcán Cotopaxi presento un estado más activo en 2015. El volcán Guagua Pichincha ha estado ocasionalmente en erupción entre 1999, 2001 y 2009. El volcán Reventador entró en erupción en 1976, 2002 y continuo con interrupciones importantes hasta 2021, mientras que el volcán Tungurahua entró en erupción después de 80 años de tranquilidad en 1999 y permaneció con erupciones menores hasta 2016 (Theofilos Toulkeridis, 2021).

Desde septiembre de 1999, estas fases eruptivas han sido monitoreadas desde el espacio en imágenes satelitales de la División de Servicios Satelitales de Servicio Nacional de

Información, Datos y Satélites Ambientales (NESDIS). En estos períodos los volcanes emitieron ceniza volcánica de grano fino en gran cantidad y alcance. Theofilos Toulkeridis (2021) con los datos disponibles, ha rastreado la distribución de la ceniza volcánica en las áreas que experimentan consecuencias de este peligro volcánico en el Ecuador. A continuación, se presenta la distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa de los volcanes (Theofilos Toulkeridis, 2021).

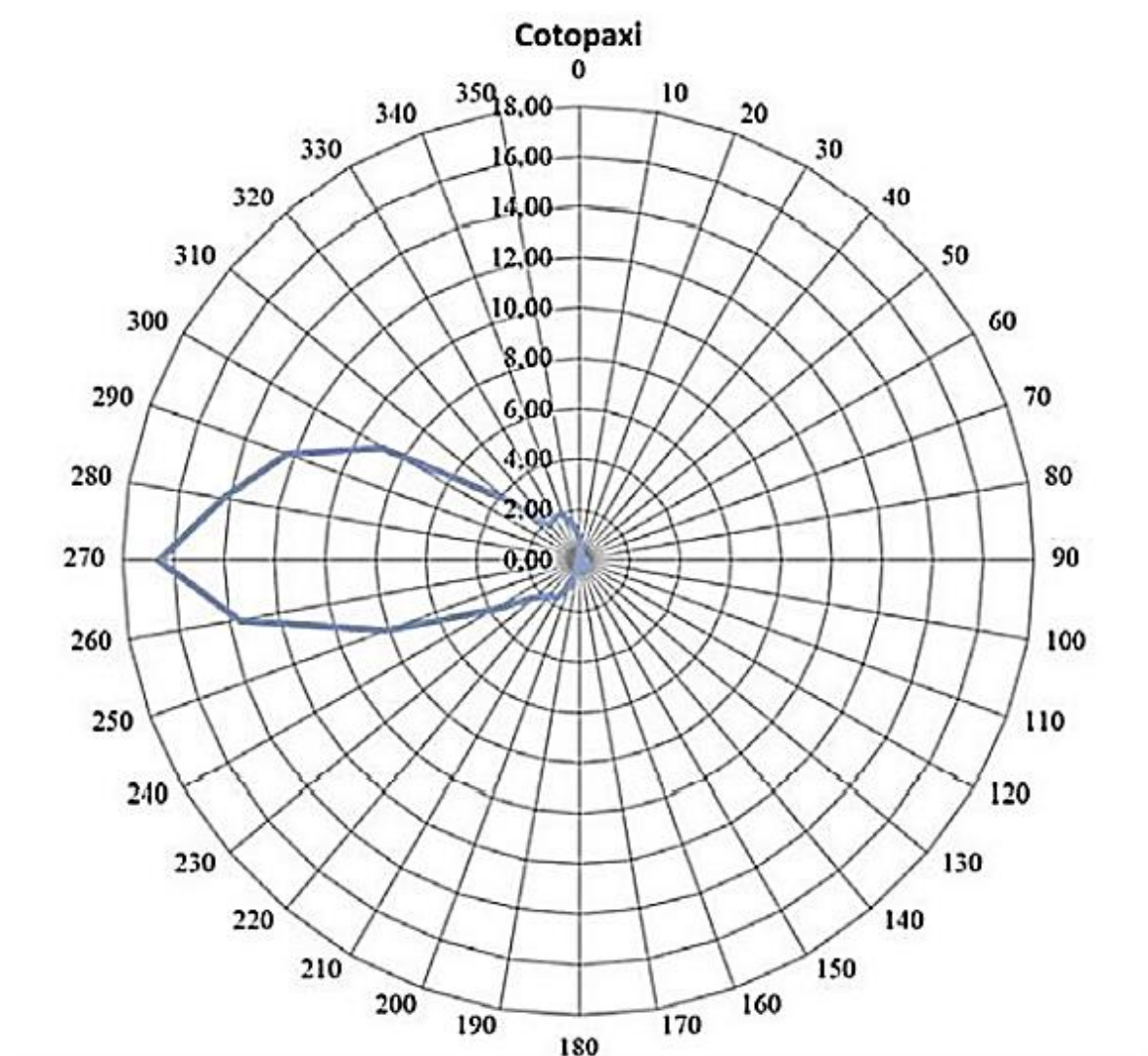


Figura 8 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Cotopaxi. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021)

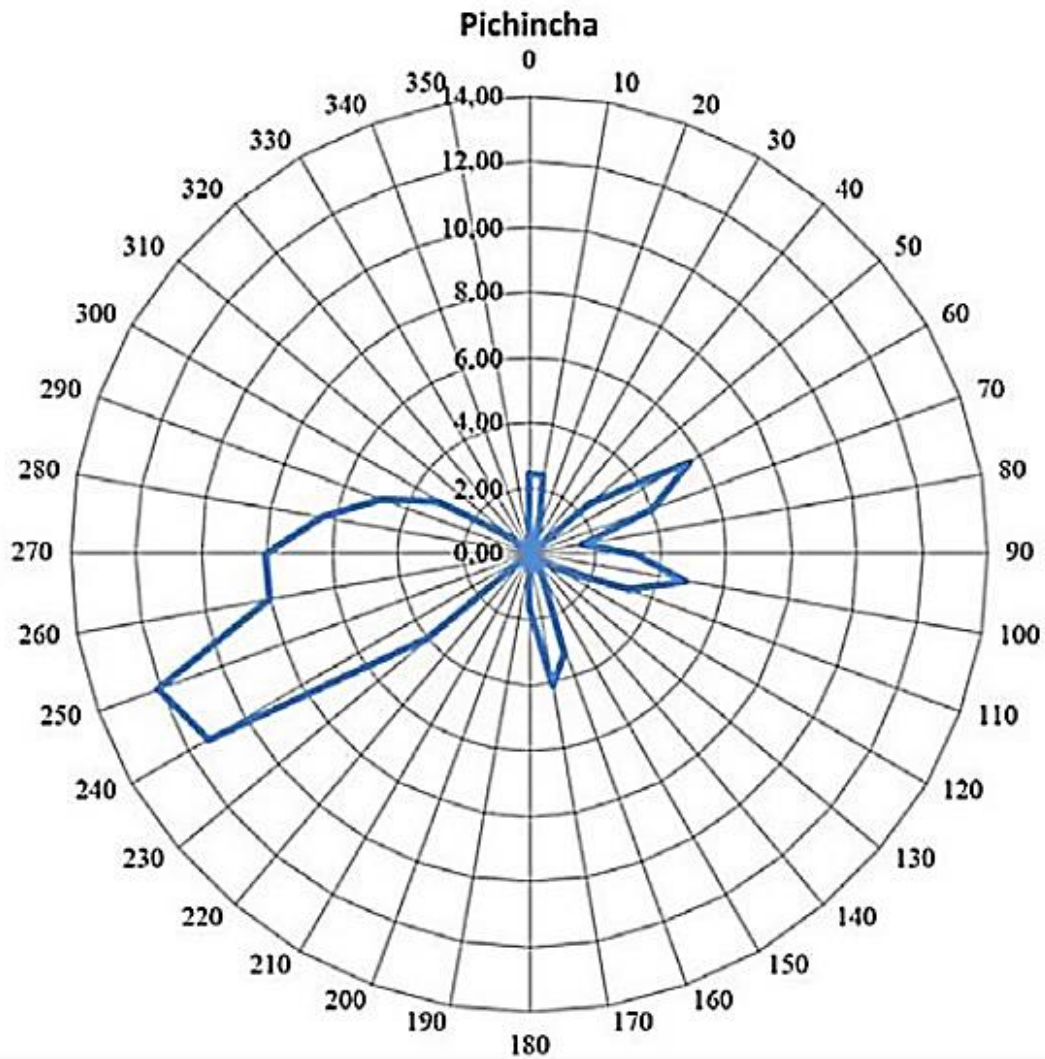


Figura 9 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Guagua Pichincha. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021).

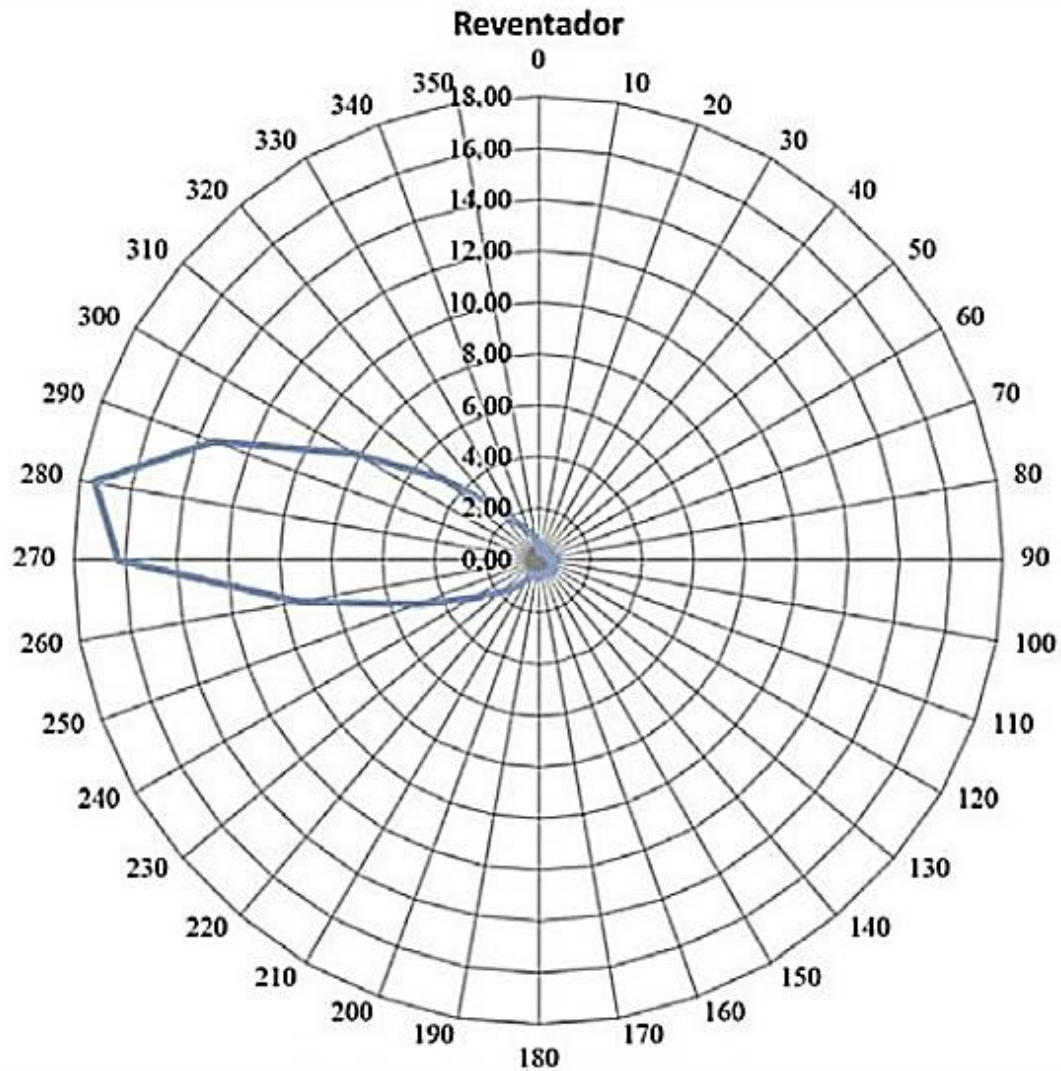


Figura 10 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Reventador. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021).

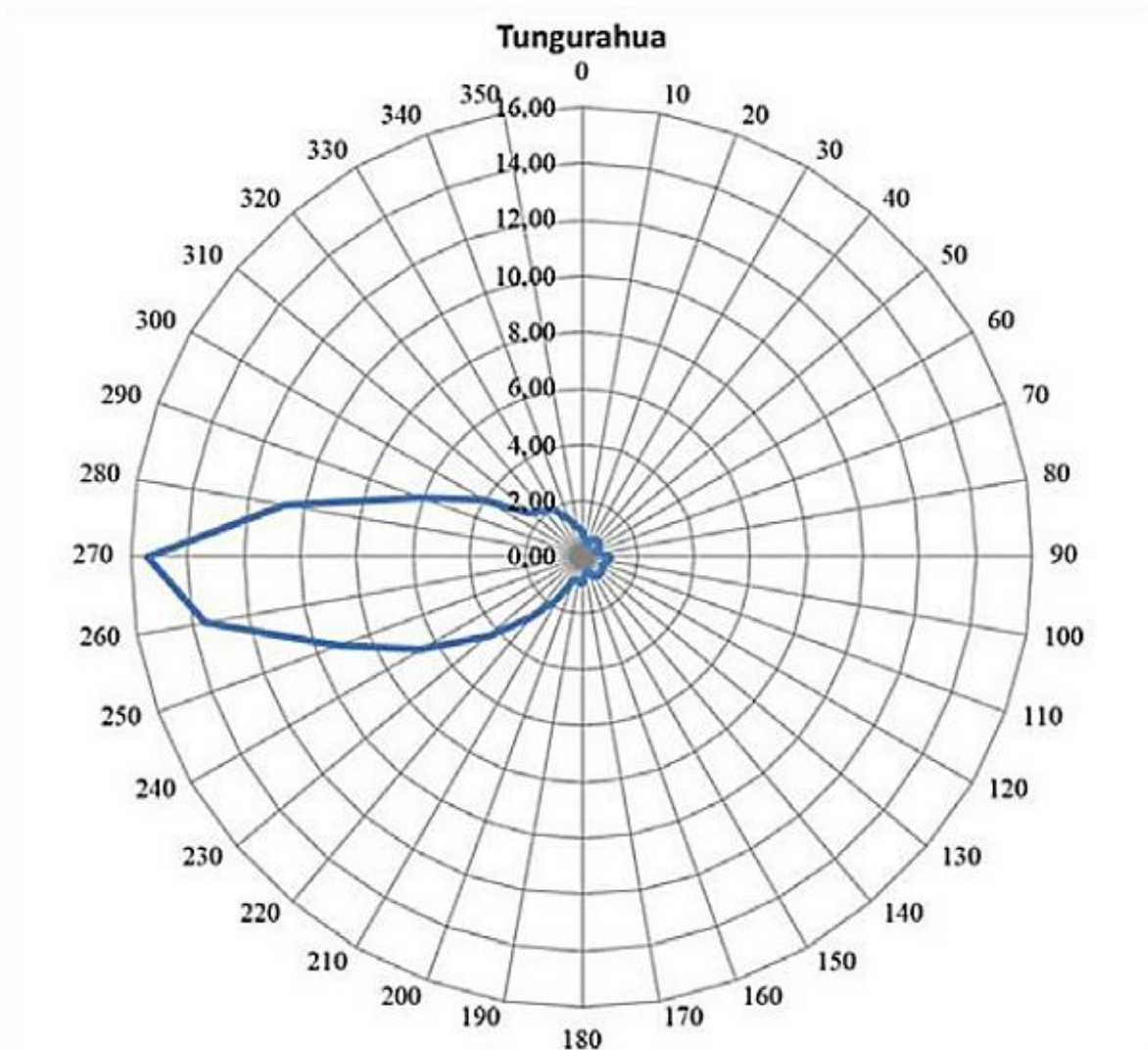


Figura 11 Dirección principal de distribución de cenizas volcánicas dentro de un diagrama de rosa del volcán Tungurahua. Todos los datos están normalizados al 100%, para cada volcán evaluado (Theofilos Toulkeridis, 2021).

Theofilos Toulkeridis (2021) realizó la evaluación de la distribución de material volcánico de grano fino, mediante 8979 imágenes satelitales (septiembre 1999 –marzo 2021). La dirección predominante de viaje es principalmente hacia el oeste desde su cráter; es decir el ángulo predominante con más del 60% de todas las distintas direcciones posibles de la distribución de ceniza se encuentra entre 250° y 290°. El resto de las direcciones ocurren en menor grado, siendo poco considerables. En ciudades como Cuenca, Loja y ciudades costeras, como Guayaquil la precipitación de cenizas volcánicas ocurre ocasionalmente.

A continuación, se presenta la dirección principal y alcance predominante de las cenizas volcánicas de los volcanes de estudio y el volcán Sangay.

