

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

ELABORACIÓN DEL MAPA DE PELIGROS PARA EL COMPLEJO VOLCÁNICO ATACAZO - NINAHUILCA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

OPCIÓN: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

PROAÑO ALTAMIRANO ANTONIO PATRICIO

antoppa18@hotmail.com

antonio.proano01@epn.edu.ec

DIRECTORA: DRA. HIDALGO TRUJILLO SILVANA IVONNE

shidalgo@igeptn.edu.ec

Quito, Junio 2018

DECLARACIÓN

Yo, Antonio Patricio Proaño Altamirano, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente

PROAÑO ALTAMIRANO ANTONIO PATRICIO

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Antonio Patricio Proaño Altamirano, bajo mi supervisión.

Dra. Hidalgo Trujillo Silvana Ivonne

DIRECTORA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, Dra. Silvana Hidalgo, por su gran apoyo, motivación y consejos para la realización de este trabajo, además de ser una guía para la formación académica a lo largo del trayecto de la vida universitaria.

Al Dr. Benjamín Bernard, por su atención, perseverancia y paciencia brindada todos estos años, además de sus excelentes consejos para la vida personal, académica y profesional, que son de gran necesidad para toda persona.

Al Dr. Daniel Andrade, por su gran ayuda para la realización del presente trabajo, al igual que la ayuda y consejos brindados en clases y salidas de campo a lo largo de la carrera de Geología.

A Jean-Luc Le Pennec y Francisco Vásconez por su gran ayuda y contribución muy significativa al presente trabajo de titulación.

A mi Familia, quienes han sido un eje fundamental en toda mi vida, siempre aconsejándome e incentivándome para auto superarme y crecer tanto como persona y profesional, brindándome su confianza y amor incondicional siempre; también a los tesoros de mi vida, mis sobrinos, Camila, Valeria, David y Kiara, los cuales son la luz que me alumbran desde que llegaron a este mundo.

A E. Pazmiño, J. Poma y A. León, mis grandes amigos con quienes hemos compartido tantos momentos felices y tristes; y a quienes les debo demasiado para ser la persona que hoy soy.

A K. Moreno, R. Lasluisa, K. Acuña, S. Santamaría, M. Cupuerán, G. Mantilla, E. Cruz, K. Morales, grandes amigos que he podido hacer a lo largo de la carrera de Geología y los cuales me han aconsejado en muchos momentos importantes de mi vida.

A S. Almeida, D. Sierra, M. Encalada, M. Córdova, E. Telenchana, P. Espín, amigos y compañeros en mi época de prácticas en el IG-EPN.

A E. Arcos, D. Herrera, D. Villacrés, P. Carvajal, A. Armas, amigos que se han hecho a lo largo de estos años y que han llegado a formar parte muy importante de mi vida.

DEDICATORIA

A mis abuelitos: Rodrigo y Luis.

Mis abuelitas: Dina y Teresa.

Mi hermosa familia:

Antonio, Gladys, Jenny, Elizabeth

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. General	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Alcance.....	4
1.5. Metodología.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Productos volcánicos asociados	6
2.2.1. Domos de Lava	6
2.2.2. Corrientes de densidad piroclástica	8
2.2.2.1. Flujo de bloques y ceniza (FBC)	8
2.2.2.2. Flujo de pómez y ceniza (FPC)	9
2.2.3. Caídas piroclásticas	11
2.2.4. Lahares	13
2.3. Marco geodinámico actual	15
2.4. Volcanismo cuaternario de los andes ecuatorianos.....	18
2.5. Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN)	21
2.5.1. Aspectos Geográficos	21
2.5.1.1. Localización y vías de acceso	21
2.5.1.2. Topografía y red hidrográfica.....	22
2.5.1.3. Clima y vegetación	23
2.5.2. Aspectos Geológicos	23

3. INFORMACIÓN EXISTENTE Y METODOLOGÍA	27
3.1. Introducción.....	27
3.2. Información existente de las últimas erupciones.....	27
3.2.1. Índice de explosividad volcánica.....	27
3.2.2. Volumen de depósitos.....	32
3.2.3. Edad y periodo de recurrencia eruptiva	32
3.3. Metodologías a utilizarse.....	34
3.3.1. Simulaciones de caída por medio de Ash3d.....	34
3.3.1.1. Contexto teórico.....	34
3.3.1.2. Distribución Suzuki.....	34
3.3.1.3. Advección	35
3.3.1.4. Difusividad turbulenta	36
3.3.1.5. Depositación.....	36
3.3.1.6. Parámetro de la fuente	37
3.3.1.7. Ingreso de datos en Ash3d	37
3.3.2. Simulaciones de FBC y lahares secundarios.....	39
3.3.2.1. Contexto teórico.....	39
3.3.2.1.1. MATLAB R2016a	39
3.3.2.1.2. VolcFlow	40
3.3.2.1.3. Reología y parámetros reológicos.....	42
3.3.2.2. Procedimientos para determinación de volumen de FBC.....	43
3.3.2.2.1. Definición de volumen de FBC	43
3.3.2.2.2. Reconstrucción de domos para FBC.....	43
3.3.2.2.3. Cálculo del volumen del FBC.....	46
3.3.2.3. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares	47
3.3.2.3.1. Definición de volumen de Lahar Secundario.....	47
3.3.2.3.2. Determinación de Drenajes y Volúmenes para Lahares Secundarios.....	47
3.3.2.4. Procedimientos para simulaciones en Volcflow.....	49
3.3.2.4.1. Preparación del modelo digital de elevación DEM	49
3.3.2.4.2. Definición de la fuente.....	51
3.3.2.4.3. Ingreso de datos en VolcFlow.....	52
3.3.2.4.4. Extracción de espesores y georreferenciación	56
3.3.3. Trabajos de campo	58
3.3.3.1. Mapeo de ignimbritas.....	58

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	60
4.1. Simulaciones de ceniza.....	60
4.1.1. Definición de escenarios eruptivos	60
4.1.2. Parámetros eruptivos de fuente	61
4.1.3. Obtención de datos y procesamiento.....	61
4.1.4. Resultados	65
4.1.4.1. Simulaciones numéricas.....	65
4.1.4.2. Trabajo de campo.....	67
4.1.5. Discusión.....	69
4.2. Simulaciones de Flujos de Bloques y Ceniza (FBC)	72
4.2.1. Definición de escenarios eruptivos	72
4.2.2. Resultados (Mapa de peligro por FBC).....	73
4.2.3. Discusión.....	76
4.3. Mapeo de Ignimbritas.....	77
4.3.1. Estudio de los depósitos	77
4.3.2. Resultados (Mapa de peligro por flujos de pómez y ceniza)	80
4.3.2.1. Elaboración del mapa geológico de ignimbritas	80
4.3.2.2. Elaboración del mapa de peligros por Corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza	81
4.3.3. Discusión.....	82
4.4. Simulaciones de lahares secundarios.....	84
4.4.1. Resultados (Mapa de peligros por lahares secundarios).....	87
4.4.2. Discusión.....	90
4.5. Elaboración del Mapa Final de Peligros.....	91
4.5.1. Discusión.....	94
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1. Conclusiones.....	96
5.2. Recomendaciones.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
ANEXOS.....	109

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. a. Complejo de domos con fumarolas activas en lo alto del volcán Soufrière Hills, Montserrat (Sigurdsson, 2015); b. Complejo de domos Santiaguito, Guatemala (Sigurdsson, 2015); c. Esquema de colapso de domo en una explosión, produciendo corrientes de densidad piroclástica (Kusky, 2008).....	7
Figura 2.2. Corrientes de densidad piroclástica producidos por colapso parcial de domo en el volcán Soufrière Hills, Montserrat; a. Corriente de densidad piroclástica activa; b. Depósito e impacto producido por corrientes de densidad piroclásticas. (Brown & Andrews, 2015).....	9
Figura 2.3. a. Columna eruptiva pliniana del Mount St. Helens, USA en 1980 (Cioni et al., 2015); b. Depósito de Ignimbrita del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo et al., 2008). c. Esquema representativo del colapso de una columna pliniana y formación de corrientes de densidad piroclástica tipo ignimbritas (Kusky, 2008).	10
Figura 2.4. a. Columna eruptiva del volcán Tungurahua en Febrero de 2014 (Narváez D.); b. Depósito y afectación por caída de piroclastos en los alrededores del volcán Tungurahua (Parra X.).....	13
Figura 2.5. Lahares provocados en distintas erupciones volcánicas; a. Lahar producido en el volcán Ruapehu, Nueva Zelanda en el 2007; b. Depósito de material posteriormente removilizado por lluvias, causando lahares secundarios posterior a la erupción del 2010 en el volcán Eyjafjallajökull; c. Lahar capaz de llevar bloques de tamaño métrico en el volcán Mayón, Filipinas en 1984. (Vallance & Iverson, 2015)....	14
Figura 2.6. Contexto Geodinámico Regional del Ecuador. (Gutscher et al., 1999).....	17
Figura 2.7. Proceso de subducción debajo del Ecuador. (Bourdon et al., 2003).	16
Figura 2.8. Mapa generalizado de fallas activas del Ecuador (Alvarado et al., 2016)..	19
Figura 2.9. Mapa de Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental (Bernard & Andrade, 2011).	19
Figura 2.10. Localización del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Mapa Base: ESRI OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community).....	21
Figura 2.11. Red Hidrogáfica del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Mapa Base: ESRI OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community).....	23
Figura 2.12. Unidades Volcánicas del complejo Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo, 2006).	25
Figura 2.13. Complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca; a. Vista aérea desde el Sur-orientado; b. Vista desde el borde norte del cráter. (Hidalgo, 2006)(Monzier M. 2004). ..	26

Figura 3.1. a. Escala del Índice de Explosividad Volcánica VEI (Newhall & Self, 1982). b. Propuesta de modificación de escala VEI (Houghton et al., 2013).....	28
Figura 3.2. Columna estratigráfica general de los periodos eruptivos del volcán Ninahuilca y su relación con otros episodios volcánicos (Almeida, 1996).	30
Figura 3.3. Columna estratigráfica generalizada de los productos del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Maruri, 1993).	31
Figura 3.4. a. Ejemplo de malla usada por Ash3d sobre Europa; b. Proyección de la malla usada por Ash3d sobre Alaska; c. Columna de celdas mostrando la distribución vertical del material. (Mastin et al., 2013).	34
Figura 3.5. Espacio de trabajo principal de Ash3d.	39
Figura 3.6. Espacio del estado y resultados de las simulaciones.	39
Figura 3.7. Cálculos resumidos realizados por el algoritmo de VolcFlow.	42
Figura 3.8. Procedimiento de reconstrucción de domos; a. Extracción de curvas de nivel; b. Reconstrucción de curvas de nivel; c. Asignación de característica 3D; d. Creación de TIN.	44
Figura 3.9. a. Topografía original del domo; b. Topografía reconstruida con volumen máximo; c. Topografía reconstruida con volumen mínimo.	45
Figura 3.10. Procedimiento de cálculo numérico de volumen; a. Diferencia de superficies TIN; b. Visualización del valor numérico del área y volumen.	46
Figura 3.11. a. Apertura del DEM en formato .tiff; b. Cambio de formato a .grd.	50
Figura 3.12. Procedimiento por seguir para definir la fuente; a. Creación de Hillshade; b. Importación de Hillshade a Photoshop; c. Cambio en la configuración de visualización de Hillshade; d. Creación de capa y representación del área fuente; e. Cambio de color del área; f. Exportación del archivo de la fuente.	52
Figura 3.13. Ejemplo del script adicional a VolcFlow.....	53
Figura 3.14. Procedimiento de ingreso de datos en VolcFlow; a. Inicio de la interfaz de VolcFlow; b. Despligue y ajuste de la vista preliminar de la simulación; c. Vista preliminar final de la simulación; d. Inicio y progreso de la simulación en VolcFlow.	55
Figura 3.15. Edición de color de base en el proceso de extracción de espesores de las simulaciones de flujos de bloques y ceniza.	55
Figura 3.16. Espesores del depósito de un flujo de bloques y ceniza modificado con transparencia.	55
Figura 3.17. Superposición de los espesores con el hillshade del área.....	55
Figura 4.1. Proceso de medición de azimut de dispersión de ceniza.	62
Figura 4.2. Ploteo Azimut vs Tiempo para cada escenario de caída de ceniza considerado.	62

Figura 4.3. Ejemplo del trazo de isolínea de 3 mm de depósito en el escenario 1.....	64
Figura 4.4. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 1 (VEI 1-2).	66
Figura 4.5. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 2 (VEI 3-4).	66
Figura 4.6. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 3 (VEI 5-6).	67
Figura 4.7. Espesores de caídas en la zona de las Antenas del Atacazo (Pto 02); a. Depósitos N5 y N6; b. Depósitos N4 y N3.	68
Figura 4.8. Depósitos de caída y secuencia de lahares secundarios en la zona de La Ecuatoriana (Pto 03).	68
Figura 4.9. Depósitos de caídas en el sector de La Carchacha; a. Depósito de caída del evento eruptivo N6 (Pto 05); b. Depósito de caída del evento eruptivo N6 (Pto 04).....	69
Figura 4.10. Depósitos de caída en el sector de Alóag (Pto 06).....	69
Figura 4.11. Mapa de depósito de FBC – escenario 2.	56
Figura 4.12. Mapa de depósito de FBC – escenario 3.	57
Figura 4.13. Mapa de peligros por FBC – escenario 2.	57
Figura 4.14. Mapa de peligros por FBC – escenario 3.	76
Figura 4.15. Depósitos de ignimbrita N6 del Ninahuilca; a. Depósito de ignimbrita de varios metros cortados por la carretera Aloag-Sto Domingo; b. Macrocomponentes de la ignimbrita; c. Estratificación cíclica interna dentro de la ignimbrita N6; d. Estructuras internas presentes; e. Lítico decimétrico de pómez microvesiculada en la ignimbrita; f. Depósito de 15 metros de ignimbrita.....	79
Figura 4.16. Mapa geológico preexistente; a. Digitalización de los límites de ignimbritas preexistentes; b. Visualización en 3D del depósito de ignimbritas en Google Earth Pro.	80
Figura 4.17. Mapa de Peligros por Corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de pómez y ceniza.	82
Figura 4.18. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco nororiental.	88
Figura 4.19. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco occidental.	89
Figura 4.20. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco suroriental.....	89
Figura 4.21. Mapa final de peligros potenciales asociados al CVAN.	92
Figura 4.22. Poster explicativo de los peligros asociados al CVAN.	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de piroclastos por su tamaño (White & Houghton, 2006).....	11
Tabla 2. Volúmenes de los depósitos de caída y corrientes de densidad piroclástica del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo et al., 2008).	32
Tabla 3. Cálculo aproximado del periodo de reposo para CVAN (Hidalgo, 2006).	33
Tabla 4. Ejemplo de parámetros que se pueden variar en VolcFlow.	41
Tabla 5. Drenajes definidos para simulaciones de Lahares secundarios	48
Tabla 6. Parámetros eruptivos utilizados en las simulaciones de caída de ceniza.	61
Tabla 7. Azimut promedio para la dispersión de ceniza de los escenarios 2 y 3.	63
Tabla 8: Datos de validación del escenario 2 de caídas de ceniza.	71
Tabla 9. Alcances promedios de FBC para cada escenario	73
Tabla 10. Zonas de seguridad extras para los escenarios 2 y 3 de FBC	75
Tabla 11. Parámetros utilizados para definición del área de peligros por FPC	81
Tabla 12: Cálculo de volumen de agua para cada cuenca hidrográfica	85
Tabla 13: Cálculo de volumen de sólidos para cada cuenca hidrográfica.....	86
Tabla 14: Volumen de lahar en cada cuenca hidrográfica.....	86

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Mapa de Ubicación de puntos de muestreo	110
ANEXO 2. Columnas Estratigráficas levantadas	111
ANEXO 3. Zonas potencialmente afectadas por caída de piroclastos	120
ANEXO 4. Mapas de peligro de caída de piroclastos en función de las direcciones del viento en el año.....	129
ANEXO 5. Base de datos de simulaciones realizadas para FBC.....	134
ANEXO 6. Mapas de espesores realizados para FBC.....	138
ANEXO 7. Localidades potencialmente afectadas por lahares secundarios.....	148
ANEXO 8. Alcances aproximados de lahares secundarios y sus áreas afectadas aproximadas.....	149
ANEXO 9. Movilización de lahares secundarios en cada drenaje y simulaciones realizadas.....	150

RESUMEN

El Arco Volcánico Ecuatoriano está formado de al menos 84 centros de emisión de menos de 5 Millones de años. Muchos de estos han presentado erupciones de gran magnitud, evidenciada por la extensión de sus depósitos; uno de estos precisamente lo constituye el Complejo Volcánico Atacazo – Ninahuilca (CVAN).

El mapa de peligros volcánicos constituye una herramienta guía para la planificación territorial y de obras estratégicas del estado. Siendo este el caso, el mapa de peligros del CVAN es fundamental, ya que sus erupciones pasadas, de gran magnitud, han generado distintos productos; sobre los cuales en la actualidad se establecen zonas densamente pobladas (Quito, Cutuglahua, Tambillo, Tandapi), obras de infraestructura importantes (captación hidroeléctrica Toachi – Pilatón) o se encuentran principales vías de transporte y comunicación terrestre del país (carretera Panamericana y vía Alóag – Sto. Domingo).

Para la elaboración del mapa de peligros volcánico se ha realizado mapeo geológico del principal depósito del CVAN (ignimbritas) y simulaciones numéricas para el resto de productos volcánicos (flujos de bloques y cenizas, caídas de tefra, lahares secundarios), con su respectiva validación mediante trabajo de campo. Los escenarios eruptivos considerados para el CVAN incluyen pequeñas erupciones para las caídas de tefra con VEI de 1 o 2 y grandes erupciones para los demás productos volcánicos, con VEI de 4 o 5.

Los principales productos del trabajo de campo son el mapa geológico de ignimbritas, columnas estratigráficas en distintos puntos del CVAN y datos para verificación de las simulaciones numéricas realizadas. Las simulaciones numéricas nos brindan una representación aproximada de la ocurrencia y extensión de algunos productos volcánicos como flujos de bloques y cenizas, caídas de tefra y lahares secundarios, así como la delimitación aproximada de las zonas afectadas por estos productos.

El producto final del presente trabajo es un poster, en el cual se describe las metodologías utilizadas para la realización de los distintos mapas de cada producto, los mapas de los distintos escenarios o zonas cada producto volcánico y el mapa de peligros volcánicos resumido, considerando el peor escenario más probable.

ABSTRACT

The Ecuadorian Volcanic Arc is formed for at least by 84 emission centers younger than 5 Million years. Many of these have presented eruptions of great magnitude, evidenced by the extension of their deposits; one of these is precisely the Atacazo - Ninahuilca Volcanic Complex (CVAN).

The volcanic hazard map is a guiding tool for territorial planning and strategic infrastructure of the state. In this case, the hazard map of the CVAN is fundamental, because its eruptions, of great magnitude, have generated different products, and nowadays population (Quito, Cutuglahua, Tambillo, Tandapi), and important infrastructure (Toachi – Pilatón hydroelectric uptake) or major roadways for transportation and terrestrial communication of the country (Panamericana and Alóag – Sto. Domingo roads) are settled on the deposits.

For the elaboration of the volcanic Hazard map, it was necessary geological mapping of the main product of the CVAN (ignimbrites) and numerical simulations for the other volcanic products (block and ash flows, tephra falls, secondary lahars), with the corresponding validation during field work. The eruptive scenarios considered for the CVAN include small eruptions for tephra falls with VEI of 1 or 2 and large eruptions for the other volcanic products, with VEI of 4 or 5.

The main products of the field work are the geological map of ignimbrites, stratigraphic columns in different points of the CVAN and data to verify the numerical simulations. The numerical simulations give us an approximate representation of the occurrence and extension of some volcanic products such as BAF, tephra falls and secondary lahars, also the approximate delimitation of the areas affected by these products.

The final product of this work is a poster, which describes the methodologies used for the realization of the different maps of each volcanic product, the maps for the different scenarios or zones for each volcanic product and the summarized volcanic hazard map, considering the worst case scenario.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El Ecuador continental es un país con una amplia historia volcánica, dada por distintos procesos de subducción desde el Cretácico hasta el Cuaternario (Bourdon et al., 2003; Pratt et al., 2005).

El Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN) es un complejo volcánico potencialmente activo de la Cordillera Occidental del Ecuador, ubicado a 10 km aproximadamente al SO de Quito que está constituido por tres edificios volcánicos: La Carcacha, Atacazo y Ninahuilca, siendo este último el actual centro de emisión (Hidalgo, 2006; Andrade et al., 2012).

En su historia reciente se ha identificado con éxito seis periodos eruptivos, constituidos de erupciones plinianas con caídas de piroclastos, corrientes de densidad piroclástica tipo flujos de pómez y ceniza y emisión de domos de lava de composición dacítica (Almeida, 1996; Andrade et al., 2012), de las cuales las más recientes ocurrieron hace 2.270 y 4.400 años AP (Hidalgo et al., 2008).

Haciendo énfasis en los trabajos previos se tiene la tesis de pregrado del Ing. Washington Maruri (1993), en la cual se realizó un mapeo geológico muy próximo al CVAN, un mapa de peligros volcánicos potenciales del CVAN, caracterización tefrocronológica, petrográfica y química de algunos productos eruptivos y se propuso un modelo de evolución e historia volcánica. Dicho trabajo se lo realizó en base a trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas y ensayos de laboratorio.

Siguiente a esto, se publica el trabajo de Eduardo Almeida (1996), donde se define los eventos eruptivos para el edificio Ninahuilca, se realiza una descripción de los depósitos y se plantea la posible dinámica de sus erupciones.

Posteriormente se tiene la tesis de doctorado de Silvana Hidalgo (2006), en la cual se realiza caracterización de las unidades volcánicas del CVAN, caracterización geoquímica más detallada, dataciones radiométricas para gran parte de los productos volcánicos,

descripción de procesos petrogenéticos de los magmas implicados y un modelo de evolución del CVAN; esta tesis se la realizó con trabajo de campo y trabajo en laboratorio.

Adicionalmente fue publicado un artículo científico, Hidalgo et al., (2008), en donde se documenta la actividad al final del Pleistoceno e inicios del Holoceno en el CVAN, describiendo los depósitos de los eventos eruptivos N1 a N6, anteriormente definidos por Almeida (1996), y calculando los volúmenes aproximados para algunos de estos depósitos; este artículo se lo realizó con trabajo de campo, análisis en laboratorio y simulaciones numéricas.

Finalmente, dentro de los trabajos previos que aportan de manera significativa en cuanto al CVAN, está la tesis de pregrado de la Ing. Angélica Robles (2013), en la cual se realiza la descripción y análisis químicos de algunos productos volcánicos al Sur del Distrito Metropolitano de Quito, siendo algunos de estos depósitos del CVAN.

El área impactada por caída de piroclastos de algunas erupciones del CVAN llega a 1.000 km² (Almeida, 1996); dicha área incluye fuentes de agua, ciudades, carreteras y zonas productivas para el país.

Considerando el pasado eruptivo del CVAN, el peligro de sus productos volcánicos, que los alcances de las corrientes de densidad piroclástica es de 24 km según mapeos previos (Maruri, 1993); es necesario redefinir con herramientas informáticas y de una manera precisa las zonas de peligro para cada producto volcánico asociado al CVAN, con la finalidad de informar y precautelar a las poblaciones cercanas y autoridades correspondientes.

1.2. Justificación

Considerando los amplios avances tecnológicos que han llevado consigo la elaboración de softwares y códigos de simulaciones numéricas, que permiten hacer múltiples y correctas interpretaciones de los dinamismos eruptivos, se han realizado actualizaciones de mapas de peligros para distintos centros volcánicos activos y potencialmente activos en el Ecuador.

Algunos de estos centros volcánicos son los volcanes Tungurahua, Reventador, Cotopaxi y Cayambe; sin embargo, la actualización del mapa de peligros para el complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca no se la ha realizado desde el año 1992.

Para el presente trabajo de titulación se pretende realizar una actualización del mapa de peligros del complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca, utilizando metodologías que incluyen filtrado y validación de datos preexistentes, simulaciones numéricas para distintos fenómenos eruptivos, y mapeo y comprobación de las simulaciones mediante trabajo de campo.

Los resultados del presente trabajo de titulación se verán orientados a la mitigación de desastres naturales mediante la interacción con las comunidades cercanas al complejo volcánico y con las autoridades seccionales para su correcto uso en medidas de prevención y respuesta ante desastres.

De igual manera, uno de los principales justificativos del presente trabajo conlleva la amenaza potencial que representa una erupción del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca para la sociedad en general, y de manera muy específica para la ciudad de Quito.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Elaborar el Mapa de Peligros del complejo Volcánico Atacazo – Ninahuilca para productos como caídas de ceniza, corrientes de densidad piroclástica, lahares secundarios.

1.3.2. Específicos

- Recopilación de información bibliográfica del dinamismo de erupciones del complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca, así como de sus depósitos.
- Definir distintos escenarios eruptivos para el Volcán Ninahuilca en base a su historia.
- Realizar simulaciones para caídas de piroclastos (ceniza y tefra) según los distintos escenarios eruptivos definidos.
- Simular corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de bloques y ceniza por colapso de domo, definiendo volúmenes adecuados.
- Mapear los depósitos de ignimbritas y definir zonas de afectación por corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de pómez y ceniza, correspondientes al evento eruptivo N6 del Volcán Ninahuilca.

- Simular lahares secundarios en las zonas propensas a éstos en los alrededores del volcán.
- Recopilación y combinación de datos de las zonas de afectación de los distintos fenómenos eruptivos.

1.4. Alcance

El alcance de este proyecto es determinar las zonas de peligro para cada producto volcánico evidenciado en la historia eruptiva del CVAN. Esto se realizará en base a simulaciones numéricas para corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de bloques y ceniza, caídas de piroclastos y lahares secundarios; mapeo de depósitos de ignimbritas y su respectiva validación con trabajo de campo. En base a los mencionados estudios se propone:

Realizar un mapa de peligros para cada producto volcánico y combinarlos a escala ideal de visualización (1:200.000) para el peor escenario eruptivo más probable.

Identificar las zonas pobladas, con infraestructura y económicamente de importancia para el país que se encuentran amenazadas en el caso de una erupción del complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca.

1.5. Metodología

La metodología del presente trabajo de investigación de manera simplificada comprende las siguientes etapas:

- Recopilación de información disponible del pasado eruptivo del volcán, analizando datos de geoquímica y petrología.
- Salidas de reconocimiento al campo.
- Simulación numérica para caídas de ceniza utilizando el modelo Ash3d; definiendo distintos escenarios eruptivos posibles para dicho volcán en base a su historia eruptiva.
- Simulación numérica para corrientes de densidad piroclástica (tipo flujo de bloques y ceniza) utilizando el software VolcFlow.

- Mapeo geológico de los depósitos de corrientes de densidad piroclástica (ignimbritas), y de ser posible, toma de datos para posterior verificación de las simulaciones de caídas de ceniza, corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de bloques y ceniza, y lahares secundarios.
- Simulación numérica para lahares secundarios utilizando el software VolcFlow, definiendo adecuadamente las zonas más propensas alrededor del CVAN.
- Elaboración de mapas de peligros individuales para cada producto volcánico.
- Elaboración del mapa final de peligros para el Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

El Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN) es un centro eruptivo que ha tenido un pasado eruptivo reciente (considerando el tiempo geológico) y que es capaz de generar una amplia variedad de productos volcánicos asociados. Esto se ve evidenciado en los depósitos que han dejado las últimas erupciones. Algunos de estos productos volcánicos tienen de un gran alcance y representan una alta peligrosidad para las poblaciones cercanas al CVAN. Considerando lo mencionado, en el presente capítulo se expone los productos volcánicos asociados y demás aspectos relacionados al CVAN.

2.2. Productos volcánicos asociados

2.2.1. Domos de Lava

Los domos de lava son montículos de lava viscosa apilada que se forma por su rápido enfriamiento y desgasificación cuando llega a la superficie de la tierra (Figura 2.1) (Calder et al., 2015). Los domos de lava se forman comúnmente en zonas de ambiente tectónico compresivo y su crecimiento puede darse dentro del cráter de los edificios volcánicos (Figura 2.1.a) o como parte de una zona de complejo cónico (Figura 2.1.b). Su formación se da rápidamente en días o semanas, pero los periodos eruptivos en los cuales estos se forman se pueden extender a años o décadas (Calder et al., 2015). Poseen una amplia tasa de emisión de lava que va desde $0,001 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, creando montículos que van de decenas de metros a pocos kilómetros de diámetro con alturas en el orden de las centenas de metros; y que a su vez, tiene grandes implicaciones en la estabilidad estructural de los mismos (Voight, 2000). Petrográficamente se han clasificado en dos tipos de domos: el primer grupo son domos ricos en vidrio volcánico (domos de obsidiana) con poca cantidad de cristales, estos domos tienen la composición química de riódacita a riolita; y el segundo

grupo son domos ricos en cristales con una matriz que contiene cristales y vidrio volcánico, este segundo grupo tiene un rango de composición química amplio, variando de andesitas basálticas a riolitas (Fink, 1990).

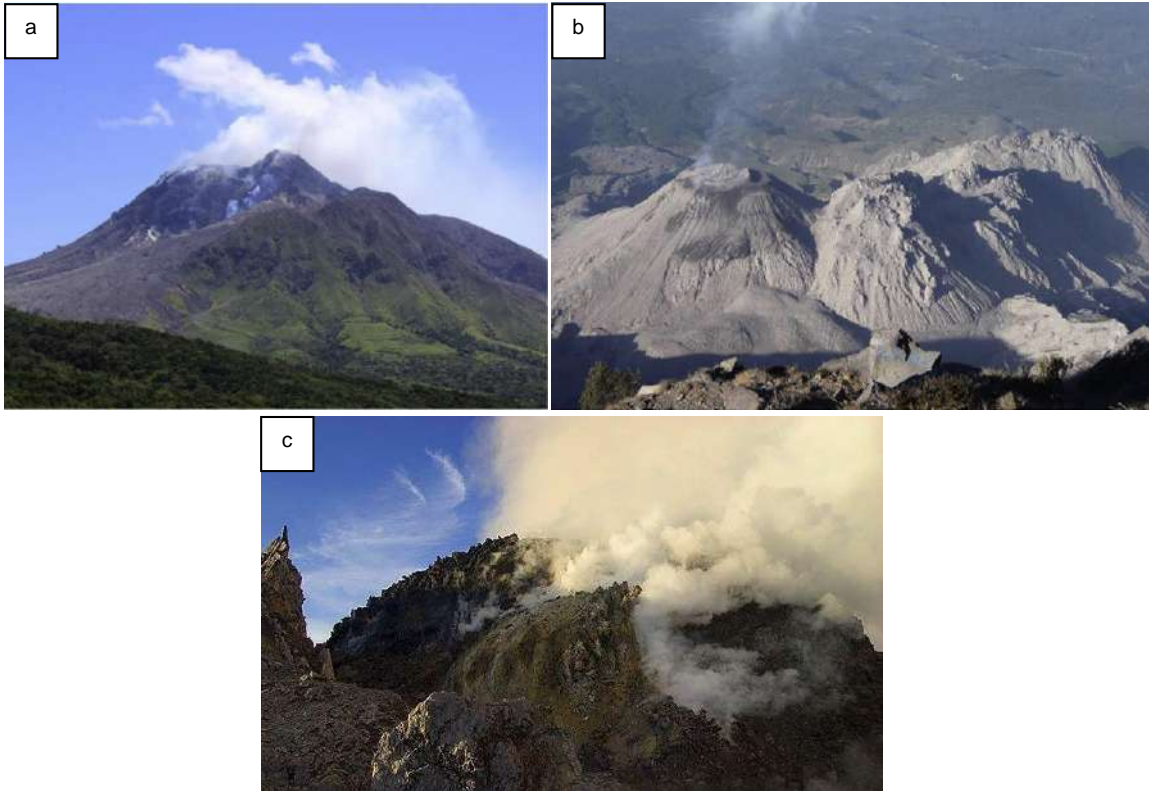


Figura 2.1. *a. Complejo de domos con fumarolas activas en lo alto del volcán Soufrière Hills, Montserrat (Sigurdsson, 2015); b. Complejo de domos Santiaguito, Guatemala (Sigurdsson, 2015); c. Crecimiento de domo volcánico en el volcán Merapi, 2006 (Fotografía: Tom Pfeiffer)(Kusky, 2008).*

En el Ecuador, donde se tiene una gran variedad de composición de los magmas, se ha dado el crecimiento de domos de lava viscosa, ácida, dentro de cráteres como es el caso del volcán Guagua Pichincha; pero también se han formado complejos dómicos como en el volcán Quilotoa y los complejos volcánicos Pululahua, Cotacachi-Cuicocha, Atacazo-Ninahuilca, entre otros (M. Hall, 1977; Santamaria, 2017).

Los peligros asociados a este tipo de producto volcánico se dan en el caso que se produzcan explosiones vulcanianas o dirigidas, donde el crecimiento de los domos y la energía liberada en dichas explosiones, conlleve a una desestabilización del domo y su

posterior colapso, produciendo corrientes de densidad piroclástica de tipo flujo de bloques y ceniza (Charbonnier & Gertisser, 2012).

2.2.2. Corrientes de densidad piroclástica

2.2.2.1. Flujo de bloques y ceniza (FBC)

Los flujos de bloques y ceniza son un subtipo de corrientes de densidad piroclástica (CDP) y se forman principalmente por el colapso gravitacional de domos de lava que pueden ser andesíticos a riolíticos; por el colapso de una columna eruptiva vulcaniana durante una erupción explosiva (Figura 2.2.) o por colapso de columna eruptiva dirigida (Brown & Andrews, 2015). Los volúmenes de los depósitos de estos flujos son relativamente pequeños, en el orden de miles a pocos millones de metros cúbicos y comúnmente tienen un alcance de pocos kilómetros de su fuente, dependiendo de las condiciones topográficas del relieve. Las velocidades de estos flujos dependen de la pendiente por la cual viajen, teniendo velocidades típicas de entre 5 y 20 m/s pero ocasionalmente pueden llegar hasta 100 m/s (Cole et al., 2002) y temperaturas de entre 400 a 600°C (Figura 2.2.a) (Brown & Andrews, 2015). Su deposición se restringe a los valles por donde se transportan, aunque su parte menos densa tipo oleada puede depositarse en zonas más altas. El espesor de sus depósitos puede superar los 100 m en los valles más confinados y pocos metros en un relieve más plano. Su principal diferencia con las ignimbritas es que los depósitos de los flujos de bloques y ceniza son muy densos, con clastos cuyas densidades se encuentran en el rango de 1700 a 2700 kg/m³. Los depósitos son clasto-soportados con pocos o ningún clasto vesiculado juvenil, producto de la desintegración del domo de lava (Brown & Andrews, 2015). También tienen en general poco o mal sorteo, compuestos de bloques que algunas veces superan los 15 m de diámetro en una matriz de ceniza (Charbonnier & Gertisser, 2011; Cole et al., 2002). En la parte proximal del depósito, su granulometría puede llegar a bloques de tamaños métricos; a diferencia de su parte distal de tipo oleada, que están enriquecidas en partículas finas, que incluso pueden llegar a tener estratificación cruzada o estructuras onduladas en formas de dunas (Brown & Andrews, 2015).

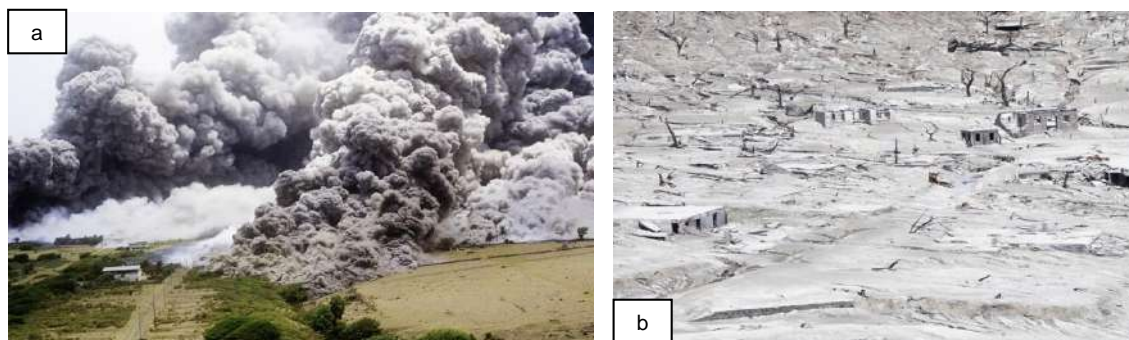


Figura 2.2. Corrientes de densidad piroclástica producidos por colapso parcial de domo en el volcán Soufrière Hills, Montserrat; **a.** Corriente de densidad piroclástica activa; **b.** Depósito e impacto producido por corrientes de densidad piroclásticas. (Brown & Andrews, 2015).

En décadas anteriores se han dado erupciones en varios volcanes alrededor del mundo en las cuales se han producido flujos de bloques y ceniza, como son los casos de los volcanes Soufrière Hills en la Isla Montserrat, Merapi y Monte Sinabung en Indonesia, Colima en México y Unzen en Japón (Calder et al., 2015). Dentro del Ecuador se han dado casos de colapso parcial de domos que generen corrientes de densidad piroclástica, como en los volcanes Guagua Pichincha y Reventador (Bernard et al., 2014; García-Aristizabal et al., 2007; Vallejo & Ramón, 2011).

El peligro asociado a este tipo de fenómeno volcánico yace en el alcance y características del flujo; si se da un gran colapso de domo de lava con volumen grande, tendrá un mayor alcance, pudiendo afectar a los poblados más cercanos al volcán, así como infraestructura y carreteras (M. Hall et al., 2004; S. Vallejo & Ramón, 2011).

2.2.2.2. Flujo de pómez y ceniza (FPC)

Los flujos de pómez y ceniza son un subtipo de corrientes de densidad piroclástica (CDP) que son generados comúnmente cuando en una erupción, la columna eruptiva estromboliana, pliniana o subpliniana, colapsa y se desliza una mezcla de gases, ceniza, fragmentos de roca y material incorporado por los flancos del volcán (Figura 2.3.a y Figura 2.3.c). Los volúmenes de este tipo de corrientes de densidad piroclástica son muy grandes, variando de pocos millones de m³ a centenas o miles de km³ como en las erupciones del complejo volcánico Coranzuli en Argentina con un volumen mínimo de 650 km³ (Seggiaro et al., 1987) y las calderas de Toba y Yellowstone en las cuales los volúmenes superaron los 2.800 y 3.000 km³ respectivamente (Chesner, 2011; Cioni et al., 2015). Pueden alcanzar velocidades muy altas de hasta centenas de m/s que conjuntamente con su gran volumen,

las hacen capaces de sobrepasar barreras topográficas como colinas o montañas, debido a lo cual pueden redefinir la topografía existente; adicionalmente sus temperaturas pueden superar fácilmente los 500°C (Cioni et al., 2015; Colin, 2008). Se caracterizan porque en sus depósitos (ignimbritas) se observa fragmentos de pómez en una abundante matriz de ceniza, que en los valles pueden alcanzar el orden de centenas de metros de espesor (Figura 2.3.b). Dentro de la corriente se puede transportar fragmentos de pómez con densidades de 200-1.000 kg/m³, líticos masivos con densidad superior a 2.000 kg/m³ y clastos escoriaáceos de 1.000-2.000 kg/m³; dando densidades de ignimbritas del orden de 1000-1800 kg/m³ (Cioni et al., 2015; Vasconez, 2015). Sus depósitos son matriz-soportada y pueden presentar estructuras como estratificación planar o cruzada y texturas como gradación normal, inversa o cíclica de sus líticos. Los componentes dentro de una ignimbrita son pómez, líticos poco o muy vesiculados, ceniza fina o gruesa y material incorporado, como material antrópico o madera carbonizada por las altas temperaturas. Dentro de los depósitos de ignimbritas a veces también se suelen presentar más tipos de depósitos de la misma erupción, como los depósitos de caída piroclástica o incluso lentes o capas de material retrabajado (Branney & Kokelaar, 2002; Cioni et al., 2015).

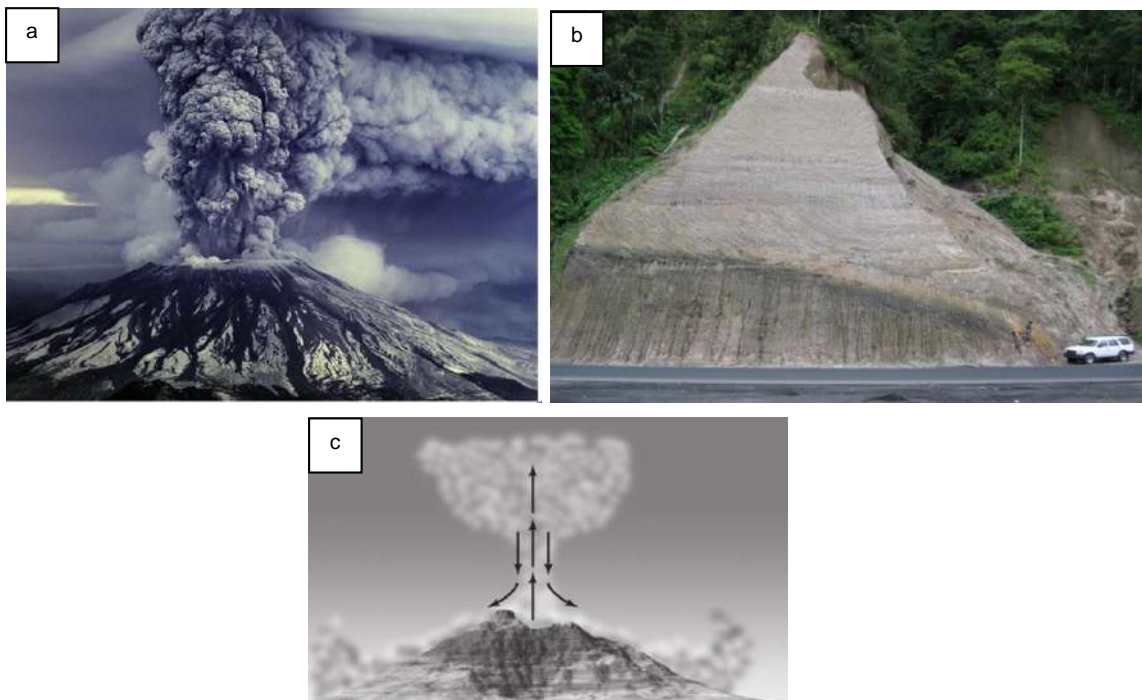


Figura 2.3. **a.** Columna eruptiva pliniana del Mount St. Helens, USA en 1980 (Cioni et al., 2015); **b.** Depósito de Ignimbrita del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo et al., 2008). **c.** Esquema representativo del colapso de una columna pliniana y formación de corrientes de densidad piroclástica tipo FPC (Kusky, 2008).

El peligro asociado con este tipo de fenómeno volcánico es debido a sus características y alcance, ya que puede enterrar, carbonizar todo lo que encuentre a su paso hasta decenas de kilómetros de su fuente, incluso sobrepasando barreras topográficas elevadas. Debido a esto es uno de los mayores peligros en el caso de una erupción volcánica grande como se han registrado anteriormente en el Ecuador en el caso de los volcanes Reventador y Tungurahua (Hall et al., 2004; Samaniego et al., 2011).