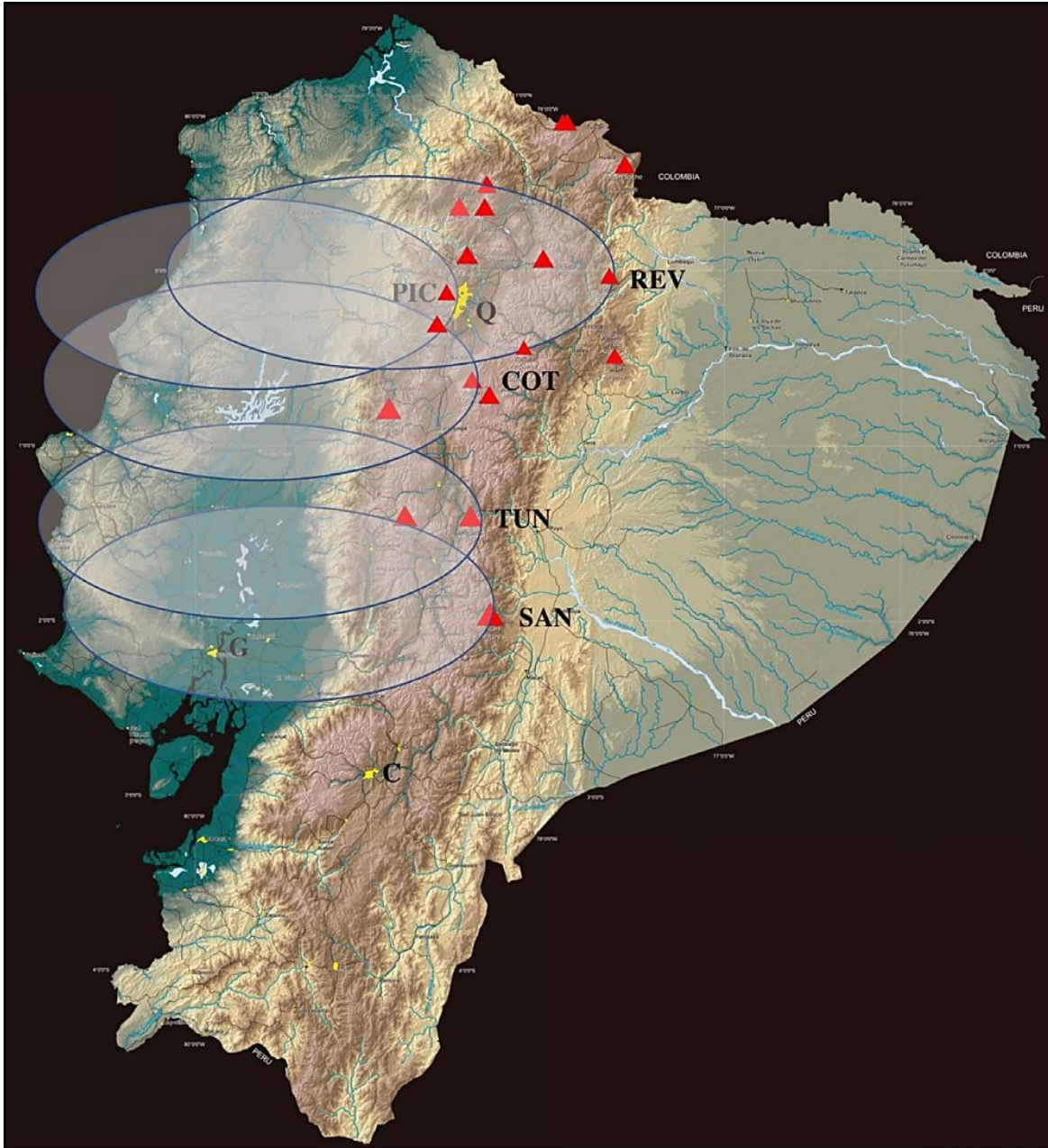


Figura 12 Dirección principal y alcance predominante de las cenizas volcánicas (color gris claro) en Ecuador con base en la actividad de los volcanes Tungurahua (TUN), Reventador (REV), Sangay (SAN), Cotopaxi (COT) y Guagua Pichincha (PIC), con las 3 ciudades más pobladas Quito (Q), Guayaquil (G) y Cuenca (C). Los triángulos rojos son otros volcanes activos (Theofilos Toulkeridis, 2021).

### 3.2 Descripción de los volcanes de estudio y sus patrones eruptivos

Idealmente, la evaluación del peligro de tefras se debe realizar con mapas probabilísticos que se basan en modelos numéricos. La elaboración de mapas, los parámetros de entrada del modelo, las aproximaciones físicas de las simulaciones numéricas y las probabilidades de ocurrencia de los diferentes tipos de erupción en marcos temporales específicos se encuentra

entre las fuentes de incertidumbre más críticas (Tadini A. , 2021). El presente trabajo presenta los mapas del riesgo de caída de tefras para los volcanes activos Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua (Tadini A. , 2021).

### **3.2.1 Volcán Cotopaxi**

El volcán Cotopaxi (5897 msnm) ubicado a 35 km al Noreste de Latacunga y de 45 km al Sureste de Quito, sobre la Cordillera Oriental (Real). El diámetro del cráter se encuentra entre 800 m en sentido Norte-Sur y 650 m en sentido Este-Oeste. Los volcanes que rodean al volcán son Sincholahuá (4873 msnm), Quilindaña (4876 msnm) y Rumiñahui (4722 msnm), además de los páramos que bordean los 3000 msnm (IGEPN, 2022).

Cotopaxi es reconocido como uno de los volcanes más peligrosos del planeta. Debido a:

- Frecuencia eruptiva.
- Estilo eruptivo.
- Relieve.
- Cobertura glacial y el número de personas expuesta.

(IGEPN, 2022)

El volcán ha tenido cinco erupciones importantes: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880. Estos han generado fenómenos volcánicos muy peligrosos, y eventos similares volverán a repetirse en el plazo de décadas apenas (IGEPN, 2022).

La peligrosidad radica en que sus erupciones pueden dar lugar a la formación de enormes lahares que transitarán por zonas densamente pobladas como el Valle Interandino entre Mulaló y Latacunga, y una parte del valle de los Chillos. Además, la caída de ceniza podría afectar una parte muy significativa de la Sierra y la Costa del Ecuador. Al ser uno de los volcanes más supervisados del Ecuador, una parte importante de los recursos se dedican a la vigilancia. La red de monitoreo de este volcán se ha expandido continuamente a su configuración actual, lo que garantiza una supervisión adecuada de este peligroso volcán (IGEPN, 2022). A continuación, se presenta el mapa de peligro volcánico del Cotopaxi:

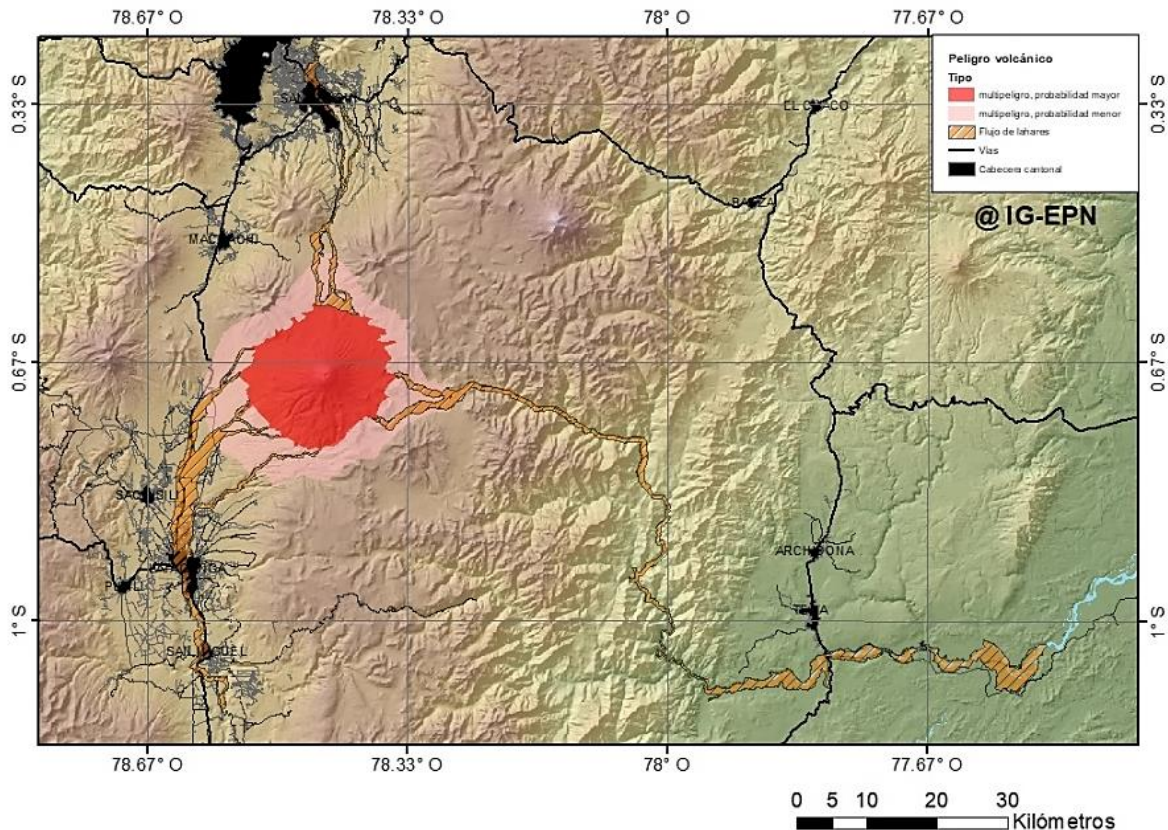


Figura 13 Mapa del peligro potencial del volcán Cotopaxi (IGEPN, 2022)

### 3.2.2 Volcán Guagua Pichincha

El volcán Guagua Pichincha está situado a 12 kilómetros al este de Quito en la Cordillera Occidental de los Andes. Volcanes más antiguos y poderosos con importantes emisiones de lava, como Toaza, Guagua basal y Rucu, están ubicados al este del centro del volcán activo. Según datos del IGEPN, algunas erupciones de los últimos diez mil años fueron de gran magnitud y han resultado en caídas de cenizas, flujos piroclásticos y lava que después colapsaron (IGEPN, 2022).

Hace 3700 y 1000 años, hubo grandes erupciones. En el año 1660, hubo una erupción histórica, pero menos significativa que las erupciones anteriores. En los distintos sucesos existió importantes caídas de ceniza en Quito, así como la presencia de flujos piroclásticos y generación de lahares secundarios en varias zonas cercanas al volcán (IGEPN, 2022).

Mediante exploraciones y estudios realizados por el IGEPN en excavaciones en el valle de Quito, donde hay abundante evidencia de caída de cenizas y deslizamientos secundarios. Un claro ejemplo es, la caída de ceniza de la erupción de hace 1000 años que presentó un espesor de 12 cm en las zonas cercanas a la Universidad Central. La caída de ceniza ocurrida en la erupción de 1660 en el Centro Histórico tenía un espesor de 4 cm (IGEPN, 2022). La totalidad de los flujos piroclásticos, se han dirigido hacia la región oriental, que corresponde a un área escasamente poblada.

El cráter está direccionado hacia el este, lo que corresponde a una zona selvática y pequeña población (IGEPN, 2022). Sus peligros volcánicos se muestran en el siguiente mapa:

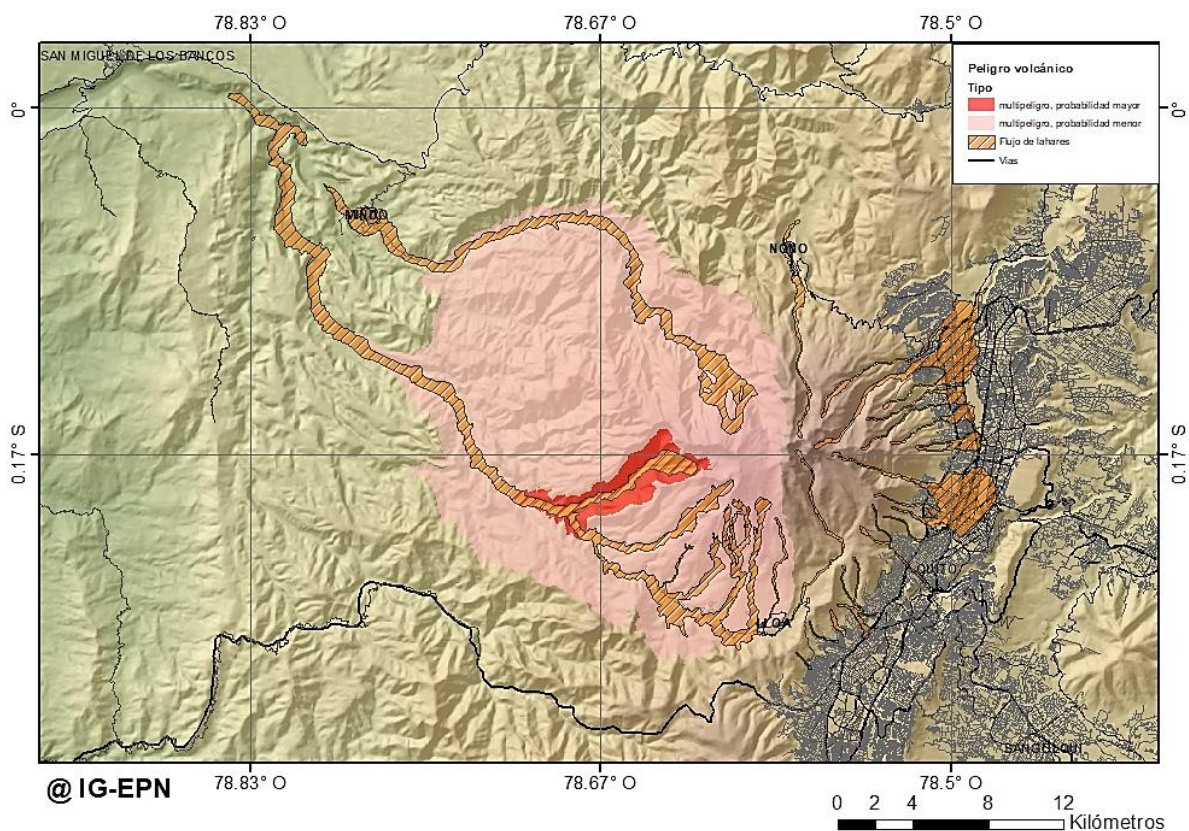


Figura 14 Mapa del peligro potencial del volcán Guagua Pichincha (IGEPN, 2022)

### **3.2.3 Volcán Reventador**

Uno de los tres volcanes que actualmente estalla en Ecuador es el volcán Reventador, se encuentra a unos 90 kilómetros al este de Quito. Cerca de él Pan de Azúcar, el Sumaco y los Conos de Puyo, situados en la región sub-andina del Ecuador forman geográficamente una fila de volcanes (IGEPN, 2022).

El 3 de noviembre de 2002, la altura del cono era de 3560 msnm; durante la erupción, la sección superior del cono fue destruida, reduciendo su altura a 3450 msnm. Se estima que el cono alcanza ahora una altura de 3600 msnm gracias al menos a 26 flujos de la actividad efusiva de lava.

El 3 de noviembre de 2002, previo a la erupción de este, la altura del cono era de 3560 msnm, tras la erupción la parte superior del cono fue destruida reduciéndose a 3450 msnm. Gracias a la efusión de al menos 26 flujos de lava se ha vuelto a construir el cono y al momento se estima que alcanza una altura de 3600 msnm. Goza de un cono, con pendientes de hasta 34° y una forma extendida hacia el Este. Actualmente, están presentes lavas andesitas y andesitas basálticas (IGEPN, 2022).

Existe poco conocimiento acerca de la actividad histórica de este volcán, debido a su lejanía, inaccesibilidad y constantes malas condiciones climáticas que dificultan la observación directa a simple vista. El IGEPN estima que desde 1541 hasta la actualidad se han producido al menos 16 erupciones. Los eventos de erupción analizados y confirmados antes del 2002 incluyen: 1898-1912, 1926-1929, 1944, 1959-1960, 1972-1974 y 1976. Además, incluyen flujos de lavas más pequeños, ceniza y flujos piroclásticos (IGEPN, 2022). La siguiente figura ilustra los peligros volcánicos del Reventador:

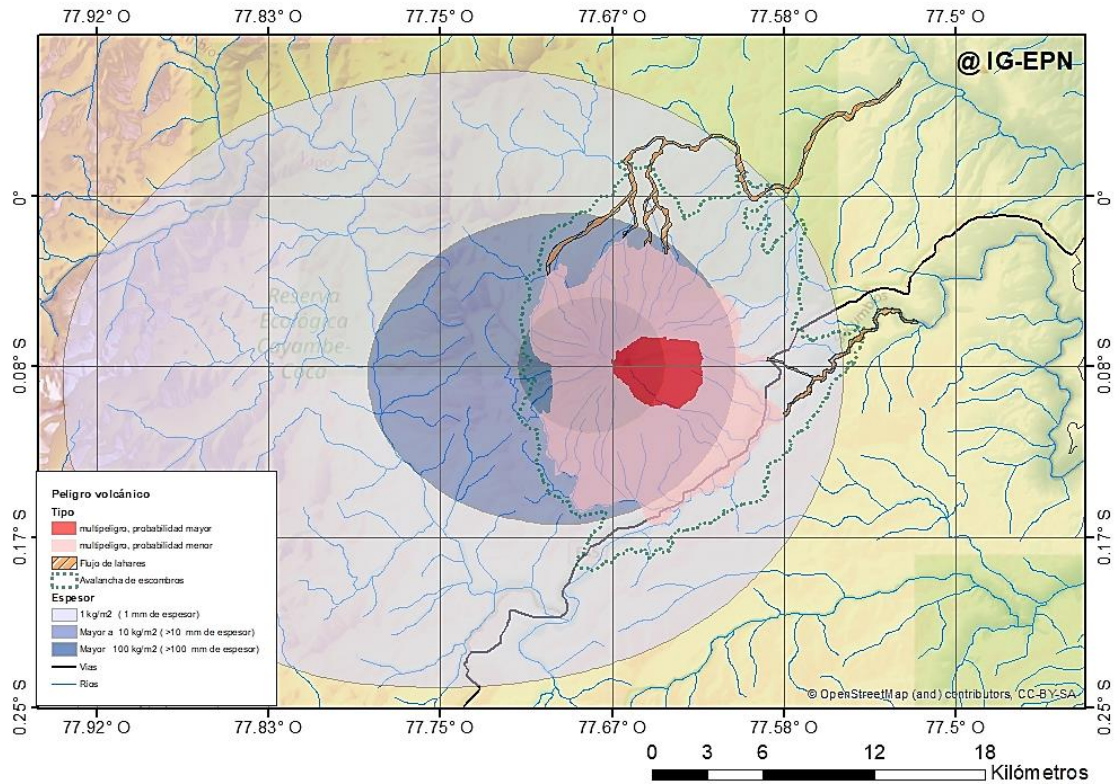


Figura 15 Mapa del peligro potencial del volcán Reventador (IGEPN, 2022).

La erupción de 2002 comenzó con una fuerte etapa explosiva que alcanzó un VEI de 3 (Índice de Explosión Volcánica). Los depósitos de ceniza tuvieron un impacto significativo en la región, con una acumulación de 1 a 2 mm de ceniza en Quito. Desde entonces, el volcán es más activo produciendo flujos de lava y erupciones moderadas que producen columnas explosivas de 1 a 2 km de altura (IGEPN, 2022).

Como uno de los volcanes más activos, se monitorea utilizando una variedad de técnicas que incluyen sismógrafos para buscar aumentos en la presión interna y el movimiento de fluidos. La alta gama de instrumentos destinados a cada volcán está directamente relacionada con la amenaza de las poblaciones cercanas. El Reventador mantiene monitoreo periódico de fluidos geoquímicos, así como también monitoreo sísmico (IGEPN, 2022).

### **3.2.4 Volcán Tungurahua**

El volcán Tungurahua es un volcán de múltiples capas ubicado en la Cordillera Real en Ecuador a 120 km al sur de Quito, 33 km al sureste de Ambato y 8 km al norte de Baños. Posee una altura de 5020 metros con un diámetro basal de 16 kilómetros dividido en tres edificios continuos Tungurahua I, II y III, el tercero de los cuales es la estructura actual. Los edificios anteriores de Tungurahua I y II se derrumbaron en los últimos 30.000 y 3.000 años, respectivamente. Desde 1300 a.C. el Tungurahua mantiene actividad volcánica que incluye flujos de lava, ceniza, flujos piroclásticos y erupciones al menos una vez cada siglo (IGEPN, 2022).

La fase de erupción actual comenzó en 1999. En la actualidad, la erupción fue esporádica y se representa por explosiones estrombolianas y vulcanianas; en otras palabras, emisiones de gases y cenizas. En julio y agosto de 2006, Tungurahua entró en erupción dos veces, provocando erupciones masivas y la formación de flujos de lava. Los hechos provocados por la caída de ceniza fueron de alcance regional y también afectaron a Guayaquil (IGEPN, 2022).

El volcán mantiene episodios de actividad esporádicos que duran algunos días y pausas de hasta 3 meses. Esta actividad suele comenzar con fuertes erupciones vulcanianas (como en los años de 2010, 2012 y 2013) o erupciones de carácter estromboliano y liberación permanente de gas y ceniza (IGEPN, 2022). La siguiente figura ilustra los peligros volcánicos del Tungurahua:

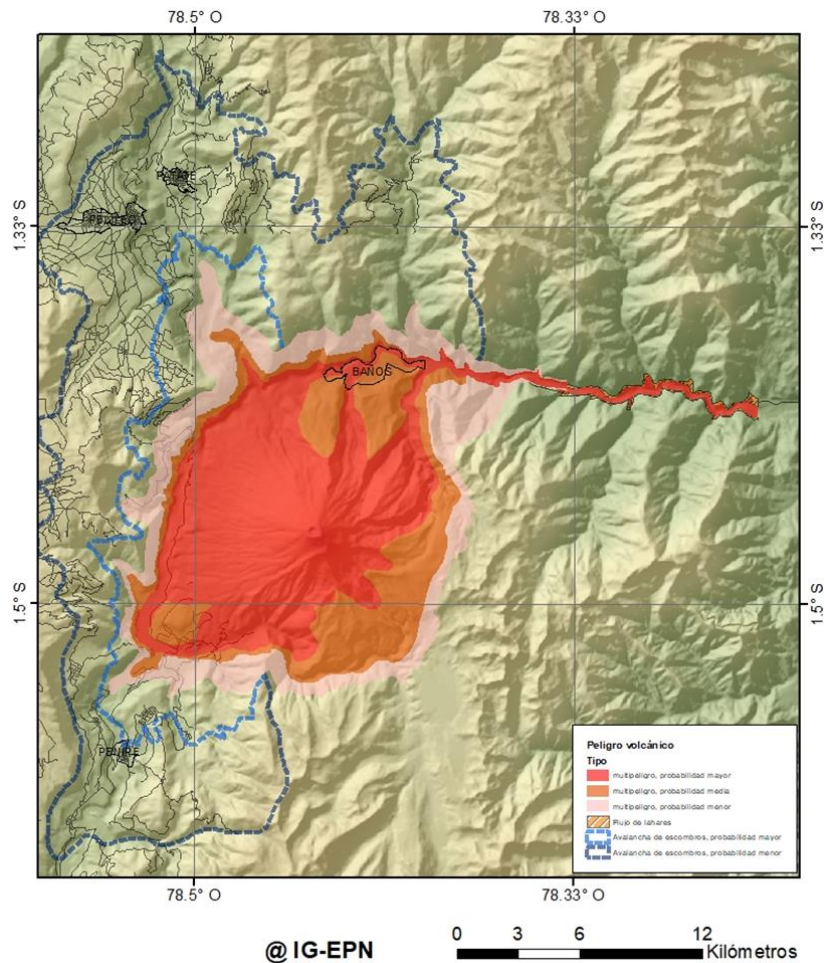


Figura 16 Mapa del peligro potencial del volcán Tungurahua (IGEPN, 2022)

### 3.3 Mapas probabilísticos y semi probabilísticos por caída de ceniza de los volcanes de estudio

El uso de mapas de amenazas para volcanes activos o potencialmente activos es un primer paso importante para reducir los riesgos en edificaciones, en este caso las cubiertas. Desde la década de 1980, IGEPN ha identificado la amenaza de los volcanes principales. Estos mapas incluyen información sobre distintas amenazas, como cuevas de tefra (cenizas), lahares (flujos piroclásticos), flujos piroclásticos, flujos de densidad piroclástica y avalanchas de escombros (deslizamientos de tierra volcánica) (IGEPN, 2022). Para efectos de esta investigación, se han creado mapas propios en base a la información proporcionada por cada uno de estos mapas.

3.3.1 *Mapa de amenaza volcánica*

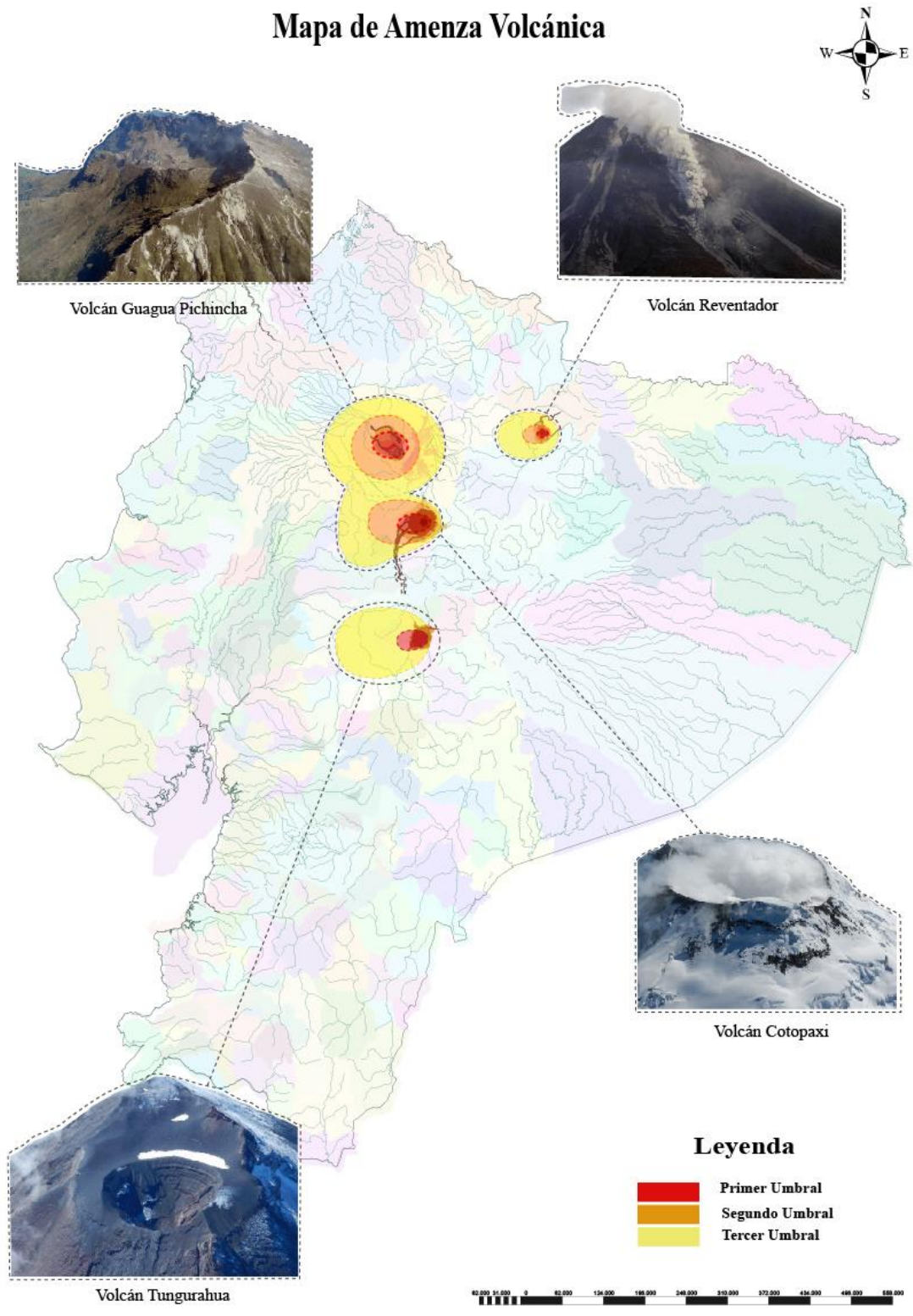


Figura 17 Mapa de amenaza volcánica. Autoría propia

Para definir las zonas que podrían ser afectadas por posibles caídas de piroclastos de los volcanes, el IGEPN utilizó el modelo numérico “Ash3d”, Modelo Atmosférico Euleriano de Transporte, Dispersión y Depositación de Tefra. Las simulaciones están basadas principalmente en parámetros propios del estudio realizado por parte del IGEPN de una erupción (altura de la columna eruptiva, volumen de magma, duración de la erupción) y en distribución estadística de los perfiles de viento. Posteriormente, estos resultados se trataron con un algoritmo que permite definir áreas probabilísticas de afectación (IG-EPN, 2019) (IGEPN, 2022).

Por ejemplo, para el volcán Reventador la delimitación de las zonas potencialmente afectadas por caídas de ceniza fue realizada mediante el uso de modelos numéricos. Los valores obtenidos de cada uno de los mapas muestran la probabilidad de 50% que una masa de piroclastos se acumule a una unidad de superficie ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) alrededor del volcán. Mencionada probabilidad está basada en la distribución estadística de los episodios eruptivos posibles y de los perfiles de vientos (Bourquin J, 2019).

Estudios previos sobre los peligros de caída de tefra y ceniza según los mapas probabilísticos y semi probabilísticos del IGEPN, presentan un enfoque probabilístico para representar los posibles escenarios en una erupción volcánica. La ventaja de los métodos probabilísticos sobre un enfoque determinista radica en una mejor evaluación de los efectos de la variación aleatoria en los parámetros eruptivos y las condiciones del viento en las estimaciones de la acumulación de ceniza en un lugar determinado o área de interés (Volentik, 2015).

Las áreas de afectación obtenidas con el modelo Ash3d están definidos por umbrales según el valor del Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) de donde se distinguen los siguientes:

- 1. Primer umbral:** El área de color rojo indica el área más peligrosa y puede verse afectada por la caída de ceniza. ( $VEI \geq 4$ ). Los grandes eventos explosivos se caracterizan por erupciones volcánicas que producen flujos piroclásticos altamente móviles asociados con el colapso de la columna eruptiva y/o a explosiones dirigidas (IGEPN, 2022).
- 2. Segundo umbral:** El área de color naranja indica la zona de peligro intermedia, puede ser afectada por la caída de ceniza ( $VEI 2-3$ ). Eventos explosivos de mediano tamaño, caracterizados por una mayor tasa de erupciones de magma, aparición de flujos de lava a ambos lados del volcán y la distribución de ceniza a escala regional (IGEPN, 2022).
- 3. Tercer umbral:** El área de color amarillo indica el área menos peligrosa y puede verse afectada por la caída de cenizas ( $VEI 1-2$ ). Actividad eruptiva pequeña, caracterizada por la aparición de erupciones de pequeña a mediana emisión de bloques y bombas volcánicas hacia los flancos superiores del cono y gran cantidad de ceniza en las inmediaciones del volcán. (IGEPN, 2022).

Es de vital importancia comprender que actualmente se emplea una amplia variedad de métodos para generar mapas de amenazas, así como reconocer la noción de que un modelo no puede adaptarse a todas las situaciones (IGEPN, 2022).