2.2.3. Caídas piroclásticas

Es la caída por efecto de la gravedad de fragmentos roca, vidrio volcánico o cristales individuales (piroclastos) que son producidos por la fragmentación magmática y expulsados a la atmósfera durante una erupción explosiva (Figura 2.4.a) (Carey & Bursik, 2015; Le Maitre et al., 2002). La clasificación de estos piroclastos se da en función de su tamaño y se la presenta en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de piroclastos por su tamaño (White & Houghton, 2006).

Tamaño de grano		Depósito volcanoclástico	
phi	mm	Sin consolidar	Litificado (Consolidado)
< -6	> 64	Bloque / Bomba	Brecha
-6 a -4	16 – 64	Lapilli grueso	Toba de lapilli grueso
-4 a -2	4 – 16	Lapilli medio	Toba de lapilli medio
-2 a -1	2 – 4	Lapilli fino	Toba de lapilli fino
-1 a 0	1 – 2	Ceniza muy gruesa	Toba muy gruesa
0 – 1	1/2 – 1	Ceniza gruesa	Toba gruesa
1 – 2	1/4 – 1/2	Ceniza media	Toba media
2 – 3	1/8 – 1/4	Ceniza fina	Toba fina
3 – 4	1/16 – 1/8	Ceniza muy fina	Toba muy fina
> 4	< 1/16	Ceniza extremadamente fina	Toba extremadamente fina

Dependiendo del tamaño de los piroclastos se da su forma de transporte; siendo así:

Tamaño bloque o bomba (> 64 mm): Su emisión se da el momento de una explosión por empuje del gas expulsado, haciendo que salga disparado y posteriormente siga una

trayectoria parabólica o balística, cayendo por gravedad en las cercanías del volcán. También se los denomina fragmentos balísticos o bombas volcánicas y lo constituyen principalmente fragmentos de roca densa (Houghton & Carey, 2015; Le Maitre et al., 2002).

Tamaño lapilli (2-64 mm): Su emisión se da en el momento de una explosión por empuje del gas expulsado, posteriormente asciende en la columna eruptiva debido a su mayor flotabilidad, es transportada por la dirección predominante del viento y posteriormente cae por acción de la gravedad. Este tipo de piroclasto puede recorrer decenas de kilómetros hasta su deposición. Son principalmente fragmentos de roca vesiculada como escorias y pómez (Carey & Bursik, 2015; Le Maitre et al., 2002).

Tamaño ceniza (< 2 mm): Su emisión se da en el momento de una explosión por empuje del gas expulsado, posteriormente asciende por la columna eruptiva por diferencia de densidades con el aire circundante, alcanzando grandes alturas que pueden ser decenas de kilómetros, después llega a la zona más alta denominada zona de sombrilla o paraguas en la cual es transportada horizontalmente por el viento (no aplicable para erupciones grandes) y finalmente cuando el material se ha enfriado lo suficiente empieza a caer nuevamente por contraste de densidad con el aire circundante. Este tipo de piroclasto puede recorrer decenas, centenas o hasta miles de kilómetros antes de caer y depositarse, dependiendo del diámetro de las partículas, su densidad y la altura que hayan alcanzado en la atmósfera. La ceniza está constituida por pequeños fragmentos de rocas que pueden ser densas como líticos rocosos del conducto y fragmentos juveniles vesiculadas como escorias y pómez o no vesiculados; además también puede haber cristales minerales individuales, agregados microcristalinos y fragmentos de vidrio volcánico (Carey & Bursik, 2015; Le Maitre et al., 2002).

Las principales fuerzas que controlan las caídas piroclásticas son la gravedad y la flotabilidad de las partículas, por lo cual sus depósitos tendrán en general un buen sorteo. Otros factores que influyen en las caídas piroclásticas son las densidades de cada fragmento expulsado, dirección y velocidad del viento al momento de la erupción y magnitud de la erupción.

Los peligros asociados a este tipo de fenómeno volcánico se dan por su gran alcance. Los espesores alcanzados pueden ser desde milímetros hasta metros, por lo cual pueden acumularse en infraestructuras provocando su colapso y causando repercusiones en los campos agrícolas, ganaderos y socio-económicos (Zhuhua et al., 2013). En zonas cercanas

al volcán hay un gran impacto por fragmentos balísticos que son de extrema peligrosidad. Adicionalmente para los organismos biológicos su efecto negativo es que impide el crecimiento de la vegetación (Figura 2.4.b) y produce efectos adversos en la salud de animales y humanos (Wilson et al., 2015).

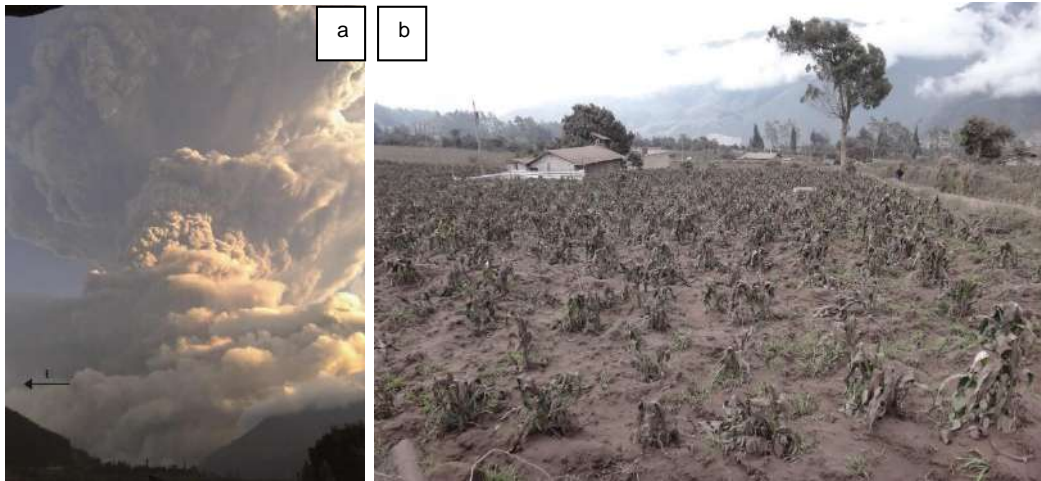


Figura 2.4. a. Columna eruptiva del volcán Tungurahua en Febrero de 2014 (Narváez D.); **b.** Depósito y afectación por caída de piroclastos en los alrededores del volcán Tungurahua (Parra X.).

2.2.4. Lahares

Los lahares son mezclas de material volcánico y agua proveniente de fuertes precipitaciones, ruptura y desbordamiento de un lago en el interior del cráter de un volcán, por el derretimiento del glaciar, por agua atrapada debajo de un glaciar que es posteriormente liberada y por agua de poro del sistema hidrotermal (Figura 2.5.a) (Andrade et al., 2005; Vallance & Iverson, 2015). Estos flujos pueden viajar a velocidades de hasta 100 km/h, avanzan pendiente abajo por los drenajes naturales y en su camino incorporan material suelto e incluso material antrópico, lo cual los hace más grandes y con mayor capacidad destructiva (Vallance & Iverson, 2015). Para que se llegue a formar un lahar en teoría se necesitan de cuatro factores principales: 1. Una fuente de agua; 2. Material volcánico no consolidado como depósitos de corrientes de densidad piroclástica o material de caída piroclástica, que proviene del mismo momento de la erupción o de erupciones pasadas; 3. Topografía con fuertes pendientes, comúnmente mayor a 15° y; 4. Un factor desencadenante que detone el lahar (Vallance & Iverson, 2015). Los lahares formados en el momento de la erupción como resultado directo de este evento se denominan primarios, y son generalmente los más voluminosos, llegando incluso al orden de pocos km³ y

movilizándose distancias de decenas o centenas de kilómetros; mientras que los formados posteriores a una erupción, por la removilización de los depósitos volcánicos (Figura 2.5.b), se denominan lahares secundarios y poseen generalmente poco volumen (exceptuando en rupturas de represamientos o lagos volcánicos) y menor capacidad destructiva en comparación a los primarios. Debido a que los lahares son muy cargados de sedimentos y densos, puede llevar bloques de roca de tamaño métrico (Figura 2.5.c) y destruir bosques, carreteras, incluso viviendas y otras infraestructuras (Andrade et al., 2005; Vallance & Iverson, 2015).



Figura 2.5. Lahares provocados en distintas erupciones volcánicas; **a.** Lahar producido en el volcán Ruapehu, Nueva Zelanda en el 2007; **b.** Depósito de material posteriormente removilizado por lluvias, causando lahares secundarios posterior a la erupción del 2010 en el volcán Eyjafjallajökull; **c.** Lahar capaz de llevar bloques de tamaño métrico en el volcán Mayón, Filipinas en 1984. (Vallance & Iverson, 2015).

El peligro asociado a este tipo de fenómeno es su gran alcance y poder destructivo, ya que destruye y entierra todo lo que esté a su paso. Las zonas ubicadas directamente en los drenajes del volcán son las que corren un mayor riesgo, ya que por ahí desciende el flujo y en el caso que sea de gran volumen que supere a los caudales pico de aquel drenaje, se produce un desbordamiento hacia otras zonas (Gudmundsson, 2015).

2.3. Marco geodinámico actual

El margen Noroccidental de Sudamérica está sometido a distintos esfuerzos, que han cambiado debido a la reorganización de las placas tectónicas (Lonsdale, 2005). Dicha reorganización ocurrió hace 23 My cuando la placa Farallón, de movimiento relativo al NE con respecto a la placa Sudamericana, se fisionó en las placas Cocos y Nazca, de movimientos NE y E con respecto a la Sudamericana respectivamente (Lonsdale, 2005). Dicha ruptura se vio favorecida por la presencia del punto caliente de Galápagos (Pennington, 1981), y como consecuencia la subducción bajo el actual Ecuador pasó de dirección Noreste (Placa Farallón) a netamente Este (Placa Nazca) con una tasa de entre 5 a 7 cm/a (DeMets et al., 1990; Kellogg & Vega, 1995).

Adicionalmente la influencia del punto caliente de Galápagos ha formado un engrosamiento de la corteza de 15 a 19 km en la placa Nazca (Gailler et al., 2007); dicho engrosamiento batimétricamente lo constituye una cadena montañosa submarina, conocida como la Cordillera de Carnegie; la cual, conjuntamente con la placa Nazca, se encuentra siendo subducida bajo Sudamérica en la latitud del Ecuador desde hace 8 My. aproximadamente (Figura 2.6 y Figura 2.7) (Gutscher et al., 1999).

Una gran cantidad de terremotos en el Ecuador, el más grande registrado de magnitud 8.8 grados en la escala de Richter en el año de 1906, son producto de los esfuerzos ejercidos entre las placas Nazca y Sudamericana, e incluso favorecidas por la subducción adicional de la cordillera de Carnegie, cuya prolongación avanza más de 110 km hacia el Este de la fosa de subducción frente al Ecuador (Gutscher et al., 1999). Como consecuencia de la subducción de Carnegie (con gran flotabilidad) también se atribuye un magmatismo adakítico por fusión parcial de corteza oceánica joven y menos densa (Bourdon et al., 2003; Gutscher et al., 1999), llegándose a formar dos o tres etapas de generación de magmas adakíticos en algunos centros volcánicos del arco ecuatoriano (Figura 2.7) (Bourdon et al., 2003).

Otro efecto relevante de la llegada a la fosa de subducción de la cordillera de Carnegie es el desplazamiento del Bloque Nor-Andino o *North Andean Sliver* (segmento de litósfera continental) con movimiento general hacia el NNE, a lo largo de una serie de fallas transpresionales que varían en rumbo de N-S a NE-SO y que se encuentran representadas por el sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) en Ecuador, sistema

de fallas Algeciras-Sibundoy-Chingual en Colombia y continuando con la falla Dolores en Venezuela (Figura 2.8) (Alvarado et al., 2016; Gutscher et al., 1999; Pennington, 1981). Dicho desplazamiento del bloque Nor-Andino se da a una tasa aproximada de 8 a 10 mm/a (Alvarado et al., 2016) y probablemente se ve favorecido por una tasa, de relativamente, rápida subducción entre las Placas Nazca y Sudamericana definidas por la fase tectónica Quechua (Figura 2.6) (Pardo-Casas & Molnar, 1987).

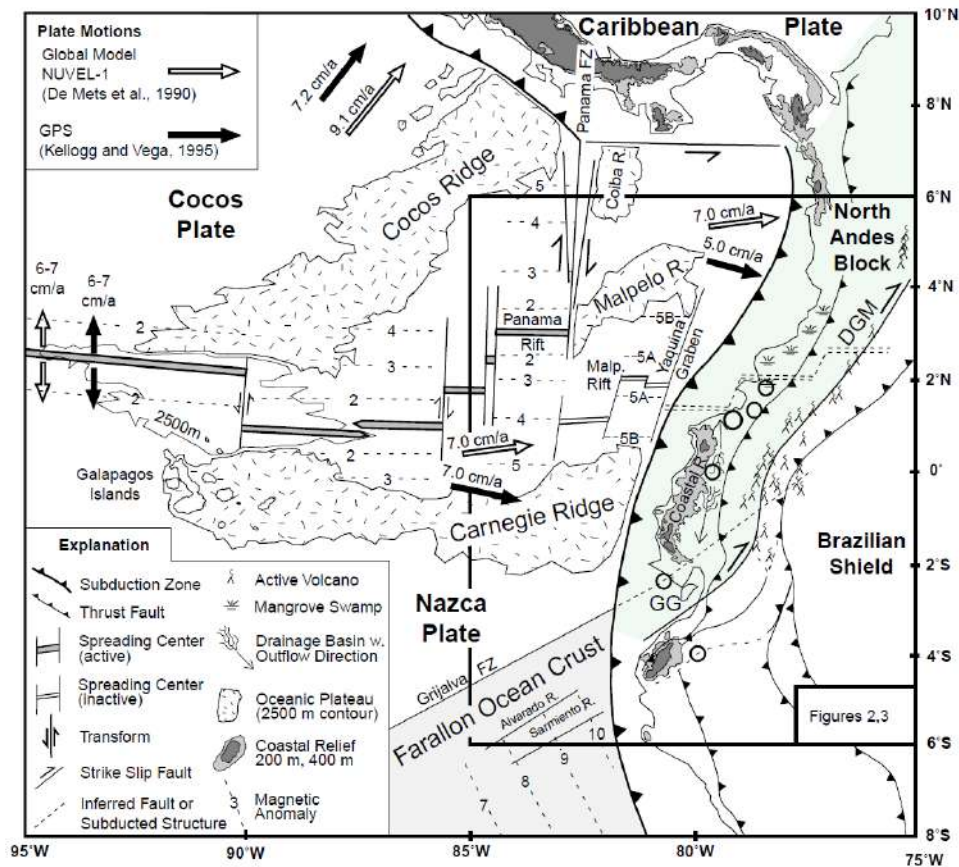


Figura 2.6. Contexto Geodinámico Regional del Ecuador. (Gutscher et al., 1999).

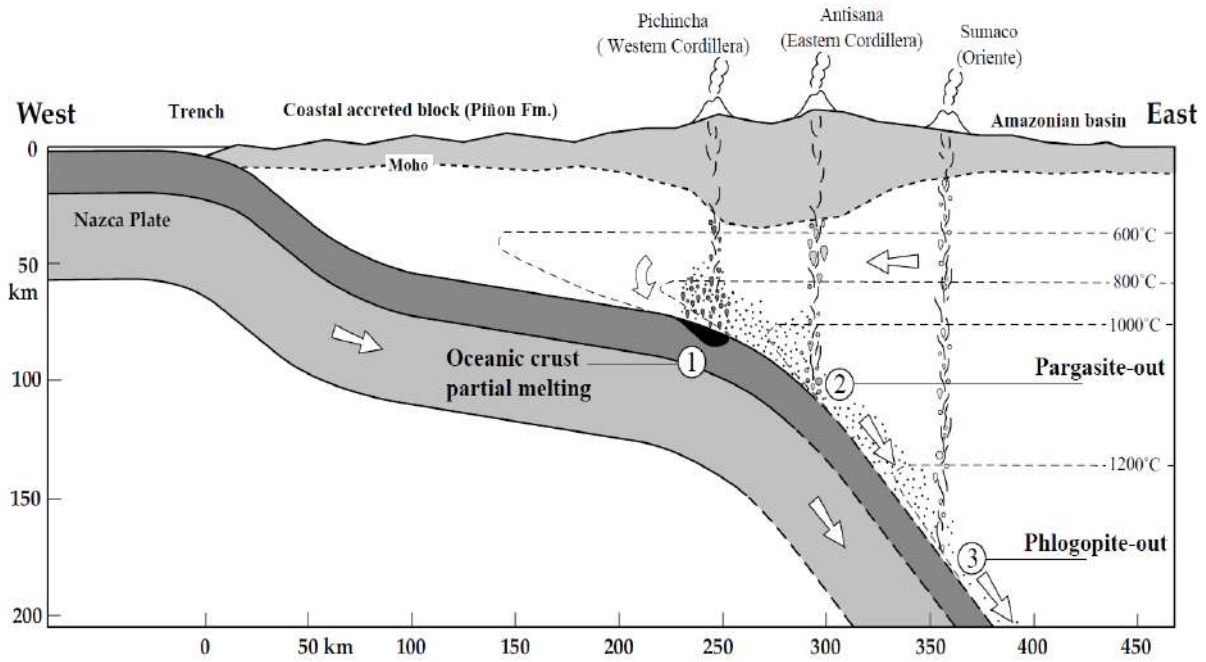


Figura 2.7. Proceso de subducción debajo del Ecuador. (Bourdon et al., 2003).

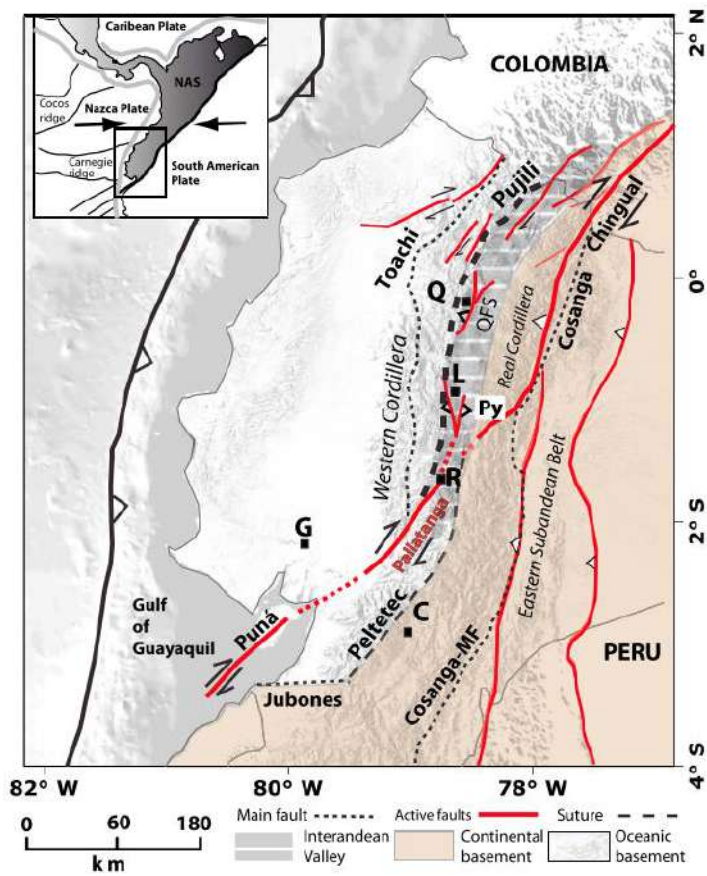


Figura 2.8. Mapa generalizado de fallas activas del Ecuador, QFS: Quito Fault System (Alvarado et al. 2016).

2.4. Volcanismo cuaternario de los andes ecuatorianos

Desde el Neógeno, el Volcanismo en el Ecuador se ha venido dando debido a la subducción de la Placa Nazca debajo de la Sudamericana, formando un arco volcánico continental típicamente calco-alcalino. Durante el Mioceno, el volcanismo en el Ecuador se ha dado en toda la longitud de la cordillera de los Andes Ecuatorianos, caracterizada por formaciones volcánicas Pisayambo al Norte (4-6 Ma.) (M. Hall & Beate, 1991); y Saraguro (28.9±1.4 Ma.), Tarqui (15.4±0.7 Ma.; 11.2±0.3 Ma.; 12.2±0.4 Ma.) y Alausí (8.12±0.1 Ma.; 7.1±0.3 Ma.) al sur del Ecuador (Barberi et al., 1988). Posteriormente el magmatismo al Sur del Ecuador de manera general cesó, pero probablemente hubo pequeñas y esporádicas erupciones de algunos centros volcánicos durante el pleistoceno como Culanga cerca de Nambacola, Quimsacocha, Anganuma al occidente de Quilanga y el Cerro San Bartolo con una composición química de dacítica a riolítica (M. Hall & Beate, 1991).

Por otra parte, en el Norte del Ecuador el volcanismo de manera general continuó hasta el presente, formándose al menos 84 centros volcánicos en los últimos 2.58 My. (Figura 2.9) (Bernard & Andrade, 2011) con una mayor actividad durante el Pleistoceno. De estos centros, 20 han tenido actividad confirmada durante el Holoceno y adicionalmente 6 pudieron haber tenido actividad durante el mismo periodo (Santamaria, 2017). Todo este volcanismo se ha venido desarrollando en cuatro regímenes distintos: El Frente Volcánico, Valle interandino, El Arco Principal y el Tras arco; cada uno con similitudes y diferencias entre sí.

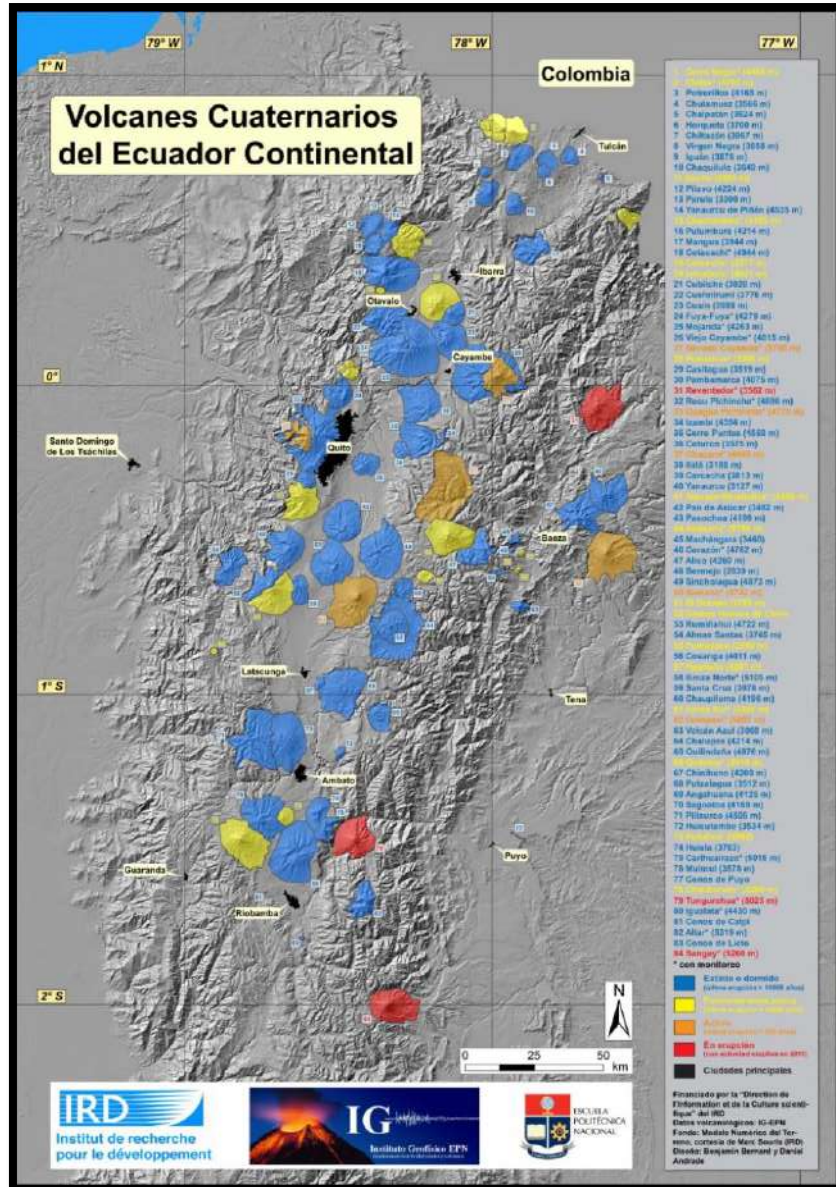


Figura 2.9. Mapa de Volcanes cuaternarios del Ecuador Continental (Bernard & Andrade, 2011).

El Frente Volcánico, ubicado en la Cordillera Occidental, posee un basamento volcánico basáltico del cretácico (Reynaud et al., 1999; Spikings et al., 2005; Spikings et al., 2002; Vallejo et al., 2009); su extensión abarca desde el Volcán Chimborazo al sur hasta el Chiles al norte; siendo algunos de sus centros volcánicos el Chiles, Cuicocha, Pululahua, Pichincha, Atacazo-Ninahuilca, Corazón - Bómboli, Illinizas, entre otros, que están compuestos de manera general por andesitas y dacitas (Barberi et al., 1988; Hall & Beate, 1991; Hall et al., 2008; Santamaria, 2017). Dentro de la cordillera occidental se hallan varios

estratovolcanes y complejos dómicos que pueden alcanzar alturas de hasta 6.263 m.s.n.m. como es el caso del Chimborazo y las edades más antiguas de estos edificios rondan los 1.3 My (Barberi et al., 1988).

En la depresión entre la cordillera de los Andes, denominada Valle Interandino se encuentran un alineamiento de distintos edificios volcánicos como son el Cusín, Imbabura, Ilaló, Paschoa, Rumiñahui, Igualata, entre otros, con elevaciones que alcanzan hasta los 4.700 m.s.n.m. y tienen edades que varían de 2.1 My (Barberi et al., 1988) a 1.6 My (M. Hall & Beate, 1991). Petrográficamente están representados por un rango muy amplio de lavas que varían de andesíticas básicas a riolitas (M. Hall & Beate, 1991; Santamaria, 2017).

El Arco Principal, ubicado en la Cordillera Real, posee un basamento volcánico (Fm. Pisayambo) y metamórfico (Esquistos, Filitas, Gneisses del Mesozoico). Dentro de este arco se incluyen algunos grandes estratovolcanes como el Cayambe, Reventador, Antisana, Sincholagua, Cotopaxi, Tungurahua, entre otros, que superan los 5.000 m.s.n.m. y algunas de sus edades más antiguas rondan los 1.3 My (Barberi et al., 1988). Petrográficamente sus volcanes están formados de andesitas básicas a riolitas (Barberi et al., 1988; M. Hall & Beate, 1991; Santamaria, 2017).

En el Tras arco, ubicado en la región subandina, yacen volcanes como el Sumaco, Pan de Azúcar, Sangay que tienen una altura de hasta 4.000 m.s.n.m. (excepto Sangay con 5.260 m.s.n.m.) y una firma química alcalina con una mineralogía de sus lavas que consta de plagioclasas, olivino, titanaugita, hauyna, nefelina (excepto el Sangay) (M. Hall & Beate, 1991; M. Hall et al., 2008) y que tienen edades de hasta 1.15 My (Santamaria, 2017).

Durante el Holoceno, la actividad volcánica observada mediante los depósitos es menor en comparación con el pleistoceno, evidenciándose que se produjeron erupciones con un VEI=5 en los casos de los volcanes Pululahua y Atacazo-Ninahuilca (Andrade et al., 2012) y VEI=6 en el volcán Quilotoa (Hall & Mothes, 2008). Históricamente solo 8 centros volcánicos han tenido actividad, entre los más importantes constan los volcanes Tungurahua, Guagua Pichincha, Reventador y Cotopaxi con erupciones que no superaron un VEI 4 como en el caso del Reventador en 2002 (Santamaria, 2017).

2.5. Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN)

2.5.1. Aspectos Geográficos

2.5.1.1. Localización y vías de acceso

El complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca (CVAN) se ubica 10 km al Suroccidente del perímetro urbano de Quito (Figura 2.10). Como parte de la cordillera occidental del Ecuador, este complejo se encuentra entre el complejo volcánico Corazón-Bómboli (CVC) al sur y el complejo volcánico Pichincha (CVP) al norte.

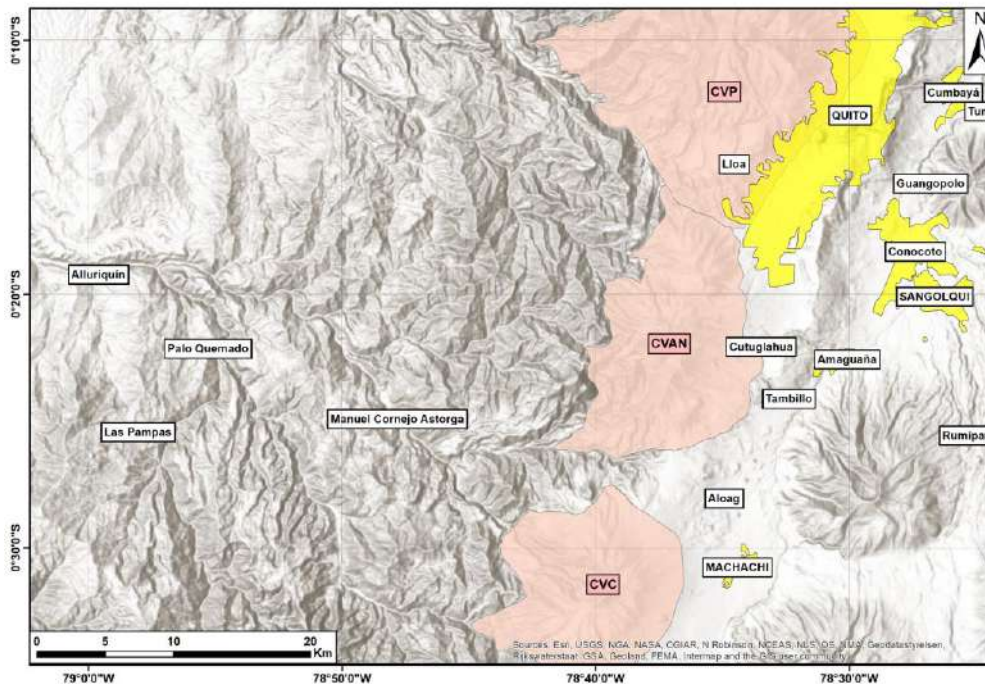


Figura 2.10. Localización del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Mapa Base: ESRI OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community).

La principal vía de acceso al CVAN es por la parte sur, siguiendo la carretera Alóag-Santo Domingo y posteriormente una serie de caminos empedrados que conllevan a una caminata final hasta las proximidades del complejo dómico Ninahuilca, incluyendo la localidad conocida como Aguas Calientes al Suroccidente del complejo. Adicionalmente existe un camino que lleva hacia la parte norte, específicamente hacia la cumbre del volcán Atacazo. Dicha vía es ascendiendo la avenida Ecuatoriana en el Sur de Quito, hasta llegar a una

planicie donde existen vías de segundo y tercer orden hacia el Atacazo. También existen caminos que rodean el complejo volcánico, como la vía que lleva a Chiriboga y al Río Saloya al Norte, siguiendo el camino a San Juan.

2.5.1.2. Topografía y red hidrográfica

El CVAN está conformado en su parte norte por un edificio antiguo (La Carcacha) muy erosionado y con pendientes muy suavizadas que alcanzan una cota máxima de 3.875 m.s.n.m. Hacia el sur de la Carcacha, existe un edificio mayor (Atacazo) con una cota máxima de 4.455 m.s.n.m. que desciende regularmente hacia el norte y oriente; hacia el lado SSE topográficamente lo comprende una cuchilla de longitud aproximada 4 km, conformada por paquetes de lavas y hacia el SO existe una depresión en forma de anfiteatro, abierta hacia el SO, dentro de esta depresión existe una serie de domos, entre ellos el Ninahuilca de cota máxima 3.787 m.s.n.m. y aproximadamente 350 m. por sobre la base del anfiteatro.

Su red hidrográfica la componen 3 redes principales: la primera al oriente (conjunto de quebradas), la segunda al Noroccidente (quebradas y ríos) y la tercera hacia el Suroccidente (quebradas y ríos) (Figura 2.11). Las quebradas y ríos que componen dichas redes se presentan a continuación:

Red Oriental: Compuesta por las quebradas El Sello, Pasocuncho, Tilicucho, Ugtupungu, Monjas, Saguanchi, Canoos, Riulluchi, La Chorrera, El Belén, San Antonio, Miraflores, entre otras.

Red Noroccidental: Compuesta por las quebradas Arenal, Atacazo, Plata, Cristal, Carcacha, San Juan y el Río Saloya.

Red Suroccidental: Compuesta por las quebradas Santa Ana, Illoalán y los Ríos Minasgüilca Grande, Minasgüilca Chico, Naranjal, Quitasol, Pilatón y Santa Ana.

- Fm. Pallatanga: Constituida de basaltos, microgabros, diabasas, peridotitas, pillow lavas, hialoclastitas y doleritas provenientes de un plateau oceánico con edades de 87.1 ± 1.66 My. en circones y 123 ± 12 My. en anfíboles (Hughes & Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2004; C. Vallejo, 2007).
- Unidad San Juan: Secuencia ultramáfica de peridotitas serpentinizadas, peridotitas, dunitas, gabros, noritas, anortositas y doleritas provenientes de la parte intrusiva de un plateau oceánico con edades de 87.1 ± 1.66 My. (Hughes & Pilatasig, 2002; C. Vallejo, 2007).
- Fm. Yunguilla: Consiste de turbiditas, cherts, areniscas de grano fino y calciturbiditas depositadas posiblemente en una cuenca antearco de edad Maastrichtiense (Hughes & Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2004; C. Vallejo, 2007).
- Fm. Silante: Está formada por conglomerados, lodolitas, lutitas y tobas violetas. Dentro de esta formación está la facies Tandapi que constituye una secuencia volcánica con andesitas y conglomerados y brechas volcánicas. Todas estas rocas son formadas en un ambiente de arco volcánico continental que tiene una edad de Maastrichtiense a Paleoceno temprano (Hughes & Pilatasig, 2002; C. Vallejo, 2007).
- Unidad Macuchi: Consiste de pillow lavas, tobas ricas en líticos de composición basáltica y andesítica, brechas basálticas, intrusiones andesíticas, turbiditas y cherts provenientes de un arco insular con edades que varían entre 42.62 ± 1.3 My y 35.12 ± 1.66 My (Jaillard et al., 2004; C. Vallejo, 2007).

El complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca está formado por tres edificios volcánicos que son del más antiguo al más joven: La Carcacha, Atacazo y Ninahuilca (Figura 2.12).

El edificio La Carcacha se encuentra ubicado en la parte NNE del complejo volcánico. Posee un diámetro aproximado de 4,5 km y una altura máxima de 3.880 m.s.n.m. (Figura 2.12). Este edificio está altamente erosionado por lo cual su relieve forma pendientes muy suavizadas. Petrográficamente está formado de andesitas con dos piroxenos y olivino que tienen una edad de 1,3 My para su parte más joven (Hidalgo, 2006).

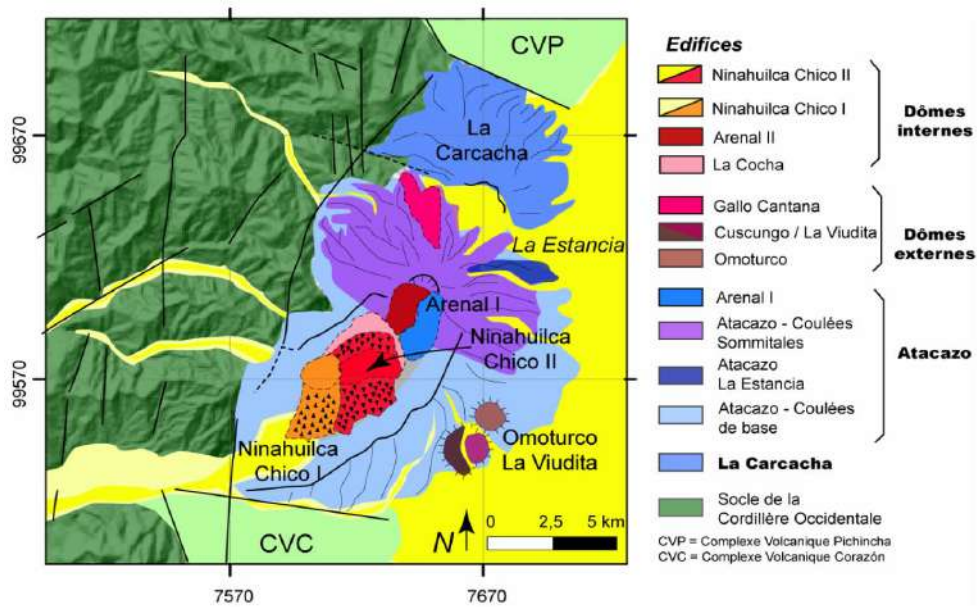


Figura 2.12. Unidades Volcánicas del complejo Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo, 2006).

El edificio Atacazo está formando la mayor parte del complejo volcánico. Con una forma elíptica de 10x12 km de diámetros y con su eje principal en dirección NE-SO, alcanza una altura de 4.455 m.s.n.m. (Figura 2.12 y Figura 2.13.a). Petrográficamente posee dos tipos de formaciones rocosas: coladas de lava de composición andesítica y domos de lava de composición dacítica. Las coladas de lava se encuentran formando la mayor parte del edificio volcánico y sus edades varían de 220 a 195 ka para las más antiguas y 83 ka para las más recientes (Hidalgo, 2006). Los domos de lava que presentan composición dacítica se encuentran distribuidos en la parte norte, centro y suroriente del edificio Atacazo y lo conforman los domos Gallo Cantana, Omoturco, Cuscungo, Arenal I y La Viudita (Figura 2.12 y Figura 2.13.a), siendo este último datado y presentando edades de 71ka (Hidalgo, 2006). Resumiendo, el edificio Atacazo ha tenido erupciones efusivas que originaron las coladas de lava andesíticas. En uno de estos periodos eruptivos, se produjo una erupción que causó el colapso del flanco SO del edificio Atacazo, formando de esta manera una estructura en forma de anfiteatro abierta hacia el SO; este periodo eruptivo fue definido N1, representando el final de la actividad del edificio Atacazo e inicio de la actividad del edificio Ninahuilca (Almeida, 1996).

El edificio Ninahuilca lo comprende una serie de domos extruidos que se han emplazado en el anfiteatro abierto hacia el SO. Estos domos son dacíticos similares entre sí e individualmente son denominados: La Cocha I, La Cocha II, Arenal II, Ninahuilca Chico I y Ninahuilca Chico II, siendo este último el centro de emisión potencialmente activo (Figura 2.12 y Figura 2.13.b) (Hidalgo et al., 2008). Petrográficamente varían desde dacitas con opx + cpx + plg + óxidos de Fe-Ti con 62-64 wt % SiO₂ en el domo La Cocha II, a dacitas con plg + amph + opx + óxidos de Fe-Ti ± apt con 65 wt % SiO₂ en el domo Ninahuilca Chico II.

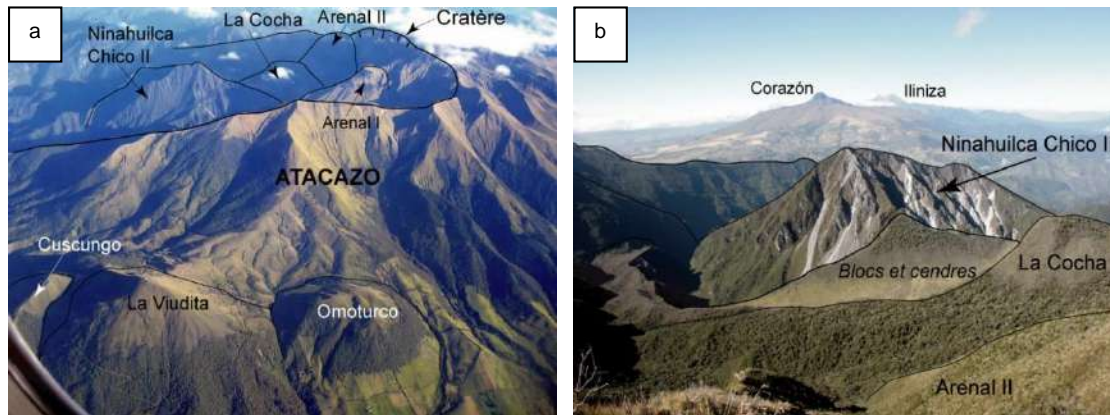


Figura 2.13. Complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca; **a.** Vista aérea desde el Sureste; **b.** Vista desde el borde norte del cráter. (Hidalgo, 2006)(Monzier M. 2004).

Los periodos eruptivos del Ninahuilca han sido definidos N1, N2, N3, N4, N5 y N6 (Almeida, 1996), de los cuales N5 y N6 han generado grandes depósitos de caída de piroclastos y flujos asociados. Los depósitos de caídas de piroclastos tienen espesores aproximados de 25 cm al oriente y 100 cm al occidente; por otra parte los espesores de corrientes de densidad piroclástica asociados superan los 5 m al oriente y 100 m al occidente (Andrade et al., 2012). La estimación de los volúmenes para la caída de piroclastos son de al menos 1,4 km³ para N5 y 1,0 km³ para N6 (Hidalgo et al., 2008).

CAPÍTULO III

3. INFORMACIÓN EXISTENTE Y METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta una descripción de los datos existentes y documentados de las últimas erupciones del CVAN, que son de utilidad o constituyen una guía para los objetivos del presente trabajo. También se describe las metodologías y procedimientos utilizados para la adquisición de los datos y resultados, los cuales serán presentados en el siguiente capítulo.

3.2. Información existente de las últimas erupciones

3.2.1. Índice de explosividad volcánica

El VEI (*Volcanic Explosivity Index*) es una escala pseudo logarítmica que va del 0 al 8 y se la utiliza para medir la magnitud de las erupciones volcánicas (Figura 3.1.a). Dicha escala fue desarrollada por Christophner Newhall y Stephen Self (1982) y se basa en designar un VEI dependiendo principalmente del volumen total de magma extruido por el volcán durante una erupción explosiva. Este volumen incluye corrientes de densidad piroclástica y caídas de tefra. Otro parámetro, menos utilizado, para definir el VEI de una erupción es la altura de la columna de ceniza que alcanza en una erupción; ya que no siempre se puede contar con esta cuantificación. El resto de parámetros utilizados definiendo el correspondiente VEI se los representa en la Figura 3.1.a.

La escala que define el VEI es una escala pseudo logarítmica, por ejemplo, una erupción volcánica con VEI=3, expulsa 10 veces más volumen de tefra que una erupción de un VEI=2 y 100 veces más que una erupción de un VEI=1, por lo cual la mayor cantidad de erupciones volcánicas en el mundo, tienen VEI's relativamente bajos, con valores de hasta 3; caso contrario, las erupciones volcánicas con VEI's grandes como 6,7 u 8 son pocas.