3.3.2 Mapa de Umbral de Ceniza

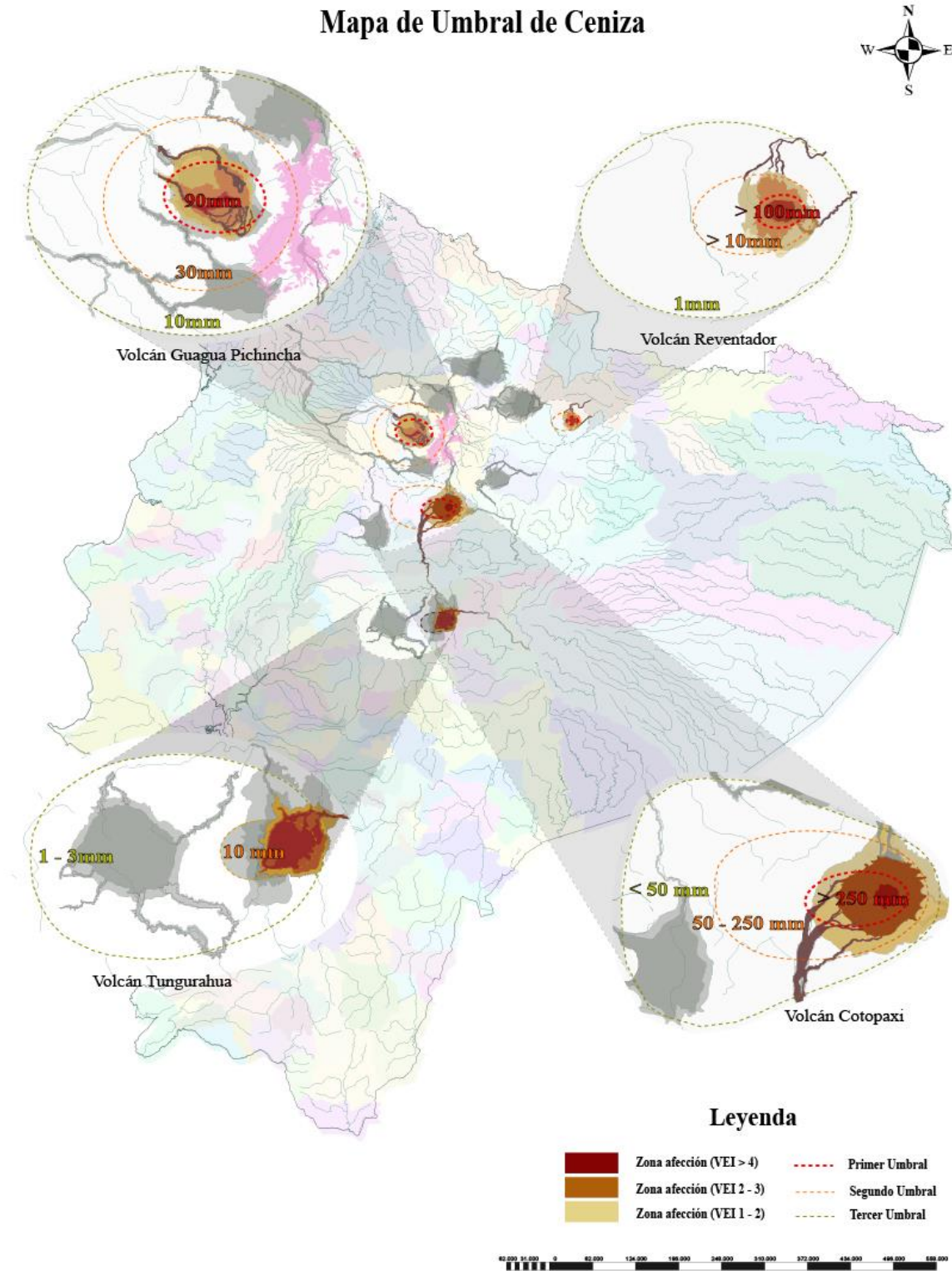


Figura 18 Mapa de Umbral de Ceniza. Autoría propia

El mapa de umbral de ceniza es similar al de amenaza en términos del VEI, pero con los valores correspondientes a cantidad de ceniza, los cuales son:

**Tabla 6.** Cantidad de ceniza por umbral y por volcán

Volcanes	Umbral de ceniza		
	Primer Umbral (mm)	Segundo Umbral (mm)	Tercer Umbral (mm)
Volcán Guagua Pichincha	90	30	10
Volcán Cotopaxi	> 250	50 - 250	< 50
Volcán Tungurahua		30	1 - 3
Volcán Reventador	> 100	> 10	1

3.3.3 *Mapa cantonal de amenaza volcánica*

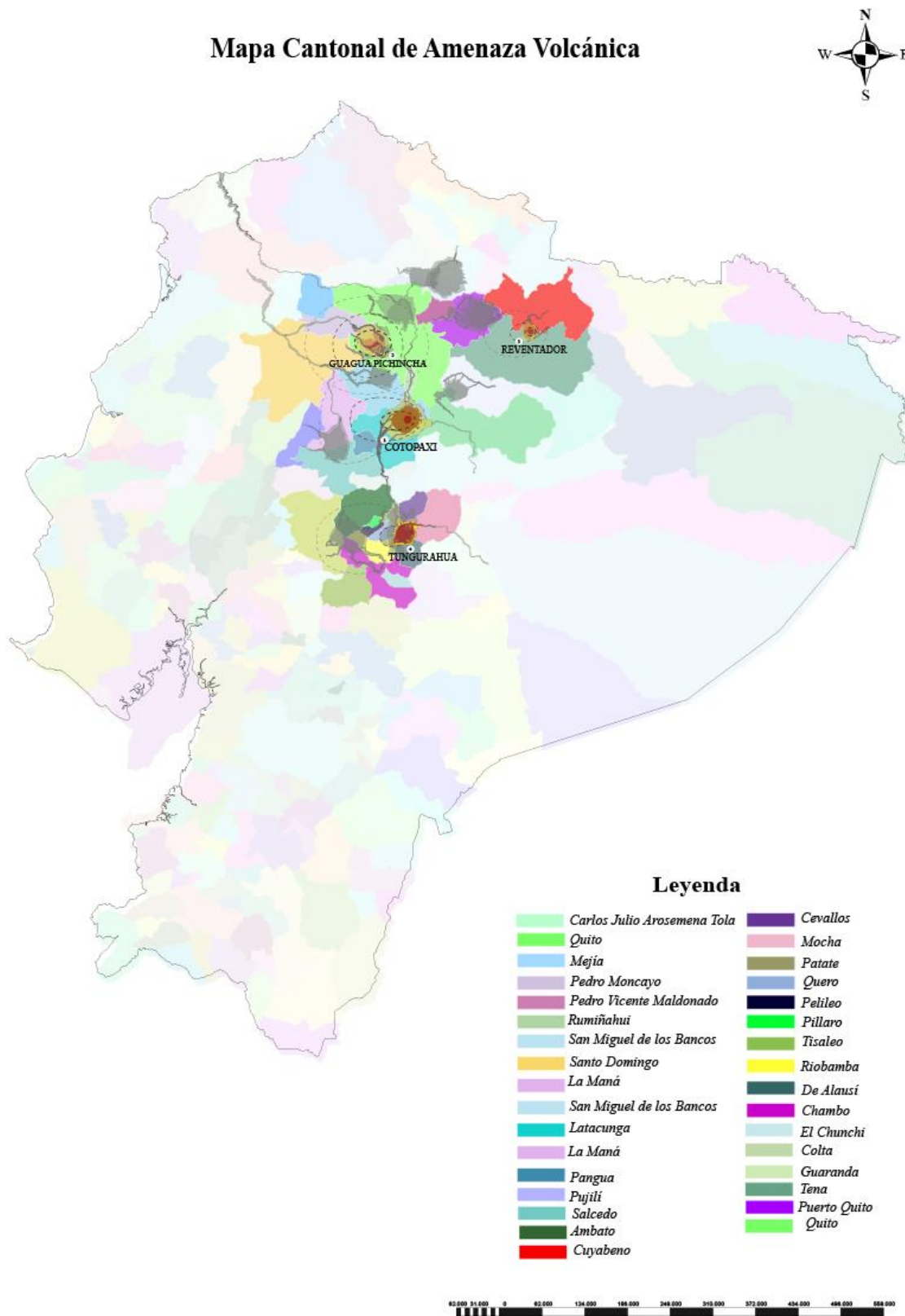


Figura 19 Mapa cantonal de amenaza volcánica. Autoría propia

En el presente mapa se detalla los cuatro volcanes de estudio, la magnitud de cada umbral de amenaza y el mapa cantonal del Ecuador; la superposición de esta información permite identificar los cantones susceptibles a la caída de ceniza, es decir, para apreciar la exposición y definir una zonificación cantonal de la amenaza. Cabe recalcar que los datos vulcanológicos fueron obtenidos de los mapas probabilísticos y semi probabilísticos del IGEPN.

Los cantones detallados en la siguiente tabla se encuentran dentro del umbral de ceniza de cada volcán, total o parcialmente. Sin embargo, se tomó a consideración propia y en base al riesgo, no tan solo los cantones dentro del umbral sino también los cantones cercanos a este por la incertidumbre inherente a la modelación matemática por factores como el viento o la explosividad de la erupción.

Así, los cantones identificados para establecer la exposición a caída de ceniza de los volcanes en estudio son los siguientes:

**Tabla 7.** Cantones afectados por la ceniza proveniente de los volcanes en estudio

<b>Volcanes</b>	<b>Provincias</b>	<b>Cantones</b>	<b>Región</b>
Volcán Guagua Pichincha	Pichincha, Santo Domingo y Cotopaxi	Quito	Sierra
		Mejía	
		Pedro Moncayo	
		Pedro Vicente Maldonado	
		Rumiñahui	
		San Miguel de Los Bancos	
		La Maná	Costa
Santo Domingo			
Volcán Cotopaxi	Cotopaxi, Pichincha y Napo	San Miguel de Los Bancos	Sierra
		Latacunga	
		La Maná	
		Pangua	
		Pujilí	
		Salcedo	
		Quito	Amazonía
Carlos Julio Arosemena Tola			
Volcán Tungurahua	Tungurahua y Chimborazo	Ambato	Sierra
		Cevallos	

		Mocha	
		Patate	
		Quero	
		Pelileo	
		Píllaro	
		Tisaleo	
		Riobamba	
		De Alausí	
		Chambo	
		El Chunchi	
		Colta	
		Guaranda	
		Tena	
Volcán Reventador	Napo, Pichincha y Sucumbíos	Cuyabeno	Amazonía
		Puerto Quito	Sierra

### 3.3.4 Mapa de Flujo de Vientos en el Ecuador

#### Mapa de Flujo de Vientos en el Ecuador

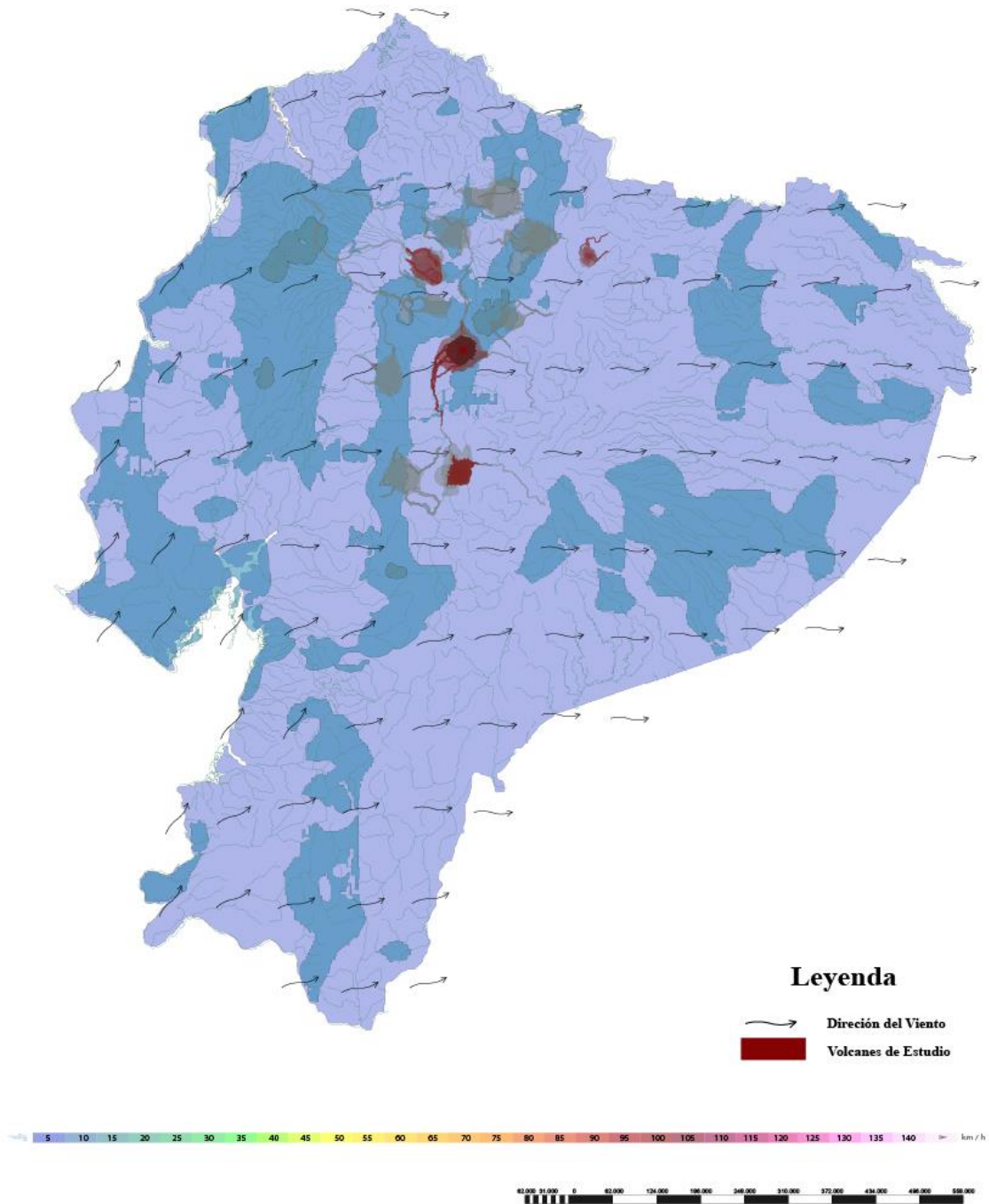
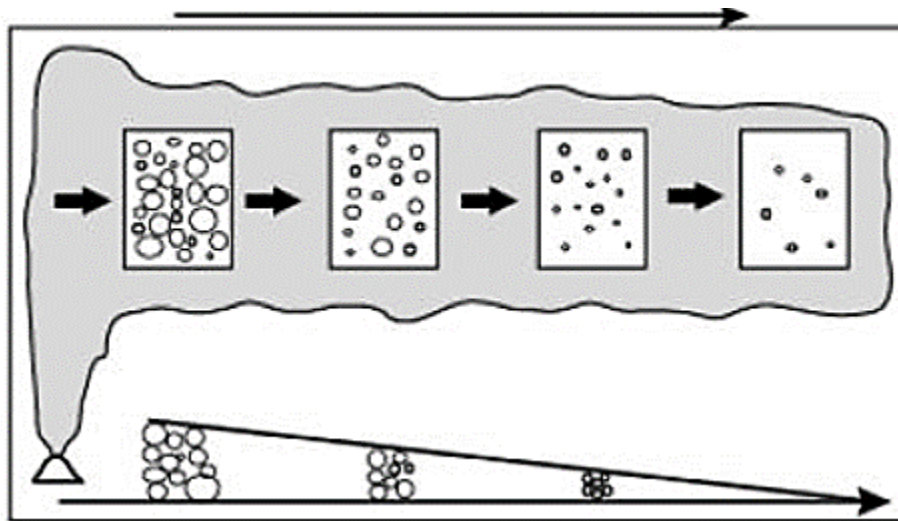


Figura 20 Mapa de Flujo de Vientos en el Ecuador. Autoría propia.

El área de vulcanología del Instituto Geofísico realiza trabajos de observación de la actividad superficial, monitoreo térmico y medición de gases volcánicos, ha realizado un total de 11 sobrevuelos a los volcanes, siendo recurrentes y siempre han estado regidos a las condiciones meteorológicas durante el año (IGEPN, 2022). El viento es un factor influyente en la movilización de la ceniza, debido a esto se elaboró un mapa del flujo de vientos. Con el objetivo de demostrar que la ceniza no tan solo afecta a los cantones bajo cada umbral, sino también aquellos cercanos a estos.

El tamaño de grano promedio de las cenizas volcánicas varía al ser emitidos por distintas explosiones volcánicas, incluso dentro de un solo evento explosivo que dura horas o días. Los fragmentos de roca más pesados y grandes suelen caer cerca del volcán. Las cenizas volcánicas al ser partículas más pequeñas pueden viajar decenas a miles de kilómetros a favor del viento, según su velocidad, el volumen de ceniza y la altura de la columna de erupción (USGS, 2015).



*Figura 21 El tamaño de las partículas de ceniza generalmente disminuye con la distancia desde la ventilación (USGS, 2015).*

El mapa de flujo de vientos en el Ecuador detalla en la leyenda la dirección del viento del país, su velocidad (km/h) y los volcanes de estudio, de manera que sea de mayor comprensión entender la dispersión de la ceniza, debido al movimiento del viento y su respectiva velocidad.

## **4 CAPITULO IV: PRÁCTICAS INTERNACIONALES PARA CONSIDERAR LA CAÍDA DE CENIZA EN LA ESTIMACIÓN DE SOBRECARGAS EN CUBIERTAS**

### ***4.1 Evaluación de riesgos***

El Servicio Geológico de Estados Unidos, ha realizado distintos estudios a la carga en cubiertas, entre ellos considero la carga de ceniza, debido a que es una preocupación común el colapso de las cubiertas. Sin embargo, es un impacto raro que requiere cantidades considerables (típicamente mayores que 100 mm de ceniza). El daño en las cubiertas depende del espesor y densidad del depósito de la carga de ceniza acumulada y la resistencia estructural del edificio. La ceniza mojada es hasta dos veces más densa que la seca, por lo que la carga correspondiente es mayor (USGS, 2015).

Las cubiertas que no poseen un estudio ingenieril y de poca pendiente son particularmente vulnerables al colapso, con espesores de alrededor de 100 mm o menos. Bajo caídas de ceniza más finas (< 100 mm), es poco probable que se produzcan daños estructurales, sin embargo, los elementos no estructurales, como canaletas y voladizos, pueden sufrir daños. Además, es poco probable que se produzcan daños estructurales en cubiertas de luz corta para espesores de ceniza < 300 mm con el correcto estudio ingenieril, en cubiertas. Ante mayor magnitud de la caída de ceniza, se debe realizar un estudio de resistencia de las cubiertas en el área y el espesor máximo de ceniza que soportará sin peligro al colapso, especialmente para infraestructuras que brinden refugio a personas durante la caída de ceniza (USGS, 2015).

### ***4.2 Cálculo de carga en cubiertas***

El peso específico de la ceniza seca varía entre 400 a 700 kg/m<sup>3</sup>. Ante el agua de lluvia puede incrementar en 50 – 100% o más si la ceniza se satura con la misma, alcanzando más de 2000 kg/m<sup>3</sup>. El Servicio Geológico de Estados Unidos ha determinado que los problemas de la carga de ceniza son similares a los de la carga de nieve, pero los efectos de acumulación de ceniza son más graves (USGS, 2015).

**Tabla 8.** Comparación de densidad y carga, 100 mm de nieve y 100 mm de ceniza volcánica (USGS, 2015).

Descripción	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (kPa)
<i>Nueva nieve</i>	50-70	0.05-0.07
<i>Nieve nueva húmeda</i>	100-200	0.1-0.2
<i>Nieve asentada</i>	200-300	0.2-0.3
<i>Ceniza seca sin compactar</i>	500-1300	0.5-1.3
<i>Ceniza compactada húmeda</i>	1000-2000	1.0-2.0

Las cenizas no se derriten, pueden obstruir las canaletas y causar el colapso de la cubierta, especialmente después de la lluvia. En EE.UU, existen áreas que poseen códigos de carga de nieve, puede resultar cierta protección contra las cenizas, sin embargo, esto depende en gran medida de la ubicación de las estructuras porque los niveles de carga de nieve varían con la altitud (USGS, 2015).

La carga sobre cubiertas viene dada por la ecuación (USGS, 2015):

$$L = \frac{dpg}{1000}$$

Donde:

- L: es carga de ceniza volcánica (presión en kPa)
- d: es la profundidad de la ceniza (m)
- p: es la densidad de cenizas (kg/m<sup>3</sup>)
- g: es la aceleración gravitacional (9,8 m/s<sup>2</sup>)

#### **4.3 Diseño y construcción ante amenaza de caída de ceniza**

Los daños en cubiertas debido a la caída de cenizas volcánicas pueden variar desde daños menores en el exterior de la cubierta hasta daños estructurales catastróficos. El nivel de impacto dependerá de la cantidad y las características de la caída de ceniza, el diseño, calidad y del sistema de soporte de la cubierta. Además de las condiciones ambientales en el momento de la caída de ceniza y después de ella (USGS, 2015).

En Nueva Zelanda se realizó un estudio acerca de la caída de ceniza basándose en el espesor de la caída de ceniza acumulada en el que se establecieron umbrales basados en la gravedad de varios impactos, obteniendo los datos en gran medida de la experiencia y la documentación de las erupciones recientes del Monte Ruapehu en Nueva Zelanda (USGS, 2015).

**Tabla 9** Gravedad de caída de ceniza en función del espesor acumulado (USGS, 2015).

Término	Acumulación (pulgadas)	Acumulación (pulgadas decimales y unidad SI)	Umbrales de impacto clave (acumulativo)
Rastro o polvo	< 1/32	0,031pulg. (<0,8 mm)	Irritante ocular y respiratorio, impactos de muy bajo nivel para la mayoría de las personas.
Menor	1/32 - 1/4	0,031- 0,25 pulg. (0,8 - 6,4 mm)	Posibles problemas de cultivo, equipamiento animal e infraestructura; limpieza generalizada probable.
Moderado	1/4 - 1	6,4 a 25,4 mm (0,25 a 1,0 pulg.)	Los esfuerzos de remoción de cenizas son significativos.
Pesado	1 - 4	1,0 a 4,0 pulg. (25,4 a 100 mm)	Cubiertas más débiles pueden fallar a ~ 4-5 pulgadas de acumulación de ceniza húmeda compactada (~40 lb/ft <sup>2</sup> ).
Muy pesado	4 - 12	4,0 a 12,0 pulg. (100 a 300 mm)	Aumenta peligro de derrumbe de cubiertas, daños a árboles, interrupción de servicios esenciales.
Severo	> 12	>12 pulg. (>300 mm)	Carreteras intransitables, graves daños a la infraestructura, gran pérdida de plantas y animales.

#### 4.4 Estudio de caso

En este acápite se resume un estudio de caso en el que se analizó con profundidad los efectos por la caída de ceniza. Ante la ausencia de estudios de eventos ocurridos en Ecuador, se seleccionó un estudio de caso ocurrido en Oceanía, considerado relevante por ubicarse en el Cinturón de Fuego del Pacífico, al igual que Ecuador.

Rabaul Caldera, Papúa Nueva Guinea (Lauer, 1995), presentó un período de 27 horas de intensidad sísmica, y los volcanes Tavurvur y Vulcan que se ubican en la caldera de Rabaul entraron en erupción el 19 de septiembre de 1994. La cercana ciudad de Rabaul resulto

devastada en gran medida con depósitos de cenizas que alcanzaron hasta 2m de espesor. En ese evento se registraron los siguientes datos obtenidos por la caída de ceniza en cubiertas (USGS, 2015).

**Tabla 10.** Levantamiento de datos en cubiertas

<b>Espesor de ceniza<sup>1</sup> (mm)</b>	<b>Carga estimada<sup>2</sup> (kPa)</b>	<b>Daños observados en cubiertas</b>
< 100	1.5 - 2.0	En general, los techos y las canaletas permanecieron intactos.
< 200	3.0 - 4.0	El 80-90% de los techos permanecieron intactos con poco daño aparente. Se produjeron hundimientos o derrumbes parciales en algunos edificios.
< 300	4.5 – 6.0	Más del 50% de los techos no colapsaron.
500 - 600	7.5 – 12.0	Más del 50% de los techos colapsaron.
> 600	9.0 – 12.0	Es dudoso que los edificios sobrevivieran sin daños significativos, incluso cuando el techo permaneció relativamente intacto.

*Nota:* <sup>1</sup>La ceniza cayó húmeda (USGS, 2015).

<sup>2</sup> Suponiendo una densidad de ceniza de 1500 a 2000 kg/m<sup>3</sup> (USGS, 2015).

Global Volcanism Program (2013) realiza reportes de los volcanes de estudio de manera mensual de las explosiones, hasta el momento presenta un registro desde agosto de 2021 hasta enero de 2022 y datos que son presentados por IGEPN (Program, 2013).

## 5 CAPITULO V: ESTIMACIÓN DE LA CARGA VIVA DE CENIZA EN CUBIERTAS

### 5.1 *Fundamentación para la estimación de carga viva por caída de ceniza*

En este trabajo se determinó la carga viva de ceniza por dos métodos: (i) mediante mapas de peligro volcánico y (ii) mediante la aplicación del código NEC-SE-CG.

Para el cálculo de la cantidad de ceniza mediante mapas de peligro volcánico, se tomó el valor máximo de cantidad de ceniza correspondiente al umbral de mayor valor al que está expuesto cada cantón. Los motivos para esta simplificación son los siguientes:

1. Como en el caso de la identificación de cantones expuestos, se considera que los umbrales acarrearán incertidumbre y por lo tanto no son límites fijos y exactos que podrían alcanzar otras zonas de cada cantón.
2. La heterogeneidad de cantidades de ceniza en un mismo cantón podría generar confusión entre funcionarios municipales y personas administradas, recordando que el control de la construcción se ejerce desde los gobiernos cantonales según la legislación vigente. Por lo tanto, se cree conveniente manejar un solo valor por cantón, logrando así un estándar uniforme, envolvente y conservador<sup>1</sup>.
3. La probabilidad de erupciones fuertes simultáneas de más de un volcán es prácticamente nula, por lo que no se considera el traslape de áreas de afectación de distintos volcanes. Es decir, si un cantón está expuesto a la ceniza de más de un volcán, no se suma la cantidad de ceniza, sino que se la evalúa por cada volcán independientemente.

Seguidamente, se convierte la cantidad de ceniza a una carga uniformemente distribuida usando la conversión de 1mm a 1kgf/m<sup>2</sup>, la cual es la relación que utiliza típicamente el IGEPN. Esto es consistente con lo indicado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2015), quien reporta que la densidad suelta de depósitos de ceniza recientemente

---

<sup>1</sup> La utilización de límites administrativos como límites de zonificación de amenazas es utilizada en la región. Un ejemplo de esto es la zonificación sísmica del Perú en la que los límites de cada zona sísmica en su código de construcción coinciden predominantemente con límites administrativos.

caída y ligeramente compactada oscila entre 500 y 1500 kg/m<sup>3</sup>, que en promedio es igual a 1000kg/m<sup>3</sup>, es decir, 1kgf/m<sup>2</sup> por cada milímetro de espesor de ceniza.

De este modo, se obtuvo las siguientes cargas por ceniza para cantón expuesto:

**Tabla 11.** Cantidad de ceniza en los cantones de estudio del Ecuador

VOLCANES	CANTONES	UMBRAL DE CENIZA			ESPESOR DE CENIZA (mm)	CARGA POR CENIZA (kg/m <sup>2</sup> )	CARGA POR CENIZA (kN/m <sup>2</sup> )
		Primer Umbral (mm)	Segundo Umbral (mm)	Tercer Umbral (mm)			
Volcán Guagua Pichincha	Quito	90	30	10	90	90	0,88
	Mejía			10	10	10	0,10
	Pedro Moncayo	90	30	10	90	90	0,88
	Pedro Vicente Maldonado			10	10	10	0,10
	Rumiñahui			10	10	10	0,10
	San Miguel de los Bancos		30	10	30	30	0,29
	Maná			10	10	10	0,10
	Santo Domingo		30	10	30	30	0,29
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	> 250	50 - 250	< 50	250	250	2,45
	Quito			< 50	50	50	0,49
	Maná		50 - 250	< 50	150	150	1,47
	Pangua		50 - 250	< 50	150	150	1,47
	Pujilí			< 50	50	50	0,49
	Salcedo			< 50	50	50	0,49
	Latacunga	> 250	50 - 250	< 50	250	250	2,45
	Carlos Julio Arosemena Tola			< 50	50	50	0,49
Volcán Tungurahua	Ambato			1 - 3	1 - 3	3	0,03
	Cevallos		30	1 - 3	30	30	0,29
	Mocha		30	1 - 3	30	30	0,29
	Patate		30	1 - 3	30	30	0,29
	Quero		30	1 - 3	30	30	0,29
	Pelileo			1 - 3	1 - 3	3	0,03
	Píllaro			1 - 3	1 - 3	3	0,03
	Tisaleo			1 - 3	1 - 3	3	0,03
	Riobamba		30	1 - 3	30	30	0,29
	Alausí		30	1 - 3	30	30	0,29
	Chambo			1 - 3	1 - 3	3	0,03
Chunchi			1 - 3	1 - 3	3	0,03	

	Colta			1 - 3	1 - 3	3	0,03
	Guaranda			1 - 3	1 - 3	3	0,03
Volcán Reventador	Tena	> 100	> 10	1	> 100	100	0,98
	Cuyabeno	> 100	> 10	1	> 100	100	0,98
	Puerto Quito			1	1	1	0,01

Por otro lado, para estimar la carga viva de ceniza aplicando la Normativa Ecuatoriana de la Construcción, código NEC-SE-CG, se calculará el valor de la reducción de carga viva en cubierta para cantones de la Sierra. El motivo de esto es que la sección 3.2.3 del código no establece necesariamente un valor de carga viva para ceniza sino apenas una restricción que impide reducir la carga viva en cubierta en la región andina y sus estribaciones, es decir, en ubicaciones con una elevación igual o superior a 1000 metros sobre el nivel del mar, esto para brindar seguridad en zonas expuestas a caída de ceniza o granizo, como si la reducción de carga viva en sí misma fuese equivalente a la carga viva por ceniza o granizo.

Se realizaron cálculos para 5 escenarios de cubierta para una de las 33 combinaciones de volcán y los cantones expuestos a su ceniza, dando un total de 165 escenarios. Los primeros 3 escenarios cubren los distintos valores de reducción de carga viva por pendiente de cubierta ( $R_2$ ) y las dos últimas corresponden a losas, elementos estructurales cuya carga viva se obtiene según la ocupación. Los escenarios definidos para el cálculo fueron:

- Cubiertas planas, inclinadas y curvas (usando ecuación  $L_r=L_oR_1R_2$ ):
  - Escenario A: con pendiente de 0%
  - Escenario B: con pendiente de 50%
  - Escenario C: con pendiente de 100%
- Losas en una o dos direcciones (usando ecuación para elementos estructurales con base al factor de sobrecarga  $K_{LL}$ ):
  - Escenario D: Cubiertas destinadas para áreas de paseo
  - Escenario E: Cubiertas destinadas en jardinería o patios de reunión.

Cabe notar que no se ha considerado entre los escenarios a las cubiertas destinadas para propósitos especiales dado que la NEC no establece una sobrecarga por ocupación para este uso. Tampoco se ha considerado la ocupación de tipo toldos o carpas por no tratarse de estructuras típicas de la Ingeniería Civil.

Según el código NEC-SE-CG, la reducción de cargas vivas se calcula con expresiones que dependen del área tributaria y de la pendiente de la cubierta, según las ecuaciones indicadas en el Capítulo 2. Por tal motivo, para este estudio comparativo se asumió un área tributaria de  $100 \text{ m}^2$  y tres escenarios de pendiente de cubierta (0, 50 y 100%) de forma arbitraria para representar estructuras hipotéticas de mediano tamaño en planta, lo cual es razonablemente ya que podría tratarse de una vivienda mediana, un aula, una bodega u otras estructuras de diversos usos. Además, por tratarse de cubiertas, se asume que las losas consideradas como elementos estructurales no soportan pisos, por lo que no se aplicó el límite inferior de  $0.5L_o$  a ni  $0.4L_o$  para la sobrecarga reducida.

Finalmente, se hizo una comparación entre la carga de ceniza basada en información vulcanológica del IGEPN ( $L_c$ -IGEPN) y la reducción de la carga viva de cubierta calculada según la NEC-SE-CG ( $L_c$ -NEC) para encontrar en qué escenarios hay probabilidad de que la NEC sobreestime o subestime la sobrecarga por ceniza. En esta comparación, se calculó la variación en porcentaje tomando como referencia el valor  $L_c$ -IGEPN, el cual tiene una base científica en la amenaza. Además, se consideró que ambas alternativas de cálculo son similares si su variación relativa es menor que 10%.

## **5.2 Resultados de cálculo de sobrecarga**

Mediante información vulcanológica del IGEPN se obtuvo una sobrecarga por ceniza,  $L_c$ -IGEPN, en promedio  $0,50 \text{ kN/m}^2$ , mínimo  $0,01 \text{ kN/m}^2$  y máximo  $2,45 \text{ kN/m}^2$ . La sobrecarga equivalente por ceniza estimada mediante la NEC,  $L_c$ -NEC, fue en promedio  $0,46 \text{ kN/m}^2$ , mínimo 0 y máximo  $1,41 \text{ kN/m}^2$ . Los valores de sobrecarga estimados por los dos métodos en estudio y para los distintos escenarios y volcanes se muestran en las siguientes figuras:

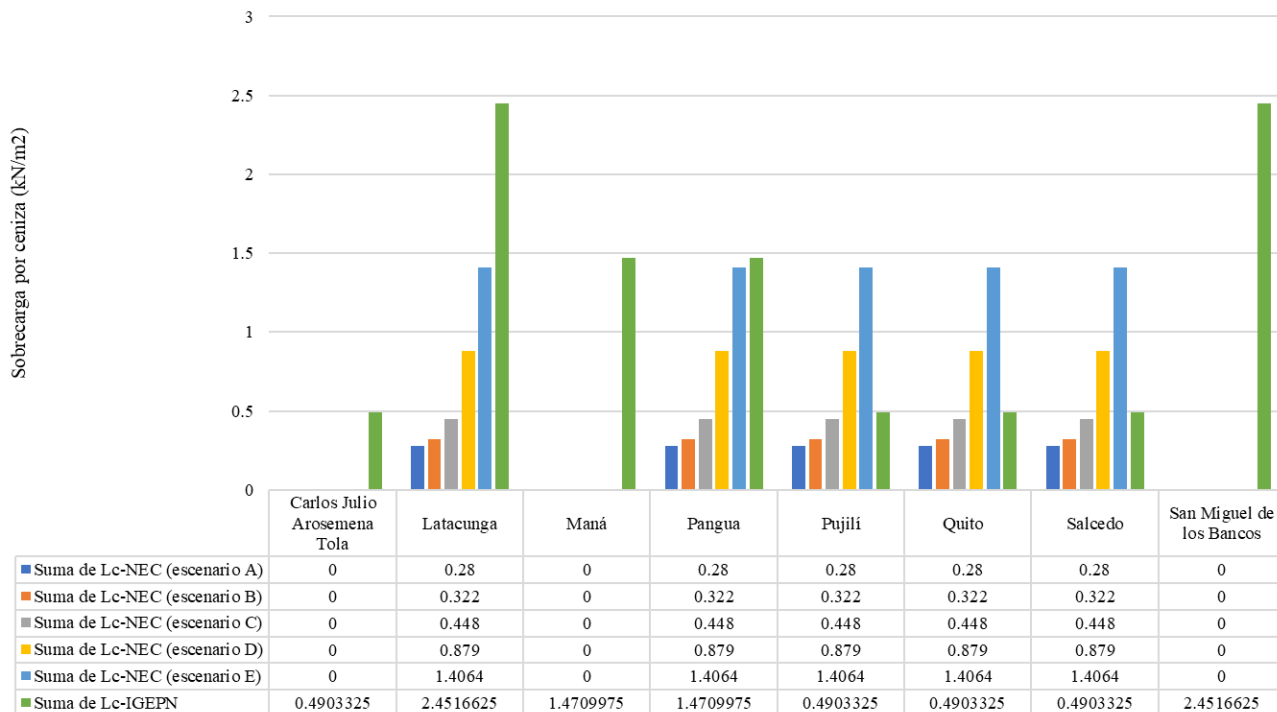


Figura 22. Valores de sobrecarga distribuida en  $\text{kN/m}^2$  (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Cotopaxi