Recientes estudios han determinado un problema es la escala VEI propuesta en 1982, y han concluido que dicha escala no refleja la magnitud de las erupciones pequeñas, poco explosivas y que no expulsan una gran cantidad de volumen, como en el caso del Volcán Kilawea. Debido a esto se ha propuesto modificar la escala VEI propuesta por Newhall & Self con un VEI que va de 0 a 8, por una que vaya de -6 a 8 (Figura 3.1.b), incluyendo así facilidad de determinación de magnitud en erupciones pequeñas (Houghton et al., 2013).

Criteria	VEI:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
DESCRIPTION		non-explosive	small	moderate	mod-large	large	very large	-----			
VOLUME OF EJECTA (M ³)		<10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁹	10 ⁹ -10 ¹⁰	10 ¹⁰ -10 ¹¹	10 ¹¹ -10 ¹²	>10 ¹²	
(TSUYA CLASSIFICATION)*		(I)	(II-III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)	(IX)	-----	
COLUMN HEIGHT (KM)*		<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	-----			
QUALITATIVE DESCRIPTION		---"gentle, effusive"---	-----"explosive"-----			-----"cataclysmic, paroxysmal, colossal"-----					
							"severe, violent, terrific"-----				
CLASSIFICATION		-----"Strombolian"-----			-----"Plinian"-----						
		-----"Hawaiian"-----		-----"Vulcanian"-----			-----"Ultraplinian"-----				
DURATION (hours)		-----<1-----				----->12-----					
of continuous blast						-----1-6-----					
						-----6-12-----					
CAVW MAX EXPLOSIVITY**		---lava flows---	-----explosion or nuee ardente-----			-----					
		-----phreatic-----			-----						
		-----dome or mudflow-----									
TROPOSPHERIC INJECTION		negligible	minor	moderate	substantial	-----					
STRATOSPHERIC INJECTION		none	none	none	possible	definite	significant	-----			

*If all eruptive products were pyroclastic ejecta
 *For VEI's 0-2, uses km above crater; for VEI's 3-8, uses km above sea level.
 **The most explosive activity indicated for the eruption in the Catalogue of Active Volcanoes

New VEI	Old VEI	Volume range m ³	Eruption style
-6	0	1E-2 to 1E-1	
-5	0	1E-1 to 1E0	
-4	0	1E0 to 1E+1	
-3	0	1E+1 to 1E+2	
-2	0	1E+2 to 1E+3	
-1	0	1E+3 to 1E+4	
0	1	1E+4 to 1E+5	
1	1	1E+5 to 1E+6	
2	2	1E+6 to 10E+7	
3	3	1E+7 to 1E+8	
4	4	1E+8 to 1E+9	
5	5	1E+9 to 1E+10	
6	6	1E+10 to 1E+11	
7	7	1E+11 to 1E+12	
8	8	>1E+12	

Figura 3.1. a. Escala del Índice de Explosividad Volcánica VEI (Newhall & Self, 1982); b. Propuesta de modificación de escala VEI (Houghton et al., 2013)

En el Ecuador, muchos de los depósitos producidos por las erupciones volcánicas, han sido erosionados, por lo cual existe un subregistro de ellas. Existiendo así para el periodo del Holoceno un total de 53 erupciones con $VEI \leq 2$, 38 erupciones con un $VEI=3$, 31 erupciones con $VEI=4$ y 15 erupciones con $VEI=5$ (Santamaria, 2017), sin embargo, el número de erupciones reales que se han producido en el pasado es mayor al aquí citado a causa del subregistro ya mencionado.

Para el caso específico del Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca se han identificado 6 periodos eruptivos (Figura 3.2), de los cuales al menos 5 han formado columnas plinianas (Almeida, 1996), lo que señala que las erupciones con un VEI superior a 4 son comunes para este complejo volcánico (Figura 3.2 y Figura 3.3). Adicionalmente las últimas 2 erupciones, definidas como N5 y N6, han alcanzado un VEI de 5 (Almeida, 1996; Hidalgo et al., 2008), lo cual corrobora que las erupciones del Ninahuilca se caracterizan por ser grandes.

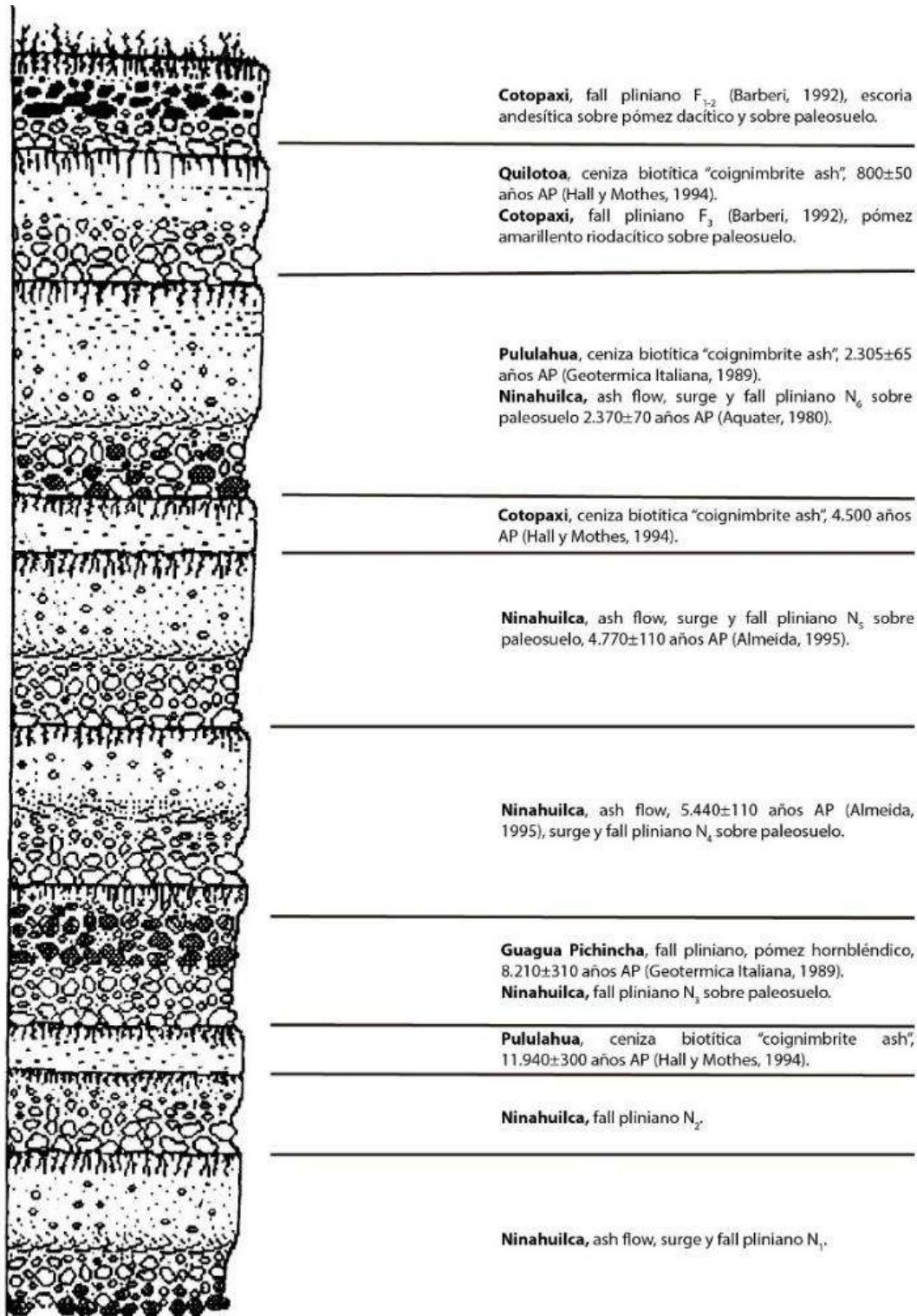


Figura 3.2. Columna estratigráfica general de los periodos eruptivos del volcán Ninahuilca y su relación con otros episodios volcánicos (Almeida, 1996).

Edad	Unidad	Litología	Descripción	Petrografía
	SA		Suelo actual	
2,400a AP. 2,350a AP.	QDn		Colapso parcial de domo Ninahuilca	Dacitas con anfíbol grises y rosas
	QPn		Extrusión de domo Ninahuilca Flujo y oleada piroclástica Caída piroclástica	
	SB		Paleosuelo	
≤ 6,000a AP. Estimado	QDn		Extrusión inicial de domo Ninahuilca	Dacitas con anfíbol grises y rosas
	QPn		Flujo piroclástico Caída piroclástica	
	SC		Paleosuelo	
≤ 9,000a AP. Estimado	QDc		Extrusión domo La Cocha	Dacitas con anfíbol grises
	QPc		Flujo piroclástico Caída piroclástica	
	SD		Paleosuelo	
	QDc		Extrusión inicial del domo La Cocha	Dacitas con anfíbol grises
	QPd		Flujo piroclástico Caída piroclástica	
10,000 12,000a AP. Estimado	Qg		Depósito glacial	Andesitas grises
	QDa QPc		Extrusión del domo Arenal Caída piroclástica	Andesitas con anfíbol y biotita grises
48,000a AP.	QCg		Cangahua	Toba
> 50,000a AP. Estimado	QDv		Extrusión del domo La Viudita	Andesita con anfíbol gris verdosa
	QDo		Extrusión del domo Omoturco	
0.4-0.32 Ma. AP.	QVa		Flujos de lava del Atacazo	Andesitas con dos piroxenos grises

Figura 3.3. Columna estratigráfica generalizada de los productos del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Maruri, 1993).

3.2.2. Volumen de depósitos

Se realizó el cálculo del volumen de los depósitos en el complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca para las 2 últimas erupciones registradas. En estos casos se ha calculado volúmenes de caídas mediante 3 métodos desarrollados por Pyle (1989), Fierstein & Nathenson (1992) y Legros (2000), usando distintas isópacas; y también se ha calculado volúmenes de los depósitos de las corrientes de densidad piroclástica para N6 usando simulaciones en el programa VolcFlow. Dichos volúmenes se encuentran resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Volúmenes de los depósitos de caída y corrientes de densidad piroclástica del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca (Hidalgo et al., 2008).

Depósito	V (km ³) (Pyle 1989)	V (km ³) (Fierstein & Nathenson 1992)	V (km ³) (Legros 2000)	V (km ³) (VolcFlow)
Caída N5	1.7	-	1.4	-
Caída N6	1.0	1.3	1.2	-
CDP N6	-	-	-	0.4 – 0.8

3.2.3. Edad y periodo de recurrencia eruptiva

Las edades presentadas a continuación se basan en dataciones realizadas a los últimos periodos eruptivos del complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca y en trabajos previos de Almeida (1996) e Hidalgo (2006).

Se ha datado material orgánico de paleosuelos o material orgánico que ha quedado atrapado en los productos de las erupciones pasadas, debido a lo cual se ha utilizado el método radiométrico ¹⁴C. También en algunos casos se ha hecho únicamente datación relativa con depósitos volcánicos de otros centros eruptivos.

Debido a la escasez del material fresco y óptimo para realizar dataciones, tan solo se ha podido determinar edades absolutas en 4 periodos eruptivos y edades relativas en 1 de los 6 periodos eruptivos registrados para el complejo volcánico Atacazo-Ninahuilca. La datación relativa se la ha realizado para el periodo N2, cuyo depósito de caída y *ash flow* asociado, está subyaciendo a un estrado de ceniza con biotita (Almeida, 1996), que es presumiblemente del complejo volcánico Pululahua (M. Hall & Mothes, 1994). Las

dataciones absolutas realizadas corresponden para los periodos del N3 al N6, resultado de lo cual se obtienen las edades 8.860 ± 70 años AP, para N3; 5.440 ± 111 años AP, para N4; 4.400 ± 35 años AP, para N5 y 2.267 ± 17 años AP, para N6 (Hidalgo, 2006).

Para el periodo de recurrencia, no se ha determinado estadísticamente un periodo de reposo entre cada evento eruptivo con una buena precisión, ya que solo hay unas pocas erupciones datadas, pero se ha realizado una media aritmética del tiempo en el cual no hubo actividad significativa (Tabla 3); producto de lo cual se ha obtenido un periodo de recurrencia de aproximadamente 2.513 ± 193 años (Hidalgo, 2006); aunque también es posible que hubiera erupciones de intensidad baja de las cuales no se tiene registro.

Tabla 3. Cálculo aproximado del periodo de reposo para CVAN (Hidalgo, 2006).

Periodo eruptivo	Edades BC calibradas al 95.4% de probabilidad		Edades promedio BC	Desviación estándar (2σ)	Duración de periodo de reposo (años)
N3	8240	7750	7995	245	
N4	4500	3990	4245	255	3760
N5	3270	2910	3094	175	1080
N6	400	210	305	95	2700
Duración promedio de los periodos de reposo					2513

3.3. Metodologías a utilizarse

3.3.1. Simulaciones de caída por medio de Ash3d

3.3.1.1. Contexto teórico

Ash3d es un modelo euleriano atmosférico de tres dimensiones para el transporte, dispersión y depositación de tefra emitida en columnas eruptivas que ha sido desarrollado por Larry Mastin (2012) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El modelo simula la advección del viento, difusión turbulenta y sedimentación de la ceniza inyectada a la atmósfera en una columna eruptiva. A su vez la advección del viento se calcula usando datos de viento preexistentes que varían con el tiempo y métodos que usan volúmenes finitos de material. Adicionalmente se utiliza el principio de conservación de masa y se lo une con los datos de viento en un sistema cartesiano local, dentro de un sistema global esférico que representa la Tierra (Figura 3.4). La velocidad de caída, distribución y duración del transporte se ve influenciada por un número arbitrario de tamaño de grano designada por el programa; pero la distribución vertical de la masa y elevación son calculadas usando una distribución Suzuki (Schwaiger et al., 2012).

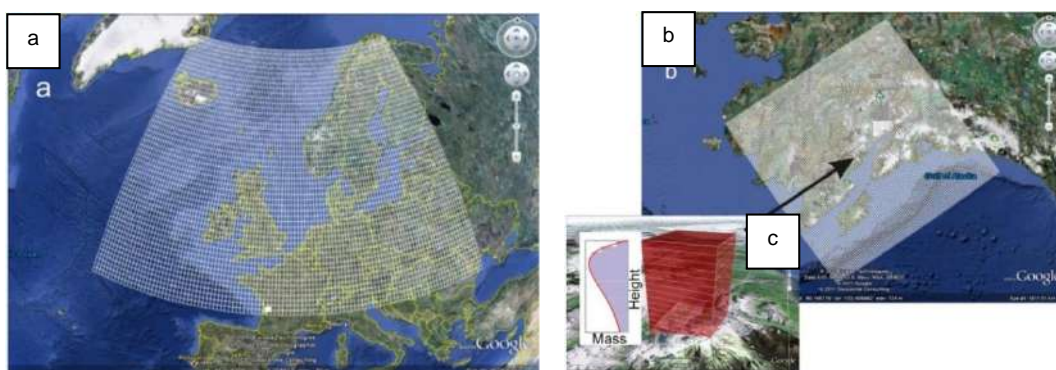


Figura 3.4. *a. Ejemplo de malla usada por Ash3d sobre Europa; b. Proyección de la malla usada por Ash3d sobre Alaska; c. Columna de celdas mostrando la distribución vertical del material. (Mastin et al., 2013).*

3.3.1.2. Distribución Suzuki

Este tipo de distribución se encuentra basado en considerar la dispersión de tefra en función de algunos factores: la masa total, diámetro medio y desviación estándar del material emitido a la atmósfera, velocidad del viento, altura de la columna eruptiva y la difusión de las partículas de la columna eruptiva (Suzuki, 1983). Básicamente se logra formular un modelo de dispersión de dos dimensiones (vertical-horizontal) de partículas en la atmósfera.

El autor de este modelo (Takeo Suzuki) publicó un trabajo en el que saca a la luz este método que modifica modelos anteriores, los adapta y simplifica para obtener un algoritmo de dispersión de ceniza. En dicha publicación se realizó algunos análisis numéricos y gráficos; y se obtiene 4 conclusiones principales que resumen el cuerpo del modelo (Suzuki, 1983), las cuales son:

- El patrón de dispersión no es afectado por variaciones en el total de masa emitida y la masa por unidad de área en el área dispersa, es proporcional a la masa total.
- Para una columna eruptiva con emisión de grandes diámetros medios y a baja velocidad del viento, las líneas iso-masa de acumulación de tefra son casi circulares, con el centro localizado en el viento.
- Para una gran columna eruptiva, con pequeño diámetro medio de partículas y gran desviación estándar de la distribución del tamaño de partículas, el área de dispersión es más ancha y tiene una masa por unidad de área máxima, a cierta distancia del viento.
- Para una columna eruptiva con gran diámetro medio y gran desviación estándar de la distribución del tamaño de partículas, las curvas de dispersión de tefra muestran que la masa por unidad de área disminuye a una tasa logarítmicamente lineal con el incremento de la distancia al viento; y el área encerrada por las líneas iso-masa, disminuyen casi logarítmicamente lineal con el incremento de la masa por unidad de área.

3.3.1.3. Advección

Considerando que la advección es fundamentalmente el transporte horizontal de material a través de un medio (Carey & Bursik, 2015); Ash3d usa el principio que en un evento eruptivo, el volumen de ceniza es relativamente insignificante comparado al volumen total del aire y la concentración de esta ceniza o tefra está dada por:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot ((\mathbf{u} + \mathbf{v}_s)q) = 0$$

donde q es la concentración de un tamaño particular de grano de ceniza; \mathbf{u} es el campo de velocidad; \mathbf{v}_s es la velocidad de sedimentación de las partículas de ceniza y t es el tiempo. La concentración total en la nube de ceniza está compuesta por la concentración de un

número arbitrario de tamaños de grano, de los cuales la advección es calculada independientemente para cada grano (Schwaiger et al., 2012).

Posteriormente, utilizando una malla horizontal, resuelve la conservación de la masa en cada celda mediante el seguimiento de la concentración de la masa q con el tiempo t , mediante la siguiente ecuación de Advección-Difusión:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot ((\mathbf{u} + \mathbf{v}_s)q) - \nabla \cdot (K\nabla q) = Q.$$

en donde q es la concentración de la masa; t es el tiempo; \mathbf{u} es el vector de la dirección del viento en 3D; \mathbf{v}_s es la velocidad de sedimentación; K es la difusividad; y Q es un término fuente, el cual es distinto a cero solo en la columna de nodos por encima del volcán (Mastin et al, 2013).

3.3.1.4. Difusividad turbulenta

La difusividad turbulenta es básicamente la mezcla de material en un flujo turbulento. A pesar que la difusividad de ceniza en la atmósfera varía dependiendo de las condiciones meteorológicas locales; para una simplificación de la distribución se la considera como constante dentro de Ash3d (Schwaiger et al., 2012).

3.3.1.5. Depositación

La depositación de la tefra suspendida en la atmósfera se calcula considerando que es una sedimentación en seco. Los depósitos se calculan mediante el seguimiento del flujo de ceniza en la topografía y se deposita una masa de ceniza por unidad de área. La distribución del tamaño de grano se conserva y se la utiliza para comparar con muestras observadas. Este modelo asume una densidad del material de 1000 kg/m^3 , que representa una media de las densidades de material medidas en el campo y utilizadas para la calibración en la etapa del desarrollo de dicho modelo (Mastin et al., 2013). Adicionalmente se puede especificar la velocidad de caída de un tamaño de grano en particular en los parámetros de entrada de Ash3d, o simplemente se puede dejar que se calcule la velocidad de caída dependiendo de las condiciones atmosféricas (Schwaiger et al., 2012). Por defecto se calcula la velocidad de caída de cada partícula usando la ecuación de Wilson & Huang (1979) que es utilizada para partículas no esféricas; pero adicionalmente se puede utilizar

más ecuaciones dependiendo de las características de cada material como forma y tamaño (Mastin et al., 2013). Los parámetros que usa el cálculo de la velocidad de caída son varios, como el diámetro de partícula, aceleración de la gravedad, densidad del aire, distintos coeficientes, y otros parámetros; que se encuentran detallados en el artículo de Schwaiger et al. (2012).

3.3.1.6. Parámetro de la fuente

El parámetro fuente es la masa entrante por unidad de volumen por unidad de tiempo dentro de una columna de ceniza ($\text{kg/m}^3\text{s}$). Todo este cálculo se logra determinando un perfil vertical de concentración de material, en forma de columnas de varias celdas por encima del viento o conducto de emisión del material (Schwaiger et al., 2012). La altura de la columna eruptiva, el tiempo en el cual inicia y la duración de la columna, al igual que la masa total emitida, son los parámetros que controlan este perfil vertical de concentración. Ash3d permite ingresar distintos pulsos o columnas eruptivas; pero en el caso que se desee un pulso único, Ash3d caracteriza la carga vertical de ceniza en la pluma siguiendo una distribución Suzuki:

$$\frac{dS}{dz} = S \frac{k^2(1 - z/H)\exp[k(z/H - 1)]}{H[1 - (1 + k)\exp(-k)]}$$

Donde H es la altura de la columna, S es la masa emitida y k es un factor que controla la distribución. Con bajos valores de k se obtiene una distribución de la masa más uniforme en toda la columna, pero con valores altos se da una concentración mayor hacia la parte alta de la columna (Schwaiger et al., 2012).

3.3.1.7. Ingreso de datos en Ash3d

Ash3d se lo puede utilizar mediante un enlace online (<https://vsc-ash.wr.usgs.gov/user/session.php>) pero anteriormente se debe tener una cuenta debidamente registrada. Posterior a ello podemos crear una serie de proyectos con datos propios *New Job*. Después Ash3d nos despliega una página con los detalles del trabajo y las opciones disponibles para ingresar las condiciones de nuestras simulaciones (Figura 3.5). Los datos del viento se toman automáticamente de la base de datos de la *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), por lo cual los datos del viento no se los puede modificar. Posteriormente tenemos entradas como el Nombre del Proyecto (*Name*), acciones a realizar cuando se complete la simulación (*When Complete*) y el tipo de

simulación (*Run Type*) que puede ser *Airborne* (su resultado son imágenes o animaciones de la dispersión de la nube de ceniza con el tiempo en formato .gif) o *Deposit* (su resultado son isomasas del depósito en formatos .gif .kmz .shp).

Posteriormente existen espacios para ingresar parámetros con respecto a la fuente (Figura 3.5), como *Volcano/Site* donde se digita el nombre del volcán, se lo selecciona y automáticamente se despliegan los datos de latitud, longitud y elevación relacionados a éste; *Eruption Start Time* que es el momento de inicio de la erupción. Para este punto hay que considerar que si ingresamos una hora de 00:00 horas por ejemplo, la simulación arrancara con los datos de las 05:00 horas, esto se debe a una interface de tiempo a la cual están disponibles los datos de la base de la NOAA.

También existen los parámetros como *Simulation Duration* que es el tiempo en el que Ash3d calcula el transporte del material de la nube; *Eruption Duration* que es el tiempo de emisión activa de ceniza; *Plume Height* define la altura que alcanza la columna eruptiva medida en metros y tomando de referencia el nivel del mar; *Erupted Volume* que es el volumen dense rock equivalent (DRE) de material expulsado. Para tener simulaciones aceptables no es necesario modificar los demás parámetros, incluyendo los de opciones avanzadas, por lo cual es mejor dejarlos por default. Para finalizar siempre hay que guardar los cambios, *Save Changes*, y correr la simulación, *Run*.

Finalmente terminadas las simulaciones nos permiten visualizar de manera rápida los resultados, *Results*, o descargar los datos, *Download Data* (Figura 3.6).

Ash3d Job

Times

Windfile: 2017-09-25 07:00:00

Local: 2017-09-25 17:27:16

Name: Atacazo VEI 1-2

Run Type: Both Airborne and Deposit

When Complete: Do not send email

Note: Model runs generally complete in about 10 minutes.

Use Advanced Options:

Volcano/Site: Atacazo

Latitude: -0.3527778
Longitude: -78.61694444
Elevation: 4,463 (m)

Eruption Start Time: Specific Date/Time

2016-06-16 05:00
(YYYY-MM-DD HH:MM)

Simulation Duration: 24 Between 3 and 48 hours

Eruption Duration: 12 At Most 24 Hours
Default eruption duration for this volcano is 3 hours (apply).

Plume Height: 8.863 km ASL
Default plume height for this volcano is 15.463 km (apply).

Erupted Volume: 0.001 Km³
Default erupted volume for this volcano is 0.015 Km³ (apply).
Value if unspecified: 0.0011 Km³
DRE: airborne ash fraction = 5%

Volcano/Site: Atacazo

Latitude: -0.3527778
Longitude: -78.61694444
Elevation: 4,463 (m)

Eruption Start Time: Specific Date/Time

2016-06-16 05:00
(YYYY-MM-DD HH:MM)

Simulation Duration: 24 Between 3 and 48 hours

Eruption Duration: 12 At Most 24 Hours
Default eruption duration for this volcano is 3 hours (apply).

Plume Height: 8.863 km ASL
Default plume height for this volcano is 15.463 km (apply).

Erupted Volume: 0.001 Km³
Default erupted volume for this volcano is 0.015 Km³ (apply).
Value if unspecified: 0.0011 Km³
DRE: airborne ash fraction = 5%

Share With Public: Most recent run result freely available.

Actual Eruption: Check when output from this job is modeling an actual eruption (used in some downstream products).

Description:

Description appears on public page if job is public. May appear in other locations in the future.

Figura 3.5. Espacio de trabajo principal de Ash3d.

Model Runs			
Requested	Type	Status	
			Run Now

Model Runs					
Requested	Type	Status			
2017-09-25 17:30:59	Airborne	Results	Download Data	Delete	
2017-09-25 17:30:59	Deposit	Running	Cancel		

Figura 3.6. Espacio del estado y resultados de las simulaciones.

3.3.2. Simulaciones de FBC y lahares secundarios

3.3.2.1. Contexto teórico

3.3.2.1.1. MATLAB R2016a

MATLAB es la abreviación de *Matrix Laboratory*, es un software con un lenguaje propio de alto nivel (lenguaje M) y un entorno interactivo dedicado al cálculo matemático, desarrollo de algoritmos (*scripts*), adquisición de datos, modelado, simulación, análisis y visualización de datos, elaboración de gráficos en 2D y 3D, desarrollo de aplicaciones e interfaces gráficas de usuario, entre otras (MathWorks, 2017).

Una de las características más importantes de MATLAB es la posibilidad de que cada usuario desarrolle sus propias aplicaciones, escribiendo matemáticamente la aplicación,

implementando matrices para su simplificación, implementando aritmética compleja y ampliando y adaptando el lenguaje de programación mediante ficheros de *script* y funciones (MathWorks, 2017).

3.3.2.1.2. VolcFlow

VolcFlow es un código (script) de MatLab que permite simular fenómenos volcánicos como corrientes de densidad piroclástica densas, flujos de lava, avalanchas de escombros y lahares. Adicionalmente ha sido utilizado para simular Tsunamis y rompimientos de presas. Dicho programa ha sido desarrollado en el *Laboratoire Magmas et Volcans* por Karim Kelfoun y Tim Druitt (2005).

El modelo que usa VolcFlow se basa en la aproximación de profundidad media del flujo. El script resuelve ecuaciones de conservación de masa y balance de momento en un sistema de coordenadas local con X e Y paralelos a la superficie y H (profundidad) perpendicular a estos (Kelfoun et al., 2016). Las ecuaciones de conservación son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) \\ &= gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2}k_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_x}{\rho} \\ \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) \\ &= gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2}k_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \frac{T_y}{\rho} \end{aligned}$$

En donde h es el espesor del flujo (calculado ortogonalmente a la superficie), t es el tiempo, $u=(u,v)$ es la velocidad del flujo a lo largo de la pendiente, α es la pendiente del terreno, ρ es la densidad *bulk* del flujo, g es la gravedad, X e Y denotan las direcciones a lo largo de las pendientes. La variable $T=(T_x, T_y)$ expresa la tensión retardante basal que varía de acuerdo a la reología del producto simulado (Kelfoun, 2011).

El término $k_{actpass}$ es un coeficiente de presión de la tierra que está en función de los ángulos de fricción interna y basal (Iverson & Denlinger, 2001), y es definida así:

$$k_{actpass} = 2 \frac{1 \pm [1 - \cos^2 \varphi_{int} (1 + \tan^2 \varphi_{bed})]^{1/2}}{\cos^2 \varphi_{int}} - 1$$

En donde φ_{bed} es el ángulo de fricción basal y φ_{int} es el ángulo de fricción interna. Dicha expresión solo es válida cuando $\varphi_{bed} < \varphi_{int}$. El signo \pm es positivo cuando el flujo es localmente convergente y es negativo cuando es localmente divergente. Caso contrario, si $\varphi_{bed} \geq \varphi_{int}$, $k_{actpass}$ está dado por:

$$k_{actpass} = \frac{1 + \sin^2 \varphi_{int}}{1 - \sin^2 \varphi_{int}}$$

Adicionalmente T_x está definida por:

$$T_x = -\rho h \left(g \cos \alpha + \frac{u^2}{r} \right) \tan \varphi_{bed} \frac{u}{\| \mathbf{u} \|}$$

donde r es el radio de curvatura del terreno (Savage & Hutter, 1991).

VolcFlow permite simular una variedad de productos volcánicos, para lo cual se debe variar las características reológicas de cada producto. En la Tabla 4 se muestra un ejemplo de los parámetros variados para las distintas simulaciones realizadas en el trabajo de Kelfoun (2011), en el cual busca describir el modelo y calibrarlo para distintos fenómenos.

Tabla 4. Ejemplo de parámetros que se pueden variar en VolcFlow.

	Coulomb 1 Angle: φ_{bed}	Coulomb 2 Angles: $\varphi_{bed} \varphi_{int}$	Voellmy $\varphi_{bed} \xi$	Plastic T_0	Plastic + $f(u^2) T_0 \xi$
PF, 1D, dome	(1) 15°	(4) 15° 30°	(7) 5° 0.1	(10) 20 kPa	(13) 3 kPa 0.1
PF, 1D, 60 s	(2) 15°	(5) 15° 30°	(8) 5° 0.1	(11) 20 kPa	(14) 3 kPa 0.1
PF, 1D, 600 s	(3) 15°	(6) 15° 30°	(9) 5° 0.1	(12) 20 kPa	(15) 3 kPa 0.1
LRA, 1D	(16) 4°	(17) 4° 30°	(18) 4° 0.1	(19) 80 kPa	(20) 20 kPa 0.1
LRA, 2D	(21) 2°	(22) 2° 30°	(23) 2° 0.1	(24) 30 kPa	(25) 10 kPa 0.1
FF, 2D	(26) 11°	(27) 11° 30°	(28) 11° 0.1	(29) 2 kPa	(30) 2 kPa 0.1

^aNumbers in parentheses indicate the case number, the others the rheological parameters used. Cases in italic are not presented on figures. PF, pyroelastic flow; LRA, long-runout avalanche; FF, flow front in detail.

ξ es un coeficiente que expresa la turbulencia y colisiones (Evans et al., 2001; Hutter & Nohguchi, 1990), T_0 es la tensión elástica y u es el vector de velocidad. Se evidencia que claramente VolcFlow permite simular flujos siguiendo distintas leyes: Coulomb (con ángulos de fricción interna y basal o solo basal), Voellmy (añade un esfuerzo extra al Coulomb que depende de la velocidad y considera el efecto de turbulencia y colisiones junto con el ángulo de fricción basal), Sólido plástico (con comportamiento plástico o plástico y viscoso).

Resumiendo, los cálculos utilizados por el algoritmo de VolcFlow, el primer paso se inicia con la estimación de las velocidades en los bordes de cada celda en función de la fuente; posteriormente se calcula el flujo de masa y el momento. El segundo paso viene dado por la estimación de la advección y el cálculo del nuevo espesor y velocidades medias al centro de cada celda. Finalmente en el tercer paso las velocidades en los bordes modificadas por la advección, son calculadas (Figura 3.7) (Kelfoun et al., 2016).

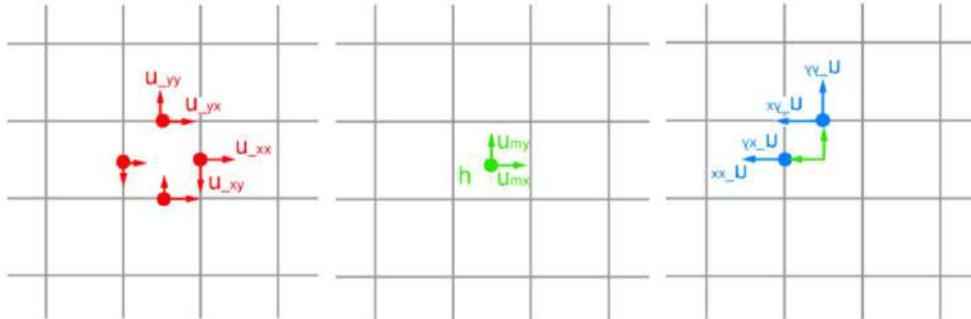


Figura 3.7. Cálculos resumidos realizados por el algoritmo de VolcFlow.

3.3.2.1.3. Reología y parámetros reológicos

La Reología estudia las relaciones entre la deformación y el esfuerzo a los que pueden estar sometidos los magmas (Harris & Rowland, 2015). Dentro de VolcFlow los principales parámetros reológicos utilizados son los siguientes:

Viscosidad: la propiedad de un fluido que describe su resistencia a deformarse y fluir cuando se le aplica un esfuerzo (Parfitt & Wilson, 2008).

Cohesión: Resistencia intrínseca de un material a la fractura de cizalla cuando el valor del esfuerzo normal es cero (Vera & Granada, 2015).

Densidad: Relación entre la masa que ocupa una cantidad de volumen determinado.

Ángulos de fricción interna y basal: Ángulos cuyas tangentes son los coeficientes de fricción interna y basal (Vera & Granada, 2015).

3.3.2.2. Procedimientos para determinación de volumen de FBC

3.3.2.2.1. Definición de volumen de FBC

Para definir el volumen adecuado para las simulaciones de flujos de bloques y ceniza se procede a analizar los rasgos topográficos del último domo formado (Ninahuilca Chico II en este caso) y se considera que en el caso de una futura erupción el crecimiento de un domo, cuyo colapso produciría corrientes de densidad piroclástica tipo bloques y ceniza, será en el mismo lugar donde se ubica el domo más reciente, por lo cual se procede a realizar una reconstrucción espacial del domo a un punto de inestabilidad y futuro colapso.

3.3.2.2.2. Reconstrucción de domos para FBC

La reconstrucción espacial se la ha realizado utilizando softwares como ArcScene y Quantum GIS (QGIS); su procedimiento se detalla a continuación:

1. Con la ayuda del DEM de la zona del domo a reconstruir, se utiliza la herramienta *CONTOUR* de ArcScene para extraer las curvas de nivel del domo (Figura 3.8.a).
2. Se representa las curvas de nivel del domo en QGIS y se las reconstruye manualmente, modificando los nodos y brindando una forma típica de domo iniciando desde la parte superior del mismo (Figura 3.8.b).
3. Se representan las curvas de nivel reconstruidas en ArcScene y se les asigna el atributo de 3D con la herramienta *FEATURE TO 3D BY ATTRIBUTE*. Aquí se especifica el atributo de 3D que será la cota de cada isolínea (Figura 3.8.c).
4. Para visualizar de una mejor manera se crea una superficie triangular (TIN), utilizando la herramienta *CREATE TIN* en ArcScene y las isolíneas con característica de 3D (Figura 3.8.d).

Para la correcta visualización en 3D en ArcScene, debemos habilitar la opción *FLOATING ON A CUSTOM SURFACE* de la pestaña *BASE HEIGHTS* en la propiedad de cada archivo.

Este procedimiento se lo usa para realizar una reconstrucción de domo en el cual tendremos un valor máximo de volumen (forma típica de domo) (Figura 3.9.b), un volumen mínimo (rellenando ligeramente las quebradas y depresiones sin dar forma de domo) (Figura 3.9.c) y un volumen intermedio (promedio aritmético de volumen máximo y mínimo)

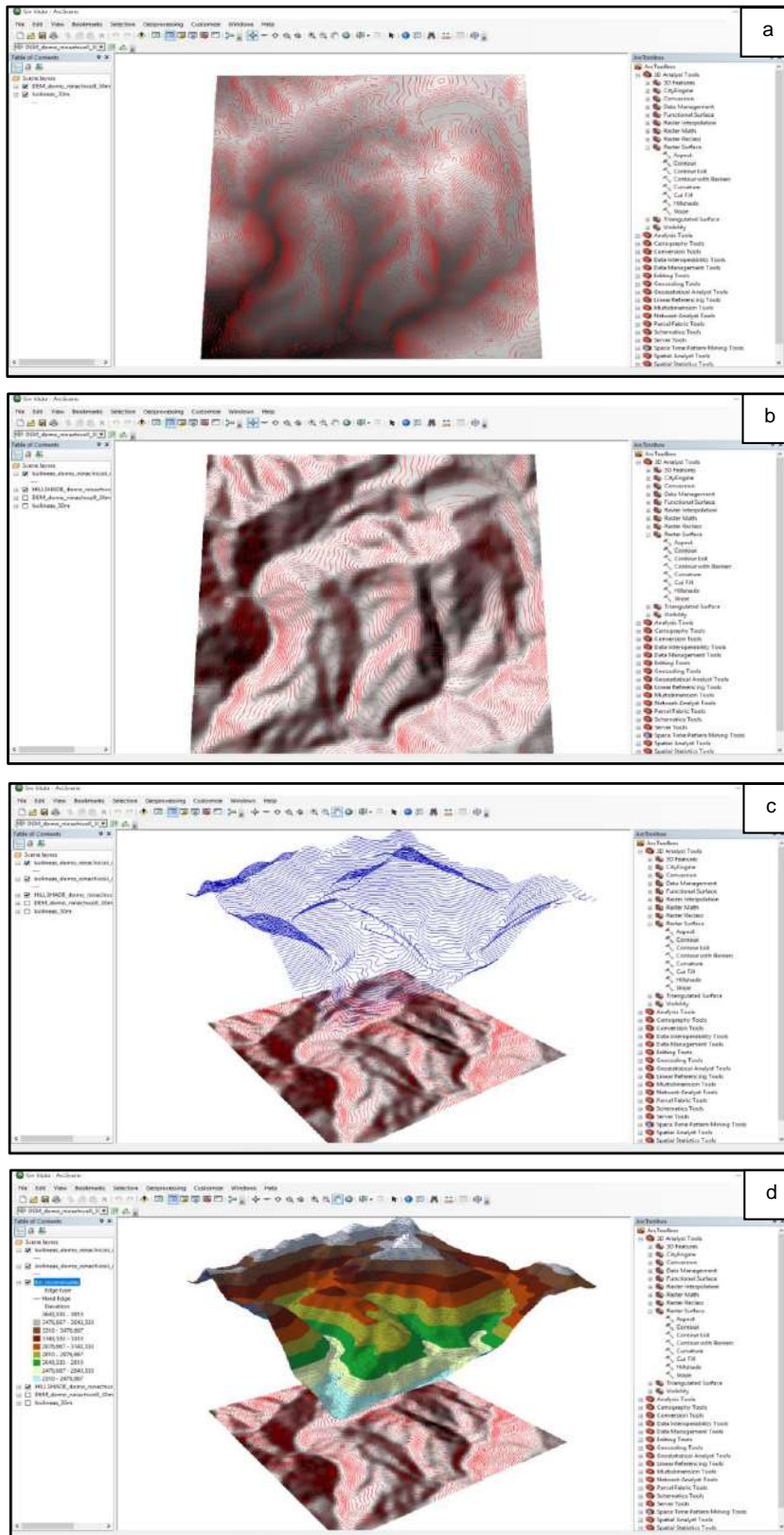


Figura 3.8. Procedimiento de reconstrucción de domos; **a.** Extracción de curvas de nivel; **b.** Reconstrucción de curvas de nivel; **c.** Asignación de característica 3D; **d.** Creación de TIN.

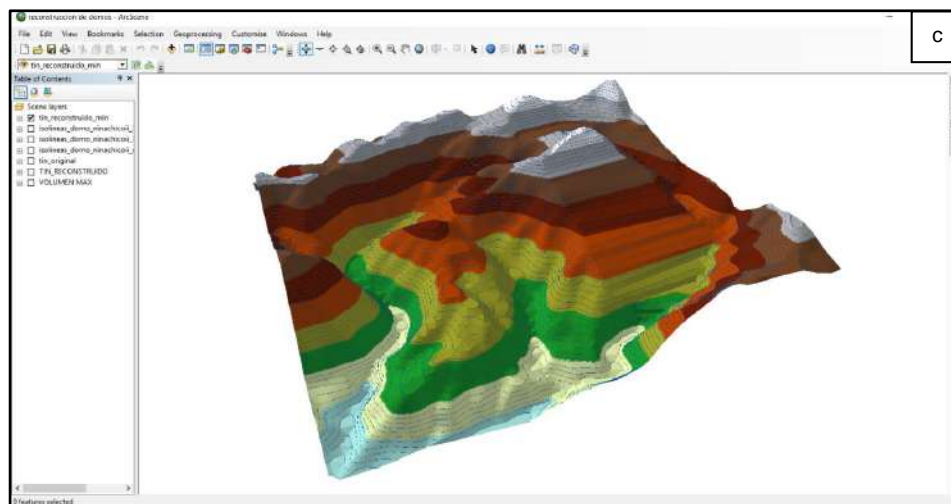
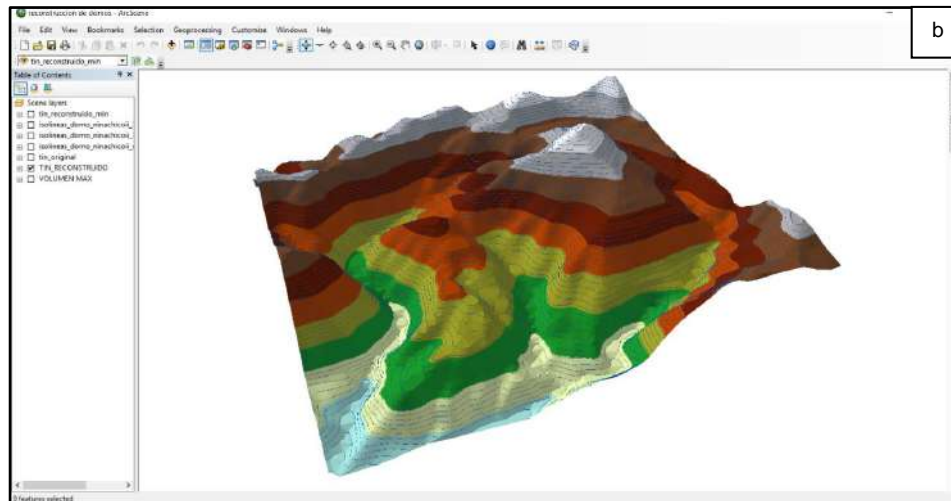
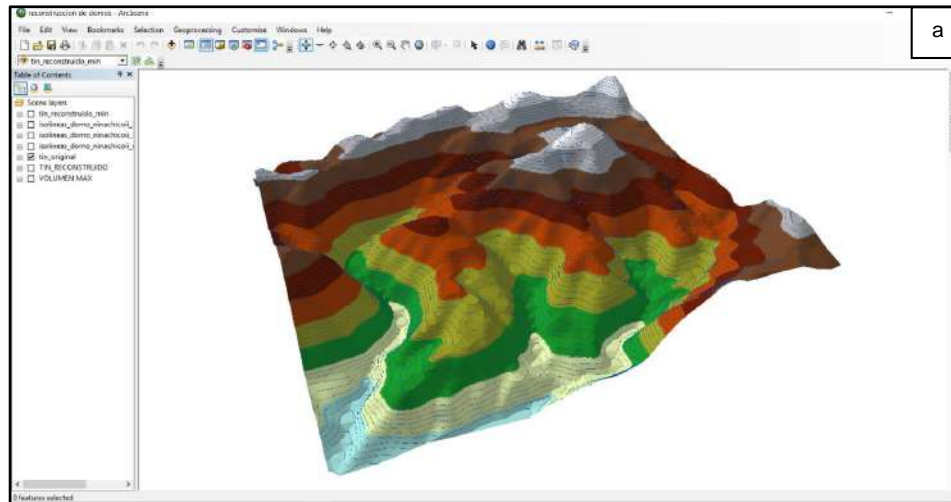


Figura 3.9. *a. Topografía original del domo; b. Topografía reconstruida con volumen máximo; c. Topografía reconstruida con volumen mínimo.*

3.3.2.2.3. Cálculo del volumen del FBC

Para calcular numéricamente el volumen máximo y mínimo debemos realizar el siguiente procedimiento:

1. Usamos la herramienta *SURFACE DIFFERENCE* en ArcScene, donde restaremos las superficies TIN reconstruidas y la superficie TIN original de domo; lo cual nos dará como producto un archivo .shp (Figura 3.10.a).
2. Utilizamos la herramienta *IDENTIFY* en ArcScene y seleccionamos el polígono que representa la diferencia de volúmenes de las superficies reconstruidas y original (polígono más grande generalmente) en donde podemos visualizar el valor numérico del volumen en m^3 de la parte reconstruida del domo, así como también el área en m^2 (Figura 3.10.b).