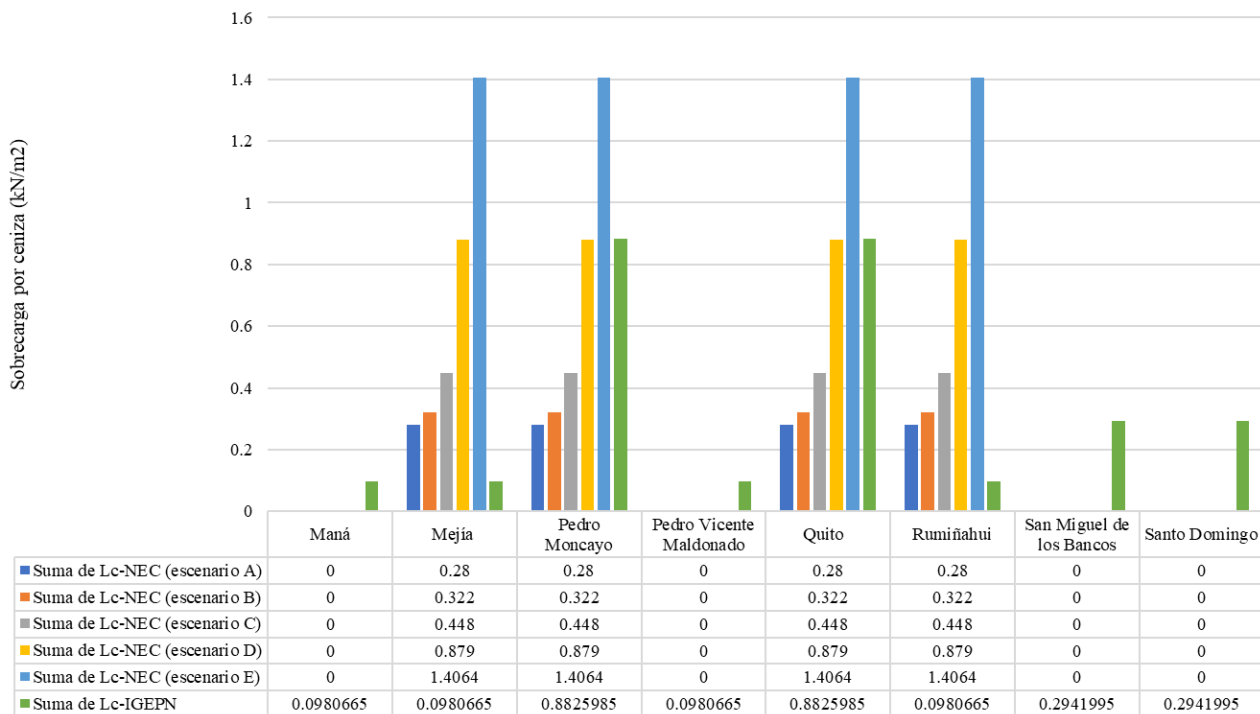


Figura 23. Valores de sobrecarga distribuida en  $\text{kN/m}^2$  (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Guagua Pichincha

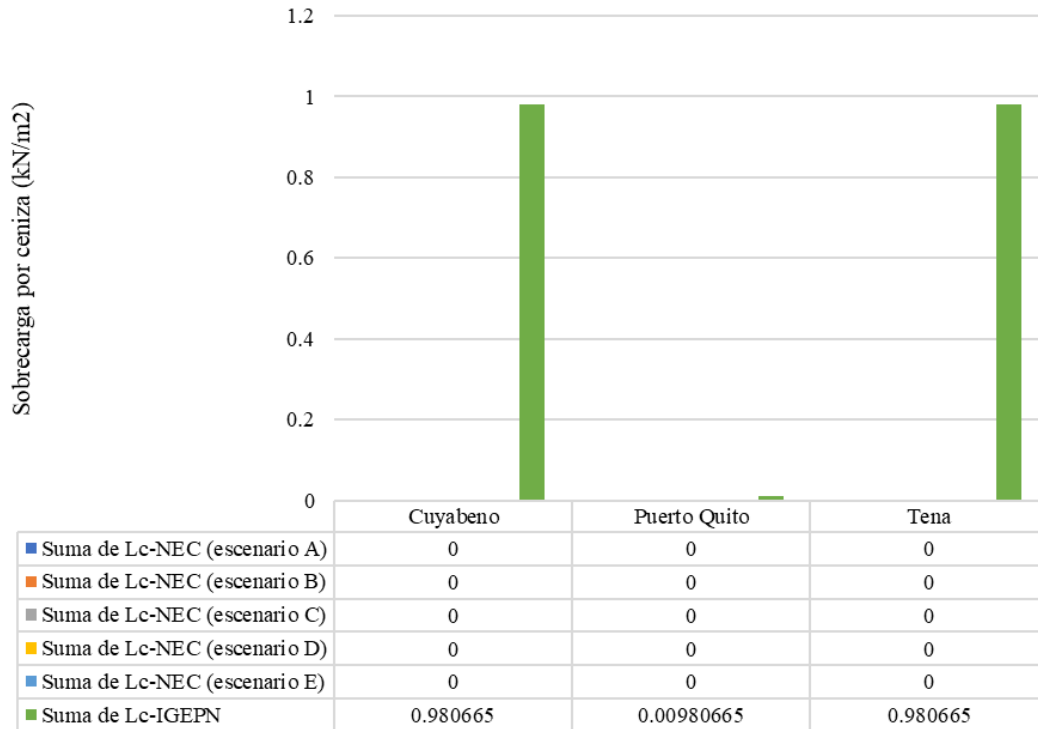


Figura 24. Valores de sobrecarga distribuida en kN/m<sup>2</sup> (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Reventador

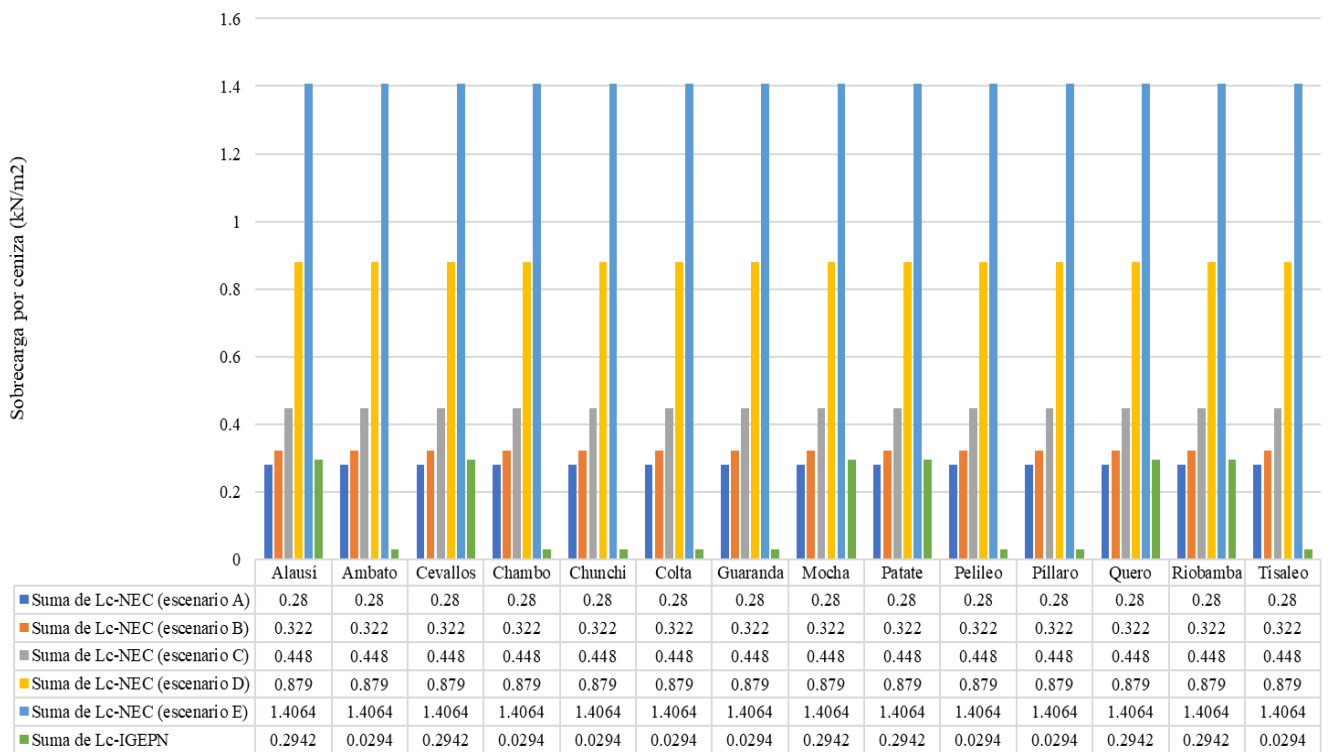


Figura 25. Valores de sobrecarga distribuida en kN/m<sup>2</sup> (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcán Tungurahua

Las sobrecargas de ceniza máximas esperadas por volcán se resumen a continuación, donde se observa que para el Volcán Cotopaxi hay una mayor brecha respecto del Lc-IGEPN.

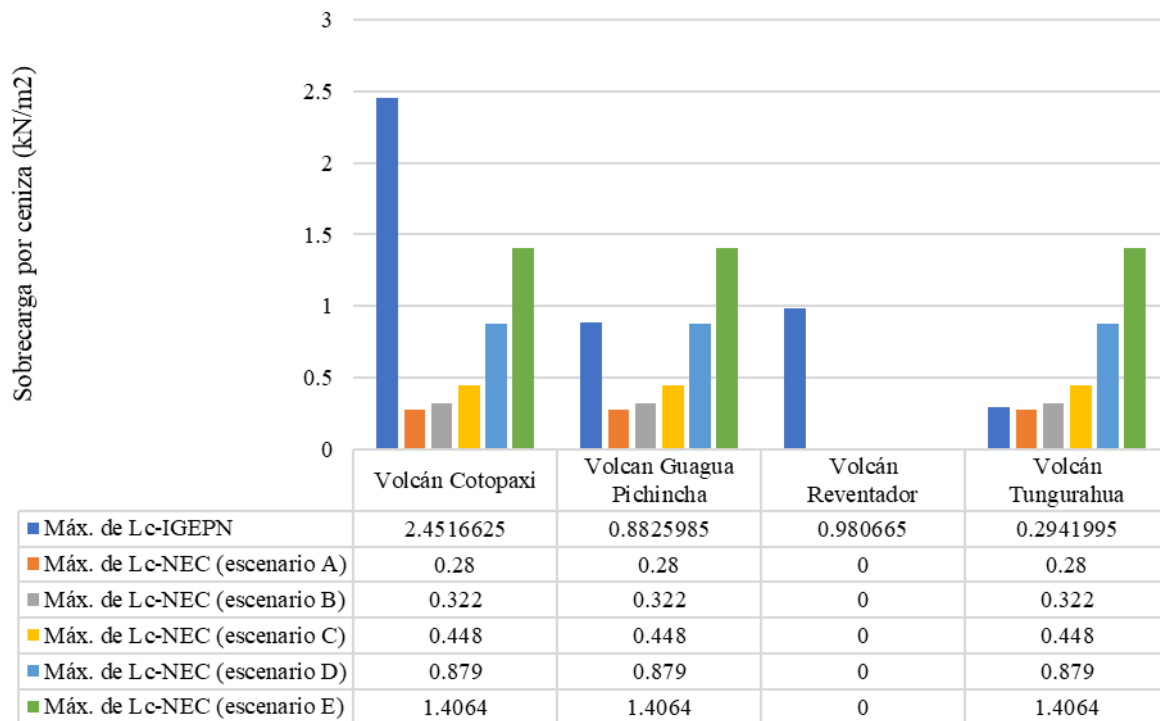


Figura 26. Valores de sobrecarga distribuida en  $kN/m^2$  (L) de acuerdo con la NEC e IGEPN. Volcanes de estudio

### 5.3 Análisis comparativo

Se observa una variabilidad significativa entre los dos métodos de cálculo de la sobrecarga de ceniza en cubiertas. En esta sección se describe dicha variabilidad mediante probabilidades están basadas en un conteo de casos en los que hay sobreestimación, subestimación y similitud entre ambos métodos de cálculo.

En promedio, las sobrecargas Lc-NEC sobrepasan el valor de Lc-IGEPN en 551%, mínimo -100% y máximo 4680%. De hecho, la probabilidad de que el valor de Lc-NEC sobrepase el de Lc-IGEPN, causando sobreestimación, es de 46%. Sin embargo, la probabilidad de subestimación, donde Lc-NEC está por debajo del Lc-IGEPN, es de 43%. Por último, la probabilidad de que haya una coincidencia razonable entre los métodos (variación entre ambos es menor que 10%) es de tan solo del 11%.

El Volcán Tungurahua es el que presenta el mayor número de casos de sobreestimación con la NEC (70 casos, 83% del total), mientras que el Volcán Cotopaxi presenta el mayor número de casos de subestimación con la NEC (40 casos, 75% del total). Los volcanes Tungurahua y Guagua Pichincha tienen la mayor probabilidad de sobreestimación mediante la NEC (con 83% y 30%, respectivamente), mientras que los volcanes Cotopaxi y Reventador presentan la mayor probabilidad de subestimación mediante la NEC (con 75% y 100%, respectivamente). Estas probabilidades se ilustran en el siguiente gráfico:

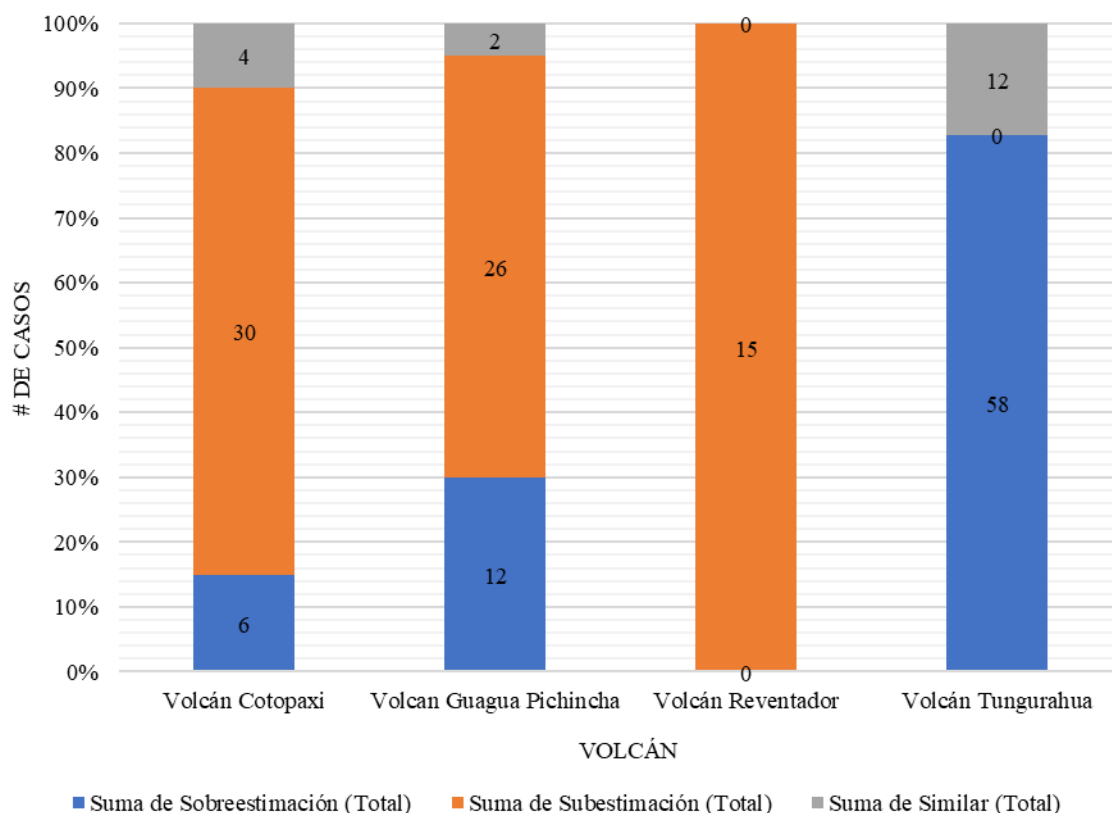


Figura 27. Casos de sobreestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por volcán.

Las causas de subestimación pueden ser variadas. Por ejemplo, el volcán Reventador presenta una subestimación del 100 % porque los cantones expuestos están por debajo de 1000 msnm, que hace que según la NEC no es necesario prevenir la caída de ceniza. En el caso del volcán Cotopaxi, la causa puede ser que este es un volcán muy peligroso que puede arrojar una cantidad grande de ceniza y simplemente las disposiciones de la NEC no brindan la suficiente seguridad para los cantones expuestos. El efecto inverso a éste puede ser la causa de la

subestimación de la sobrecarga para cantones expuestos a la caída de ceniza de los volcanes Tungurahua y Guagua Pichincha.

Por otro lado, se observa que en los cantones de la Amazonía y Sierra hay una probabilidad cierta, del 100%, de que se tenga una subestimación de la sobrecarga mediante el uso de la NEC. La razón es que el código NEC-SE-CG solo impone una restricción a la reducción de carga viva en territorios con elevación mayor que 1000 metros sobre el nivel del mar, que demuestra que dicha disposición no genera protección para territorios de menor altura que están expuestos a esta amenaza.

En el caso de la Sierra, hay un 52% de probabilidad de que la aplicación de la NEC sobreestime la sobrecarga por ceniza, y un presenta un 35% de que la subestime. Aunque la sobreestimación brinda seguridad, tampoco es lo más deseable dado que puede conllevar al sobredimensionamiento y, por lo tanto, al encarecimiento de las estructuras. En la Amazonía y en la Costa la probabilidad de subestimación es total, 100%. Esto se debe a que los cantones en esas regiones están a una elevación inferior a 1000msnm, por lo que la NEC no prevé una sobrecarga de protección por ceniza. Como resumen, se ilustran las probabilidades por región del Ecuador en el siguiente gráfico:

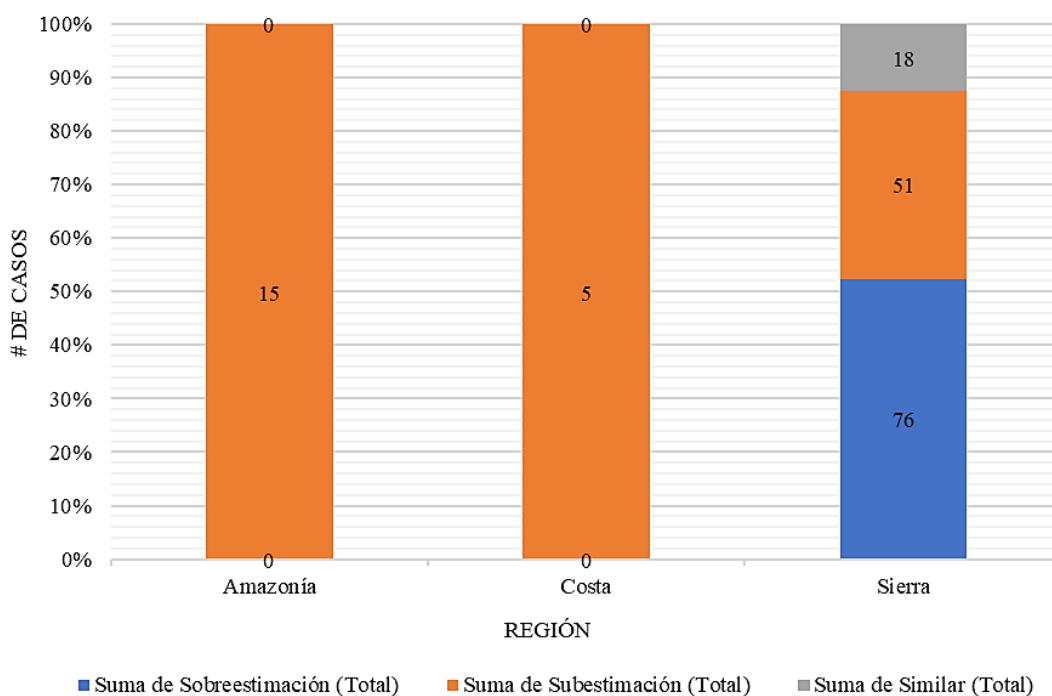


Figura 28. Casos de sobreestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por región.

Finalmente, se puede observar que las losas para jardinería o patios de reunión tienen la mayor probabilidad de sobrestimación (un 64%) cuando se aplica la NEC, mientras que las cubiertas con pendiente nula o del 50% tienen la probabilidad de tener la sobrecarga subestimada, con un 52%. Esta diversidad de probabilidades se debe a que el factor de reducción por pendiente,  $R_2$ , es mayor cuando la pendiente de la cubierta se incrementa. Para el caso de losas de cubierta, las sobrecargas por la ocupación que pueden tener son considerablemente menores, por lo que el cálculo de la reducción de sobrecarga resulta en valores generalmente menores que la sobrecarga de ceniza basada en datos vulcanológicos. Dichas probabilidades se ilustran a continuación:

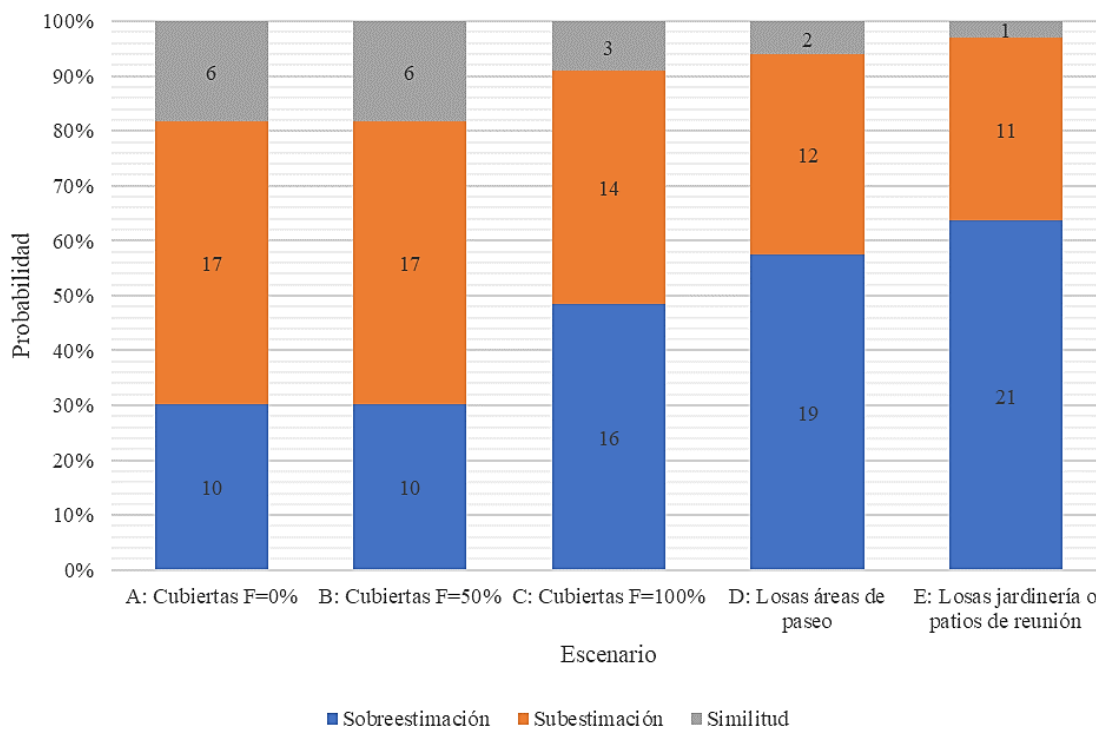


Figura 29. Casos de sobrestimación, subestimación y similitud entre Lc-NEC y Lc-IGEPN por escenario.

## 6 CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

- La evidencia presentada, demuestra que bajo la elaboración y uso de mapas probabilísticos y semi probabilísticos se realizó la estimación de carga viva por caída de ceniza para los volcanes de estudio. Obteniendo así, el valor máximo de 2.4516 kN/m<sup>2</sup> correspondiente al volcán Cotopaxi. Según la aplicación de la NEC, se plantearon distintos escenarios, el mayor valor correspondiente al escenario E: cubiertas destinadas en jardinería o patios de reunión con un valor de 1.4064 kN/m<sup>2</sup> para los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha y Tungurahua. Cabe recalcar que el volcán Reventador presentó valores nulos de acuerdo con la aplicación de la NEC; sin embargo, mediante el uso de los mapas probabilísticos se obtuvo el valor de 0.9806 kN/m<sup>2</sup>.
- La investigación ha demostrado que la ceniza de los volcanes Cotopaxi, Guagua Pichincha, Reventador y Tungurahua representan una amenaza para las cubiertas de las edificaciones ubicadas en los cantones cercanos a los mismos, por lo que se mantienen en continuo monitoreo por parte del IGEPN. Además, la dirección predominante de la ceniza para los volcanes de estudio es principalmente hacia el oeste desde su cráter, afectando ciudades como Cuenca, Loja y ciudades costeras, como Guayaquil. Sin embargo, el código NEC-SE-CG, delimita únicamente la restricción a la reducción de sobrecarga en cubiertas únicamente a la región andina.
- En base a la información obtenida, se elaboraron mapas de acuerdo con la amenaza volcánica cantonal, umbral de ceniza y flujo de vientos. De esta manera se determinaron los siguientes valores.

**Tabla 12** Cantidad de ceniza por umbral y por volcán con su respectivo VEI

Volcanes	Umbral de ceniza		
	Primer Umbral (mm)	Segundo Umbral (mm)	Tercer Umbral (mm)
<b>El índice de explosividad volcánica (VEI)</b>	VEI ≥ 4	VEI 2-3	VEI 1-2
Volcán Guagua Pichincha	90	30	10

Volcán Cotopaxi	> 250	50 - 250	< 50
Volcán Tungurahua		30	1 - 3
Volcán Reventador	> 100	> 10	1

En el volcán Guagua Pichincha los cantones que presentan mayor cantidad de ceniza son Quito ( $0,88\text{kN/m}^2$ ) y Pedro Moncayo ( $0,88\text{kN/m}^2$ ); correspondientes al volcán Cotopaxi son San Miguel de los Bancos ( $2,45\text{kN/m}^2$ ) y Latacunga ( $2,45\text{kN/m}^2$ ), a diferencia del volcán Tungurahua que mantiene un rango entre cada uno de los cantones cercanos a esté de  $0,03$  y  $0,29\text{ kN/m}^2$ . Finalmente, en el volcán Reventador son Tena ( $0,98\text{kN/m}^2$ ) y Cuyabeno ( $0,98\text{kN/m}^2$ ).

- A partir de la investigación precedente, es posible sostener que el servicio geológico de Estados Unidos presenta gran énfasis a la caída de ceniza y nieve en cubiertas, estableciendo que la densidad suelta de depósitos de ceniza oscila entre  $500$  y  $1500\text{ kg/m}^3$ , que en promedio es igual a  $1\text{kgf/m}^2$  por cada milímetro de espesor de ceniza. Este valor es consistente con la conversión de  $1\text{mm}$  a  $1\text{kgf/m}^2$  que utiliza el IGEPN. Estos datos son de gran relevancia para el desarrollo de la carga por ceniza en cubiertas, mismo que fue usado para la cantidad de ceniza en los cantones de estudio del Ecuador.
- Tras el análisis comparativo expuesto, podemos afirmar que existe gran variabilidad de resultados entre ambos métodos aplicados. El volcán Reventador presenta la mayor probabilidad ( $100\%$ ) de subestimación entre los valores obtenidos mediante la NEC (Lc-NEC) y los mapas probabilísticos y semi probabilísticos (Lc-IGPEN); mientras que la probabilidad por región es del  $100\%$  para la Amazonia y Costa. Según los distintos escenarios propuestos aquellos que presentan mayor subestimación, son cubiertas planas, inclinadas y curvas con pendiente nula o del  $50\%$  con un valor del  $52\%$ . Las cubiertas destinadas para áreas de paseo y jardinería o patios de reunión presentan una sobreestimación del  $58\%$  y  $64\%$ . Cada uno de los datos obtenidos varían de acuerdo con la elevación de cada cantón, en este caso según el código NEC-SE-CG solo se establece restricción a la reducción de carga viva en superficies que superen los  $1000$  metros sobre el nivel del mar, por lo tanto, la NEC no considera que se requiera protección a superficies que no superen los  $1000\text{ msnm}$ .

## 6.2 *Recomendaciones*

- El estudio ha demostrado que es de vital importancia no delimitar la carga de ceniza únicamente a la región andina, puesto que cantones fuera de la región también son afectados. Es por ello, que se recomienda realizar una zonificación basada en los estudios vulcanológicos disponibles, al menos para los volcanes activos del país.
- Este estudio se ha enfocado exclusivamente a la estimación de carga viva por ceniza proveniente de erupciones volcánicas que son eventos naturales poco frecuentes. Los eventos hidrometeorológicos son mucho más frecuentes, especialmente debido al cambio climático, y su incidencia en la seguridad estructural puede ser considerable, por lo que se recomienda realizar un estudio de carga viva por granizo, asimismo, fundamentado en el riesgo.
- La investigación reveló en el análisis comparativo que existió una probabilidad de subestimación de un porcentaje significativo para los distintos escenarios. Sin embargo, para las cubiertas destinadas para propósitos especiales, la NEC-SE-CG, no asigna un valor específico como al resto de cubiertas. Se recomienda realizar un estudio previo a este tipo de cubiertas para implementar un valor a la misma.
- A partir de a la evidencia recolectada de las buenas prácticas internacionales, se ha demostrado que es necesario considerar los valores de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y carga (kPa) para la ceniza seca sin compactar como para la ceniza compactada húmeda, ya que la lluvia y el viento influyen en la misma. Es por ello que se recomienda realizar un estudio detallado de los volcanes más activos del Ecuador tomando en cuenta estas consideraciones.

## 7 Bibliografía

- Alberto Caselli, M. L. (2011). Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas . En M. L. Alberto Caselli, *Manual de procedimientos ante caída de cenizas volcánicas* (pág. 52).
- Bourquin J, S. P. (2019). Mapa de los peligros potenciales del volcán Reventador . Quito, Ecuador.
- CORPOSSO. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras. En CORPOSSO, *Evaluación de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras* (pág. 535). Pasto: Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 entre el Fondo nacional de Calamidades y la Corporación OSSO.
- Douglas., J. (2007). Modelado de la vulnerabilidad física en la evaluación del riesgo de amenazas naturales. En D. J, *Peligros Earth Syst* (págs. 283-288). Ciencia 7.
- Egred, J. (s.f.). *Un día como hoy*. Obtenido de Un día como hoy: <http://www.igepn.edu.ec/un-dia-como-hoy?tmpl=component>
- El Comercio. (14 de Marzo de 2021). *Miles afectados por lluvias y caída de ceniza en Ecuador*. Obtenido de Miles afectados por lluvias y caída de ceniza en Ecuador: <https://www.dw.com/es/miles-afectados-por-lluvias-y-ca%C3%ADda-de-ceniza-en-ecuador/a-56866821>
- Fernández, G. (s.f.). *Rosa de los vientos*. Obtenido de Rosa de los vientos: <http://www.etitudela.com/profesores/gcf/orientacioncartografia/02e5c29c8e0ff3209/02e5c29c8e10a3613/index.html>
- G. Wilson, T. W. (2014). Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica. *ELSEVIER*, 1-32.
- Gemma Gómez Castillo, M. E. (2017). Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo. *Revista Geográfica* 158, 9.
- IGEPN, I. G. (2022). *Amenaza Volcánica*. Obtenido de Amenaza Volcánica: <https://www.igepn.edu.ec/amenaza-volcanica>
- IG-EPN, I. I. (2019). Mapa de peligros volcánicos potenciales del volcán Guagua Pichincha . Quito, Ecuador.
- INGEMMET, I. m. (2022). *Tipos de erupciones*. Obtenido de Tipos de erupciones: [http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page\\_id=102](http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=102)
- INGEOMINAS. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad de cubiertas de viviendas expuestas a la caída de de cubiertas de viviendas expuestas a la caída de. En INGEOMINAS, *Evaluación de la vulnerabilidad de cubiertas de viviendas*

*expuestas a la caída de de cubiertas de viviendas expuestas a la caída de* (pág. 96).  
Pasto.