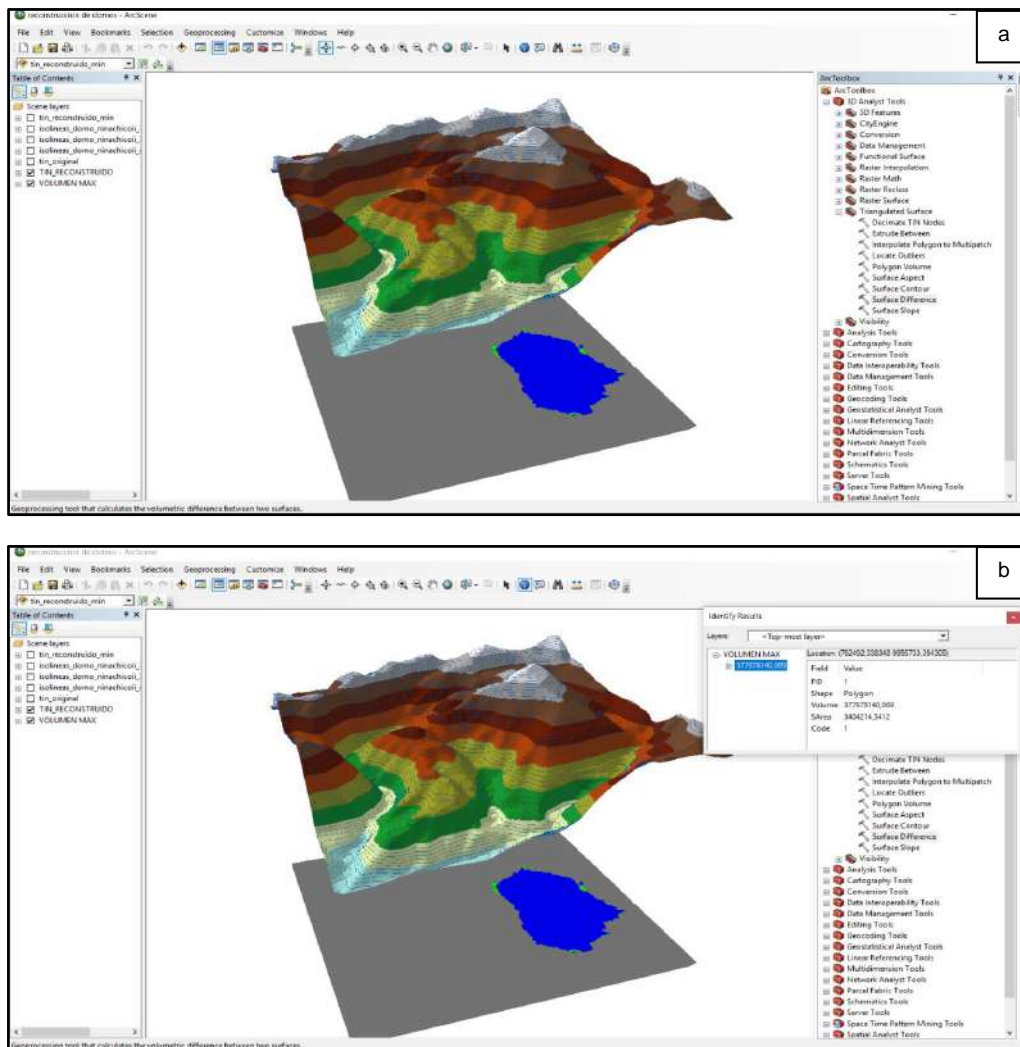


Figura 3.10. Procedimiento de cálculo numérico de volumen; **a.** Diferencia de superficies TIN; **b.** Visualización del valor numérico del área y volumen.

3.3.2.3. Procedimientos previos a las simulaciones de lahares

3.3.2.3.1. Definición de volumen de Lahar Secundario

Dado que el complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca no posee un casquete glaciar ni lagunas cratélicas, los lahares que posiblemente se puedan generar serán generados por lluvias (lahares secundarios). En base a esto para definir el volumen adecuado para las simulaciones de lahares secundarios, es necesario tener depósitos de otros fenómenos volcánicos como los depósitos de caída o de corrientes de densidad piroclástica que puedan ser removilizados con la presencia de lluvias. El volumen de un lahar será una mezcla de material depositado propenso a removilización y de la lluvia caída en cada drenaje en los alrededores del CVAN, debido a lo cual es necesario determinar estos dos volúmenes.

3.3.2.3.2. Determinación de Drenajes y Volúmenes para Lahares Secundarios

Para la determinación de las zonas susceptibles a lahares secundarios se ha realizado un análisis de los drenajes más grandes alrededor del CVAN, Poniendo énfasis en aquellos que puedan afectar a zonas pobladas ubicadas aguas debajo de los mismos.

En consecuencia, se ha determinado un total de 12 drenajes por los cuales, en teoría, descenderían lahares secundarios en el caso de una erupción del CVAN (Tabla 5). De estos 12 drenajes, 5 se ubican al NE y E del CVAN y están directamente relacionados con el Sur del Distrito Metropolitano de Quito, 4 se encuentran al SE del CVAN relacionados al cantón Mejía y principalmente a la población de Tambillo y Cutuglahua, 1 está ubicado hacia el NO del CVAN y está relacionado a la población de Saloya y finalmente 2 se encuentran hacia el O y SO del CVAN y relacionados a las poblaciones de Tandapi y Alluriquín.

Tabla 5. Drenajes definidos para simulaciones de Lahares secundarios

Drenaje Seleccionado	Afluentes	Ubicación
Drenaje 1	Q. El Salado, Q. Jatunloma, Q. Cevallos, Q. Rundobalin, Q. El Sello, Río Grande	Sur de Quito
Drenaje 2	Q. Pasocucho	Sur de Quito
Drenaje 3	Q. Tilicucho	Sur de Quito
Drenaje 4	Q. de Monjas	Sur de Quito
Drenaje 5	Q. Ugtupungu	Sur de Quito
Drenaje 6	Q. Saguanchi	Sur de Quito
Drenaje 7	Q. Riulluchi, Q. Canoos, Q. La Chorrera	Límite cantones Quito-Mejía
Drenaje 8	Q. El Belén, Q. San Antonio, Q. Recoletilla, Q. Tambilloyacú	Nor-occidente de Tambillo
Drenaje 9	Q. Miraflores	Nor-occidente de Tambillo
Drenaje 10	Q. Plata, Q. Atacazo, Q. Arenal, Río Saloya	Nor-occidente del CVAN
Drenaje 11	Q. Santa Ana, Río Santa Ana	Occidente del CVAN
Drenaje 12	Río Minasgüilca Grande, Río Minasgüilca Chico, Río Quitasol, Río Naranjal, Río Pilatón	Sur-occidente del CVAN

En cuanto a la definición de volúmenes para simulaciones numéricas, primero se ha calculado el volumen de agua entrante en cada cuenca hidrográfica, considerando la precipitación máxima diaria de los últimos 53 años (INAMHI, 2018), la cobertura vegetal existente en cada cuenca y su respectivo coeficiente de escorrentía (Martinez, 2006) y el área de cada cuenca hidrográfica con pendientes superiores a 15° (pendiente necesaria para removilización de sedimentos). Producto de esto se obtendrá la cantidad o volumen de agua máxima escurrida y disponible en superficie, que puede removilizar material suelto en el peor caso posible de un día excesivamente lluvioso.

Posteriormente se ha calculado el volumen de material disponible en cada cuenca hidrográfica, adoptando espesores aproximados de los depósitos en cada cuenca, tomando en consideración las simulaciones de caídas de tefra realizadas, de mapeo de corrientes

de densidad piroclásticas y de espesores documentados para dichos depósitos en trabajos previos. Producto de este cálculo se obtiene volúmenes máximos de material disponible para ser mezclado con agua y generar lahares secundarios.

Finalmente, en función de la ubicación de cada cuenca hidrográfica y del tipo de material volcánico que cada una de éstas puedan llegar a tener, se ha discriminado la posible generación de lahares tipo *Debris Flows* y flujos hiperconcentrados hacia los drenajes del flanco occidental y oriental respectivamente. Considerando el límite máximo de concentración de partículas sólidas en cada tipo de flujo (75% de sólidos para *debris flows* y 60% de sólidos para flujos hiperconcentrados), se calcula la relación Agua/Sólidos para cada cuenca; si la relación calculada se aproxima a la relación teórica para cada flujo, se suman los volúmenes de agua y sólidos disponibles que representarían el volumen máximo de un lahar producido en ese drenaje; caso contrario se considera al agua como factor limitante de generación de un lahar y se calcula el volumen de un lahar cuyo volumen parcial de agua sea 25% para *debris flows* y 40% para flujos hiperconcentrados, siendo estos porcentajes la cantidad de agua que ha sido calculada en cada cuenca.

3.3.2.4. Procedimientos para simulaciones en Volcflow

Los siguientes procedimientos son aplicados en ambos casos para simulaciones de flujos de bloques y cenizas y de lahares secundarios, con unas variaciones en los parámetros reológicos del flujo y la forma de las fuentes.

3.3.2.4.1. Preparación del modelo digital de elevación DEM

Previo a simular los fenómenos en Volcflow, se debe preparar el modelo digital de elevación, con la finalidad de optimizar el tiempo de duración de las simulaciones y el reconocimiento correcto por el programa VolcFlow. Dicha preparación del DEM se lo realiza en el software Surfer 13, herramienta informática que permite la creación de mapas, visualización de datos en 2D y 3D, geoprocésamiento (GoldenSoftware, 2017). El procedimiento de cambio de formato necesario del DEM es el siguiente:

1. Se abre el DEM que debe estar en formato .tiff (Figura 3.11.a).
2. Se guarda sin modificar, en formato GRD Surfer 6 Binary Grid (.grd); ya que este es el formato que ha sido programado para que VolcFlow reconozca a nuestro DEM (Figura 3.11.b).

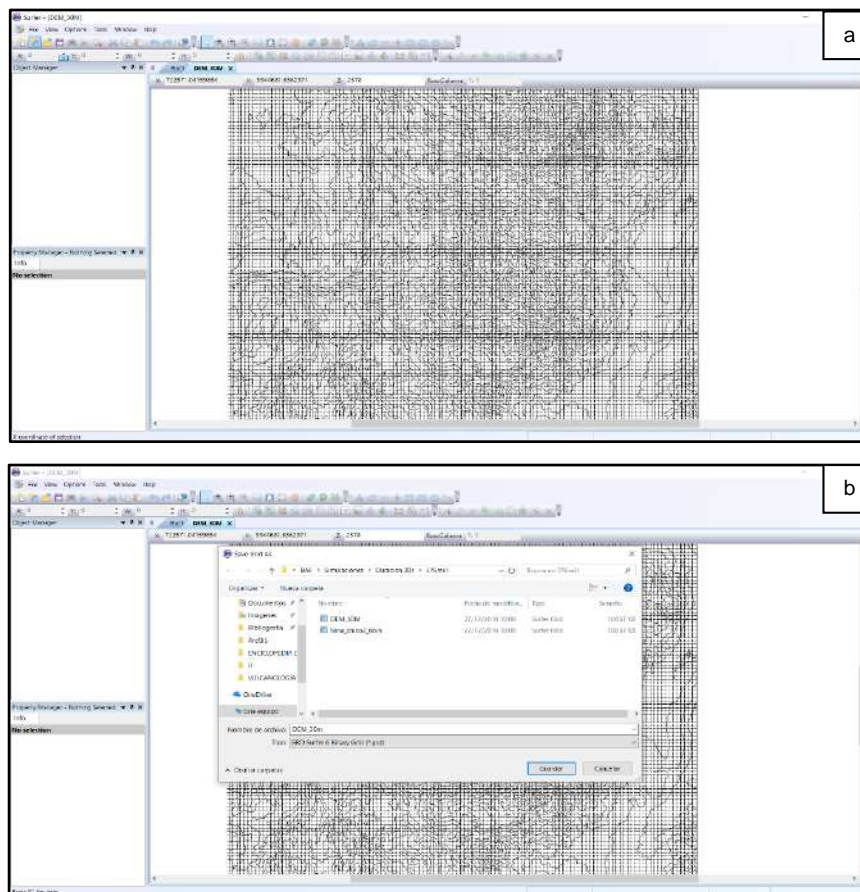


Figura 3.11. a. Apertura del DEM en formato .tiff; **b.** Cambio de formato a .grd.

Posteriormente tendremos ya exportado nuestro DEM en formato .grd listo para ingresarlo a nuestros parámetros de entrada en VolcFlow

3.3.2.4.2. Definición de la fuente

La fuente debe ser definida con un área específica para ser ingresada en VolcFlow. Dicha área debe estar representada de color negro en un archivo ráster .tiff, con transparencia y del mismo tamaño que nuestro DEM a utilizar en las simulaciones, lo cual podremos realizarlo en el software Adobe Photoshop CS6 siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Cargamos nuestro DEM del área deseada en QGIS y se crea un mapa de sombras (Hillshade), utilizando la herramienta MAPA DE SOMBRAS en la sección ANÁLISIS DE TERRENO de la pestaña RASTER (Figura 3.12.a).
2. Se carga dicho hillshade a Photoshop, aceptando el OK en cualquier cuadro de diálogo que pueda desplegarse (Figura 3.12.b).
3. Con la finalidad de visualizar correctamente el hillshade se configura la imagen en 8 BITS en la sección MODO de la pestaña IMAGEN; y en la ventana desplegada se selecciona ECUALIZAR HISTOGRAMA en MÉTODO (Figura 3.12.c).
4. Posteriormente crearemos una capa, en la cual estará definida nuestra área representando la fuente, y dibujamos el área de nuestra fuente (área definida en la reconstrucción de los domos) con la herramienta PINCEL a un TAMAÑO de 4 PÍXELES y 60% de DUREZA (Figura 3.12.d). El valor de tamaño y dureza puede variar dependiendo de la resolución y del área de la fuente que deseamos representar.
5. Cuando esté lista el área de nuestra fuente utilizamos la herramienta VARITA MÁGICA y seleccionamos nuestra área, para asignarle a todos aquellos píxeles un color negro. Se toma este color, ya que su código es utilizado para definir la fuente en VolcFlow (Figura 3.12.e).
6. Finalmente se deshabilita la visualización de la capa de fondo (hillshade) y se guarda la capa en formato .tiff. Adicionalmente se puede guardar todo en formato .psd para volverlo a editar en Photoshop (Figura 3.12.f).

Con el procedimiento antes indicado se logra obtener un archivo .tiff de nuestra área fuente, con transparencia y del mismo tamaño de nuestro DEM que ingresaremos en VolcFlow, lo cual es clave para que VolcFlow corra correctamente sin errores.

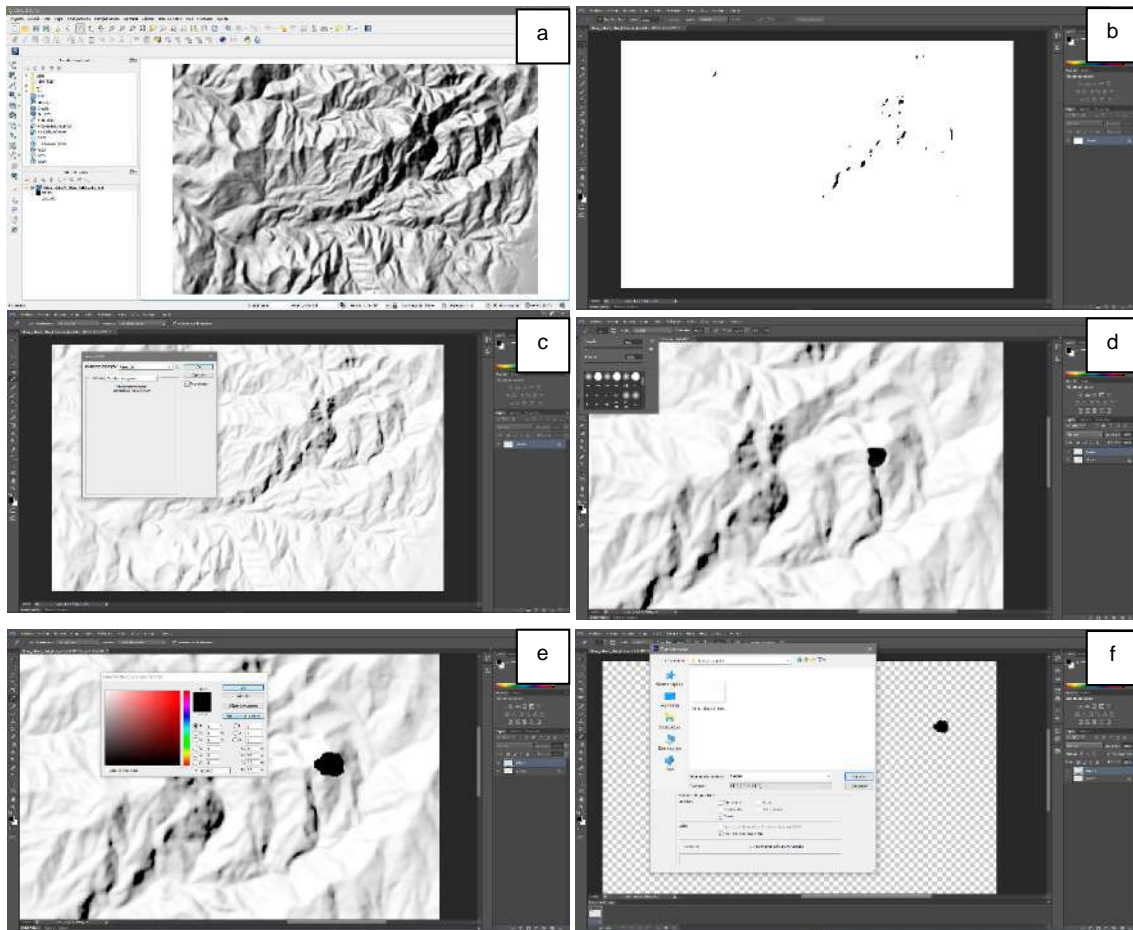


Figura 3.12. Procedimiento por seguir para definir la fuente; **a.** Creación de Hillshade; **b.** Importación de Hillshade a Photoshop; **c.** Cambio en la configuración de visualización de Hillshade; **d.** Creación de capa y representación del área fuente; **e.** Cambio de color del área; **f.** Exportación del archivo de la fuente.

3.3.2.4.3. Ingreso de datos en VolcFlow

Para realizar simulaciones con el código VolcFlow, se necesita de un *script* adicional de fuente que debe ser desarrollado particularmente, en el cual se especifican archivos de entrada como un Modelo Digital de Elevación (DEM), el área de la fuente que se va a simular y se especifican los archivos de salida, que pueden ser una serie de datos a exportar o simplemente un video de la simulación realizada; teniendo la opción de al final de cada simulación poder manipular los resultados, existen opciones en MatLab para exportar archivos .tif .img. jpg de los depósitos de cada simulación o incluso realizar representaciones en 3D.

Este *script* adicional de fuente, ha sido desarrollado y proporcionado por el Ing. Francisco Vásconez del IG-EPN (Figura 3.13). Aquí se especifica el DEM del área en la cual realizaremos la simulación en formato .grd, el área de la fuente del material en formato .tif, las dimensiones en pixeles del área de la simulación (tamaño en pixeles de nuestro DEM), el tiempo activo de alimentación del material, el volumen del material, velocidad inicial del flujo, tiempo máximo de la simulación y el valor de la gravedad. En este código fuente también debe especificarse la reología del flujo a simular, para lo cual deben especificarse parámetros como coeficientes de velocidad, viscosidad, cohesión, densidad *bulk* y ángulos de fricción (basal e interno); estos parámetros se los define tomando en cuenta los utilizados en trabajos previos de simulaciones de FBC o lahares para otros volcanes. Dependiendo de lo que el usuario desee simular, en el código fuente adicional se debe definir las variables correspondientes.

```

%----- Definición de la FUENTE -----%
% Area PF= 0.31761579039 km2; espesores variables de 1 a 10 m dependiendo
% la erosion >>> segun mapa 2012 del libro >>>>>>> NS
% Segun paper Hidalgo et al 2008; espesores promedio de 10 a 20m; area de
% 41 km2; volumen estimado para PF de 0.4 a 0.6 km3 erupcion VEI 3 >>>NS

hfuentes=imread('DMS_misachimo_1\m11_fuente.tif'); % Archivo .tif que representa la fuente
hfuentes=(255-ilog10(hfuentes))/255*5; % 255 = puntos negros del .tif
hfuentes(hfuentes>1)=1; %VEE DESDE AQUÍ!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!]
hfuentes(hfuentes<1)=0; % x= 1851 y= 1471
%hfuentes=flipud(hfuentes); si la fuente se invierte con respecto a la matriz
% Cuidado! el archivo de la fuente debe ser del mismo tamaño que la matriz %
% Debe ser del tipo : ("tamaño en x"-1:-1:1,1:"tamaño en y"
hfuentes=hfuentes(420:-1:1,1:669);

source = 'a1m'; % Tipo de alimentación (ver el archivo "a1m")

talim = 300; % (s) Tiempo de alimentación de los flujos
Volumen = 3766; % (m3) Volumen de los flujos

%alt_a1m=900;

% Velocidad inicial de los flujos (componentes x / y)
u_xx = zeros(1:nrow, 1:ncol-1)*0;
u_xy = zeros(1:nrow, 1:ncol-1)*0;
u_yy = zeros(1:nrow-1, 1:ncol)*0;
u_yx = zeros(1:nrow-1, 1:ncol)*0;

velocidad_ini = 0;

%----- Parametros del CALCULO -----%
%----- Parametros de TIEMPO -----%
pas=1; % No cambiar

dt=0.1; % Tiempo frente dos calculos del modelo (dt puede ser [0.05-1]
% !Cuidado! el tiempo de calculo aumenta con dt pequeños
% El mejor = hacer los tests con dt grande y despues utilizar dt <
dtplot = 1; % Tiempo frente dos representaciones de los resultados
tmax = 900; % Tiempo max de la simulation (el codigo se acaba despues)

g=9.78; % (m.s-2) Valor de la aceleracion de la gravedad

%----- TIPO DE REOLOGIA de los FLUJOS -----%
% !Cuidado! Eso es super importante

coef_u2 = 0.01; % Coeficiente de colision frente partículas (velocidad^2)
viscosity = 0; % (Pa.s) Viscosidad dinámica (Por reologia VISCOSA)
cohesion = 3500; % (Pa) Cohesion (Por reologia PLASTICA)
delta_interne = 0; % (°) Angulo de friccion interno (Por reologia COULOMBS)
delta_basal = 0/180*pi; % (°) Friccion basal (Por reologia COULOMBS)

rho = 1200; % (kg/m3) Densidad del flujo

```

Figura 3.13. Ejemplo del *script* adicional a VolcFlow

Teniendo definido el código fuente correctamente según el tipo de flujo a modelar, se debe tener en el directorio de VolcFlow el código del programa en sí, el código fuente antes mencionado, el DEM de la zona en formato .grd y la fuente en formato .tiff. Posterior a ello se corre el programa VolcFlow y nos desplegara una ventana con la información de la licencia que se utiliza, una ventana de resumen de los parámetros de la simulación a realizarse y una última ventana en la cual nos solicita que ingresemos el código fuente en el cual está especificado nuestros parámetros. Posterior a ello se nos despliega una nueva

ventana, la cual debemos ajustar al tamaño deseado y dar click en *REPRESENTATION*, esto permite ajustar la ventana del video que es producto de nuestra simulación y finalmente damos click en *OK* (Figura 3.14). Con esto la simulación empieza a correr y el tiempo que tarde en finalizar dependerá de algunos factores como la capacidad del equipo en el cual estemos corriendo las simulaciones, el tamaño y resolución del DEM utilizado y el tiempo de duración de la simulación que hayamos ingresado.

Los resultados de las simulaciones son videos de su transporte y emplazamiento en función de los rasgos topográficos; pero también lo que nos interesa para realizar el mapa de peligro por este fenómeno es el espesor del depósito dejado por el fenómeno. Para esto último se utilizan más herramientas disponibles en Matlab, Adobe Photoshop, Adobe Illustrator y GIS con la finalidad de que los espesores se los represente correctamente en un mapa.

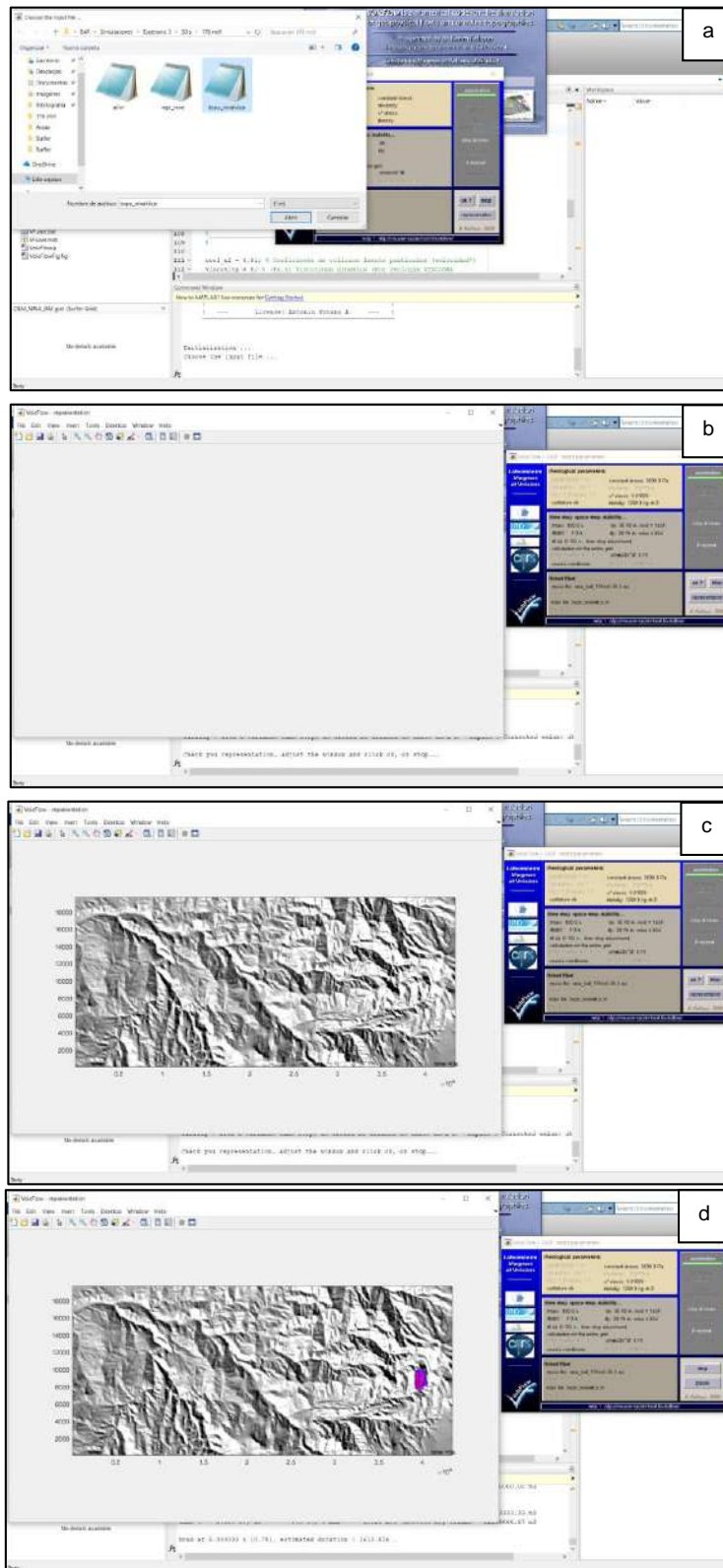


Figura 3.14. Procedimiento de ingreso de datos en VolcFlow; **a.** Inicio de la interfaz de VolcFlow; **b.** Despliegue y ajuste de la vista preliminar de la simulación; **c.** Vista preliminar final de la simulación; **d.** Inicio y progreso de la simulación en VolcFlow.

3.3.2.4.4. Extracción de espesores y georreferenciación

Después de terminada cada simulación se grafica los espesores dejados, utilizando las siguientes funciones en la ventana de comandos de Matlab:

- `figure` ► Abre una nueva ventana para las figuras de los espesores
- `h=flipud(h)` ► Calcula el espesor en cada pixel
- `imagesc(h)` ► Grafica los espesores

Y posterior a ello, para unificar el nivel base de los espesores (espesor=0), se modifica el color de este nivel utilizando la herramienta `COLORMAP` de la pestaña `EDIT` de la ventana del gráfico de espesores (Figura 3.15), y se guarda estos gráficos en los formatos `.fig` (para poder editarlo posteriormente si es necesario) y `.tif` (formato para importarlo a Adobe Photoshop y continuar el proceso de digitalización). Este proceso se lo realizó para todas las simulaciones elaboradas.

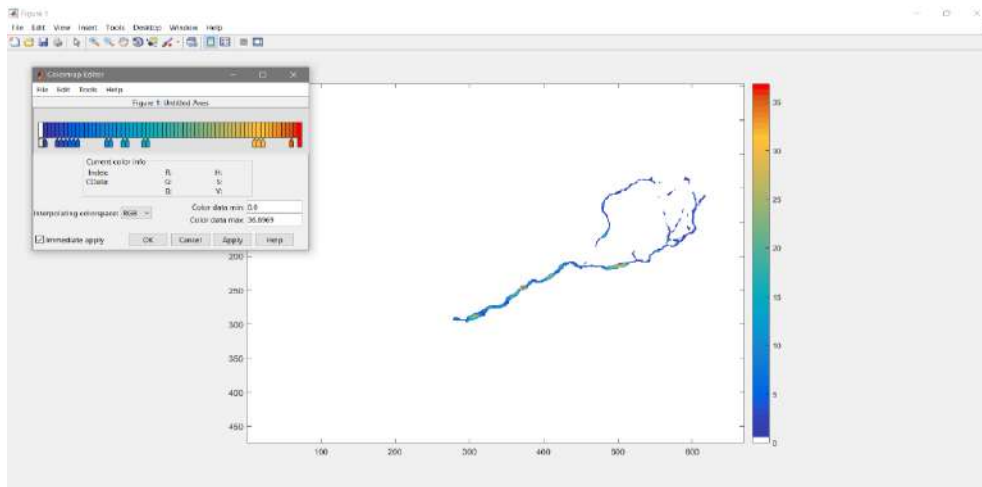


Figura 3.15. Edición del color de base en el proceso de extracción de espesores de las simulaciones de flujos de bloques y ceniza.

Posterior a tener los espesores en un gráfico (sin sistema de coordenadas) debemos quitar el fondo blanco para después superponerlo a un Hillshade y digitalizarlo. Para retirar este fondo blanco se usa la herramienta VARITA MAGICA en Adobe Photoshop y se guarda en formato .png para conservar la transparencia del fondo y tener los pixeles con el espesor del depósito (Figura 3.16).

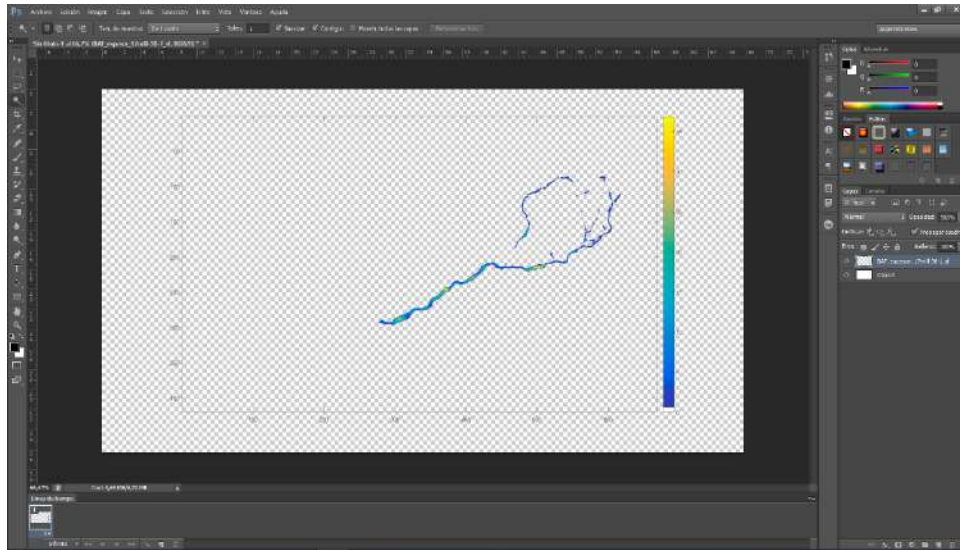


Figura 3.16. Espesores del depósito de un flujo de bloques y ceniza modificado con transparencia.

Después se procede a superponer la imagen de los espesores en formato .png con el hillshade del DEM utilizado en las simulaciones de Matlab, con lo cual se superpone nuestros espesores perfectamente con los drenajes del hillshade y se lo guarda en formato .tif; este paso lo realizamos en Adobe Illustrator (Figura 3.17).

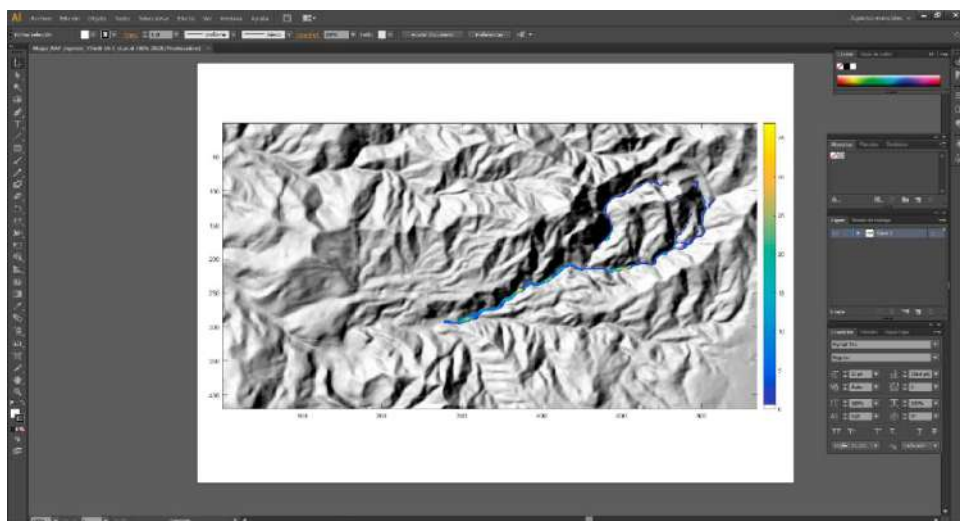


Figura 3.17. Superposición de los espesores con el hillshade del área.

Como paso siguiente debemos georreferenciar cada uno de los mapas de espesores en un GIS, con la finalidad de darles un sistema de coordenadas y concatenarlos con información preexistente o tomada en el campo para la validación de la mejor simulación y posteriormente digitalizarla como tal.

3.3.3. Trabajos de campo

El trabajo realizado en el campo constituye unas de las metodologías más comunes empleadas por geólogos, pero al mismo tiempo es una de las más útiles y confiables formas de adquisición de datos, ya que se visualiza en la realidad fenómenos que sucedieron en el pasado y han dejado su huella (depósitos) hasta la actualidad. Los trabajos de campo realizados para el presente trabajo de investigación han sido con el objetivo principal de delimitar las zonas de peligros por corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza, ya que, a diferencia de flujos de bloques y ceniza y lahares, no se ha desarrollado una herramienta informática que puedan reproducir con gran confiabilidad a estos fenómenos debido a sus características dinámicas muy complejas. Además del objetivo antes mencionado, con los trabajos de campo se espera lograr la corroboración de los datos obtenidos en las simulaciones para el resto de los fenómenos volcánicos, o, al menos, marcar límites y guías para mejorar las simulaciones realizadas en softwares.

3.3.3.1. Mapeo de ignimbritas

El mapeo se lo realizó para el último depósito dejado por las corrientes de densidad piroclástica de la última erupción del volcán Ninahuilca (edificio potencialmente activo) que sucedió hace 2.267 ± 17 años AP (Hidalgo, 2006).

El mapeo de depósitos de corrientes de densidad piroclástica se lo realiza principalmente siguiendo las quebradas en los alrededores de un volcán y se va definiendo los límites superiores del depósito en un mapa topográfico para posteriormente digitalizarlo de una manera correcta.

Anteriormente, Washington Maruri (1993) como parte de su tesis de pregrado, realizó el mapeo geológico de una gran parte de la zona de estudio. La cartografía de este depósito de ignimbritas se la ha utilizado como referencia en las partes proximales del complejo

volcánico. Este mapeo se lo corroboró y se ha agregado nuevas zonas mapeadas para las ignimbritas del Ninahuilca hacia el occidente del complejo volcánico a lo largo del Río Pilatón. Este procedimiento se ha tomado considerando la información previa disponible y en otros sectores se ha inferido los límites del depósito debido la inaccesibilidad a gran parte de la zona de estudio.

Todo este proceso se ha conseguido con 7 salidas de campo, en las cuales se tomaron los puntos GPS, se midió aproximadamente la altura de los afloramientos de ignimbritas, se hizo una breve interpretación de campo, en algunos casos se realiza columnas estratigráficas, se tomó muestras para compararlas entre sí y verificar gracias a la química que se trata del mismo depósito de ignimbrita.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Simulaciones de ceniza

4.1.1. Definición de escenarios eruptivos

La reactivación de un volcán puede darse en distintos pasos y de distinta magnitud, dependiendo el tipo de volcán y la fuente de sus productos; dicha magnitud puede verse reflejada en la historia eruptiva del volcán, de lo cual se tendrá una idea de las erupciones y su alcance reflejados en los depósitos volcánicos.

Para el caso del Complejo Volcánico Atacazo – Ninahuilca se ha estudiado los depósitos de sus erupciones (corrientes de densidad piroclástica y capas de ceniza) en algunos trabajos previos (Hidalgo, 2006; Hidalgo et al., 2008), en base a lo cual se ha deducido tres escenarios eruptivos probables. Dichos escenarios son descritos a continuación:

Escenario 1: Erupción con Índice de Explosividad Volcánica (VEI) 1 a 2 con una altura de columna eruptiva de 4 km sobre el nivel del cráter, expulsando un volumen de 0.001 km³ DRE. Corresponde a una actividad eruptiva vulcaniana, poco explosiva con expulsión de material volcánico. Depósitos comunes son la caída de tefra y ceniza en las cercanías del volcán.

Escenario 2: Erupción con Índice de Explosividad Volcánica (VEI) 3 a 4 con una altura de columna eruptiva de 13 km sobre el nivel del cráter, expulsando un volumen de 0.1 km³ DRE. Corresponde a una actividad eruptiva vulcaniana a pliniana, explosiva con expulsión de material volcánico. Depósitos comunes son de caída la tefra y ceniza a distancias moderadas del volcán, corrientes de densidad piroclástica en las proximidades del volcán con emisión de domos pequeños y generación de lahares secundarios de poco volumen.

Escenario 3: Erupción con Índice de Explosividad Volcánica (VEI) 5 con una altura de columna eruptiva de 29.5 km sobre el nivel del cráter, expulsando un volumen de 0.8 km³ DRE. Corresponde a una actividad eruptiva pliniana a ultra-pliniana, muy explosiva con expulsión de material volcánico. Depósitos comunes son la caída de tefra y ceniza a distancias lejanas del volcán, corrientes de densidad piroclástica con alcances moderados

desde el volcán, emisión de domos grandes, flujos de lava y lahares secundarios de grandes volúmenes.

4.1.2. Parámetros eruptivos de fuente

Los parámetros utilizados para realizar las simulaciones de caída de ceniza han sido determinados tomando medidas promedias representativas para cada escenario evaluado, siendo estos parámetros alturas de las columnas de ceniza, volumen expulsado y tiempo de duración de la erupción, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros eruptivos utilizados en las simulaciones de caída de ceniza.

ESCENARIO	INDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA	ALTURA DE LA COLUMNA (km)	VOLUMEN DE CENIZA (km ³ DRE)	DURACIÓN DE LA ERUPCIÓN (horas)
Escenario 1	VEI 1 – VEI 2	4	0.001	12
Escenario 2	VEI 3 – VEI 4	13	0.1	12
Escenario 3	VEI 5	29.5	0.8	24

4.1.3. Obtención de datos y procesamiento

Para definir estadísticamente las zonas más probables de caída de ceniza por una erupción se ha realizado simulaciones con el modelo antes descrito (Capítulo 3) para un periodo de tiempo de 10 años (tiempo estadísticamente apropiado para la metodología utilizada); realizando una simulación mensual el día número 15 de cada mes, ya que así se tiene un evento representativo para dicho mes. De esto se obtuvo inicialmente 120 simulaciones por cada escenario planteado (360 simulaciones iniciales en total).

Cada simulación de ceniza genera un gráfico .kmz (formato para Google Earth). Este gráfico se lo representa cada vez en Google Earth Pro y se toman las medidas aproximadas de azimut de los ejes de dispersión de la nube de ceniza en la atmósfera utilizando la herramienta REGLA (Figura 4.1), con la finalidad de analizarlos en un ploteo azimut vs tiempo (Figura 4.2), buscando tendencias que puedan darse en función de las condiciones meteorológicas en el año.

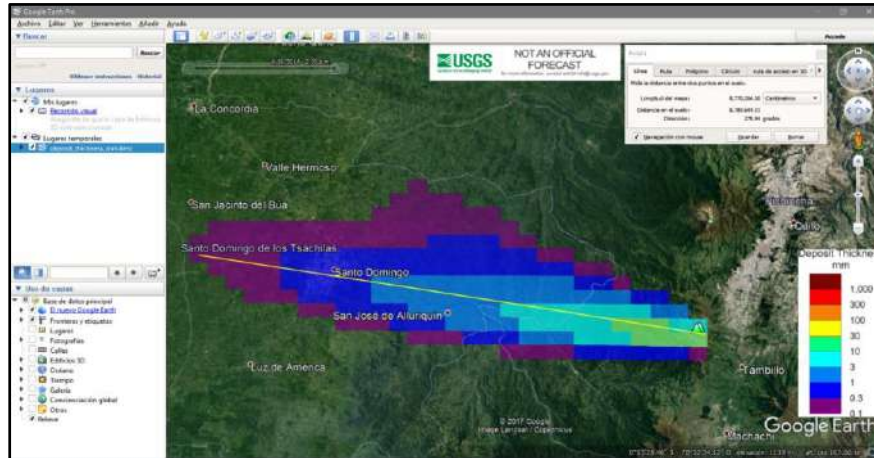


Figura 4.1. Proceso de medición de azimut de dispersión de ceniza.

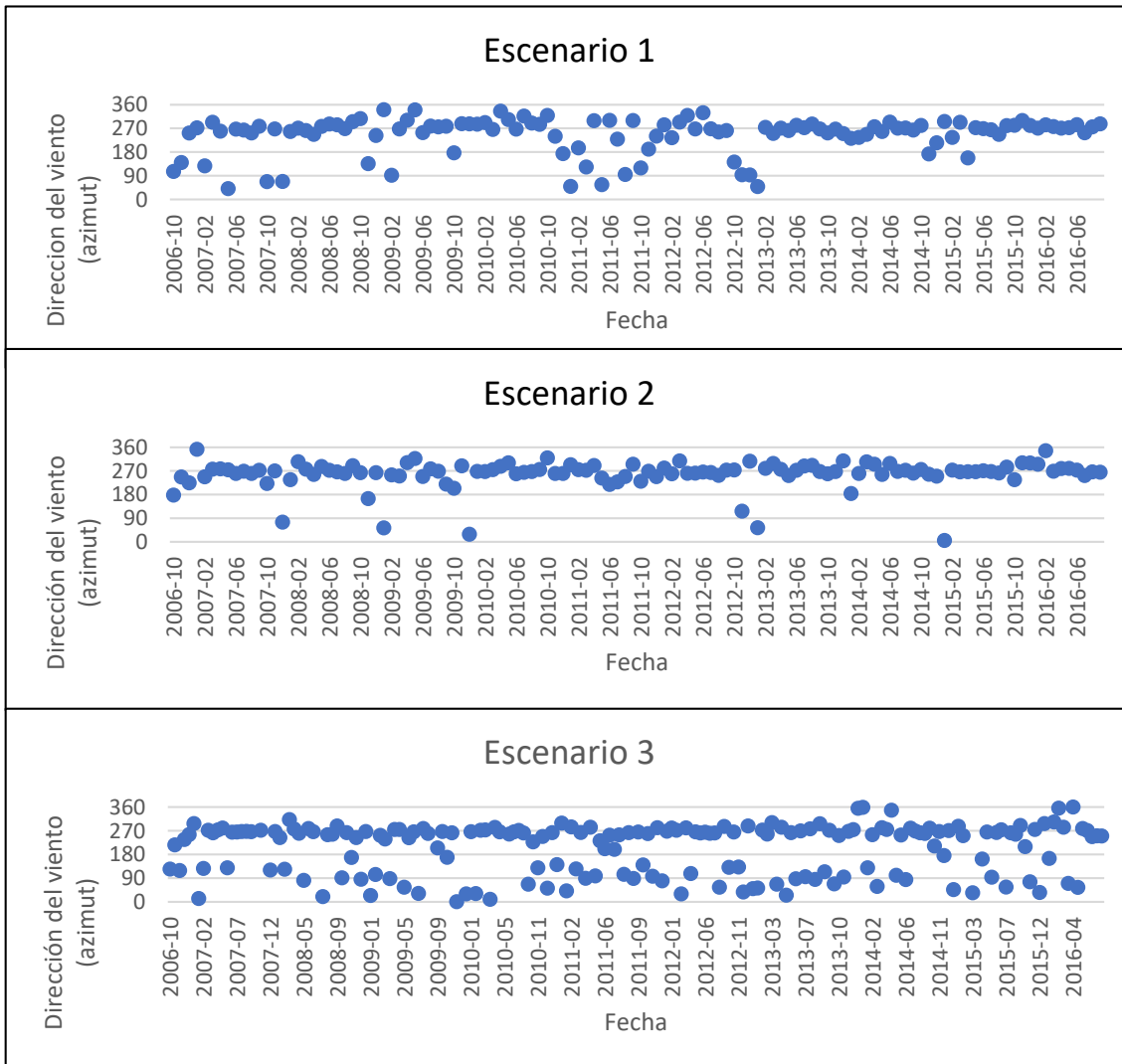


Figura 4.2. Ploteo Azimut vs Tiempo para cada escenario de caída de ceniza considerado.

Del análisis del ploteo azimut vs tiempo se dedujeron ciertas tendencias para cada escenario previamente definido. Observando así que para el escenario 1 no existe una tendencia clara en las direcciones del viento, por lo cual no es necesario realizar una discriminación más estricta en los mapas de cenizas finales y concluimos que la cantidad de simulaciones para dicho escenario es suficiente para realizar un mapa de peligro por ceniza. Lo contrario, sucedió para los escenarios 2 y 3, donde se observó que para los meses “invernales” (noviembre-enero) la dirección del viento es distinta al resto del año (febrero-octubre), y debido a esto fue necesario realizar una discriminación más rigurosa en los mapas de ceniza finales por las tendencias en las direcciones de los vientos. Con esto se concluye que la cantidad de simulaciones para estos meses es estadísticamente insuficiente para realizar un mapa de peligros por ceniza. En base a estos primeros análisis de nuestros datos se deduce que es necesario realizar más simulaciones de ceniza para los meses invernales, con lo cual se simula más caídas de ceniza los días 05, 15 y 25 de cada uno de estos meses invernales, más para los meses no invernales la cantidad de simulaciones es suficiente. Finalmente realizamos un total de 3 simulaciones por cada uno de estos meses invernales y obtenemos un número de 90 simulaciones por cada época del año para cada escenario (escenario 2 y 3). Todo este proceso se realizó con la finalidad de tener un eje estadísticamente correcto para nuestros mapas finales de ceniza. Para el escenario 1 no se observan claramente estos ejes, pero para los escenarios 2 y 3 se observa claramente la tendencia de estos ejes: los promedios del azimut (media aritmética) son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Azimut promedio para la dispersión de ceniza de los escenarios 2 y 3.

	Febrero - Octubre		Noviembre – Enero	
	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 2	Escenario 3
Azimut del eje de dispersión promedio	266°	255°	183°	197°

Como un paso siguiente en la elaboración de los mapas de ceniza, se representaron todos los archivos shapefiles (.shp) de los depósitos de ceniza para cada simulación (considerando la discriminación de direcciones del viento antes mencionada) en un Sistema de Información Geográfica (GIS). Cada archivo shapefile contiene de 6 a 8 isóneas que son categorizadas en base al espesor del depósito (por ejemplo: color rojo para espesor de

300 mm y color verde para espesor de 0.1 mm) y se procedió a trazar una nueva isolínea (isolínea promedia), la cual contiene aproximadamente al 80% de isolíneas del mismo espesor dentro de ella (por ejemplo: si son 120 isolíneas en total para un mismo espesor, se debe excluir máximo a 24 e incluir 96) (Figura 4.3).

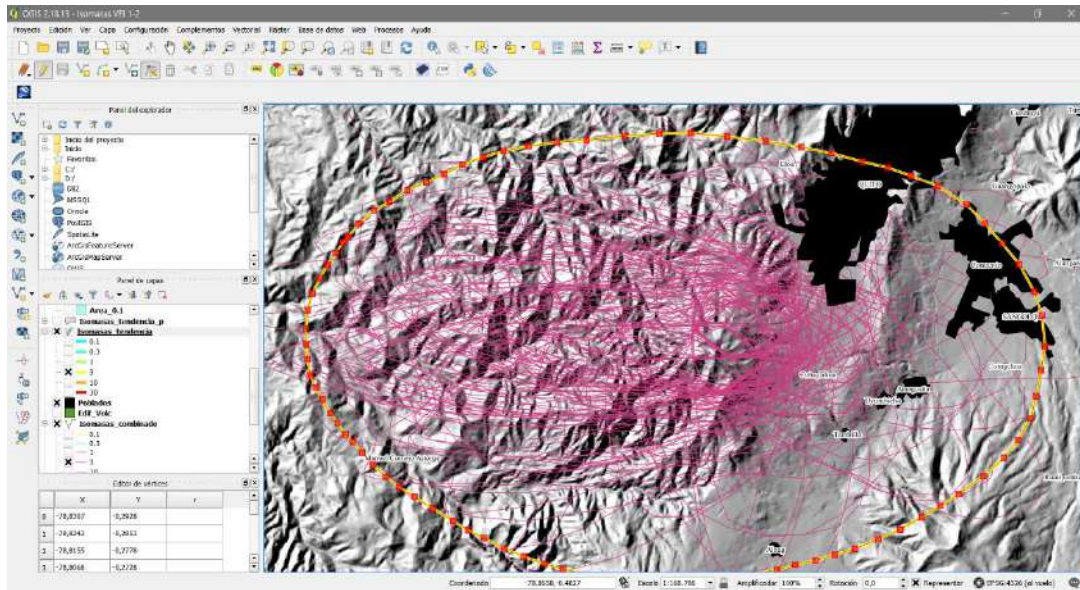


Figura 4.3. Ejemplo del trazo de isolínea de 3 mm de depósito en el escenario 1.

Como resultado de este procedimiento se obtiene de 6 a 8 isolíneas por cada escenario definido (considerando tendencias de viento), que nos definen los límites aproximados de depósitos de ceniza del mismo espesor. Estas isolíneas graficadas representan el 80% de los casos en los cuales existe caída de ceniza en estas zonas. Adicionalmente se ha querido tener mayor certeza en las zonas de caída de ceniza si la dirección del viento llegase a variar de la predominante, por lo cual se han trazado zonas de afectación para el 100% de los casos; en cuya situación las isolíneas son de forma circular y con los alcances máximos dados en las simulaciones. Las zonas afectadas por ceniza en estos casos dependerán de la dirección del viento al momento de la erupción.

4.1.4. Resultados

4.1.4.1. Simulaciones numéricas

Se realizó un total de 480 simulaciones de dispersión y caídas de ceniza que corresponden a un periodo de 10 años, de las cuales 120 corresponden al escenario 1, 90 al escenario 2 en meses no invernales (febrero – octubre), 90 al escenario 2 en meses invernales (noviembre – enero), 90 al escenario 3 en meses no invernales (febrero – octubre) y 90 al escenario 3 en meses invernales (noviembre – enero).

Se observa que para el escenario 1, la dirección de viento predominante en el año es hacia el occidente, de igual forma que para los meses entre febrero y octubre para los escenarios 2 y 3. Para los meses de noviembre, diciembre y enero de los escenarios 2 y 3 se observa una mayor variabilidad en la dispersión de ceniza, teniendo un mayor alcance hacia el norte, sur y oriente que en el resto de los meses del año. Esta variación probablemente se debe a fluctuaciones y cambios en las condiciones atmosféricas por la época invernal y a las direcciones y velocidades del viento a alturas más altas en la pluma de ceniza.

Para facilitar un entendimiento del impacto de cada escenario se ha dibujado 6 isomasas para el escenario 1 y 8 isomasas para cada mapa de los escenarios 2 y 3, de tal manera que se puede visualizar correctamente los límites aproximados de cada espesor de ceniza en las distintas localidades del país.

Los mapas resultantes de caídas de ceniza a distintas escalas dependiendo las direcciones de los vientos en las distintas épocas del año, al igual que las poblaciones afectadas por caída de ceniza se muestran en los Anexos 3 y 4 del presente trabajo de investigación; pero para mejorar el entendimiento de la comunidad en general se ha realizado mapas simplificados de cada escenario, los que se observan en las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6.

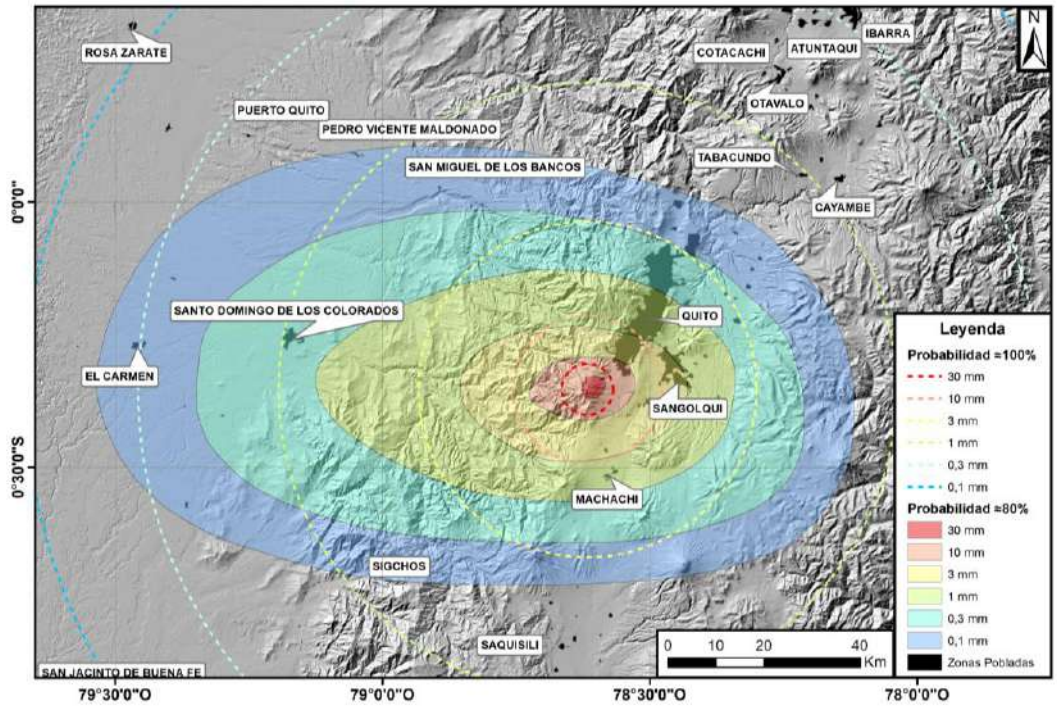


Figura 4.4. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 1 (VEI 1-2).

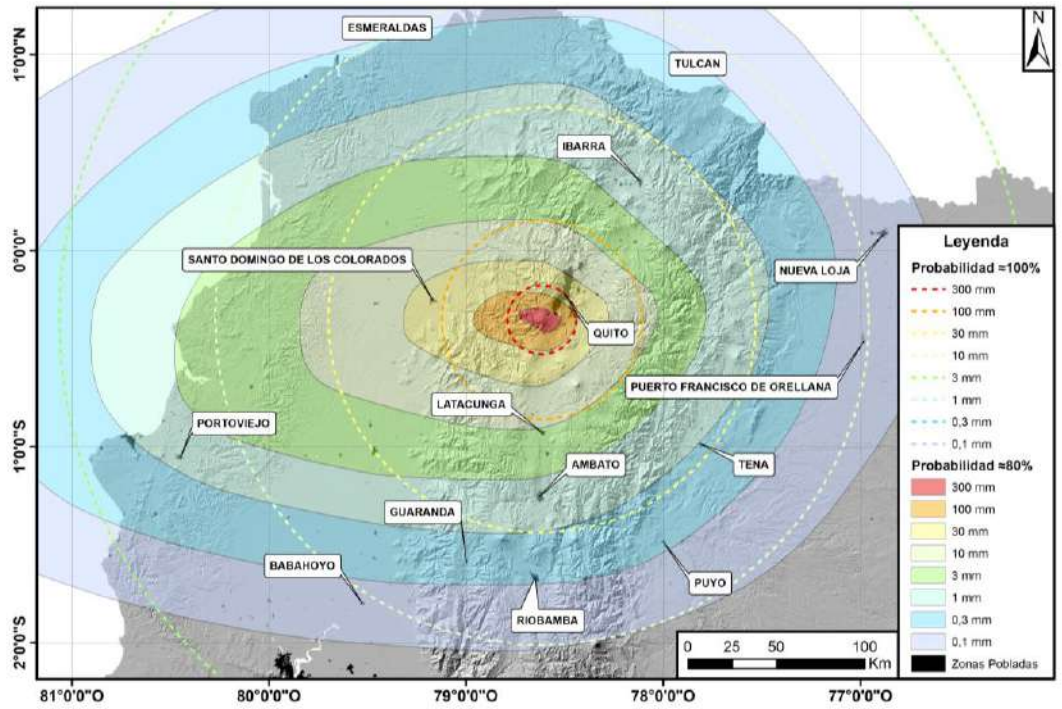


Figura 4.5. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 2 (VEI 3-4).

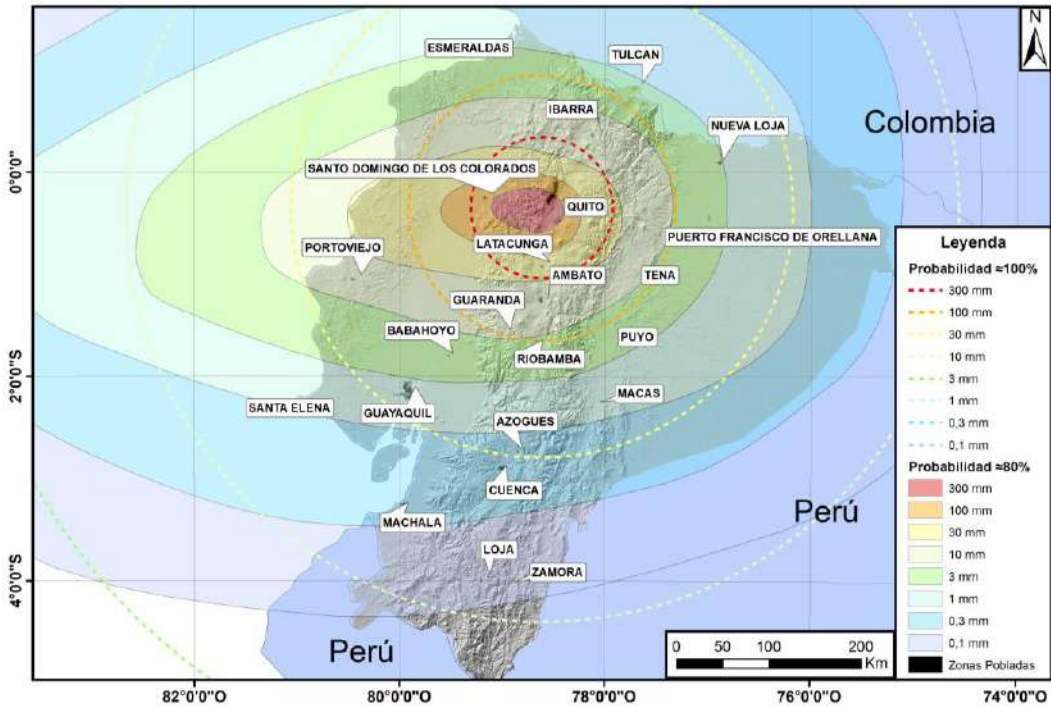


Figura 4.6. Mapa de peligro por caída de ceniza para el escenario 3 (VEI 5).

4.1.4.2. Trabajo de campo

En el trabajo de campo realizado se pudo tomar medidas de espesores de los depósitos de caída e identificar periodos eruptivos previos al N6; con lo cual se ha podido identificar los periodos eruptivos N5, N4 y N3 con sus depósitos de caídas y posibles flujos asociados (Ash Flows).

Estos datos de espesores tomados se utilizan para corroborar simulaciones realizadas por caídas de ceniza. En resumen, en el trabajo de campo se ha podido tomar espesores para eventos VEI=5 de 23 y 35 cm en la zona de las antenas del Atacazo (Figura 4.7), espesores de 15 y 36 cm para la zona de La Ecuatoriana en el Sur de Quito (Figura 4.8), espesores de entre 42 y 35 cm en las proximidades de La Carcacha (Figura 4.9) y espesores de 70 cm en Alóag (Figura 4.10), lo cual nos ayuda a validar los espesores simulados en las proximidades del CVAN, con la posibilidad de que una parte de los depósitos originales hayan sido erosionados. Las columnas estratigráficas de todas las secciones realizadas, al igual que su ubicación se encuentran en los Anexos 1 y 2.

Para una verificación óptima de a qué evento eruptivo cada depósito pertenece, se ha tomado muestras de cada estrato de caída, para realizar su análisis químico y compararlo con la geoquímica existente de trabajos previos para estos depósitos, pero por motivos de tiempo del presente proyecto, no se ha podido incorporar estos resultados en esta sección.

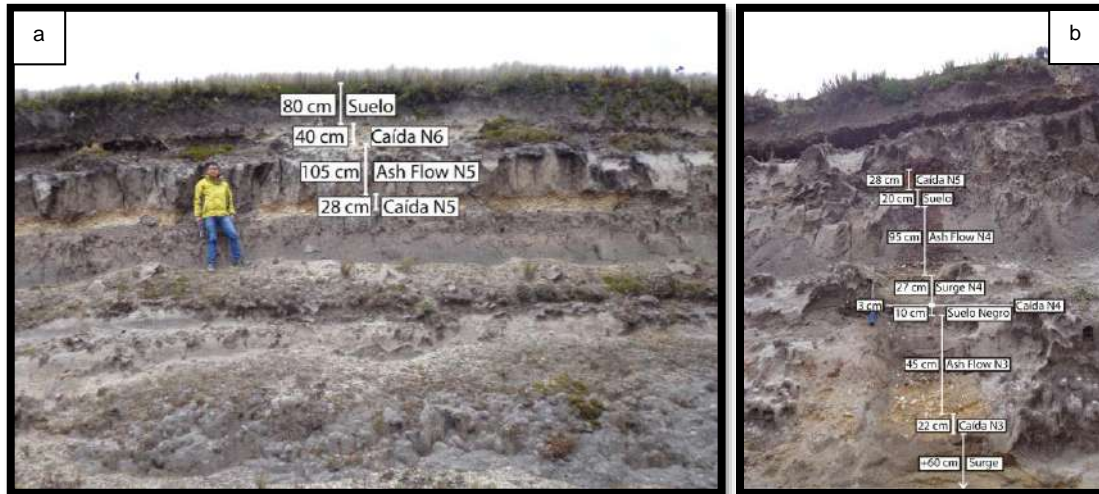


Figura 4.7. Espesores de caídas en la zona de las Antenas del Atacazo (Pto 02); **a.** Depósitos N5 y N6; **b.** Depósitos N4 y N3. (Mayor detalle en Anexo 2)



Figura 4.8. Depósitos de caída y secuencia de lahares secundarios en la zona de La Ecuatoriana (Pto 03).



Figura 4.9. Depósitos de caídas en el sector de La Carchacha; **a.** Depósito de caída del evento eruptivo N6 (Pto 05); **b.** Depósito de caída del evento eruptivo N6 (Pto 04).



Figura 4.10. Depósitos de caída en el sector de Alóag (Pto 06).

4.1.5. Discusión

Mediante la elaboración de los mapas de peligros por ceniza para distintos escenarios eruptivos del complejo volcánico Atacazo – Ninahuilca se ha podido observar que el material de caída emitido por una erupción del CVAN podría tener un alcance variable e importante.

Realizando un análisis de los datos de simulaciones se deduce que para el escenario 1 se da una mayor afectación a escala local, en los alrededores del complejo volcánico y ciudades cercanas al volcán; por lo cual se vería afectada la capital del país y varios sectores en los alrededores de la provincia de Pichincha, en adición a ellos se afectaría zonas productivas en la sierra y una potencial pérdida económica por daños a actividades agrícolas y ganaderas.

Por otra parte, para el escenario 2 se observa una afectación a escala nacional, ya que la caída de ceniza se daría en gran parte hacia la región costa, y específicamente en los meses invernales a la región oriental, afectando ligeramente las localidades incluso al sur de la latitud 2°S (Anexo 4). De igual manera los perjuicios sociales y económicos serían mayores que en el escenario 1.

Pero para el escenario 3, sea en cualquier mes del año se observa una afectación nacional de todas las regiones, siendo el alcance de la ceniza de centenares de kilómetros, llegando incluso a afectar al sur de Colombia. El daño a distintas áreas productivas, sociales y culturales del país se verían grandemente afectadas, especialmente en los alrededores del complejo volcánico.

En base a los datos de espesores medidos en el campo y a datos de espesores de trabajos previos, se concluye que, de los tres escenarios planteados, el más probable es el escenario 2 ya que, los registros geológicos de las últimas erupciones del CVAN evidencian intensidades del límite superior de VEI 4 y límite inferior de VEI 5, con formación de columnas de ceniza plinianas superiores a 20 km de altura sobre el nivel del cráter y flujos asociados (Almeida, 1996; Andrade et al., 2012; Hidalgo, 2006; Hidalgo et al., 2008; Maruri, 1993), cuyos depósitos en el campo se relacionan de mejor manera al escenario número 2 que representan espesores de hasta 450 mm en los alrededores del centro de emisión.

Por otra parte, el escenario 3 es considerado el peor escenario probable, ya que a pesar que sus depósitos no se correlacionen tan bien con los tomados en el campo como en el escenario 2, los depósitos evidenciados en el escenario 3 representan la máxima afectación posible durante una erupción pliniana del CVAN, con espesores de hasta 1500 mm en los alrededores del centro de emisión.

Considerando que al inicio de todo este procedimiento los escenarios eruptivos fueron definidos en base a la historia eruptiva del complejo volcánico y a las intensidades de las mismas, los datos de espesores de las caídas reales de las últimas erupciones representan

una variable independiente y constituyen un método de verificación y comprobación de la fiabilidad de nuestras simulaciones y procedimiento realizado; debido a que se ha tomado medidas de espesores de los depósitos en trabajos de campo y arrojan espesores que van acorde a los mapas realizados (Anexo 4). Específicamente para el caso del escenario 2 hemos comprobado que los espesores de los depósitos de caídas en varios sectores próximos al complejo volcánico superan los 300 mm y en zonas un poco más distales presentan espesores de 150 a 250 mm, con lo cual nuestro modelo utilizado queda debidamente validado; sin ignorar que el factor que controla la depositación de este tipo de producto volcánico es el viento. También se ha realizado la validación del modelo con los datos de espesores de otros trabajos como el de la Ing. Angélica Robles (2013), en el cual realizó estudios de caídas volcánicas al sur del distrito metropolitano de Quito, de lo cual concluyó que los depósitos del complejo Atacazo-Ninahuilca son las unidades SB-AE, QEC-C y QEC-G de aquel trabajo (Anexo 1). Los datos de espesores utilizados para la validación del escenario 2, considerado más probable, se los presenta a continuación en la Tabla 8.

Tabla 8: Datos de validación del escenario 2 de caídas de ceniza.

Fuente	Distancia al centro de emisión (km)	Espesor real (mm)	Espesores simulados (mm)		
			Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Robles - SB	10,17	300	3-10	>300	>300
Robles - QEC	10,37	180-850	3-10	100-300	>300
Pto 1	18,73	250	3-10	100-300	>300
Pto 2	1,6	220-400	30-100	>300	>300
Pto 3	5,1	150-360	10-30	>300	>300
Pto 4	6,5	420	10-30	>300	>300
Pto 5	8,2	400	3-10	100-300	>300
Pto 6	12,42	100-700	3-10	100-300	>300

Por otra parte, es posible que en el pasado se hayan dado erupciones de menor intensidad como el escenario 1, pero que su registro (depósitos) no haya quedado preservado y haya sido erosionado por completo, debido a lo cual se realizaron mapas para este caso. En cualquier caso, los mapas aquí elaborados son semejantes a lo que se debería producir en la realidad sin embargo debido a la ausencia de estos depósitos no se ha podido validar debidamente estos mapas.

4.2. Simulaciones de Flujos de Bloques y Ceniza (FBC)

4.2.1. Definición de escenarios eruptivos

Considerando que los domos del complejo dómico Ninahuilca son extremadamente grandes, se han definido los siguientes escenarios posibles para la generación de un FBC:

Escenario 2: Correspondiente a una erupción de VEI 4 con emisión de domos pequeños y colapsos parciales con volúmenes del orden de decenas de millones de metros cúbicos.

Escenario 3: Correspondiente a una erupción de VEI 5 con emisión de domos grandes y colapsos parciales con volúmenes del orden de centenas de millones de metros cúbicos.

Del procedimiento de reconstrucción del domo Ninahuilca Chico II, se calculó el volumen máximo y mínimo, dando valores de 377 y 176 millones de m³ respectivamente, con un volumen intermedio de 276 millones de m³; estos valores son considerados los volúmenes posibles para el escenario 3, que es el más grande de VEI=5.

Para el escenario 2, con VEI=4, se optó por considerar solo el 10% de los volúmenes definidos para el escenario 3, dando como volúmenes 37, 27 y 17 millones de m³ para los volúmenes máximo, intermedio y mínimo por cada colapso respectivamente; estos volúmenes son comparables a los de los volcanes Merapi y Unzen, cuyos FBC fueron de 5.8 y 14.6 millones de m³ respectivamente (Charbonnier & Gertisser, 2012; Shi et al., 2017).

Con la metodología utilizada para simulaciones de flujos de bloques y ceniza, se han realizado 42 simulaciones para el escenario 2 y 36 simulaciones para el escenario 3, considerando la ubicación de la fuente, el mismo sitio del último centro de emisión (domo Ninahuilca Chico II) y suponiendo que, si un domo colapsaría, sería uno que se sobreponga al antes mencionado. En estas simulaciones se ha variado los parámetros de cohesión (3500 y 7500 Pa), densidad (1200 y 1500 kg/m³) (Charbonnier & Gertisser, 2012), duración del colapso del domo (30, 60, 90, 120, 180, 240 y 300 seg) y volumen (17, 27 y 37 millones de m³ para el escenario 2; 176, 276 y 376 millones de m³ para el escenario 3) para cubrir todos los casos posibles que pueda darse dependiendo de las características del magma emitido.

Desde un punto de vista general se evidencia que el alcance y la concentración de la masa depositada en un FBC depende de los parámetros que hemos variado, teniendo un mayor

alcance y masa distribuida ampliamente a lo largo del valle fluvial cuando tenemos cohesión baja, densidad baja, tiempo de duración del colapso corto y volumen grande; caso contrario tenemos un menor alcance y masa concentrada en los alrededores del domo colapsado cuando tenemos cohesión alta, densidad alta, tiempo de duración del colapso largo y volumen pequeño Estas condiciones vendrán dadas por el volumen y características del domo formado y colapsado.

4.2.2. Resultados (Mapa de peligro por FBC)

Los mapas de los espesores georreferenciados de las 42 simulaciones del escenario 2 y 36 simulaciones del escenario 3 para FBC se los presenta en el Anexo 6 del presente trabajo de investigación. De estos mapas se realizó un análisis estadístico básico de los alcances máximos para determinar tres alcances en cada escenario, dichos alcances representan las distancias mínimas que alcanzan el 25%, 50% y 75% de las simulaciones realizadas para cada escenario, que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Alcances promedios de FBC para cada escenario

Porcentaje de simulaciones realizadas	Alcances promedios (km)	
	Escenario 2	Escenario 3
25%	11,96	25,47
50%	10,72	23,27
75%	9,54	21,28

En base a los alcances definidos para cada porcentaje de simulaciones, se toma como guía para digitalización a la simulación más próxima al alcance mínimo que llegan el 75% de simulaciones realizadas para cada escenario; producto de lo cual se obtiene 1 mapa del depósito dejado por un posible flujo de bloques y ceniza por cada escenario planteado (Figura 4.11 y 4.12).

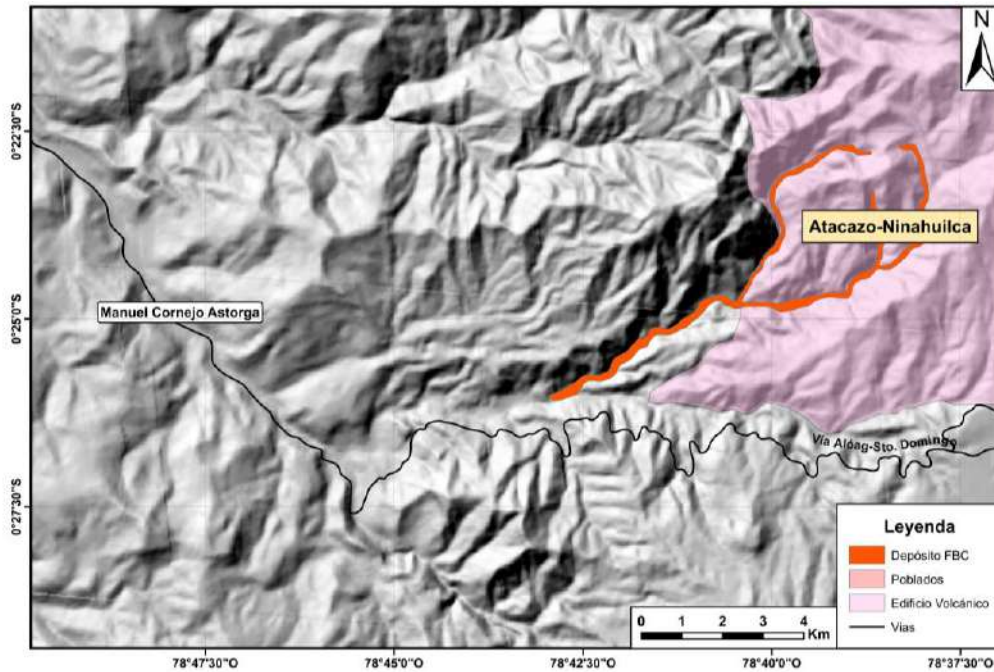


Figura 4.11. Mapa de depósito de FBC - escenario 2.

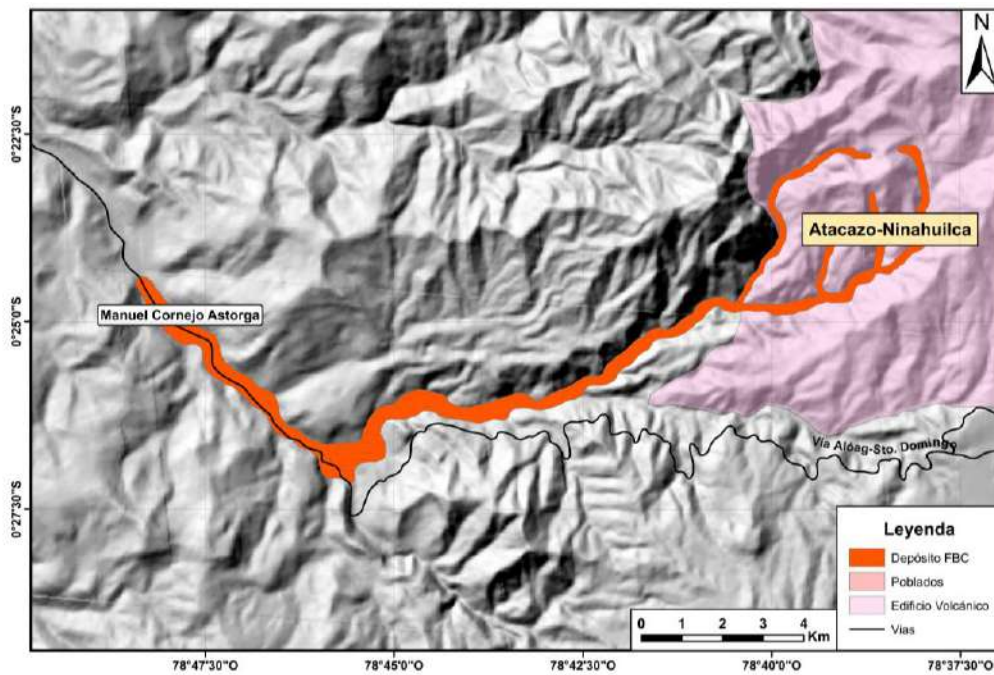


Figura 4.12. Mapa de depósito de FBC - escenario 3.

Adicionalmente se ha optado por trazar una zona de seguridad alrededor del depósito obtenido, dicha zona representaría el alcance extra que potencialmente tendrían las oleadas piroclásticas desprendidas del flujo principal. Para dicha zona de seguridad se

procede a realizar un equilibrio de energías cinética y potencial gravitatoria, utilizando la velocidad máxima que alcanza el flujo (obtenido de las simulaciones) y la pendiente promedio del terreno. Producto de esto se obtiene el alcance extra vertical (h) y horizontal (x) para ser trazados alrededor del depósito principal (Tabla 10), obteniendo las zonas de peligros por este tipo de fenómenos, presentadas en la Figura 4.13 y 4.14.

$$E_c = E_p$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = m g h$$

$$\frac{1}{2} v^2 = g h$$

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

Tabla 10. Zonas de seguridad extras para los escenarios 2 y 3 de FBC

	V (m/s)	Pendiente (°)	h (m)	x (m)
Escenario 2	43,2	30	25	21
Escenario 3	85,34	30	95	80

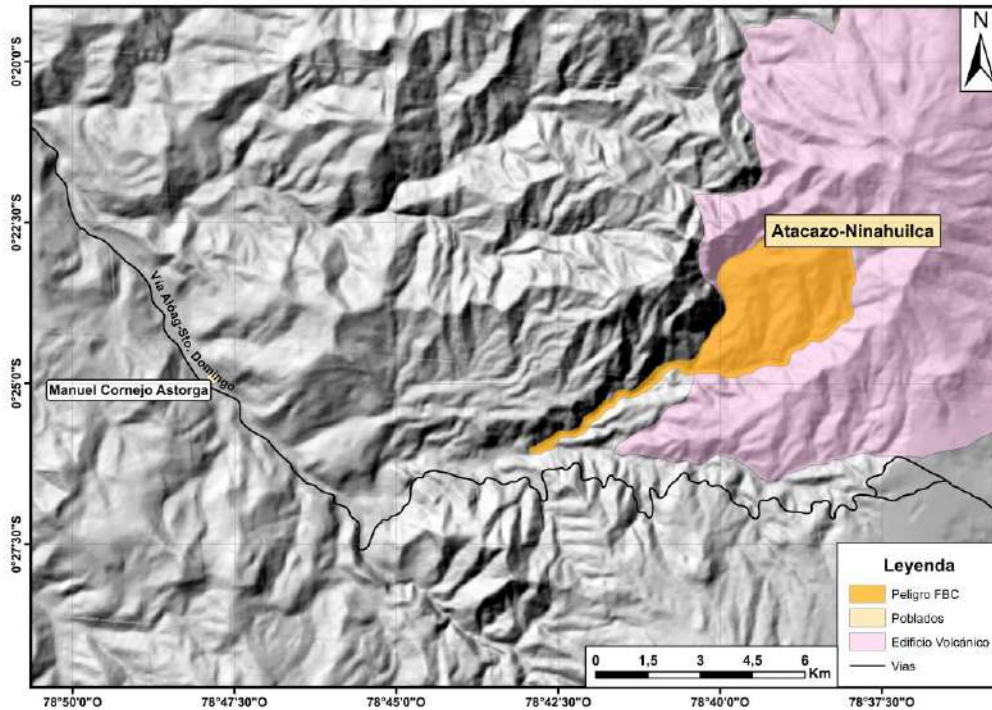


Figura 4.13. Mapa de peligros por FBC - escenario 2.

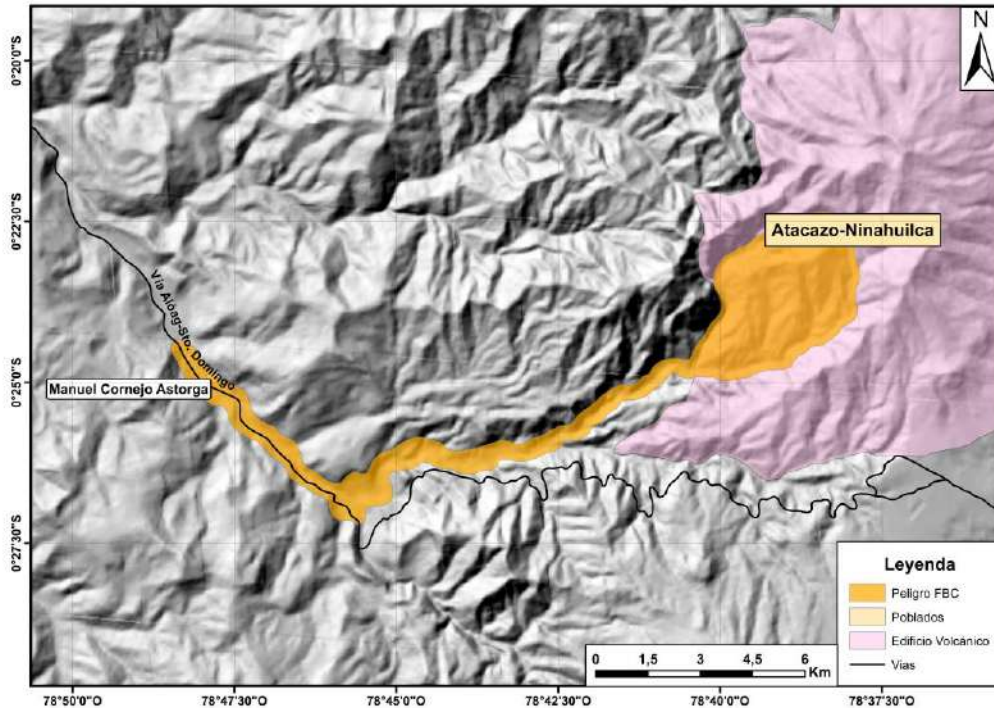


Figura 4.14. Mapa de peligros por FBC - escenario 3.

4.2.3. Discusión

Mediante la metodología utilizada se obtuvo como resultado un mapa por cada escenario definido, el primero (escenario 2) representado por un colapso parcial de un domo pequeño en una erupción con VEI=4, con su centro de emisión en el mismo lugar del último domo formado (Ninahuilca Chico II), formando un flujo que tenga un alcance máximo de 9,5 km y cuyo impacto se restringe a los alrededores de su centro de emisión; el segundo (escenario 3) representado por un colapso parcial de un domo grande en una erupción con VEI=5, formando un flujo que tenga un alcance máximo de 21 km a partir de su centro de emisión y cuyo impacto es significativo, afectando estructuras como la captación de agua de la represa Toachi-Pilatón, la carretera Alóag-Sto. Domingo y varias poblaciones, entre las que se destaca Manuel Cornejo Astorga (Tandapi).