- López, O. (1997). Evaluación de la resistencia estructural de las cubiertas de las edificaciones ubicadas en la zona de influencia del volcán Galeras. En O. López, *Evaluación de la resistencia estructural de las cubiertas de las edificaciones ubicadas en la zona de influencia del volcán Galeras* (pág. 102). Pasto: INGEOMINAS.
- Loughlin C. Susan, S. S. (2015). *Global Volcanic Hazards and Risk*. UNISDR.
- MIDUVI. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción. Cargas (No sísmicas). NEC-SE-CG*. Quito: MIDUVI.
- Patricia A. Mothes, P. E. (2019). Mapa regional de amenazas volcánicas potenciales del volcán Cotopaxi. Quito, Ecuador.
- Ponce, C. D. (22 de Septiembre de 2020). *Daños en 80 000 hectáreas en balance inicial y Chimborazo, Bolívar, Los Ríos y Guayas, las más golpeadas con caída de ceniza del Sangay*. Obtenido de Daños en 80 000 hectáreas en balance inicial y Chimborazo, Bolívar, Los Ríos y Guayas, las más golpeadas con caída de ceniza del Sangay: <https://notimundo.com.ec/danos-en-80-000-hectareas-en-balance-inicial-y-chimborazo-bolivar-los-rios-y-guayas-las-mas-golpeadas-con-caida-de-ceniza-del-sangay/>
- Program, S. I. (2013). *Latest Activity Reports*. Obtenido de Latest Activity Reports: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=352020&vtab=Weekly>
- Roberto Armando, P. P. (2017). *Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán galeras*. Bogotá.
- Samaniego. P, L. P.-L. (2019). Mapa de los peligros potenciales del volcán Tungurahua. Quito, Ecuador.
- Slutz, R. (1980). *Elements of Solar Architecture*. Obtenido de SKAT Publication: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms0s.htm#Bibliograf%C3%ADa>
- Spence, R. K. (2005). Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. En R. K. Spence, *Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. Natural Hazards and Earth System Sciences* (págs. 477-494).
- Susan C., L. S. (2015). *Global Vlcanic Hazards and Risk*. UNISDR.
- Tadini, A. (2021). Mapas probabilísticos de peligro de caída de tefra para los volcanes Cotopaxi y Guagua Pichincha (Ecuador) con cuantificación de la incertidumbre. *JGR Solid Earth*, 2-29.

- Tadini, A. (2021). *Tephra Fallout Probabilistic Hazard Maps for Cotopaxi and Guagua Pichincha Volcanoes (Ecuador) With Uncertainty Quantification*. Italia: JGR Solid Earth.
- Theofilos Toulkeridis, M. T. (2021). *Ceniza volcánica como precursor de la infección por SARS-CoV-2 entre poblaciones susceptibles en Ecuador: un análisis basados en imágenes satelitales y exceso de mortalidad*. Quito: ResearchGate.
- Torres, R. (2001). Vulnerabilidad estructural de edificaciones de uso general ante eventos eruptivos del volcán Galeras en su zona de influencia. En INGEOMINAS, *Vulnerabilidad estructural de edificaciones de uso general ante eventos eruptivos del volcán Galeras en su zona de influencia* (pág. 122). Pasto.
- Toulkeridis, E. A. (2018). *El rol de las fuerzas armadas en la gestión y prevención de riesgos: logros y retos*. Quito: ResearchGate.
- University, S. D. (13 de Febrero de 2012). *How Volcanoes Work: Variability of Eruptions*. Obtenido de How Volcanoes Work: Variability of Eruptions: [https://geology.sdsu.edu/how\\_volcanoes\\_work/Variability.html](https://geology.sdsu.edu/how_volcanoes_work/Variability.html)
- USGS, S. G. (2015). *Impactos de cenizas volcánicas y mitigación*. Obtenido de Impactos de cenizas volcánicas y mitigación: [https://volcanoes.usgs.gov/volcanic\\_ash/density\\_thickness.html](https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/density_thickness.html)
- Volentik, A. C. (2015). *Riesgos de caída de tefra en el Aeropuerto Internacional de Quito (Ecuador)*. Quito: Springer.
- Winckell, A. (1997). Los grandes rasgos del relieve en el Ecuador. En A. Winckell, *Los grandes rasgos del relieve en el Ecuador* (pág. 3). Quito: CEDIG.
- Zuccaro, G. C. (2008). Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius. En G. C. Zuccaro, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (págs. 416-453).

## ANEXOS

**Tabla 13.** Características geográficas y cálculo de Lc-IGEPN y Lc-NEC (kN/m<sup>2</sup>) para cada volcán.

Volcanes	Cantones	Provincia	Elevación (m)	Región	Lc-IGEPN	AT (m2)	Condición $K_{LL} * AT > 35 \text{ m}^2$ para elementos estructurales		Cumple / No cumple	
							$K_{LL}$ (sólo losas)	$K_{LL} * AT$ (m2)		
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	2854	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	Mejía		2192	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	Pedro Moncayo		2537	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	Pedro Vicente Maldonado		628	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	Rumiñahui		2971	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	San Miguel de los Bancos		944	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
	Maná		Cotopaxi	742	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Santo Domingo		Santo Domingo de los Tsáchilas	555	Costa	0.00	100	1	100	Cumple
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	944	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	

	Quito		2854	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Maná	Cotopaxi	742	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Pangua		1723	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Pujilí		2886	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Salcedo		2651	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Latacunga		2773	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Carlos Julio Arosemena Tola		Napo	609	Amazonía	0.00	100	1	100
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	2597	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Cevallos	Chimborazo	2885	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Mocha		3266	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Patate		2496	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Quero		3106	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Pelileo		2587	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Píllaro		2855	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Tisaleo		3164	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Riobamba		2745	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Alausí		2740	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Chambo		2906	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Chunchi		2496	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
	Colta		3403	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
Guaranda	Bolívar	2591	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple	
Volcán Reventador	Tena	Napo	521	Amazonía	0.00	100	1	100	Cumple
	Cuyabeno	Sucumbíos	237	Amazonía	0.00	100	1	100	Cumple

	Puerto Quito	Pichincha	300	Sierra	0.00	100	1	100	Cumple
--	--------------	-----------	-----	--------	------	-----	---	-----	--------

**Factores de reducción para cubiertas planas, inclinadas y curvas**

**A: Carga viva no reducida (kN/m<sup>2</sup>)**

Volcanes	Cantones	Provincia	R1	R2	R2	R2	L	L	L	L	L
				(F=0%)	(F=50%)	(F=100%)	(escenario A)	(escenario B)	(escenario C)	(escenario D)	(escenario E)
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Mejía		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Pedro Moncayo		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Pedro Vicente Maldonado		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Rumiñahui		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	San Miguel de los Bancos		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Maná		Cotopaxi	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8

Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Quito		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Maná	Cotopaxi	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Pangua		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Pujilí		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Salcedo		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Latacunga		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Cevallos	Chimborazo	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Mocha		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Patate		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Quero		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Pelileo		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Píllaro		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Tisaleo		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Riobamba		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Alausí		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Chambo		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Chunchi		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Colta		0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
Guaranda	Bolívar	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8	

Volcán Reventador	Tena	Napo	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Cuyabeno	Sucumbíos	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8
	Puerto Quito	Pichincha	0.6	1	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	3	4.8

**B: Carga viva reducida (kN/m<sup>2</sup>)**

Volcanes	Cantones	Provincia	Lr (escenario A)	Lr (escenario B)	Lr (escenario C)	Lr (escenario D)	Lr (escenario E)
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Mejía		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Pedro Moncayo		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Pedro Vicente Maldonado		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Rumiñahui		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	San Miguel de los Bancos		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Maná		Cotopaxi	0.42	0.378	0.252	2.121
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936

Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Quito		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Maná	Cotopaxi	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Pangua		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Pujilí		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Salcedo		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Latacunga	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936	
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Cevallos	Chimborazo	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Mocha		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Patate		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Quero		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Pelileo		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Píllaro		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Tisaleo		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Riobamba		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Alausí		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Chambo		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Chunchi		0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Colta	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936	
Guaranda	Bolívar	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936	

Volcán Reventador	Tena	Napo	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Cuyabeno	Sucumbíos	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936
	Puerto Quito	Pichincha	0.42	0.378	0.252	2.121	3.3936

---

**C=A-B: Reducción de carga viva no permitida para prevenir caída de granizo o ceniza (kN/m<sup>2</sup>)**

---

Volcanes	Cantones	Provincia	Lc-NEC (escenario A)	Lc-NEC (escenario B)	Lc-NEC (escenario C)	Lc-NEC (escenario D)	Lc-NEC (escenario E)
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Mejía		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Pedro Moncayo		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Pedro Vicente Maldonado		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Rumiñahui		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	San Miguel de los Bancos		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Maná		Cotopaxi	0.00	0.00	0.00	0.00

	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Quito		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Maná	Cotopaxi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pangua		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Pujilí		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Salcedo		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Latacunga	0.28	0.32	0.45	0.88	1.41	
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Cevallos	Chimborazo	0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Mocha		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Patate		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Quero		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Pelileo		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Píllaro		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Tisaleo		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Riobamba		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Alausí		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41

	Chambo		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Chunchi		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Colta		0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
	Guaranda	Bolívar	0.28	0.32	0.45	0.88	1.41
Volcán Reventador	Tena	Napo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Cuyabeno	Sucumbíos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Puerto Quito	Pichincha	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**D=(C-X)/X: Variación reducción NEC vs. Carga de ceniza (%)**

Volcanes	Cantones	Provincia	Cubiertas planas, inclinadas y curvas (F=0%)	Cubiertas planas, inclinadas y curvas (F=50%)	Cubiertas planas, inclinadas y curvas (F=100%)	Cubiertas destinadas para áreas de paseo	Cubiertas destinadas en jardinería o patios de reunión.
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	-68%	-64%	-49%	0%	59%
	Mejía		186%	228%	357%	796%	1334%
	Pedro Moncayo		-68%	-64%	-49%	0%	59%
	Pedro Vicente Maldonado		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

	Rumiñahui		186%	228%	357%	796%	1334%
	San Miguel de los Bancos		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Maná	Cotopaxi	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Quito		-43%	-34%	-9%	79%	187%
	Maná		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Pangua		-81%	-78%	-70%	-40%	-4%
	Pujilí	Cotopaxi	-43%	-34%	-9%	79%	187%
	Salcedo		-43%	-34%	-9%	79%	187%
	Latacunga		-89%	-87%	-82%	-64%	-43%
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Cevallos		-5%	9%	52%	199%	378%
	Mocha	Chimborazo	-5%	9%	52%	199%	378%
	Patate		-5%	9%	52%	199%	378%
	Quero		-5%	9%	52%	199%	378%

	Pelileo		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Píllaro		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Tisaleo		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Riobamba		-5%	9%	52%	199%	378%
	Alausí		-5%	9%	52%	199%	378%
	Chambo		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Chunchi		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Colta		852%	994%	1423%	2888%	4680%
	Guaranda	Bolívar	852%	994%	1423%	2888%	4680%
Volcán Reventador	Tena	Napo	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Cuyabeno	Sucumbíos	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
	Puerto Quito	Pichincha	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%

### Casos de sobreestimación

Volcanes	Cantones	Provincia	Sobreestimación (escenario A)	Sobreestimación (escenario B)	Sobreestimación (escenario C)	Sobreestimación (escenario D)	Sobreestimación (escenario E)	Sobreestimación (Total)
	Quito	Pichincha	0	0	0	0	1	1
	Mejía		1	1	1	1	1	5

Volcán Guagua Pichincha	Pedro Moncayo		0	0	0	0	1	1
	Pedro Vicente Maldonado		0	0	0	0	0	0
	Rumiñahui		1	1	1	1	1	5
	San Miguel de los Bancos		0	0	0	0	0	0
	Maná	Cotopaxi	0	0	0	0	0	0
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	0	0	0	0	0	0
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	0	0	0	0	0	0
	Quito		0	0	0	1	1	2
	Maná		0	0	0	0	0	0
	Pangua		0	0	0	0	0	0
	Pujilí	Cotopaxi	0	0	0	1	1	2
	Salcedo		0	0	0	1	1	2
	Latacunga		0	0	0	0	0	0
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	0	0	0	0	0	0	

Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	1	1	1	1	1	5
	Cevallos	Chimborazo	0	0	1	1	1	3
	Mocha		0	0	1	1	1	3
	Patate		0	0	1	1	1	3
	Quero		0	0	1	1	1	3
	Pelileo		1	1	1	1	1	5
	Píllaro		1	1	1	1	1	5
	Tisaleo		1	1	1	1	1	5
	Riobamba		0	0	1	1	1	3
	Alausí		0	0	1	1	1	3
	Chambo		1	1	1	1	1	5
	Chunchi		1	1	1	1	1	5
	Colta		1	1	1	1	1	5
	Guaranda		Bolívar	1	1	1	1	1
Volcán Reventador	Tena	Napo	0	0	0	0	0	0
	Cuyabeno	Sucumbíos	0	0	0	0	0	0
	Puerto Quito	Pichincha	0	0	0	0	0	0

**Casos de subestimación**

<b>Volcanes</b>	<b>Cantones</b>	<b>Provincia</b>	<b>Subestimación (escenario A)</b>	<b>Subestimación (escenario B)</b>	<b>Subestimación (escenario C)</b>	<b>Subestimación (escenario D)</b>	<b>Subestimación (escenario E)</b>	<b>Subestimación (Total)</b>
<b>Volcán Guagua Pichincha</b>	Quito	Pichincha	1	1	1	0	0	3
	Mejía		0	0	0	0	0	0
	Pedro Moncayo		1	1	1	0	0	3
	Pedro Vicente Maldonado		1	1	1	1	1	5
	Rumiñahui		0	0	0	0	0	0
	San Miguel de los Bancos		1	1	1	1	1	5
	Maná	Cotopaxi	1	1	1	1	1	5
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	1	1	1	1	1	5

Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	1	1	1	1	1	5
	Quito		1	1	0	0	0	2
	Maná	Cotopaxi	1	1	1	1	1	5
	Pangua		1	1	1	1	0	4
	Pujilí		1	1	0	0	0	2
	Salcedo		1	1	0	0	0	2
	Latacunga		1	1	1	1	1	5
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	1	1	1	1	1	5	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	0	0	0	0	0	0
	Cevallos	Chimborazo	0	0	0	0	0	0
	Mocha		0	0	0	0	0	0
	Patate		0	0	0	0	0	0
	Quero		0	0	0	0	0	0
	Pelileo		0	0	0	0	0	0
	Píllaro		0	0	0	0	0	0
	Tisaleo		0	0	0	0	0	0
	Riobamba		0	0	0	0	0	0
	Alausí		0	0	0	0	0	0
	Chambo		0	0	0	0	0	0
	Chunchi		0	0	0	0	0	0
	Colta		0	0	0	0	0	0
Guaranda	Bolívar	0	0	0	0	0	0	

Volcán Reventador	Tena	Napo	1	1	1	1	1	5
	Cuyabeno	Sucumbíos	1	1	1	1	1	5
	Puerto Quito	Pichincha	1	1	1	1	1	5

### Casos similares

Volcanes	Cantones	Provincia	Similar (escenario A)	Similar (escenario B)	Similar (escenario C)	Similar (escenario D)	Similar (escenario E)	Similar (Total)
Volcán Guagua Pichincha	Quito	Pichincha	0	0	0	1	0	1
	Mejía		0	0	0	0	0	0
	Pedro Moncayo		0	0	0	1	0	1
	Pedro Vicente Maldonado		0	0	0	0	0	0
	Rumiñahui		0	0	0	0	0	0
	San Miguel de los Bancos		0	0	0	0	0	0

	Maná	Cotopaxi	0	0	0	0	0	0
	Santo Domingo	Santo Domingo de los Tsáchilas	0	0	0	0	0	0
Volcán Cotopaxi	San Miguel de los Bancos	Pichincha	0	0	0	0	0	0
	Quito		0	0	1	0	0	1
	Maná	Cotopaxi	0	0	0	0	0	0
	Pangua		0	0	0	0	1	1
	Pujilí		0	0	1	0	0	1
	Salcedo		0	0	1	0	0	1
	Latacunga		0	0	0	0	0	0
Carlos Julio Arosemena Tola	Napo	0	0	0	0	0	0	
Volcán Tungurahua	Ambato	Tungurahua	0	0	0	0	0	0
	Cevallos	Chimborazo	1	1	0	0	0	2
	Mocha		1	1	0	0	0	2
	Patate		1	1	0	0	0	2
	Quero		1	1	0	0	0	2
	Pelileo		0	0	0	0	0	0
	Píllaro		0	0	0	0	0	0
	Tisaleo		0	0	0	0	0	0
	Riobamba		1	1	0	0	0	2

	Alausí		1	1	0	0	0	2
	Chambo		0	0	0	0	0	0
	Chunchi		0	0	0	0	0	0
	Colta		0	0	0	0	0	0
	Guaranda	Bolívar	0	0	0	0	0	0
Volcán Reventador	Tena	Napo	0	0	0	0	0	0
	Cuyabeno	Sucumbíos	0	0	0	0	0	0
	Puerto Quito	Pichincha	0	0	0	0	0	0