El impacto de este tipo de fenómeno, independientemente del escenario, no sería capaz de sobrepasar barreras topográficas grandes, ya que un flujo de bloques y ceniza es un flujo caliente pero denso, que viajará a lo largo de las cuencas hidrográficas; sin embargo, este tipo de fenómenos pueden sobrepasar barreras topográficas pequeñas como terrazas

aluviales, lo cual representa un mayor peligro a comunidades asentadas en este tipo de rasgos topográficos.

Las zonas de peligros impactadas por FBC engloba el área impactada por el flujo principal (más denso) y por la oleada piroclástica (menos denso), con lo cual en los mapas resultantes se representa el área total que puede ser afectada por este tipo de fenómenos; adicionalmente se utilizó las velocidades máximas del flujo en el cálculo de los alcances de las oleadas piroclásticas, obteniendo distancias verticales y horizontales máximas que puedan alcanzar.

Para la definición de la zona de peligro por FBC presentada anteriormente, se ha considerado el crecimiento y colapso del último domo formado, pero también existe la posibilidad que se dé una migración del centro de emisión magmático como ha ocurrido a lo largo de la historia evolutiva del complejo volcánico (Hidalgo, 2006), con lo cual no se puede descartar el crecimiento de un nuevo domo en las inmediaciones del domo Ninahuilca Chico II, preferentemente al SO y su posterior colapso.

4.3. Mapeo de Ignimbritas

Los resultados del trabajo de campo se evidencian en el mapeo geológico del depósito de ignimbritas dejado por las últimas erupciones y en la adquisición de datos que ayuden a corroborar las simulaciones de flujos de bloques y ceniza, caídas de ceniza y lahares secundarios.

4.3.1. Estudio de los depósitos

Iniciando por el mapeo de las ignimbritas, se ha cumplido con uno de los objetivos claves para elaborar el mapa de peligros por corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza, el cual es ampliar el mapeo geológico existente (Maruri, 1993) hacia el occidente, a lo largo del Río Pilatón y la verificación de los depósitos de ignimbrita hacia el norte y oriente del complejo volcánico.

Durante el trabajo de campo se pudo corroborar que el alcance vertical de las ignimbritas es muy grande, ya que además de haber llenado un valle fluvial en V profundo con su posterior erosión, se tiene aún grandes depósitos de decenas de metros hacia los bordes del mismo (Figura 4.15.a y Figura 4.15.f).

También se observa que la naturaleza de los líticos llevados en un flujo y depositado en una ignimbrita es variable como se observa en la Figura 4.15.b, donde además de líticos de pómez microvesiculada, se tienen fragmentos dacíticos que serían del magma emitido en esa erupción de color gris y fragmentos hidrotermalizados y alterados (color rojo y naranja) que son preexistentes de otras erupciones e incorporados al flujo durante su transporte.

En la Figura 4.15.c se evidencia que dentro de la ignimbrita se produjo una estratificación cíclica, posiblemente debido a depositación sucesiva de ignimbritas por distintos pulsos eruptivos y por la diferenciación de densidades del material llevado dentro del mismo flujo.

Adicionalmente se han levantado columnas estratigráficas de este depósito, que se presenta en el Anexo 2; con lo cual se observa que existen distintas estructuras internas en el depósito dado por el dinamismo durante su transporte. Un ejemplo de estas estructuras internas se las observa en la Figura 4.15.d donde se evidencia una estratificación de zonas con mayor contenido de líticos.

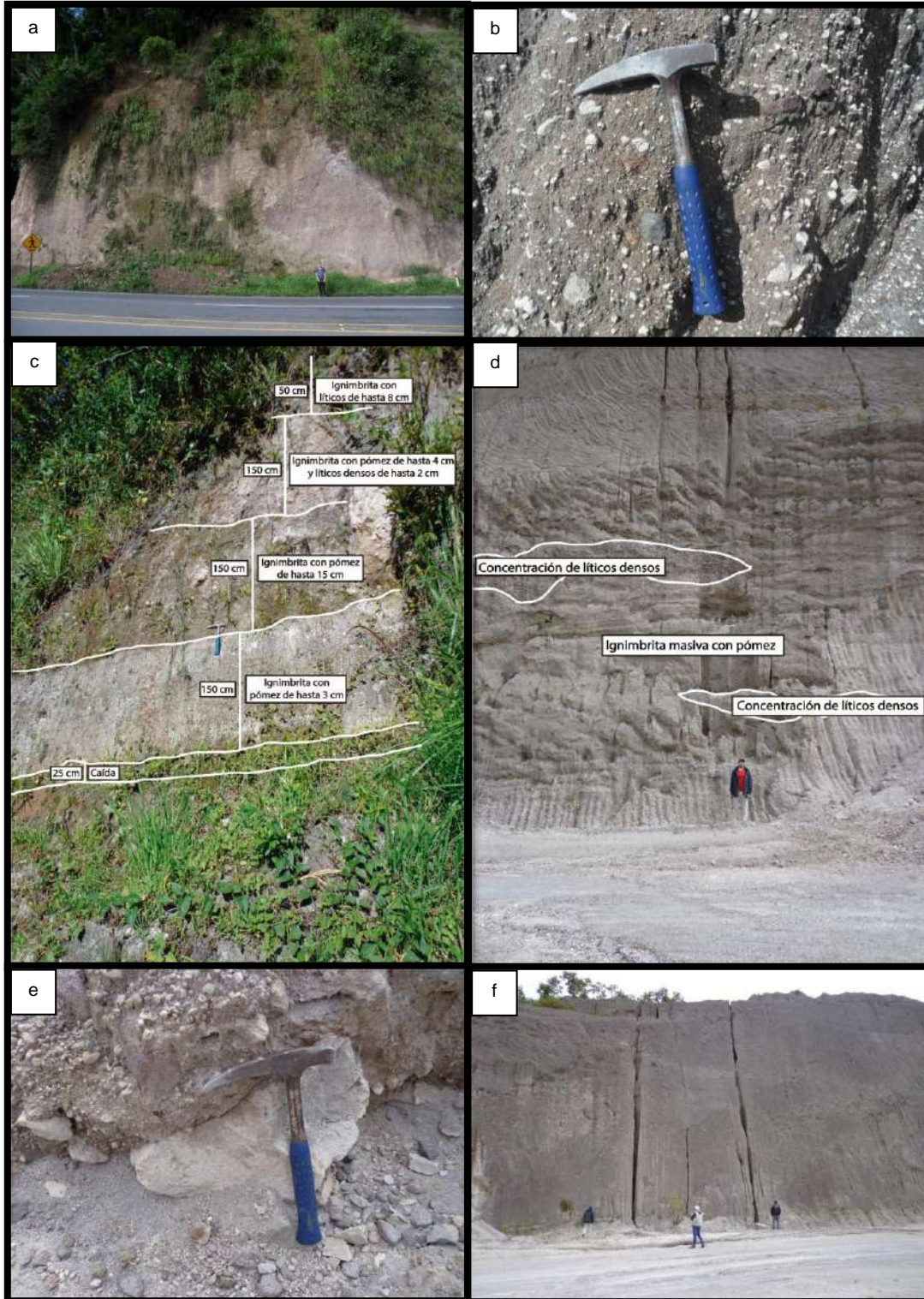


Figura 4.15. Depósitos de ignimbrita N6 del Ninahuilca; **a.** Depósito de ignimbrita de varios metros cortados por la carretera Aloag-Sto Domingo; **b.** Macrocomponentes de la ignimbrita; **c.** Estratificación cíclica interna dentro de la ignimbrita N6; **d.** Estructuras internas presentes; **e.** Lítico decimétrico de pómez microvesiculada en la ignimbrita; **f.** Depósito de 15 metros de ignimbrita.

4.3.2. Resultados (Mapa de peligro por flujos de pómez y ceniza)

4.3.2.1. Elaboración del mapa geológico de ignimbritas

Para el mapeo geológico se procede a digitalizar el mapa geológico preexistente de 1993 en un Sistema de Información Geográfica, georreferenciándolo y trazando adecuadamente los límites de las ignimbritas ahí mapeadas (Figura 4.16). Usando otros softwares como Google Earth Pro se corrobora o corrige los límites definidos analizando adecuadamente los rasgos topográficos que se pueden visualizar en 3D.

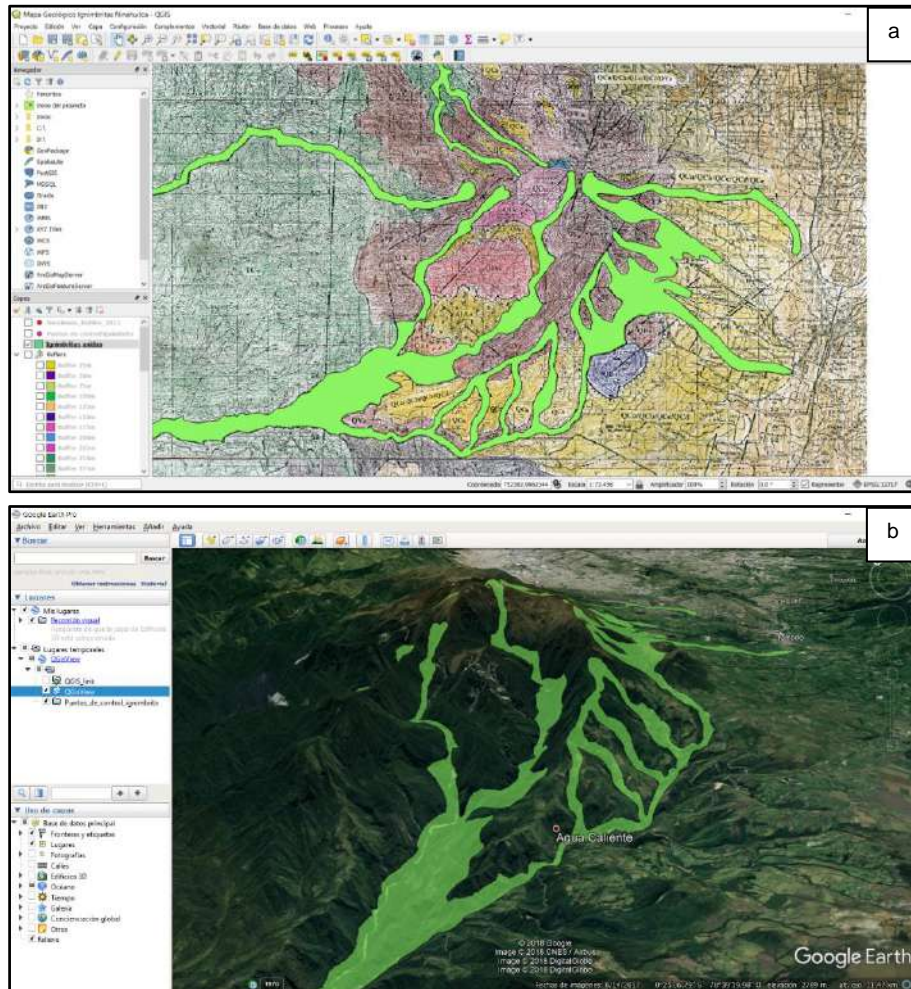


Figura 4.16. Mapa geológico preexistente; **a.** Digitalización de los límites de ignimbritas preexistentes; **b.** Visualización en 3D del depósito de ignimbritas en Google Earth Pro.

Posteriormente se procede a ubicar los puntos del límite superior de las ignimbritas mapeadas durante el trabajo de campo a lo largo del Río Pilatón, se corrobora los datos del mapa geológico existente (Anexo 1) y además se extiende los límites del depósito que han sido identificados, principalmente hacia el lado occidental del CVAN. Adicionalmente como método de comprobación del mapeo se puede calcular el volumen aproximado del depósito (700 millones de m³), calculando el área y considerando los espesores, para comprobar con volúmenes calculados en otros trabajos.

4.3.2.2. Elaboración del mapa de peligros por Corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza

Para definir el mapa de peligros por corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza, se parte del mapeo geológico de sus depósitos (ignimbritas), a lo que posteriormente se aumenta las distancias vertical y horizontal que las oleadas piroclásticas desprendidas del flujo principal (parte menos densa) puedan alcanzar, siguiendo el mismo procedimiento aplicado en los flujos de bloques y ceniza de presente trabajo, y considerando el trabajo de Bernard (2014) donde se tomó la velocidad de referencia de 120 m/s como velocidad de un flujo de pómez y ceniza. Los parámetros utilizados para el cálculo del alcance de las oleadas piroclásticas se los presenta en la Tabla 11 y el mapa de peligros por FPC en la Figura 4.17.

Tabla 11. Parámetros utilizados para definición del área de peligros por FPC

	V (m/s)	Pendiente (°)	h (m)	x (m)
Escenario 2-3	120	30	190	160

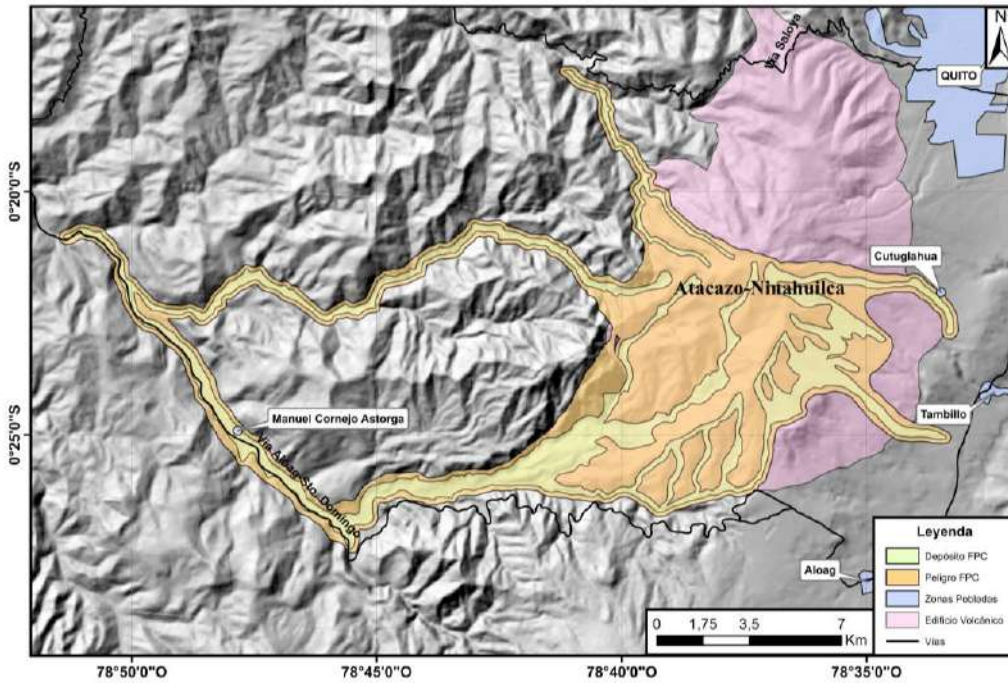


Figura 4.17. Mapa de peligros por corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de pómez y ceniza.

4.3.3. Discusión

La elaboración del mapa de peligros por corrientes de densidad piroclástica tipo pómez y ceniza nos brinda una idea del producto volcánico proximal más destructivo de este complejo volcánico. El estudio de estos depósitos nos deja en evidencia la gran magnitud y alcance que los flujos de pómez y ceniza pueden llegar a tener, sobrepasando en algunas zonas las barreras topográficas como pequeñas elevaciones e incluso desbordándose fuera de los drenajes principales que rodean el CVAN.

Los depósitos mapeados a lo largo del Río Pilatón, son depósitos que rellenaron el valle fluvial y que en ciertas partes se encuentran muy bien conservados, pero también han sido muy erosionados. Los espesores mapeados, representan los límites del depósito principal dejado por la corriente piroclástica, pero la parte menos densa (oleada piroclástica) muy posiblemente fue erosionada por completo, por lo cual no ha sido posible encontrarla en los drenajes.

Un inconveniente para reducir el error en el mapeo de ignimbritas es la escasa accesibilidad a la zona occidental del CVAN, la vegetación muy densa y pendientes muy abruptas; por lo cual no se tuvo acceso al Río Santa Ana y al Río Saloya; y los depósitos aquí presentados son inferidos de acuerdo al mapeo geológico de Maruri (1993). De igual manera se procedió en los drenajes contiguos al mismo Domo Ninahuilca Chico.

Para disminuir el error en la zona de peligro se verificó los alcances máximos de las ignimbritas y se añadió una zona de seguridad que representa aproximadamente 190 metros verticales y 160 horizontales, con lo cual se abarcaría toda la zona que la corriente piroclástica pueda impactar, incluyendo las oleadas piroclásticas desprendidas a partir del flujo principal; estas distancias fueron calculadas con una velocidad muy alta pero posible para una corriente de densidad piroclástica (120 m/s).

Hacia el lado oriental del CVAN, los depósitos de FPC se han conservado, razón por la cual, si se produce un colapso de nube eruptiva con un gran volumen, una corriente piroclástica puede tener un mayor alcance y afectar a poblaciones como Tambillo.

Por otra parte, como se ha evidenciado en el estudio de los depósitos de ignimbritas, se observa una gran variación estructural dentro del mismo depósito, dándose de alguna manera estratificación u horizontes de concentración de líticos de pómez de determinado tamaño. Esto quizás se da a que un mismo depósito con tanto espesor no se formó en un mismo pulso eruptivo, sino que en una erupción muy grande se producen varios pulsos, con varios colapsos de columnas eruptivas que se depositan una sobre otra de manera sucesiva y que incorpora material erosionado.

Otra característica estructural que se ha encontrado dentro de las ignimbritas es la presencia de lentes de concentración de líticos densos. Esto se produce debido a que el transporte de un flujo de pómez y ceniza, se da en un medio fluido con laminación en la parte menos densa y turbulencia en la parte más densa, con lo cual los líticos más densos se concentran en ciertas zonas del flujo.

En cuanto a características texturales y de componentes del flujo, se observó que se encuentra principalmente conformado de una matriz de ceniza de tamaño medio con líticos de distinta naturaleza, pero predominantemente son pómez microvesiculadas, densas ($\rho = 650 - 1.100 \text{ kg/m}^3$), que contienen Qz+Plg+Amph+Vidrio. Como este tipo de fenómeno es muy energético, puede llevar y transportar líticos dacíticos, más densos y que constituyen el aporte de magma juvenil del presente evento eruptivo. Finalmente, un tercer grupo de

líticos llevados en los flujos de pómez y ceniza, son hidrotermales, muy densos y que constituirían la parte alterada y erosionada del sistema hidrotermal del CVAN que, en el momento del evento eruptivo, son erosionadas y expulsados.

4.4. Simulaciones de lahares secundarios

Para la elaboración de un mapa de peligros por lahares secundarios se ha realizado un total de 21 simulaciones numéricas utilizando VolcFlow, de las cuales 12 fueron realizadas utilizando un DEM de 30 metros de resolución para representar el peligro a escala regional de todo el complejo volcánico y 9 fueron realizadas con un DEM de 10 metros en los drenajes que afectan al flanco oriental del CVAN debido a que los drenajes en dicha zona son pequeños y la delimitación de la zona de peligro necesita una mayor precisión en relación a la parte occidental.

Un factor tomado en cuenta para la determinación de los parámetros reológicos fue el tipo de material que potencialmente será removilizado, teniendo así para el flanco occidental del CVAN material que incluye caídas de ceniza y corrientes de densidad piroclástica (FBC e Ignimbritas) y para el flanco oriental del CVAN se tiene principalmente caídas de ceniza.

Los depósitos citados anteriormente al mezclarse con agua de lluvia generarían lahares cuyos valores de densidad fueron calculados manualmente, tomando en cuenta las fracciones parciales de ceniza e ignimbritas de cada drenaje, y también valores de densidades y cohesiones documentados en trabajos previos (Gueugneau, 2014; Kelfoun et al., 2009; Mueller et al., 2011). Realizando un cálculo ponderado, se obtuvo una densidad de 1.650 kg/m^3 y cohesión de 500 Pa para *debris flows* en los drenajes occidentales y una densidad de 2.000 kg/m^3 y cohesión de 650 Pa para flujos hiperconcentrados en los drenajes orientales.

La duración de cada evento de igual manera se optimizó en función del movimiento del mismo, dando tiempos de duración de todo el evento entre 2 y 4 horas dependiendo el drenaje; de igual manera se utilizó un tiempo de inyección de material de 30 minutos, brindando el mayor alcance posible dentro de los parámetros documentados para este tipo de fenómenos.

Los cálculos de los volúmenes de agua y sólidos, así como el volumen máximo de cada lahar en cada cuenca se presentan en las Tablas 12, 13 y 14.

Tabla 12: Cálculo de volumen de agua para cada cuenca hidrográfica

Drenaje	Área Total de Cuenca (m2)	Área con pendiente >15° (m2)	Estación INAMHI	Precipitación diaria max (mm) (litros/m2)	Volumen H2O Max/día (litros)	Volumen H2O Max/día (m3)	Coefficiente de escorrentía	Volumen H2O escurrida Max/día (m3)
Q. El Salado	2,89E+06	2,09E+06	M003	84,5	1,77E+08	1,77E+05	0,275	4,86E+04
Q. Jatunloma	1,60E+06	9,80E+05	M003	84,5	8,28E+07	8,28E+04	0,275	2,28E+04
Q. Cevallos	1,63E+06	1,08E+06	M003	84,5	9,15E+07	9,15E+04	0,275	2,52E+04
Q. Rundobalin	2,70E+06	2,15E+06	M003	84,5	1,82E+08	1,82E+05	0,275	5,00E+04
Q. Pasochucho	1,83E+06	1,17E+06	M003	84,5	9,87E+07	9,87E+04	0,275	2,71E+04
Q. Tilicucho	1,96E+06	1,39E+06	M003	84,5	1,17E+08	1,17E+05	0,275	3,22E+04
Q. de Monjas	4,61E+06	2,19E+06	M003	84,5	1,85E+08	1,85E+05	0,275	5,08E+04
Q. Ugtupungu	1,41E+06	1,19E+06	M003	84,5	1,01E+08	1,01E+05	0,275	2,77E+04
Q. Saguanchi	3,30E+06	3,27E+06	M003	84,5	2,76E+08	2,76E+05	0,275	7,59E+04
Q. Riulluchi	1,57E+06	9,63E+05	M003	84,5	8,14E+07	8,14E+04	0,275	2,24E+04
Q. Canoos	3,07E+06	2,64E+06	M003	84,5	2,23E+08	2,23E+05	0,275	6,14E+04
Q. La Chorrera	2,10E+06	5,04E+05	M003	84,5	4,25E+07	4,25E+04	0,275	1,17E+04
Q. El Belen	2,28E+06	2,23E+06	M003	84,5	1,88E+08	1,88E+05	0,275	5,18E+04
Q. San Antonio	2,64E+06	2,54E+06	M003	84,5	2,14E+08	2,14E+05	0,275	5,90E+04
Q. Recoletilla	1,83E+06	1,56E+06	M003	84,5	1,32E+08	1,32E+05	0,275	3,63E+04
Q. Miraflores	2,58E+06	2,13E+06	M003	84,5	1,80E+08	1,80E+05	0,275	4,96E+04
Rio Saloya	5,09E+07	4,98E+07	M354	120,6	6,00E+09	6,00E+06	0,2	1,20E+06
Rio Santa Ana	7,50E+07	7,48E+07	M354	120,6	9,02E+09	9,02E+06	0,2	1,80E+06
Rio Pilaton	7,79E+07	7,66E+07	M354	120,6	9,24E+09	9,24E+06	0,2	1,85E+06

Tabla 13: Cálculo de volumen de sólidos para cada cuenca hidrográfica

Drenaje	Tipo de material disponible	Área depósito de caída removilizada (m2)	Espesor máximo de caída (m)	Volumen de caída removilizada (m3)	Área de ignimbrita removilizada (m2)	Espesor de Ignimbrita (m)	Volumen de ignimbrita removilizada (m3)	Volumen de sólidos removilizados (m3)
Q. El Salado	caída	2,09E+06	0,25	5,23E+05	0	0	0,00E+00	5,23E+05
Q. Jatunloma	caída	9,80E+05	0,25	2,45E+05	0	0	0,00E+00	2,45E+05
Q. Cevallos	caída	1,08E+06	0,25	2,71E+05	0	0	0,00E+00	2,71E+05
Q. Rundobalin	caída	2,15E+06	0,25	5,38E+05	0	0	0,00E+00	5,38E+05
Q. Pasochucho	caída	1,17E+06	0,3	3,50E+05	0	0	0,00E+00	3,50E+05
Q. Tillicucho	caída	1,39E+06	0,3	4,16E+05	0	0	0,00E+00	4,16E+05
Q. de Monjas	caída	2,19E+06	0,3	6,56E+05	0	0	0,00E+00	6,56E+05
Q. Ugtupungu	caída	1,19E+06	0,3	3,58E+05	0	0	0,00E+00	3,58E+05
Q. Saguanchi	caída	3,27E+06	0,3	9,80E+05	0	0	0,00E+00	9,80E+05
Q. Riulluchi	caída	9,63E+05	0,3	2,89E+05	0	0	0,00E+00	2,89E+05
Q. Canoos	caída	2,64E+06	0,3	7,92E+05	0	0	0,00E+00	7,92E+05
Q. La Chorrera	caída	5,04E+05	0,3	1,51E+05	0	0	0,00E+00	1,51E+05
Q. El Belen	caída	2,23E+06	0,3	6,69E+05	0	0	0,00E+00	6,69E+05
Q. San Antonio	caída	2,54E+06	0,3	7,61E+05	0	0	0,00E+00	7,61E+05
Q. Recoletilla	caída	1,56E+06	0,3	4,69E+05	0	0	0,00E+00	4,69E+05
Q. Miraflores	caída	2,13E+06	0,3	6,40E+05	0	0	0,00E+00	6,40E+05
Rio Saloya	caída e ignimbrita	4,98E+07	0,3	1,49E+07	2,50E+06	5	6,25E+06	2,12E+07
Rio Santa Ana	caída e ignimbrita	7,48E+07	0,25	1,87E+07	3,75E+06	5	9,38E+06	2,81E+07
Rio Pilaton	caída, ignimbrita y BAF	7,66E+07	0,25	1,91E+07	1,90E+07	20	1,90E+08	2,09E+08

Tabla 14: Volumen de lahar en cada cuenca hidrográfica

Drenaje	Relación Agua/Sólido	Volumen lahar (m3)	Volumen lahar por cuenca (m3)	Volumen aproximado lahar por cuenca (m3)
Q. El Salado	0,09295	1,21E+05	3,66E+05	3,70E+05
Q. Jatunloma	0,09295	5,69E+04		
Q. Cevallos	0,09295	6,29E+04		
Q. Rundobalin	0,09295	1,25E+05		
Q. Pasochucho	0,07745833	6,79E+04	6,79E+04	7,00E+04
Q. Tillicucho	0,07745833	8,05E+04	8,05E+04	8,00E+04
Q. de Monjas	0,07745833	1,27E+05	1,27E+05	1,30E+05
Q. Ugtupungu	0,07745833	6,93E+04	6,93E+04	7,00E+04
Q. Saguanchi	0,07745833	1,90E+05	1,90E+05	1,90E+05
Q. Riulluchi	0,07745833	5,59E+04	2,39E+05	2,40E+05
Q. Canoos	0,07745833	1,53E+05		
Q. La Chorrera	0,07745833	2,93E+04		
Q. El Belen	0,07745833	1,30E+05	3,68E+05	3,70E+05
Q. San Antonio	0,07745833	1,47E+05		
Q. Recoletilla	0,07745833	9,08E+04		
Q. Miraflores	0,07745833	1,24E+05		
Rio Saloya	0,05667616	4,80E+06	4,80E+06	4,80E+06
Rio Santa Ana	0,06425032	7,21E+06	7,21E+06	7,20E+06
Rio Pilaton	0,00884132	7,39E+06	7,39E+06	7,40E+06

El procedimiento posterior a realizar las simulaciones, es decir, de extracción de espesores y georreferenciación de los depósitos de lahares secundarios, es exactamente el mismo realizado en los flujos de bloques y ceniza, por lo cual no se lo describe nuevamente.

4.4.1. Resultados (Mapa de peligros por lahares secundarios)

El flanco occidental del CVAN es una zona muy lluviosa y con presencia de mayor cantidad de productos volcánicos como corrientes de densidad piroclásticas (Ignimbritas y FBC), con drenajes muy grandes y marcados que se dirigen hacia la costa ecuatoriana. Debido a ello los volúmenes de lahares secundarios potenciales en estos drenajes (Río Saloya, Río Santa Ana y Río Pilatón) son mucho más grandes que en drenajes al oriente del CVAN, superando los 19 millones de material lahórico en todos estos drenajes y teniendo alcances grandes que superan los 20 km. Los lahares potenciales por formarse en estos drenajes serían de tipo *debris flows*, con la posibilidad de cambiar su comportamiento durante su transporte. El área afectada por lahares secundarios hacia el occidente del CVAN, comprende los cauces de los ríos y también terrazas ubicadas en las riveras de estos, con lo cual su potencial de inundación incrementa. Las principales poblaciones afectadas son Saloya, Tandapi y, posiblemente por la repetición de lahares, La Unión del Toachi y Alluriquín.

En el flanco nororiental (Sur de Quito), los potenciales lahares secundarios que pueden producirse se generarían en una zona con fuertes precipitaciones en época invernal, de hasta 84,5 mm de lluvia en un día y con mucha presencia de material volcánico de caída, con lo cual sus volúmenes máximos son de hasta casi 400.000 m³, alcances máximos de hasta 6 kilómetros a partir del sitio de generación de éstos y siendo los flujos hiperconcentrados como tipo de lahar principal a formarse en estos drenajes, conclusión que se llega en base al tipo de material potencialmente disponible para removilización (tefra). El área afectada por estos fenómenos incluye las principales quebradas ubicadas en el sur de Quito, con la posibilidad de desbordamiento en zonas de relleno de las mismas o de construcción de obstáculos que puedan cambiar la movilización natural de un lahar. Las principales zonas afectadas son un grupo de barrios al sur de Quito cercanas a los drenajes del CVAN.

En el flanco suroriental, los potenciales lahares secundarios que pueden producirse se generarían, al igual que el nororiente, en una zona con fuertes precipitaciones en época invernal, de hasta 84,5 mm de lluvia en un día y con mucha presencia de material volcánico de caída, con volúmenes máximos de hasta casi 400.000 m³. Estos lahares tendrían alcances máximos de hasta 11 kilómetros a partir del sitio de generación de éstos y siendo los flujos hiperconcentrados como tipo de lahar principal a formarse en estos drenajes debido al tipo de material potencialmente disponible (tefra). El área afectada por estos fenómenos se restringe a las principales quebradas ubicadas al suroriente del CVAN. Las principales zonas afectadas por estos fenómenos son Cutuglahua y Tambillo.

Adicionalmente a lo anteriormente descrito, los lahares secundarios en todos los flancos pueden afectar distintas redes viales (regionales o locales) y demás obras de infraestructura, con lo cual sus potenciales volúmenes pueden variar, pero sin causar mayores cambios en los alcances de los mismos.

Un mayor detalle de las localidades afectadas por este tipo de fenómeno en cada drenaje, al igual que sus tiempos de transporte y espesores promedios se presentan en los Anexos 7, 8 y 9 del presente proyecto y los mapas de peligro en los distintos flancos en las Figuras 4.18, 4.19 y 4.20.

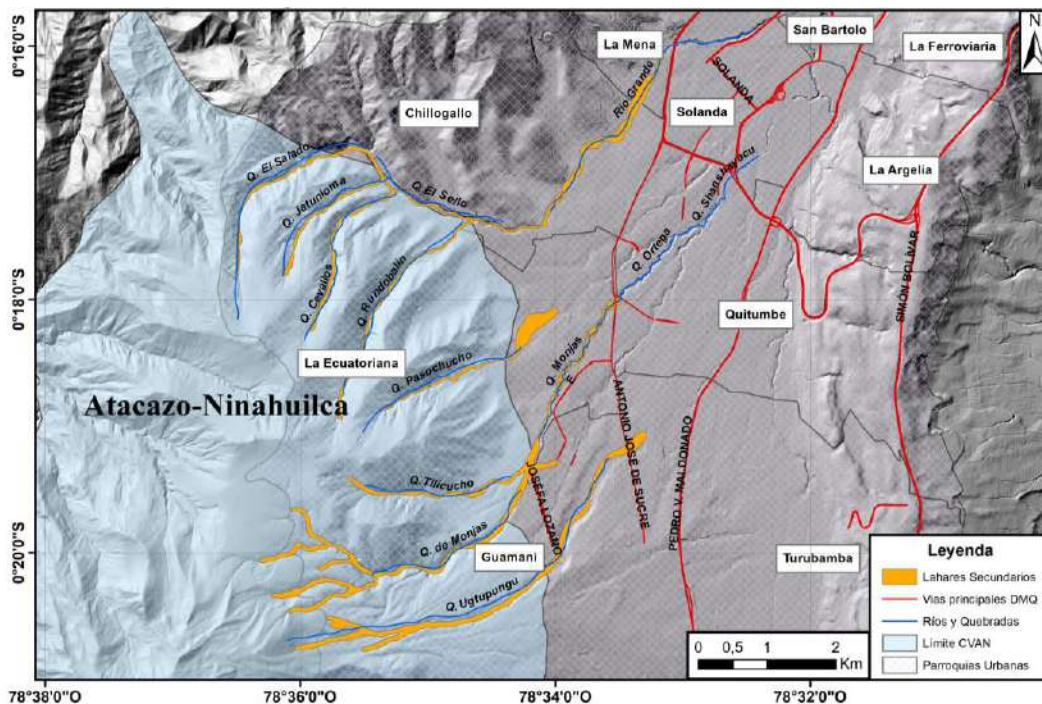


Figura 4.18. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco nororiental.

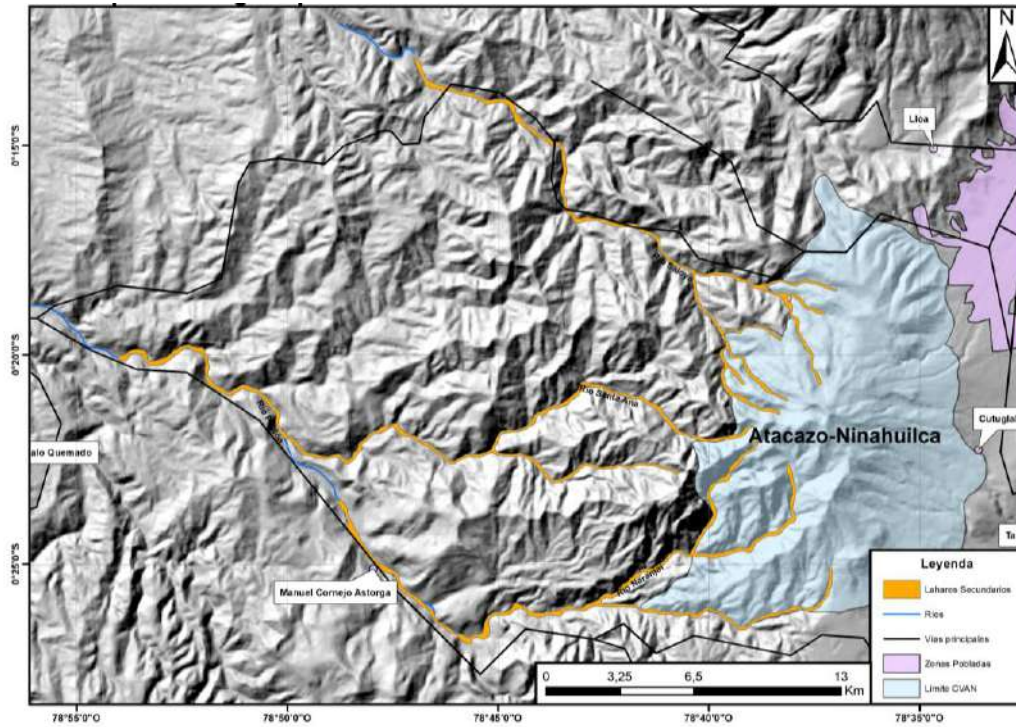


Figura 4.19. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco occidental.

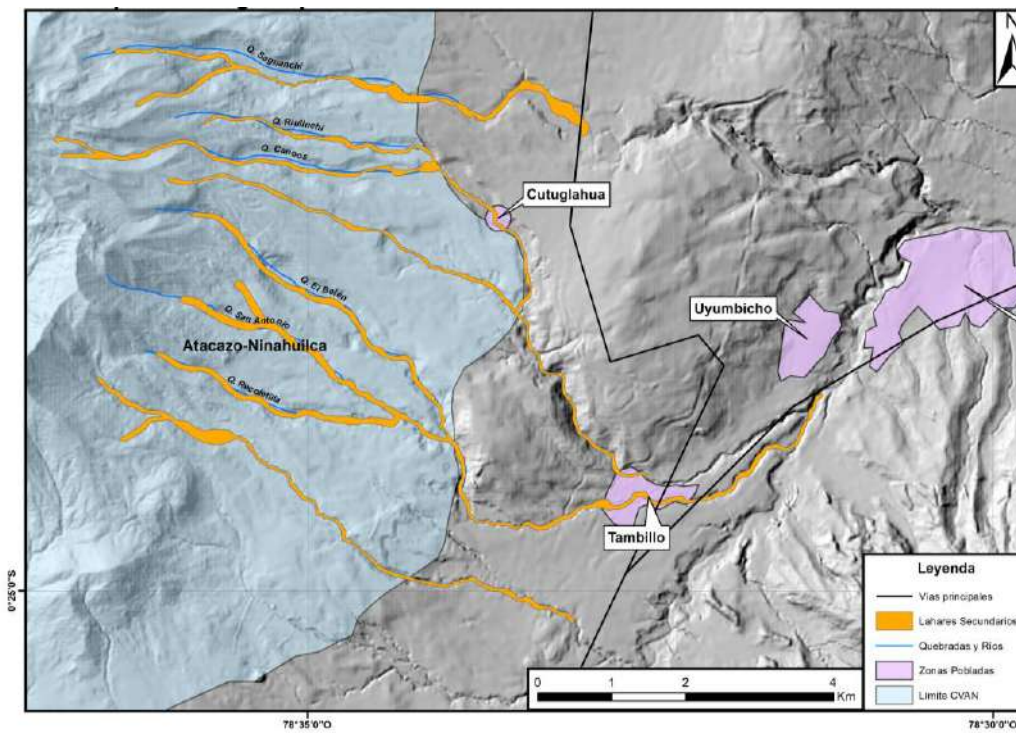


Figura 4.20. Mapa de peligro por lahares secundarios – flanco suroriental.

4.4.2. Discusión

De manera general los lahares secundarios producidos en una erupción muy grande del CVAN tienen un alcance considerable de algunos kilómetros y tendrían un impacto muy grande en la región; pero si la erupción que se genere es relativamente pequeña, los lahares secundarios que potencialmente se producirían tendrían un alcance de un par de kilómetros, con lo cual su impacto se reduciría significativamente.

Debido a la no existencia de un DEM de buena resolución hacia la parte occidental del CVAN, los mapas de peligros por lahares secundarios han sido realizados con un Modelo de Elevación Digital con una resolución de 30 metros para el flanco occidental, con lo cual el mapa de esta zona nos da una gran idea del alcance y afectación aproximadas, pero es muy general para este tipo de estudios debido al rango de error que conlleva esta resolución. Lo óptimo para esta zona sería realizar simulaciones numéricas con un DEM de 15 metros de resolución como mínimo, debido a que ciertas poblaciones a lo largo de los drenajes occidentales se encuentran en las zonas propensas a inundación por lahares secundarios. Es por aquello también que para el flanco oriental del CVAN se realizaron mapas con un DEM de 10 metros de resolución, ya que había disponible un mejor modelo de elevación digital de la zona y con ello se pudo disminuir los errores y tener mayor certidumbre en las zonas delimitadas y con alcances más aproximados.

El problema mencionado anteriormente precisamente representa un gran obstáculo para mejorar los mapas de peligros que usan DEMs, una resolución de 30 metros es poco en cuanto a la óptima representación de la realidad, nos brinda grandes errores e incluso no permite identificar ciertos obstáculos o rasgos topográficos que pueden cambiar el transporte de un lahar. Adicional a ello se pudo evidenciar que el uso de un DEM de poca resolución como 30 metros, nos acorta y limita los alcances que los lahares pueden llegar a tener en la realidad, esto queda evidenciado comparando los alcances en el flanco oriental, en los cuales, con un DEM de 10 metros de resolución los alcances máximos para los flujos se llegaban a duplicar para ciertos drenajes en comparación a los de 30 metros, brindando una mejor aproximación de las zonas de transporte y depositación de los mismos.

Los alcances máximos de las simulaciones de lahares secundarios se ven en gran parte influenciados, además del DEM utilizado, por los parámetros reológicos, el volumen y los tiempos de alimentación ingresados, por lo cual es importante saberlos definir de una

manera adecuada; relacionando quizás parámetros de otros centros volcánicos con similares condiciones tanto geológicas como climáticas.

En cuanto al modelo utilizado para este tipo de fenómenos volcánicos (VolcFlow), se evidencia que nos brinda una buena aproximación teórica de lo que son los alcances, el comportamiento de los flujos y los depósitos dejados, sin embargo, este modelo presenta ciertas limitaciones en el caso de lahares, como el no poder cambiar el comportamiento de un flujo a lo largo de su movimiento y depositación de ciertos materiales. Adicional a lo anteriormente mencionado, existen otro tipo de herramientas como Titan2D o Laharz, que permiten simular lahares, pero su principal inconveniente es que en estas herramientas no se puede especificar una reología en particular, con lo cual es imposible distinguir entre un *debris flow* o un flujo hiperconcentrado; también en estas herramientas se requiere algunos parámetros de entrada como ángulos de fricción del material, que no son tan fáciles de calcular en nuestro caso de estudio por la escasez de afloramientos de este fenómeno volcánico. De manera general VolcFlow nos brinda mejores aproximaciones para las zonas de peligro por lahares secundarios en el CVAN por los motivos antes mencionados, en comparación a otras herramientas informáticas.

4.5. Elaboración del Mapa Final de Peligros

Para la elaboración y presentación del mapa final de peligros del CVAN se consideró cuál de los tres escenarios eruptivos planteados anteriormente es el que tiene mayor probabilidad de ocurrencia, con el objetivo de combinar adecuadamente las zonas de peligros por cada producto volcánico en un solo mapa. De los tres escenarios planteados, el escenario 2 se lo consideró como el más probable debido que:

- Los depósitos de caídas de piroclastos simulados son los que muestran mayor concordancia con los depósitos reales de erupciones previas, específicamente con los depósitos de los periodos N5 y N6.
- Los depósitos de flujos de bloques y ceniza simulados tienen corto alcance en comparación con el escenario 3 y sus depósitos reales, según Maruri (1993), tan solo se encuentran en los alrededores de los domos Ninahuilca Chico I y II, lo que concuerda con un volumen de colapso de domo pequeño.

- Los depósitos de lahares secundarios simulados se basan en los datos de los depósitos de caídas y corrientes de densidad piroclástica reales, que a su vez se relacionan mejor al escenario 2.
- El depósito mapeado de los flujos de pómez y ceniza generado en el periodo N6, según Almeida (1996) e Hidalgo (2008), corresponde a una erupción con un VEI en el límite superior de VEI 4 o límite inferior de VEI 5, con lo cual no habría problema en unificarla dentro del escenario 2.

Por otra parte, el escenario 3 representa un caso que es posible para el CVAN por tener grandes erupciones, pero es menos probable que el escenario 2 debido a su menor correlación con los depósitos reales; el escenario 1 representa el caso de una erupción relativamente pequeña, que no causa mayores impactos significativos a las poblaciones y es considerado el menos probable debido a que no se han encontrado depósitos tan pequeños que reflejan este escenario.

El mapa final de peligros se lo presenta en la Figura 4.21.

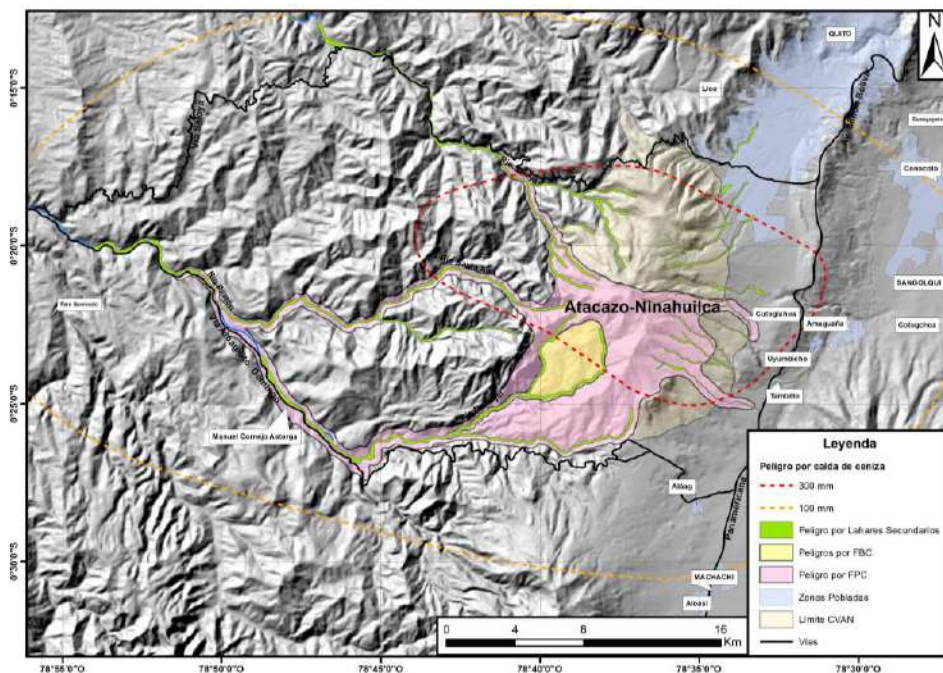


Figura 4.21. Mapa de peligros potenciales del CVAN.

Adicionalmente se ha optado por realizar un poster explicativo de los peligros asociados con el CVAN en tamaño A0 (Figura 4.22), para que exista una buena visualización de cada mapa de peligros volcánico con una breve descripción para su correcta interpretación. Este poster se lo realizó con la finalidad de poderlo difundir al público en general, al cual es directamente destinado el presente estudio.

4.5.1. Discusión

La elaboración de un mapa de peligros debe representar todos los casos probables que se puedan dar una erupción volcánica, lo cual se ha realizado satisfactoriamente.

Existen trabajos previos de peligros volcánicos del Complejo Volcánico Atacazo-Ninahuilca como el de Hall & Hillebrandt (1988) y Hall & Maruri (1992), dentro de los cuales existe una generalización, sobrevaloración u omisión de algunas zonas de peligros en comparación al mapa del presente trabajo que es importante definir las y discriminarlas adecuadamente.

En cuanto a la caída de piroclastos, el mapa de peligros de Hall & Hillebrandt (1988) y de Hall & Maruri (1992) muestran una omisión del peligro hacia el lado oriental del CVAN, ya que si bien la dirección predominante de los vientos es hacia el occidente como la indicada en estos mapas, existen fluctuaciones en esta dirección que hacen posible una gran afectación hacia oriente del CVAN, y concretamente en el sur de Quito, que, según estos mapas, se esperarían espesores de depósito de hasta 50 mm, lo cual no concuerda con espesores tomados durante trabajos de campo que fácilmente superan los 150 mm. Adicionalmente las áreas de afectación en aquellos mapas reflejan que se asemejan a las evidenciadas en el escenario 3 del presente trabajo, si bien es un escenario posible, no es el más probable. El presente trabajo aprovecha las herramientas informáticas desarrolladas a lo largo de estos años y la presencia de nuevos afloramientos por lo cual aporta una buena discriminación de espesores esperados por caídas de piroclastos y las áreas que potencialmente serían afectadas. Un inconveniente en las simulaciones realizadas en el presente trabajo es que la fuente de emisión de ceniza está ubicada en el punto más alto del edificio Atacazo, cuando el sitio de emisiones más reciente es el complejo dómico Ninahuilca; esto conlleva a un pequeño error en cuanto a la distribución general del material emitido en la atmósfera, pero como el CVAN se caracteriza por grandes erupciones con cantidades considerables de ceniza, no debería conllevar a una gran error en cuanto a la interpretación de los mapas aquí presentados.

En las corrientes de densidad piroclástica, los mapas previos muestran una generalización y simplificación al momento de definir las zonas de peligro, sin discriminar cuales serían las afectadas por flujos de bloques y ceniza y cuales, por flujos de pómez y ceniza, lo cual se ha logrado definir en el presente trabajo. Otro aspecto importante a diferenciar en mapas previos del aquí presentado, es el relacionado con los alcances y las áreas de peligro, en trabajos previos son relativamente más grandes a los aquí

presentados, sin embargo, en el mapa aquí presentado se definió estas áreas en base a los depósitos del periodo eruptivo N6, por lo que las zonas de peligro aquí definidas deberían representar adecuadamente el peligro por este tipo de fenómenos.

Para lahares secundarios los mapas previos definen zonas de peligro únicamente hacia el occidente del CVAN, omitiendo los drenajes orientales; en el presente trabajo se pudo definir adecuadamente los drenajes y las zonas más propensas a ser impactadas por este tipo de fenómenos en todas las direcciones del complejo volcánico. En mapas previos se evidencia que el peligro por lahares alcanza una distancia vertical de hasta decenas de metros por sobre el cauce de los ríos, rellenando completamente los grandes valles en "V" del occidente del complejo volcánico, lo cual implicaría volúmenes extremadamente grandes del orden de decenas de millones de metros cúbicos; la disponibilidad de estos volúmenes de agua por lluvias es difícil de lograr, sin embargo, existe la posibilidad que si se den estos volúmenes en casos de rupturas de presas naturales formadas por los depósitos de CDP, lo que sería un aspecto a mejorar en el mapa aquí presentado, ya que por el momento se logró determinar las zonas de peligro por lahares generados únicamente por mezcla de material volcánico y agua de escorrentía superficial de las cuencas sin represamiento de las mismas.

De manera general existe un gran avance en la definición de las zonas de peligros por los distintos fenómenos volcánicos en el CVAN, logrado con el uso de herramientas informáticas que permiten simular estos fenómenos, sin embargo, aún se puede mejorar algunos aspectos para definir con mayor precisión las zonas de peligro, utilizando modelos de elevación digital de mayor resolución, realizando más campañas de salidas de campo para toma de datos, estudiando más a detalle los depósitos volcánicos para una mejor correlación y utilizando herramientas informáticas alternativas a las usadas en el presente trabajo.

Los resultados aquí obtenidos cuentan con un alto grado de confiabilidad y sirve de guía a las autoridades y población en general para proyectos de planificación territorial con la finalidad de reducir la vulnerabilidad de la población e infraestructura ante los fenómenos volcánicos asociados al CVAN.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

La distribución de las caídas de ceniza afecta áreas grandes, logrando mayores alcances para el escenario definido como 3, en el cual la ceniza llegaría a afectar a casi la totalidad del Ecuador y también a una pequeña parte de Colombia.

Existe una distribución de caída de material piroclástico con tendencia hacia el occidente del CVAN, ya que la dirección preferencial de los vientos es hacia aquella zona; con excepciones entre los meses de noviembre, diciembre y enero, meses en los cuales la dirección del viento no presenta una tendencia clara y va hacia distintas direcciones, sean estas norte, oriente o sur.

La dispersión y caída de ceniza en el caso de la erupción del CVAN representa uno de los principales problemas para la población en general, afectando las actividades cotidianas de la población, así como sectores agrícolas, ganaderos y socioeconómicos, incluyendo vías de comunicación como la Alóag – Santo Domingo la cual es la principal conexión entre Costa y Sierra al centro y norte del Ecuador.

En la dispersión de tefra, el escenario 1 es el menos probable y con menor impacto en comparación a los otros; no se ha podido validar este escenario debido a la escases de depósitos con espesores pequeños o a que dicho complejo volcánico se encuentra caracterizado con grandes erupciones.

En la dispersión de tefra, el escenario 2 es considerado como el más probable, con depósitos de más de 100 mm de ceniza en el sur de Quito y 50 mm en el centro y norte de la capital, espesores que ya causarían una gran problemática debido a sus impactos.

En la dispersión de tefra, el escenario 3 por otra parte, representa el caso de una erupción con formación de columna pliniana que emitiría grandes volúmenes de tefra a la atmósfera, con depósitos que superan los 500 mm en el sur de Quito y los 250 mm en el centro y norte de la capital; este escenario es considerado el peor caso posible si el CVAN entra en actividad eruptiva.

Los valores de espesores de los depósitos de caída correspondientes a las erupciones N5 y N6 caen dentro del rango de espesores esperado y simulado para el escenario 2, con lo cual se ha validado la metodología utilizada para la elaboración de mapas de

peligros por caída de ceniza sin descartar completamente la posibilidad de ocurrencia del escenario 1 o 3.

Los corrientes de densidad piroclástica tipo flujo de bloques y ceniza simuladas representan aproximaciones de colapsos de domos que han crecido en el último centro de emisión conocido para el CVAN, variando en el tamaño de los domos y la magnitud de la erupción.

Los colapsos de domos representados en el escenario 2 son de volúmenes relativamente pequeños considerando los grandes domos que conforman el CVAN; este escenario es considerado como el más probable debido a que a lo largo del Río Pilatón no se pudo encontrar evidencias de un gran alcance para este tipo de flujos; y sus depósitos se encontrarían restringidos a los alrededores del domo Ninahuilca Chico II; adicionalmente los colapsos que se producirían serían de una pequeña parte de los domos emitidos.

El escenario 3 los volúmenes de los colapsos de domos son grandes, que representan una gran inestabilidad de la estructura del domo; este escenario representaría el peor escenario posible en el que pueda producirse flujos de bloques y ceniza en el CVAN.

Los flujos de bloques y ceniza representan fenómenos asociados a emisión y colapso de domos durante eventos eruptivos, fenómeno que en el CVAN es común ya que, en sus últimos 10.000 años de historia, se ha dado el crecimiento de algunos domos asociados a actividad explosiva.

Las simulaciones computarizadas para flujos de bloques y ceniza representan el peligro asociados a este fenómeno solo en el caso que una nueva erupción, el colapso de domo se de en la última zona de centro de emisión, es decir en el domo Ninahuilca Chico II o sus alrededores muy próximos, pero la historia eruptiva del CVAN nos revela la migración del centro de emisión en dirección preferencial SO, con lo cual no se descarta la posibilidad que se dé el crecimiento de un nuevo domo volcánico y su posterior colapso en una zona que no se ha considerado para elaborar el mapa de peligros, esperándose que este nuevo domo se genere junto al Ninahuilca Chico II pero a una corta distancia del mismo.

Los corrientes de densidad piroclástica de ceniza y pómez, representan un gran peligro asociado al CVAN, debido a los grandes volúmenes que poseen (700 millones m³), y que son reflejados por los depósitos de erupciones pasadas; por sus características con altas temperaturas y velocidades; y por su gran alcance que superan los 20 kilómetros a lo largo del Río Pilatón.

Los límites de las ignimbritas mapeadas representan valores aproximados del alcance vertical que estas tuvieron, debido a que en el momento de su emplazamiento debieron haber rellenado por completo los drenajes por donde se transportaron, siendo erosionados y quedando únicamente relictos de estos depósitos, que, a pesar de la intensa erosión, aún representan un gran volumen.

Debido a que en el trabajo de campo se encontraron *ash flows* en los flancos norte y nor-oriental del CVAN, existe la posibilidad que las ignimbritas encontradas en la parte sur-occidental representen una facies más proximal y los *ash flows* del norte una facies más distal pero correspondiente al mismo pulso eruptivo, con lo cual no se descarta el peligro asociado a corrientes de densidad piroclástica de ceniza y pómez hacia los flancos norte y nor-oriental.

Los lahares secundarios representan un peligro volcánico simultáneo o posterior a una erupción del CVAN, y depende de la cantidad de material volcánico disponible a removilización y cantidades de lluvias en los drenajes por los cuales se generen, siendo este último, el factor limitante de generación de un lahar secundarios para el CVAN.

El peligro generado por lahares secundarios hacia el occidente del CVAN se restringe exclusivamente a los cauces de los drenajes, aumentando sus caudales, la altura de los mismos y posiblemente afectando infraestructuras a una altura considerable en referencia la base de los ríos; considerando los volúmenes relativamente muy grandes que pueden alcanzar de hasta 7,4 millones de m³ por drenaje.

El peligro generado por lahares secundarios hacia los flancos nororiental y suroriental del CVAN se restringe de igual manera a los cauces de los ríos y quebradas, pero en el Sur de Quito, donde los drenajes son poco profundos, los lahares pueden llegar a desbordarse o a cambiar su dirección natural de movimiento si llega a puntos de rellenos de quebradas o algún factor que represente un obstáculo para su paso por esa zona.

El mayor impacto generado por lahares secundarios se da en los flancos orientales del CVAN, impactando a gran parte del Sur de Quito, Cutuglahua, Tambillo, Amaguaña y adicionalmente restringiendo vías de comunicación terrestre.

5.2. Recomendaciones

En base a los problemas citados en el presente proyecto, se recomienda realizar simulaciones de lahares secundarios (para el flanco occidental) y de flujos de bloques y ceniza utilizando un modelo digital de terreno de mejor resolución que 30 metros, ya que como observamos, esta resolución nos brinda una buena idea general de zonas potencialmente afectadas, pero no permite reconocer algunos rasgos morfológicos que, a pesar de ser pequeños, en muchos casos son muy importantes.

En cuanto al trabajo de campo para mapeo de ignimbritas se lo ha mejorado mucho, pero se recomienda ampliar y comprobar el mapeo realizado con excursiones de trabajo a las zonas de difícil accesibilidad, es decir a los drenajes directamente al occidente del CVAN; con la finalidad de comprobar los datos presentados o ajustarlos a la realidad.

En cuanto a la definición de peligro por caída de material piroclástico se recomienda realizar una redefinición de estas zonas con un mayor número de simulaciones, con la finalidad de disminuir el error que el número de simulaciones aquí realizadas conlleva.

Se recomienda ajustar las zonas de peligro por caída de piroclastos con metodologías alternas, como por ejemplo usar Tephra 2D, que, por limitaciones de tiempo, en el presente trabajo no se lo pudo realizar.

Adicionalmente para realizar una comprobación óptima de los depósitos de caída se recomienda realizar análisis químicos en nuevos afloramientos hoy disponibles, para confirmar que en realidad corresponden a los eventos eruptivos aquí asignados. De igual manera realizar análisis químicos en los *ash flows* asociados a distintas caídas con el objetivo de discriminarlos definitivamente.

Para lahares secundarios se recomienda realizar simulaciones en las cuencas al occidente del CVAN, considerando el caso que las corrientes de densidad piroclástica formen embalses naturales que sean propensos a rupturas, acumulando mayor cantidad de agua y por consiguiente generando lahares que puedan tener mayores volúmenes y alcances a los presentados en este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- Almeida, E. (1996). Dinámica de las erupciones del Volcán Ninahuilca. *7mo Congreso de Geología, Minas, Petróleo y Medio Ambiente*, Quito, Ecuador, pp. 21–36.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrín, P., Segovia M., Rolandone F., & Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the Northern Andes subduction zone: Migration history and the present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador. *Tectonics*, 35(5), pp. 1048–1065. doi: 10.1002/2016TC004117.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J.-P., Samaniego, P., Egred J., Ramón P., Rivero D., & Yepes H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*, Serie Los peligros volcánicos en Ecuador, No. 3, Quito, IG-EPN / IRD / Corporación Editora Nacional, 148 pp.
- Andrade, D., Hidalgo, S., Monzier, M., Eissen, J.-P., & Beate, B. (2012). *Los peligros volcánicos asociados con el Atacazo-Ninahuilca y Pululahua*, Serie Los peligros volcánicos en Ecuador, No. 5, Quito, IG-EPN / IRD / Corporación Editora Nacional, 110 pp.
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J., & Santacroce, R. (1988). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geological Magazine*, 125, pp. 1–14.
- Bernard, B. & Andrade, D. (2011). *Volcanes Cuaternarios del Ecuador Continental*. IG-EPN Poster Informativo.
- Bernard, B., Hidalgo, S., Robin, C., Beate, B., & Quijozaca, J. (2014). The 3640–3510 BC rhyodacite eruption of Chachimbiro compound volcano, Ecuador: a violent directed blast produced by a satellite dome. *Bulletin of Volcanology*, 76(9), pp. 1–20. doi: 10.1007/s00445-014-0849-z
- Bernard, J., Vásconez, F., Ramón, P., Diefenbach, A., & Mothes, P., (2014). Modeling potential hazard zones of El Reventador volcano (Ecuador): fountain and cone collapse pyroclastic flows vs cone landslide. Poster Informativo. COV 9, Puerto Varas, Chile.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Gutscher, M.-A., Monzier, M., Hall, M., & Cotter, J. (2003). Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205, pp. 123–138. doi: 10.1016/S0012-821X(02)01024-5.

- Branney, M., & Kokelaar, P. (2002). *Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites*. London: The Geological Society. 143 pp.
- Brown, R., & Andrews, G. (2015). Deposits of Pyroclastic Density Currents. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), pp. 631–648.
- Calder, E., Lavallée, Y., Kendrick, J., & Bernstein, M. (2015). Lava Dome Eruptions. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition). pp. 343–362.
- Carey, S., & Bursik, M. (2015). Volcanic Plumes. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition) pp. 571–585.
- Charbonnier, S., & Gertisser, R. (2011). Deposit architecture and dynamics of the 2006 block-and-ash flows of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Sedimentology*, *58*, pp. 1573–1612. doi: 10.1111/j.1365-3091.2011.01226.x.
- Charbonnier, S., & Gertisser, R. (2012). Evaluation of geophysical mass flow models using the 2006 block-and-ash flows of Merapi Volcano, Java, Indonesia: Towards a short-term hazard assessment tool. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *231–232*, pp. 87–108. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.02.015.
- Chesner, C. (2011). The Toba Caldera Complex. *Quaternary International*, *258*, pp. 1–14. doi: 10.1016/j.quaint.2011.09.025.
- Cioni, R., Pistolesi, M., & Rosi, M. (2015). Plinian and Subplinian Eruptions. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition). pp. 519–535.
- Cole, P., Calder, E., Sparks, R., Clarke, A., Druitt, T., Young, S., Herd R., Harford C., & Norton, G. (2002). Deposits from dome-collapse and fountain-collapse pyroclastic flows at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, from 1995-1999. *Geological Society London Memoir*, *21*, pp. 231–262. doi: 10.1144/GSL.MEM.2002.021.01.11.
- Colin, W. (2008). Supereruptions and Supervolcanoes: Processes and Products. *Elements*, *4*, pp. 1–29. doi: 10.2113/GSELEMENTS.4.1.29.
- DeMets, C., Gordon, R., Argus, D., & Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophysical Journal International*, *101*, pp. 425–478. doi: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x.
- Evans, S., Hungr, O., & Clague, J. (2001). Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada; implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes. *Engineering Geology*, *61*, pp. 29–51. doi: 10.1016/S0013-7952(00)00118-6.

- Fierstein, J., & Nathenson, M. (1992). Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bulletin of Volcanology*, 54, pp. 156–167. doi: 10.1007/BF00278005.
- Fink, J. (1990). *Lava Flows and Domes: emplacement mechanisms and hazard implications*. New York, USA. 249pp.
- Gailler, A., Charvis, P., & Flueh, E. (2007). Segmentation of the Nazca and South American plates along the Ecuador subduction zone from wide angle seismic profiles. *Earth and Planetary Science Letters*, 260, pp. 444–464. doi: 10.1016/j.epsl.2007.05.045.
- García-Aristizabal, A., Kumagai, H., Samaniego, P., Mothes, P., Yepes, H., & Monzier, M. (2007). Seismic, petrologic, and geodetic analyses of the 1999 dome-forming eruption of Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161, pp. 333–351. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.12.007.
- GoldenSoftware. (2017). SURFER v14. Retrieved October 19, 2017, (Disponible en: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/features>)
- Gudmundsson, M. (2015). Hazards from Lahars and Jokulhlaups. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), pp. 971–984.
- Gueugneau, V. (2014). *Evaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés*. Rapport de Travail d'Etude et de Recherche (TRE). Université Blaise Pascal Clermont II. France, 25 pp.
- Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168, pp. 255–270. doi: 10.1016/S0012-821X(99)00060-6.
- Hall, M. (1977). *El volcanismo en el Ecuador* (IPGH). Quito, Ecuador: Sección Nacional del Ecuador. 120 pp.
- Hall, M., & Beate, B. (1991). El Volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador. In *El Paisaje Volcánico de la Sierra Ecuatoriana: geomorfología, fenómenos volcánicos y recursos asociados*, Corporación Editora Nacional, Quito, Ecuador, pp. 5–18.
- Hall, M. L., & Mothes, P. A. (2008). Quilotoa volcano - Ecuador : An overview of young dacitic volcanism in a lake-filled caldera, 176, pp. 44–55. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.025

- Hall, M., & Mothes, P. (1994). Tefroestratigrafía Holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador. *Estudios de Geografía*, 6, pp. 47–67.
- Hall, M., Ramón, P., Mothes, P., Le Pennec, J.-L., García, A., Samaniego, P., & Yepes, H. (2004). Volcanic eruptions with little warning: the case of Volcán Reventador's Surprise November 3, 2002 Eruption, Ecuador. *Revista Geológica de Chile*, 31(2), pp. 349–358. doi: 10.4067/S0716-02082004000200010.
- Hall, M., Samaniego, P., Le Pennec, J.-L., & Johnson, J. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, pp. 1–6. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012.
- Harris, A., & Rowland, S. (2015). Lava Flows and Rheology. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), pp. 321–342.
- Hidalgo, S. (2006). *Les interactions entre magmas calco-alkalins "classiques" et adakitiques: exemple du complexe volcanique atacazo – ninahuilca (equateur)*. Université blaise pascal. France. 249 pp.
- Hidalgo, S., Monzier, M., Almeida, E., Chazot, G., Eissen, J. P., van der Plicht, J., & Hall, M. (2008). Late Pleistocene and Holocene activity of the Atacazo-Ninahuilca Volcanic Complex (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, pp. 16–26. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.017.
- Houghton, B., & Carey, R. (2015). Pyroclastic Fall Deposits. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), pp. 599–616.
- Houghton, B. F., Swanson, D. A., Rausch, J., Carey, R. J., Fagents, S. A., & Orr, T. R. (2013). Pushing the volcanic explosivity index to its limit and beyond: Constraints from exceptionally weak explosive eruptions at Kilauea in 2008. *Geology*, 41(6), pp. 627–630. doi: 10.1130/G34146.1.
- Hughes, R., & Pilatasig, L. (2002). Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 345, pp. 29–48. doi: 10.1016/S0040-1951(01)00205-0.
- Hutter, K., & Nohguchi, U. (1990). Similarity solutions for a Voellmy model of snow avalanches with finite mass. *Acta Mechanica*, 82, pp. 99–127. doi: 10.1007/BF01173741.

- INAMHI. (2014a). *Mapa de Temperatura Media Anual Serie 1981-2010*. Quito. (Disponible en: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/METEOROLOGIA/ISOLINEAS TEMPERATURA/TEMPERATURA MEDIA/ISOTERMAS ANUALES/](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/METEOROLOGIA/ISOLINEAS%20TEMPERATURA/TEMPERATURA%20MEDIA/ISOTERMAS%20ANUALES/)).
- INAMHI. (2014b). *Normal Climatológica de Precipitación Anual Acumulada Serie 1981-2010*. Quito. (Disponible en: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/METEOROLOGIA/ISOLINEAS PRECIPITACION/ISOYETAS ANUALES/](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/gisweb/METEOROLOGIA/ISOLINEAS%20PRECIPITACION/ISOYETAS%20ANUALES/)).
- INAMHI. (2018). Series mensuales de datos meteorológicos. Quito, Ecuador.
- Iverson, R., & Denlinger, R. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research*, 106, pp. 537–552. doi: 10.1029/2000JB900329.
- Jaillard, É., Ordoñez, M., Suárez, J., Toro, J., Iza, D., & Lugo, W. (2004). Stratigraphy of the late Cretaceous-Paleogene deposits of the cordillera occidental of central Ecuador: geodynamic implications. *South American Earth Sciences*, 17, pp. 49–58. doi: 10.1016/j.jsames.2004.05.003.
- Kelfoun, K. (2011). Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 116, 14 pp. doi: 10.1029/2010JB007622.
- Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socoma rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110, 13 pp. doi: 10.1029/2005JB003758.
- Kelfoun, K., Samaniego, P., & Palacios, P. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-contained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). *Bull Volcanol*, pp. 1057-1075. doi: 10.1007/s00445-009-0286-6.
- Kelfoun, K., & Volcans, L. M. et. (2016). VolcFlow simulation of volcanic flows. (Disponible en: http://lmv.univ-bpclermont.fr/volcflow/#ert_pane1-1)
- Kellogg, J., & Vega, V. (1995). Tectonic Development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System Geodetic Studies and Gravity. *Geological Society of America*, 295, pp 75–90. doi: 10.1130/SPE295-p75.

- Kusky, T. (2008). *Volcanoes: Eruptions and Other Volcanic Hazards*. New York. 152 pp.
- Le Maitre, R., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M., Bonin, B., & Bateman, P. (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511535581.
- Legros, F. (2000). Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96, pp. 25–32. doi: 10.1016/S0377-0273(99)00135-3.
- Lonsdale, P. (2005). Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon plate. *Tectonophysics*, 404, pp. 237–264. doi: 10.1016/j.tecto.2005.05.011.
- Martinez, A. (2006). Particularización al método de los coeficientes de escorrentía. In *Método de los coeficientes de escorrentía. Marco Generalizado*, pp. 1–28. (Disponible en: [http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes de escorrentía.pdf](http://www.oasification.com/archivos/Coeficientes%20de%20escorrentia.pdf))
- Maruri, W. (1993). *Estudio Volcanológico del Volcán Ninahuilca, Provincia de Pichincha*. Escuela Politécnica Nacional. 126 pp.
- Mastin, L., Randall, M., Schwaiger, H., & Denlinger, R. (2013). *User's Guide and Reference to Ash3d-A Three-Dimensional Model for Eulerian Atmospheric Tephra Transport and Deposition*. 58 pp. (Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/2013/1122/pdf/ofr20131122.pdf>)
- MathWorks. (2017). MATLAB: The Language of Technical Computing. Retrieved October 19, 2017, (Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/matlab/index.html>)
- Mueller, S., Scheu, B., Kueppers, U., Spieler, O., Richard, D., & Dingwell, D. (2011). The porosity of pyroclasts as an indicator of volcanic explosivity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 203, pp. 168–174. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.04.006.
- Newhall, C., & Self, S. (1982). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87, pp. 1231–1238. doi: 10.1029/JC087iC02p01231.
- Pardo-Casas, F., & Molnar, P. (1987). Relative Motion of the Nazca (Farallon) and South American plates since late cretaceous time. *Tectonics*, 6, pp. 233–248. doi: 10.1029/TC006i003p00233.

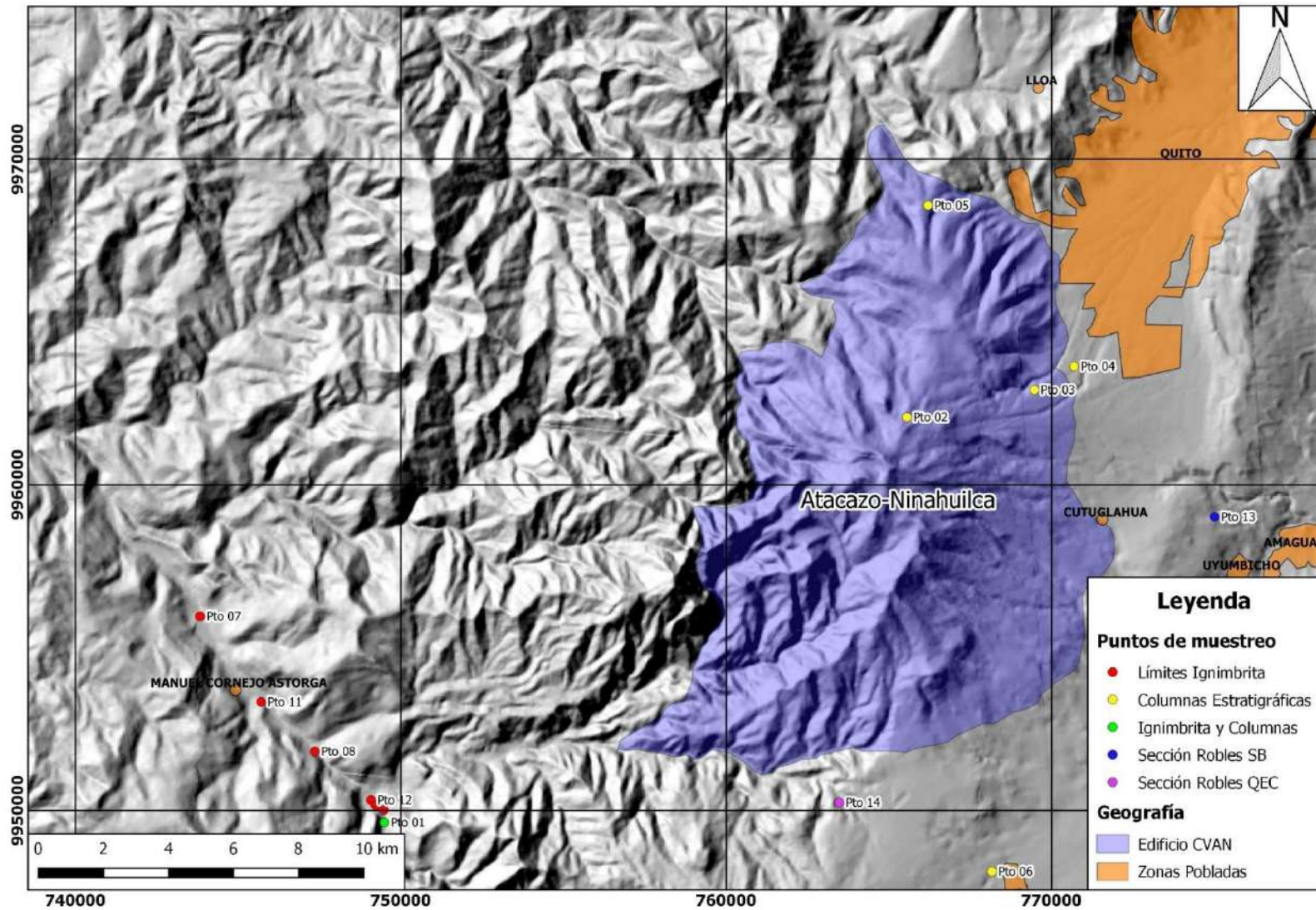
- Parfitt, E., & Wilson, L. (2008). *Fundamentals of Physical Volcanology*, Blackwell, Oxford. 256 pp.
- Pennington, W. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*, 86, pp. 10753–10770. doi: 10.1029/JB086iB11p10753.
- Pratt, W., Duque, P., & Ponce, M. (2005). An Autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador. *Tectonophysics*, 399, pp. 251–278. doi: 10.1016/j.tecto.2004.12.025.
- Pyle, D. (1989). The thickness, volume and grainsize of tephra fall deposits. *Bulletin of Volcanology*, 51, pp. 1–15. doi: 10.1007/BF01086757.
- Reynaud, C., Jaillard, É., Lapierre, H., Mamberti, M., & Mascle, G. (1999). Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America. *Tectonophysics*, 307, pp. 235–254. doi: 10.1016/S0040-1951(99)00099-2.
- Robles, A. (2013). *Estudio de depósitos volcánicos del Cuaternario en la zona Sur del Distrito Metropolitano de Quito*. Escuela Politécnica Nacional. 289 pp.
- Samaniego, P., Pennec, J. Le, Robin, C., & Hidalgo, S. (2011). Petrological analysis of the pre-eruptive magmatic process prior to the 2006 explosive eruptions at Tungurahua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 199(1–2), pp. 69–84. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.10.010.
- Santamaria, S. (2017). *Catálogo de Eventos Volcánicos ocurridos en el Ecuador Continental desde el Plioceno y Análisis de la Frecuencia Eruptiva*. Escuela Politécnica Nacional. 153 pp.
- Savage, R., & Hutter, K. (1991). The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. *Acta Mechanica*, 86, pp. 200–223. doi: 10.1007/BF01176820.
- Schwaiger, H., Denlinger, R., & Mastin, L. (2012). Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition. *Journal of Geophysical Research*, 117. 20 pp. doi: 10.1029/2011JB008968.
- Seggiaro, R., Gorustovich, S., & Martí, J. (1987). Las ignimbritas del complejo volcánico Coranzuli (Puna Argentina-Andes Centrales). *Estudios Geológicos*, 43, pp. 345–358. doi: 10.3989/egeol.87435-6605.

- Shi, X., Jiang, Y., & Hirakawa, Y. (2017). Growth and potential collapse of the lava dome in Unzen volcano and the estimation on block-and-ash flows. *Geosciences Journal*, pp. 1–14. doi: 10.1007/s12303-017-0051-3.
- Sigurdsson, H. (2015). *The Encyclopedia of Volcanoes*. (Second Edition). London, England. 1456 pp.
- Spikings, R., Winkler, W., Hughes, R., & Handler, R. (2005). Thermochemistry of allochthonous terranes in Ecuador: Unravelling the accretionary and post-accretionary history of the Northern Andes. *Tectonophysics*, 399, pp 195–220. doi: 10.1016/j.tecto.2004.12.023.
- Spikings, R., Winkler, W., Seward, D., Ruiz, G., & Handler, R. (2002). Terrane Accretion and Orogenic Growth in Ecuador. *Five ISAG*, pp. 617–620.
- Suzuki, T. (1983). A Theoretical Model for Dispersion of Tephra. *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, pp. 95–113.
- Vallance, J., & Iverson, R. (2015). Lahars and Their Deposits. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (Second Edition), pp. 649–664.
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)*. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. 208 pp.
- Vallejo, C., Winkler, W., Spikings, R., Luzieux, L., Heller, F., & Bussy, F. (2009). Mode and timing of terrane accretion in the forearc of the Andes in Ecuador. *Geological Society of America*, 204, pp. 197–216. doi: 10.1130/2009.1204(09).
- Vallejo, S., & Ramón, P. (2011). Evolución del cono de escoria y domo al interior del cráter del volcán Reventador 2010-2011. *7mas Jornadas de Ciencias de La Tierra*.
- Vasconez, F. (2015). *Estimación de la masa de magma contenida en los depósitos del Complejo Volcánico Pululahua (CVP)*. Escuela Politécnica Nacional. 144 pp.
- Vera, J., & Granada, U. (2015). RACEFN Glosario de Geología. (Disponible en: http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/0_rac.htm)
- Voight, B. (2000). Structural stability of andesite volcanoes and lava domes. *The Royal Society*, 358, pp 1663–1703. doi: 10.1098/rsta.2000.0609.
- White, J. D. L., & Houghton, B. F. (2006). Primary volcanoclastic rocks. *Geology*, 34(8), pp. 677–680. doi: 10.1130/G22346.1.
- Wikipedia. (2017). MATLAB. (Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>)

- Wilson, L., & Huang, T. C. (1979). The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. *Earth and Planetary Science Letters*, *44*, pp 311–324. doi: 10.1016/0012-821X(79)90179-1.
- Wilson, T., Jenkins, S., & Stewart, C. (2015). Impacts from Volcanic Ash Fall. In *Volcanic Hazards, Risk, and Disasters*, pp. 47–86.
- Zhuhua, J., Soonyoung, Y., Seong-Min, Y., & Ki-Hong, C. (2013). Damage and Socio-Economic Impact of Volcanic Ash. *Journal of the Korean Earth Science Society*, *34*(6), pp. 536–549. doi: 10.5467/JKESS.2013.34.6.536.

ANEXOS

ANEXO 1. Mapa de Ubicación de puntos de muestreo



ANEXO 2. Columnas Estratigráficas levantadas

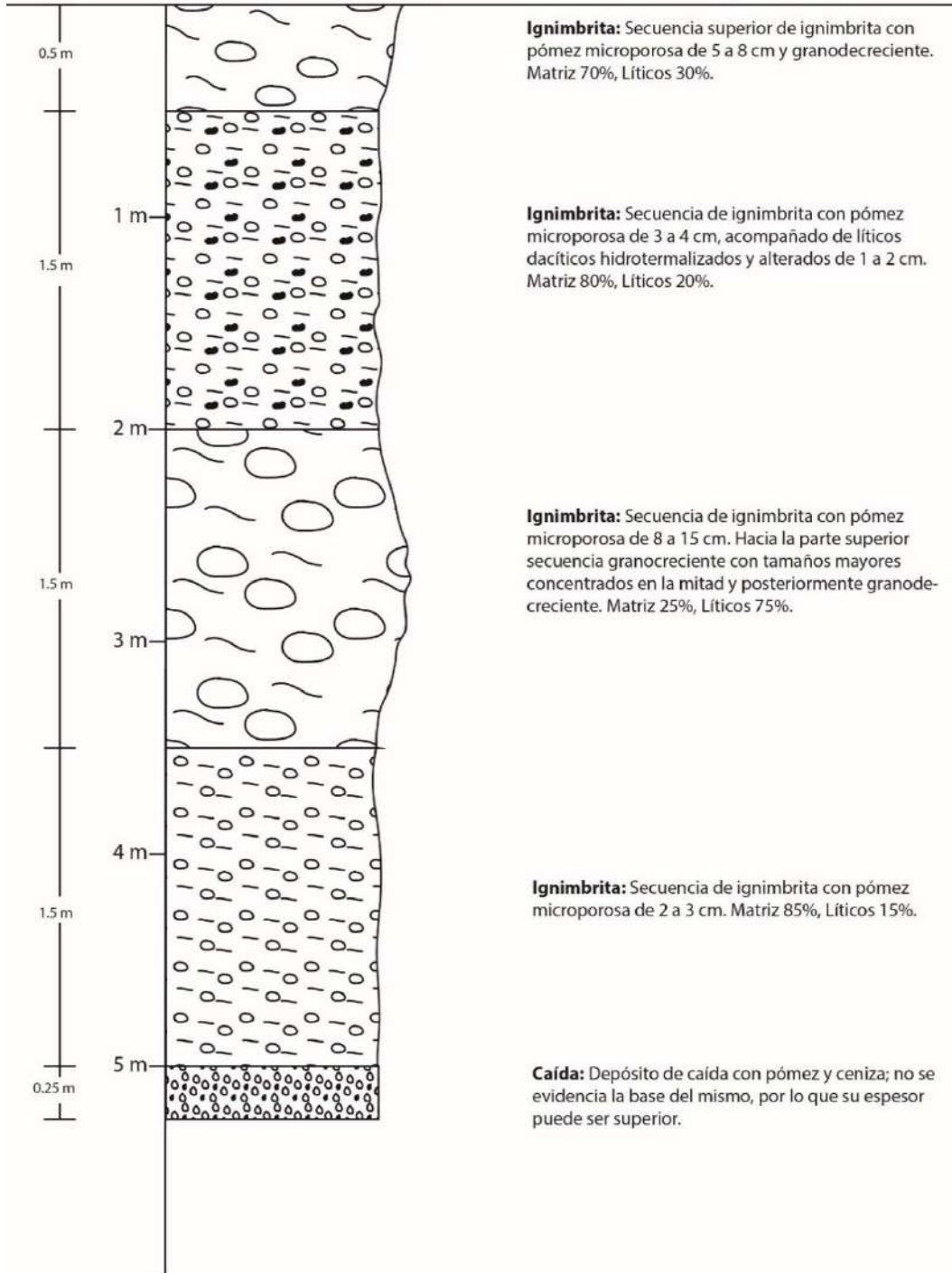
Columna Estratigráfica - Punto 01

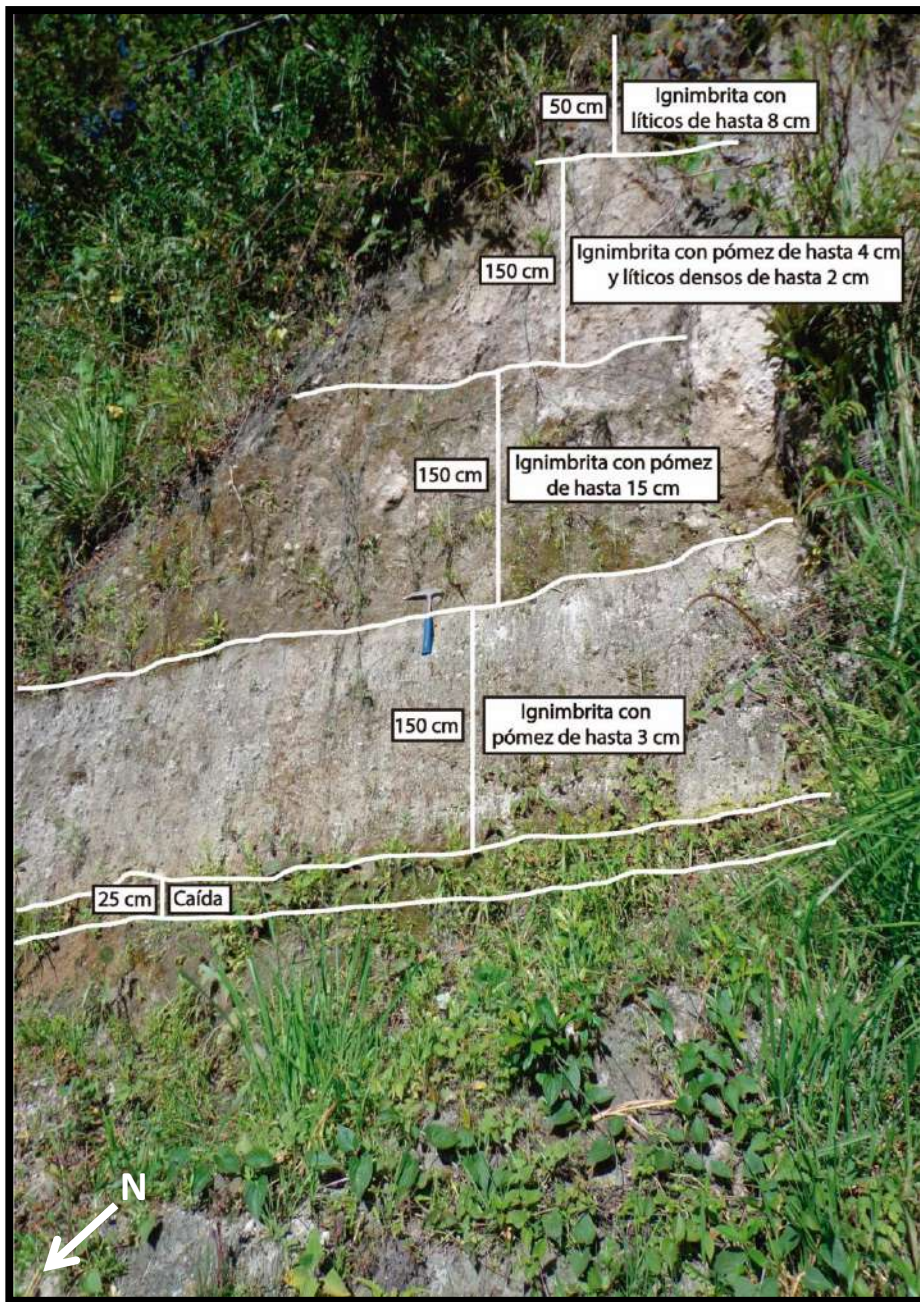
Latitud: 0749487

Longitud: 9949631

Ubicación: Carretera Alóag - Sto. Domingo

Descripción





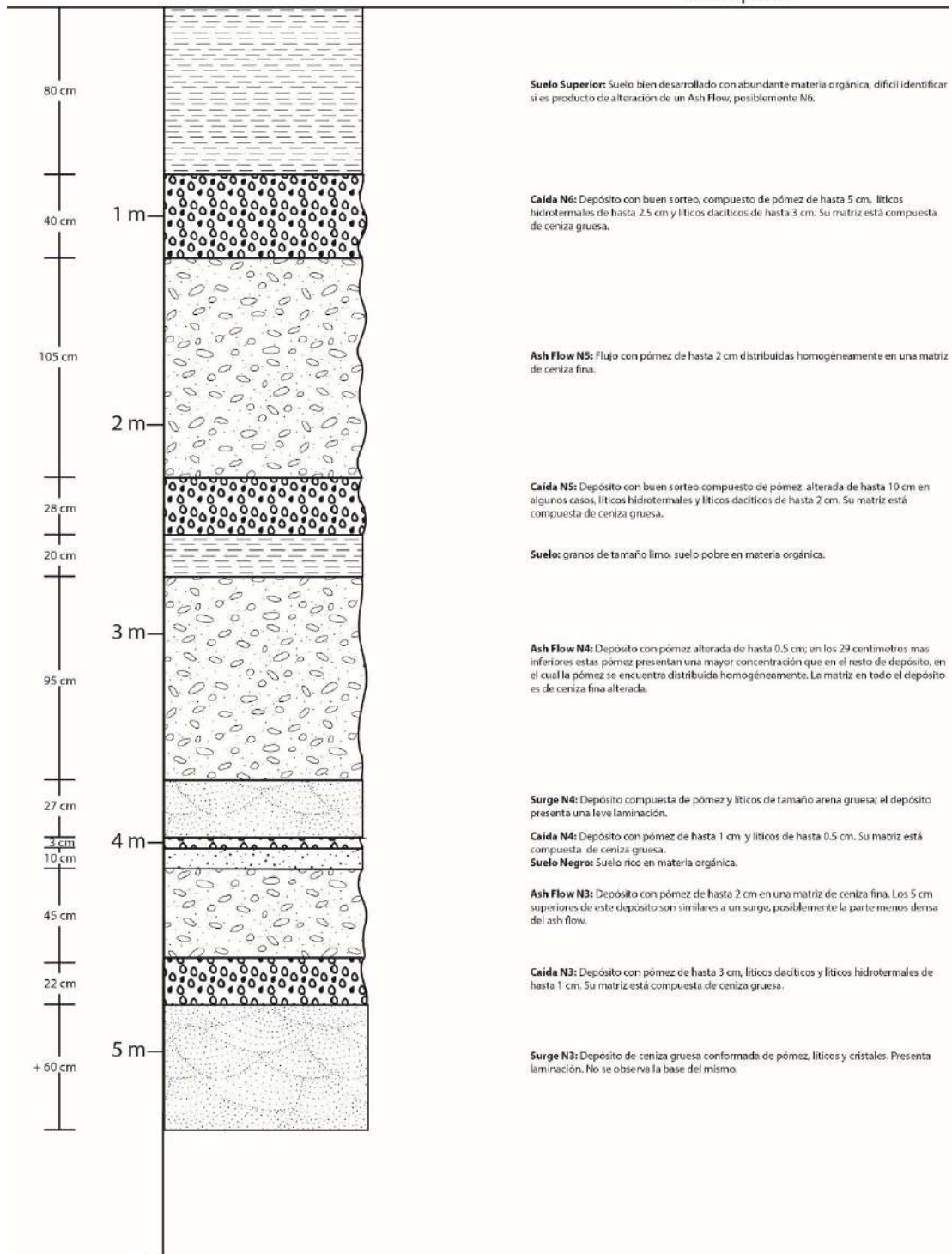
Columna Estratigráfica - Punto 02

Latitud: 0765552

Longitud: 9962076

Ubicación: Antenas del Atacazo

Descripción



Suelo Superior: Suelo bien desarrollado con abundante materia orgánica, difícil identificar si es producto de alteración de un Ash Flow, posiblemente N6.

Caída N6: Depósito con buen sorteo, compuesto de pómez de hasta 5 cm, líticos hidrotermales de hasta 2.5 cm y líticos dacíticos de hasta 3 cm. Su matriz está compuesta de ceniza gruesa.

Ash Flow N5: Flujo con pómez de hasta 2 cm distribuidas homogéneamente en una matriz de ceniza fina.

Caída N5: Depósito con buen sorteo compuesto de pómez alterada de hasta 10 cm en algunos casos, líticos hidrotermales y líticos dacíticos de hasta 2 cm. Su matriz está compuesta de ceniza gruesa.

Suelo: granos de tamaño limo, suelo pobre en materia orgánica.

Ash Flow N4: Depósito con pómez alterada de hasta 0.5 cm; en los 29 centímetros mas inferiores estas pómez presentan una mayor concentración que en el resto de depósito, en el cual la pómez se encuentra distribuida homogéneamente. La matriz en todo el depósito es de ceniza fina alterada.

Surge N4: Depósito compuesta de pómez y líticos de tamaño arena gruesa; el depósito presenta una leve laminación.

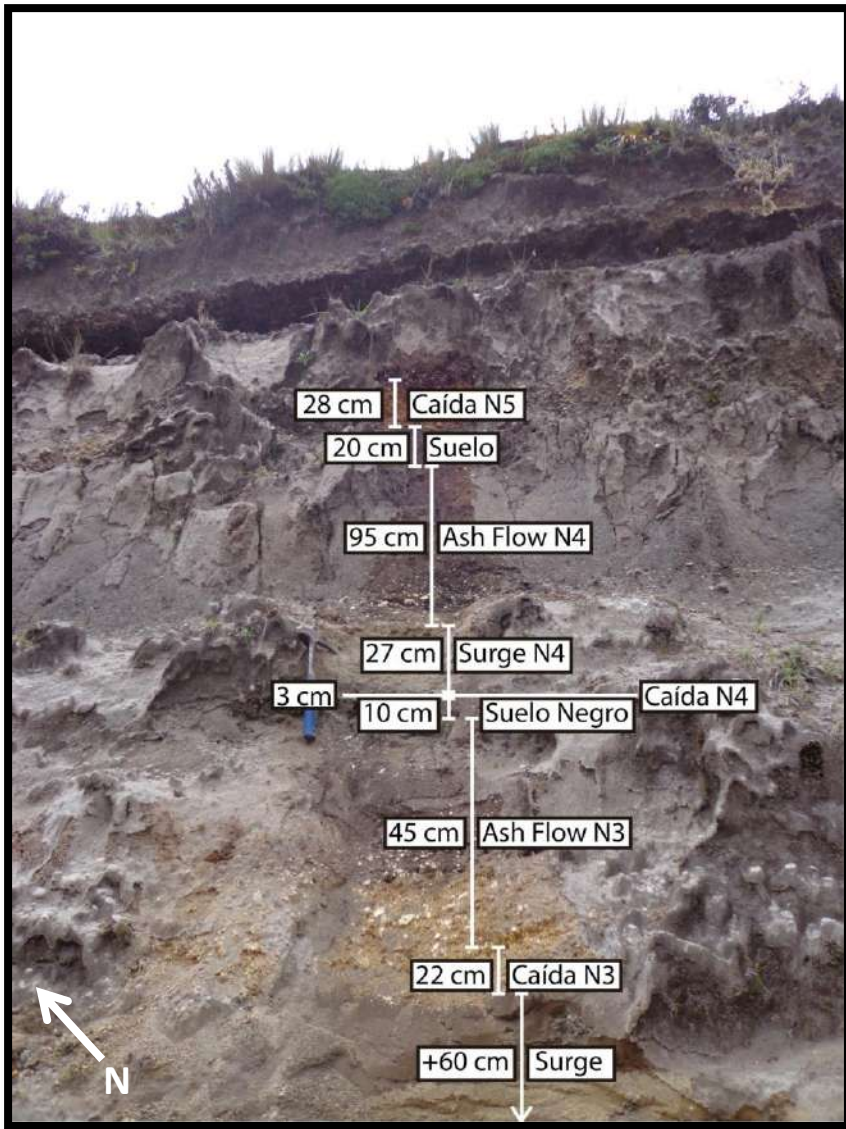
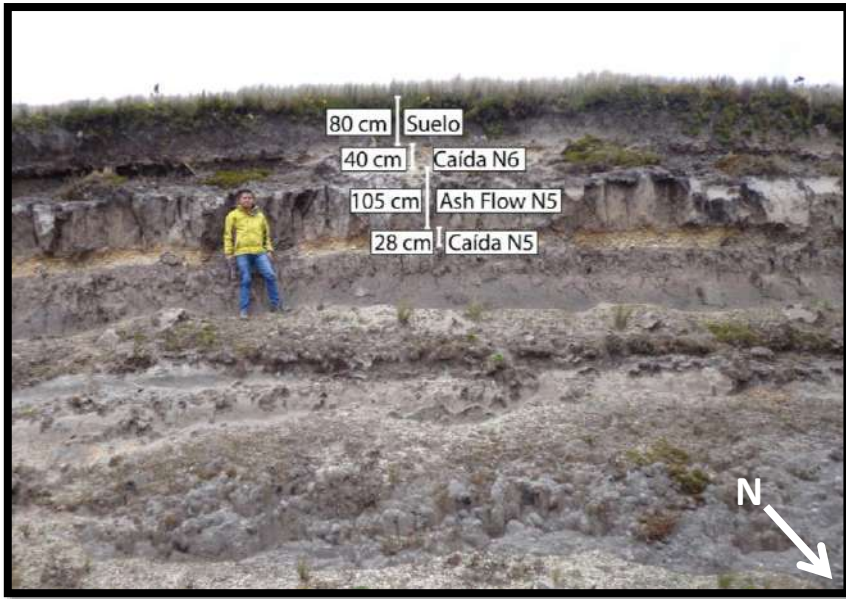
Caída N4: Depósito con pómez de hasta 1 cm y líticos de hasta 0.5 cm. Su matriz está compuesta de ceniza gruesa.

Suelo Negro: Suelo rico en materia orgánica.

Ash Flow N3: Depósito con pómez de hasta 2 cm en una matriz de ceniza fina. Los 5 cm superiores de este depósito son similares a un surge, posiblemente la parte menos densa del ash flow.

Caída N3: Depósito con pómez de hasta 3 cm, líticos dacíticos y líticos hidrotermales de hasta 1 cm. Su matriz está compuesta de ceniza gruesa.

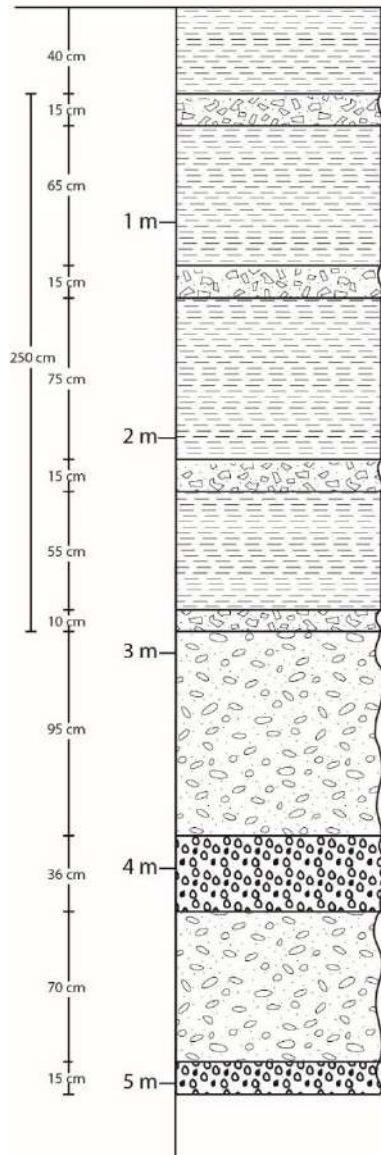
Surge N3: Depósito de ceniza gruesa conformada de pómez, líticos y cristales. Presenta laminación. No se observa la base del mismo.



Columna Estratigráfica - Punto 03

Latitud: 769464
Longitud: 9962913
Ubicación: Parroquia La Ecuatoriana

Descripción



Suelo Actual: Suelo negro rico en materia orgánica.

Secuencia de lahares: Secuencia de un número indeterminado de lahares secundarios. Se observa varios niveles de concentración de pómez removilizadas en una sola matriz.

Ash Flow N6: Depósito con pómez de hasta 3 cm en una misma matriz para todo el depósito. En los 47 cm inferiores existe una mayor concentración de pómez.

Caída N6: Depósito con buen sorteo. Presenta líticos de pómez de hasta 5 cm, líticos hidrotermales y dacíticos de hasta 1 cm. Su matriz está conformada de ceniza gruesa.

Ash Flow N5: Depósito con pómez de hasta 2 cm distribuida homogéneamente en una matriz de ceniza fina.

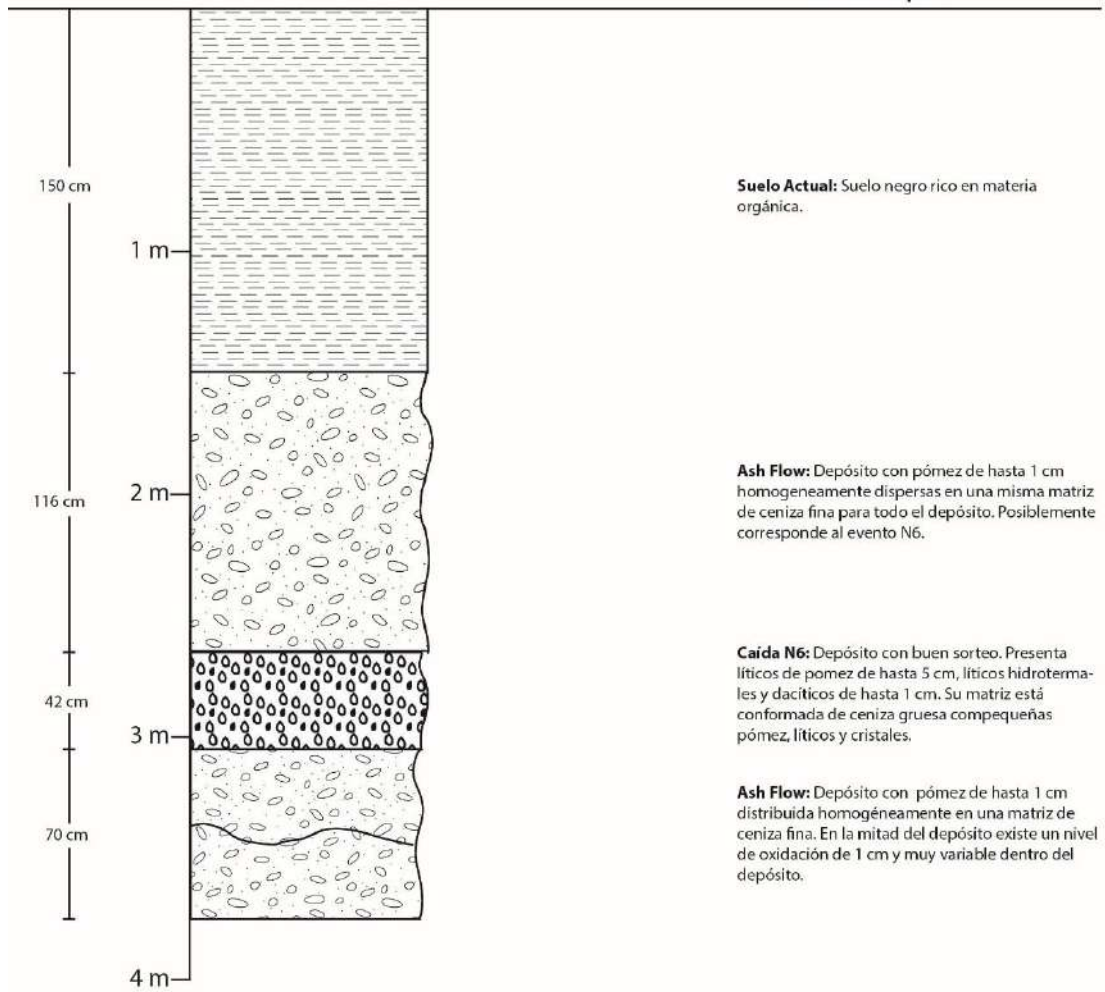
Caída N5: Depósito con buen sorteo con pómez alteradas de hasta 5 cm, líticos hidrotermales y dacíticos de hasta 1 cm. Su matriz está compuesta de ceniza gruesa.



Columna Estratigráfica - Punto 04

Latitud: 770701
Longitud: 9963632
Ubicación: Parroquia La Ecuatoriana

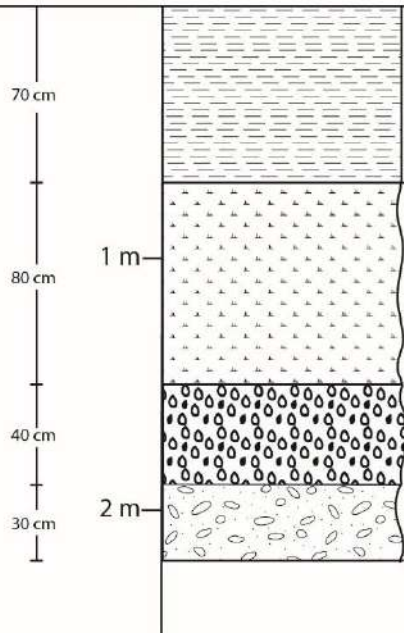
Descripción



Columna Estratigráfica - Punto 05

Latitud: 766194
Longitud: 9968572
Ubicación: La Carcacha

Descripción



Suelo Actual: Suelo negro rico en materia orgánica.

Nivel Basura: Compuesto de removilización de pómez, líticos en una matriz arcillosa.

Caída N6: Depósito con buen sorteo. Presenta líticos de pomez microvesiculada de hasta 3 cm, con qz+plg+amph+vidrio en una matriz de ceniza media de pómez, líticos y cristales.

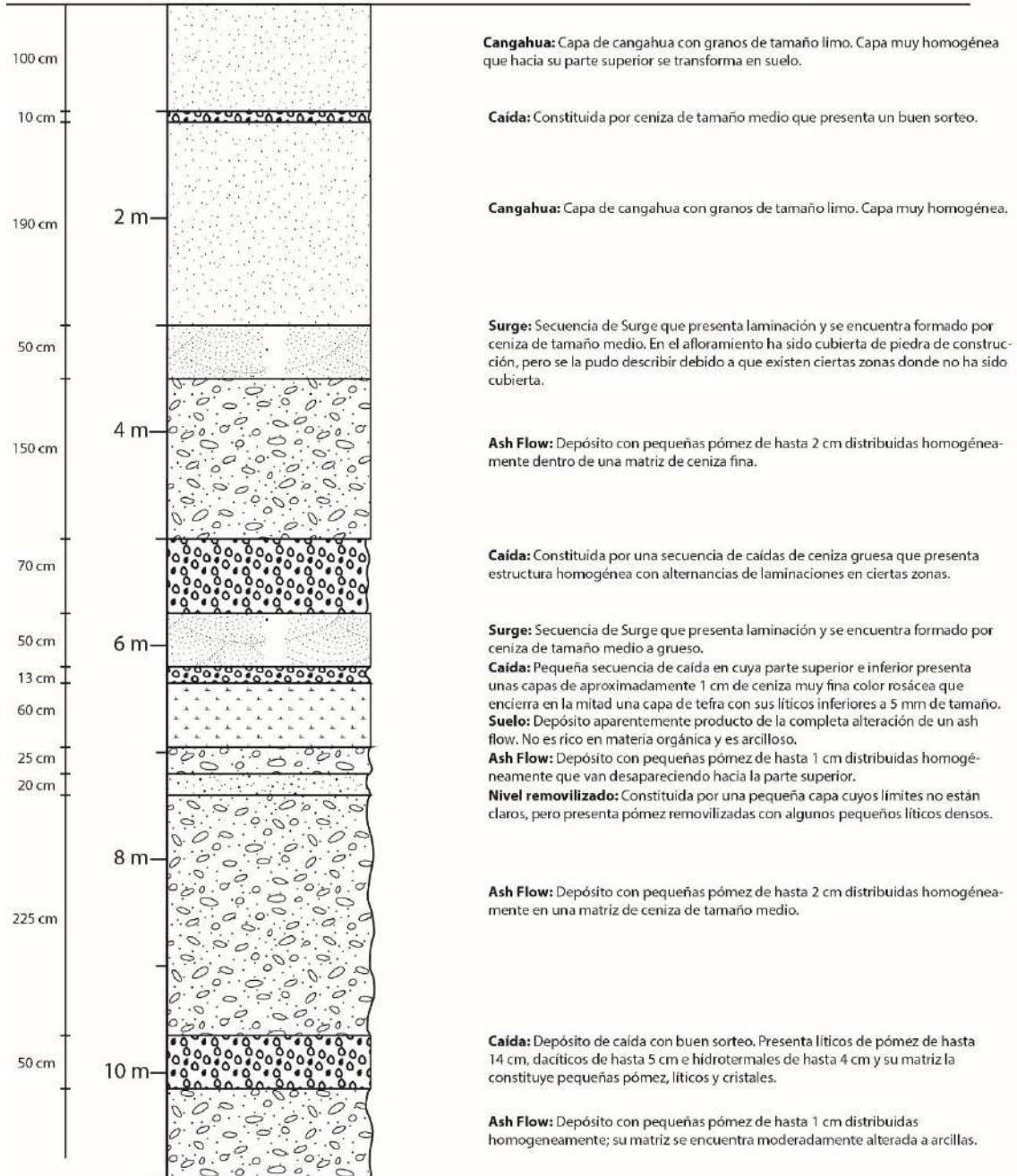
Ash Flow: Depósito con pómez de hasta 2 cm distribuida homogéneamente en una matriz de ceniza fina.

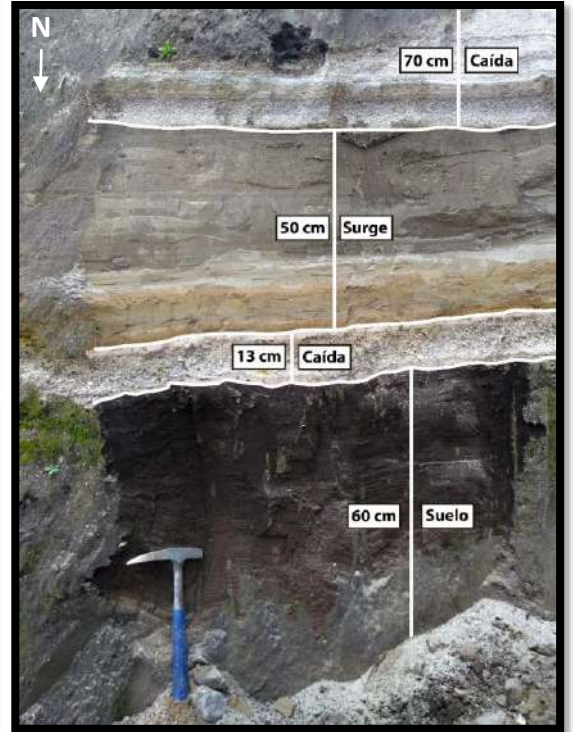


Columna Estratigráfica - Punto 06

Latitud: 0768160
Longitud: 9948124
Ubicación: Alóag

Descripción





ANEXO 3. Zonas potencialmente afectadas por caída de piroclastos

ESCENARIO	MESES	ESPESOR DEPOSITO (mm)	MAYOR PROBABILIDAD DE AFECTACIÓN	POTENCIALMENTE AFECTADO
1	Enero-Diciembre	30	Alrededores del volcán	Alrededores del Volcán
		10	Cutuglahua y Zonas limítrofes del sur de Quito	Cutuglahua, Amaguaña, Tambillo, Alóag, Lloa y sur de Quito
		3	Alóag, Tambillo, Uyumbicho, Cotogchoa, Sangolquí, Conocoto, Sur de Quito, Lloa	Centro y norte de Quito, Nono, Llano chico, Nayón, Cumbayá, Guangopolo, La Merced, Alangasí, Conocoto, Sangolquí, Cotogchoa, Pintag, Rumipamba, Machachi, Manuel Cornejo Astorga, El Chaupi.
		1	Machachi, Rumipamba, Pintag, Alangasí, La Merced, Guangopolo, Centro y centro-norte de Quito, Alluriquín, Palo Quemado, Las Pampas, Manuel Cornejo Astorga	San Miguel de los Bancos, Pacto, Gualea, Nanegal, Nanegalito, Pataqui, Atahualpa, Perucho, Malchingui, Tocachi, Tabacundo, Oton, San Antonio de Pichincha, Pomasqui, Calderón, Guayllabamba, Azcázubi, El Quinche, Checa, Yaruqui, Puembo, Cangahua, Oyacachi, Cuyuja, Papallacta, San Juan de Pastocalle, Toacazo, Tanicuchi, Mulalo, Canchagua, Guaytacama, Saquisili, Aláquez, Poaló, La Victoria, Latacunga, Guangaje, Cugchilán, Isinlivi, Sigchos, Palo Quemado, Las Pampas, Alluriquín, Sto Domingo de los Tsáchilas, Mindo.

		0.3	El Chaupi, Pifo, Puembo, Cumbayá, Nayón, Llano chico, Nono, Mindo, Sto Domingo de los Tsáchilas, Luz de América	García Moreno, Selva Alegre, Vacas Galindo, Apuela, Seis de Julio de Cuellaje, Imantag, Atuntaqui, San Roque, Quiroga, San Juan de Ilumán, Peguche, Otavalo, Eugenio Espejo, San Rafael, Gonzales Suarez, Angochagua, Pesillo, Cayambe, Tupigachi, Santa Rosa, El Chaco, Linares, Sardinas, San Francisco de Borja, Baeza, Cosanga, Pujilí, Belisario Quevedo, San Miguel, Panzaleo, Cusubamba, Mulalillo, San José de Poaló, San Andrés, Unamuncho, Pillaro, Angamarca, Zumbahua, Pilaló, Tingo, Guasaganda, Pucayacu, Patricia Pilar, Puerto Limón, Luz de América, San Jacinto de Bua, Puerto Quito, Pedro Vicente Maldonado.
		0.1	Sigchos, Cuyuja, Yaruqui, Checa, El Quinche, Azcázubi, Guayllabamba, Pomasqui, Calderón, Calacalí, Nanegalito, San Miguel de los Bancos, Pedro Vicente Maldonado, San Jacinto de Bua, El Carmen, Puerto Limón, Patricia Pilar.	La Merced de Buenos Aires, Cahuasqui, Pablo Arenas, Tumbabiro, Urcuqui, Salinas de Ibarra, San Vicente de Pusir, Ibarra, Ambuquí, Pimampiro, Monte Olivo, Chugá, Mariano Acosta, Cotundo, Archidona, San Pablo de Ushpayacu, Tena, Pano, Talag, Ambato, Quisapincha, Pasa, Pilahuin, Tisaleo, Cevallos, Quero, Pelileo, Patate, Simiatug, El Corazón, Moraspungo, La Mana, San Jacinto de Buena Fé, El Carmen, La Unión.

2	Febrero - Octubre	300	Alrededores del Volcán	Alrededores del volcán, Sur de Quito, Lloa, Aloag, Tambillo, Uyumbicho
		100	Lloa, Uyumbicho, Tambillo, Manuel Cornejo Astorga, Palo Quemado	Quito, Sangolquí, Machachi, San Miguel de los Bancos, Sigchos, Saquisilí.
		30	Sur y Centro de Quito, Sangolquí, Machachi, Sto Domingo de los Tsáchilas.	Tabacundo, Cayambe, Otavalo, Cotacachi, Atuntaqui, Ibarra, Urcuquí, Pimampiro, El Chaco, Baeza, Archidona, Tena, Latacunga, Pujilí, San Miguel, Píllaro, Ambato, Patate, Pelileo, Baños, Quero, Mocha, Cevallos, Tisaleo, El Corazón, La Mana, San Jacinto de Buena Fé, El Carmen, Sto Domingo de los Tsáchilas, Puerto Quito.
		10	Centro de Quito, Sangolquí, Machachi, Sigchos, El Carmen.	Tulcán, El Ángel, Huaca, San Gabriel, Mira, Bolívar, La Bonita, Lumbaqui, El Coca, Loreto, Santa Clara, Puyo, Mera, Palora, Penipe, Guano, Riobamba, Chambo, Guamote, Guaranda, Montalvo, Chillanes, Caluma, Ventanas, Vinces, Balzar, Palenque, Quevedo, Chone, Jama, Flavio Alfaro, Pedernales, Valdez, Sur de Colombia.
		3	Norte de Quito, Saquisilí, San Jacinto de Buena Fé, La Maná, Junin, Tosagua, Calceta, Chone, Bahía de Caráquez, Flavio Alfaro, Jama, Pedernales, Puerto Quito, San Miguel de los Bancos	Nueva Loja, Shushufindi, Tarapoa, La Joya de los Sachas, Huamboya, Macas, Sucua, Logroño, Taisha, Cañar, El Tambo, Alausí, El Triunfo, Naranjito, Milagro, Guayaquil, Eloy Alfaro, Pedro Carbo, Jipijapa, Sucre, Montecristi, Portoviejo, Manta, Rocafuerte, Bahía de Caráquez, Muisne, Atacames,

				Esmeraldas, San Lorenzo, Sur de Colombia, Norte de Perú.
		1	Rosa Zarate, Latacunga, Pujilí, San Miguel, El Corazón, Quevedo, Mocache, Portoviejo, Rocafuerte, Jaramillo.	Puerto el Carmen del Putumayo, Santiago de Méndez, San Juan Bosco, Sigsig, Chordeleg, Gualaceo, Azogues, El Pan, Cuenca, Girón, Santa Isabel, Pucara, Balao, Naranjal, Santa Elena, Salinas, Puerto López, Santa Marianita, Sur de Colombia, Norte de Perú.
		0.3	Tabacundo, Píllaro, Ambato, Patate, Tisaleo, Cevallos, Ventanas, Palenque, Balzar, Olmedo, Sucre, Jipijapa, Montecristi, Santa Marianita, Manta, Muisne.	Nuevo Rocafuerte, Gualaquiza, El Pangui, Zumbi, 28 de Mayo, Saraguro, Nabón, Balsas, Piñas, Paccha, Chilla, Arenillas, Huaquillas, Santa Rosa del El Oro, Pasaje, Machala, El Guabo, Sur de Colombia, Norte de Perú
		0.1	Atuntaqui, Ibarra, Cotacachi, Otavalo, Cayambe, Pelileo, Baños, Quero, Mocha, Penipe, Guano, Riobamba, Chambo, La Unión, Guaranda, Montalvo, Babahoyo, Vinces, Colimes, Baba, Daule, Pedro Carbo, Pajan, Colimes, Puerto López, Atacames, Esmeraldas	Guayzimi, Zamora, Palanda, Amaluza, Cariamanga, Catamayo, Loja, Catacocha, Macara, Zapotillo, Célica, Alamor, Marcabelí, Sur de Colombia, Norte de Perú.
	Noviembre - Enero	300	Alrededores del volcán, Cutuglagua	Sur y centro de Quito, Lloa, Uyumbicho, Conocoto, Amaguaña, Tambillo, Aloag, Machachi.

		100	Sur de Quito, Lloa, Conocoto, Sangolquí, Tambillo, Amaguaña, Aloag, Manuel Cornejo Astorga	Centro y norte de Quito, San Antonio de Pichincha, Pomasqui, Calacalí, Nanegalito, Mindo, El Quinche, Tababela, Pifo, Pintag, Cumbayá, Tumbaco, El Chaupi, Mulalo, Sigchos, Palo Quemado, Alluriquín
		30	Centro y norte de Quito, Cumbayá, Tumbaco, Pifo, Alangasí, Pintag, Rumipamba, Machachi, El Chaupi, Las Pampas, Alluriquín.	Urcuqui, Ibarra, Atuntaqui, Cotacachi, Otavalo, Tabacundo, Cayambe, El Chaco, Baeza, Saquisilí, Latacunga, Pujilí, Píllaro, Ambato, El Corazón, La Mana, El Carmen, Sto Domingo de los Tsáchilas, Puerto Quito, San Miguel de los Bancos.
		10	San Antonio de Pichincha, Calderón, Pomasqui, Calacalí, Nono, Nanegalito, Nanegal, Mindo, Pacto, El Quinche, Guayllabamba, Puembo, Cuyuja, Mulaló, Saquisilí, Poaló, Sigchos, Puerto Limón, El Carmen, San Miguel de los Bancos	El Ángel, Mira, San Gabriel, Pimampiro, Huaca, La Bonita, Lumbaqui, Loreto, Archidona, Tena, Arajuno, Mera, Puyo, Baños, Patate, Pelileo, Tisaleo, Quero, Cevallos, Mocha, Penipe, Guano, Riobamba, Chambo, Guaranda, San José de Chimbo, Ventanas, Quevedo, Mocache, San Jacinto de Buena Fé, Flavio Alfaro, Rosa Zarate.
		3	Otavalo, Tabacundo, Cayambe, El Chaco, Papallacta, Baeza, Latacunga, Pujilí, San Miguel, La Mana, Flavio Alfaro, Puerto Quito, La Unión, Selva Alegre, Apuela	Tulcán, Nueva Loja, Shushufindi, La Joya de los Sachas, El Coca, Tarapoa, Palora, Huamboya, Taisha, Macas, Sucua, Guamote, Pallatanga, Alausí, Cañar, Azogues, Paute, Troncal, El Triunfo, Babahoyo, Guayaquil, Daule, Vinces, Palenque, Balzar, Jipijapa, Portoviejo, Manta, Santa Marianita, Junin, Tosagua, Chone, Bahía de Caráquez, Jama,

				Pedernales, Muisne, Atacames, Esmeraldas, San Lorenzo, Sur de Colombia
		1	Ibarra, Rucuqui, Pimampiro, Mira, Atuntaqui, Cotacachi, Archidona, Pillaro, Ambato, Patate, Pelileo, Cevallos, Tisaleo, Quero, El Corazón, Quevedo, San Jacinto de Buena Fé, Chone, Calceta, Tosagua, Bahía de Caráquez, Jama, Pedernales, Rosa Zarate.	Puerto El Carmen de Putumayo, San Juan Bosco, Gualaquiza, Sigsig, Chordeleg, Nabón, Girón, Santa Isabel, Balao, Naranjal, Salinas, Puerto López, Sur de Colombia, Norte de Perú
		0.3	El Ángel, Huaca, San Gabriel, La Bonita, Lumbaqui, Loreto, Tena, Arajuno, Puyo, Mera, Baños, Penipe, Mocha, Guano, Riobamba, Guaranda, Mocache, Rocafuerte, Junin, Portoviejo.	Nuevo Rocafuerte, Loja, Zamora, Zambí, Saraguro, Gonzanamá, Catamayo, Cética, Alamor, Marcabelí, Piñas, Arenillas, Huaquillas, Machala, Sur de Colombia, Norte de Perú
		0.1	Tulcán, Nueva Loja, Shushufindi, La Joya de los Sachas, El Coca, Palora, Chambo, Guamote, San José de Chimbo, Montalvo, Caluma, Vinces, Palenque, Balzar, Sucre, Jipijapa, Montecristi, Manta, Santa Marianita, Muisne, Atacames, Esmeraldas, San Lorenzo.	Zumba, Palanda, Amaluza, Macara, Cariamanga, Sur de Colombia, Norte de Perú.
3	Febrero - Octubre	300	Quito, Lloa, Sangolqui, Amaguaña, Tambillo, Aloag, Manuel Cornejo Astorga, Alluriquín, Las Pampas, Palo Quemado.	Provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi, Imbabura y Napo.

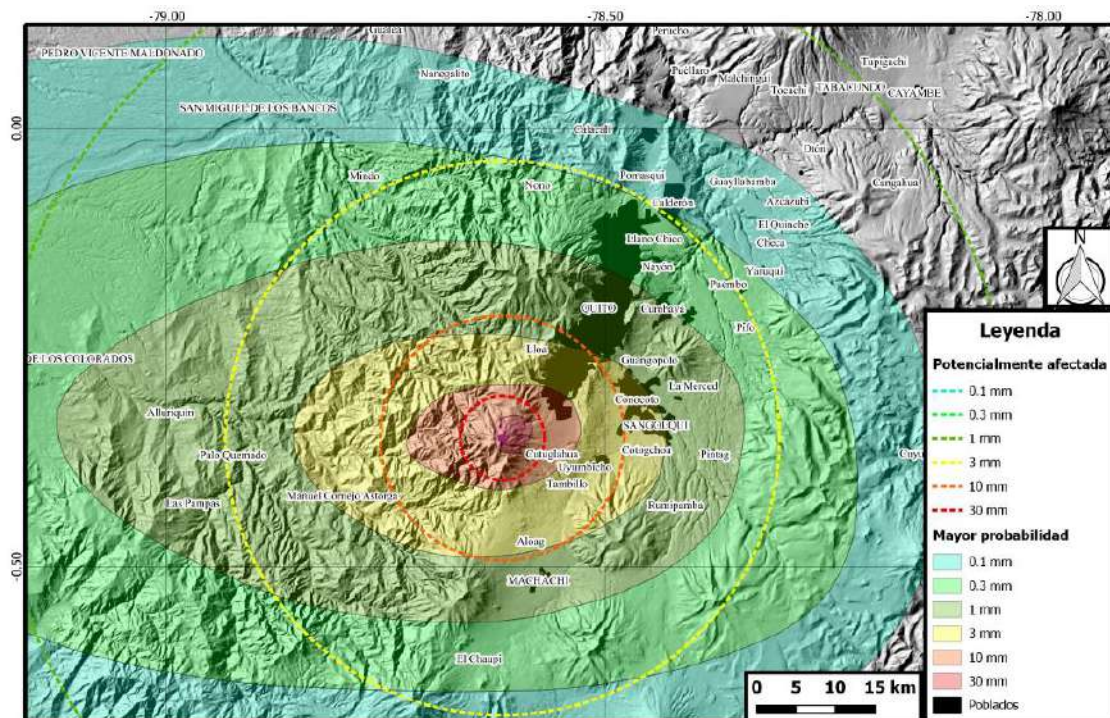
		100	Quito, Sangolquí, Machachi, Aloasí, El Cahupi, Puerto Limón, El Carmen, Santo Domingo de los Tsáchilas, Mindo, Cumbayá, Nayón.	Provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi, Imbabura, Napo, Tungurahua, Los Ríos, Manabí, Pastaza, Carchi, Esmeraldas y Chimborazo.
		30	Puerto Quito, Favio Alfaro, Jama, Canoa, San Vicente, Bahía de Caraquez, Chone, Tosagua, Calceta, San Jacinto de Buena Fé, La Maná, Sigchos, Saquisilí, Mulaló, Pastocalle, Pifo, Tababela, Pomasqui, San Antonio de Pichincha, Calacalí, Nono, San Miguel de los Bancos.	Provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas, Cotopaxi, Imbabura, Napo, Tungurahua, Los Ríos, Manabí, Pastaza, Carchi, Esmeraldas y Chimborazo, Guayas, Bolívar, Orellana, Sucumbíos.
		10	Otavalo, Nanegal, Selva Alegre, Rosa Zarate, Pedernales, Rocafuerte, Crucita, Manta, Montecristi, Quevedo, Latacunga, Píllaro, Papallacta, El chaco, Baeza, Cayambe.	Todo el Ecuador.
		3	Muisne, Cojimies, La Merced de Buenos Aires, Mira, Ibarra, Linares, Sumaco, Archidona, Tena, Bilbao, Mocha, Ambato, Ventanas, Balzar, Olmedo, Sucre, Puerto López.	Todo el Ecuador
		1	Esmeraldas, Río Verde, Súa, Galera, Borbón, Tulcán, La Bonita, Lumbaqui, Loreto, Misahuallí, Palora, Puyo, Guamote, Riobamba, Babahoyo, Daule.	Todo el Ecuador

		0.3	San Lorenzo, Nueva Loja, Mataje, Macas, Alausí, Cumandá, La Troncal, El Triunfo, Guayaquil, Salinas.	Todo el Ecuador
		0.1	Naranjal, Paute, El Guabo, Puná, Nabón, Machala, Gualaceo, Cuenca.	Todo el Ecuador
	Noviembre - Enero	300	Quito, Lloa, Conocoto, Sangolquí, Tambillo, Amaguaña, Aloag, Machachi, Aloasí, Manuel Cornejo Astorga, Las Pampas, Alluriquín.	Provincias de Pichincha, Santo Domingo, Cotopaxi, Napo e Imbabura.
		100	Quito, Santo Domingo de los Tsáchilas, Mindo, Nono, Puerto Limón, Sigchos, Pastocalle, Mulaló, Pifo, Tababela, Nayón, Tumbaco, Zámbez	Provincias de Pichincha, Santo Domingo, Cotopaxi, Napo, Imbabura, Los Ríos y Tungurahua.
		30	San Antonio de Pichincha, El Quinche, Nanegal, Pacto, Puerto Quito, San Miguel de los Bancos, Flavio Alfaro, San Jacinto de Buena Fé, La Maná, Latacunga, Pujilí, Cuyuja, Papallacta, Baexa, El Chaco.	Provincias de Pichincha, Santo Domingo, Cotopaxi, Napo, Imbabura, Los Ríos, Tungurahua, Esmeraldas, Manabí, Guayas, Chimborazo, Bolívar, Pastaza, Orellana, Sucumbíos y Carchi.
		10	Pedernales, Jama, Canoa, Bahía de Caraquez, Manta, Balzar, Calceta, Ventanas, Mocache, Quevedo, Ambato, Mocha, Quero, Guaranda, Tena, Archidona, Sumaco, Cayambe, Ibarra, Mira.	Todo el Ecuador
		3	Esmeraldas, Tonsupa, Muisne, Borbón, Selva Alegre, Tulcán, La Bonita, Lumbaquí, Loreto,	Todo el Ecuador

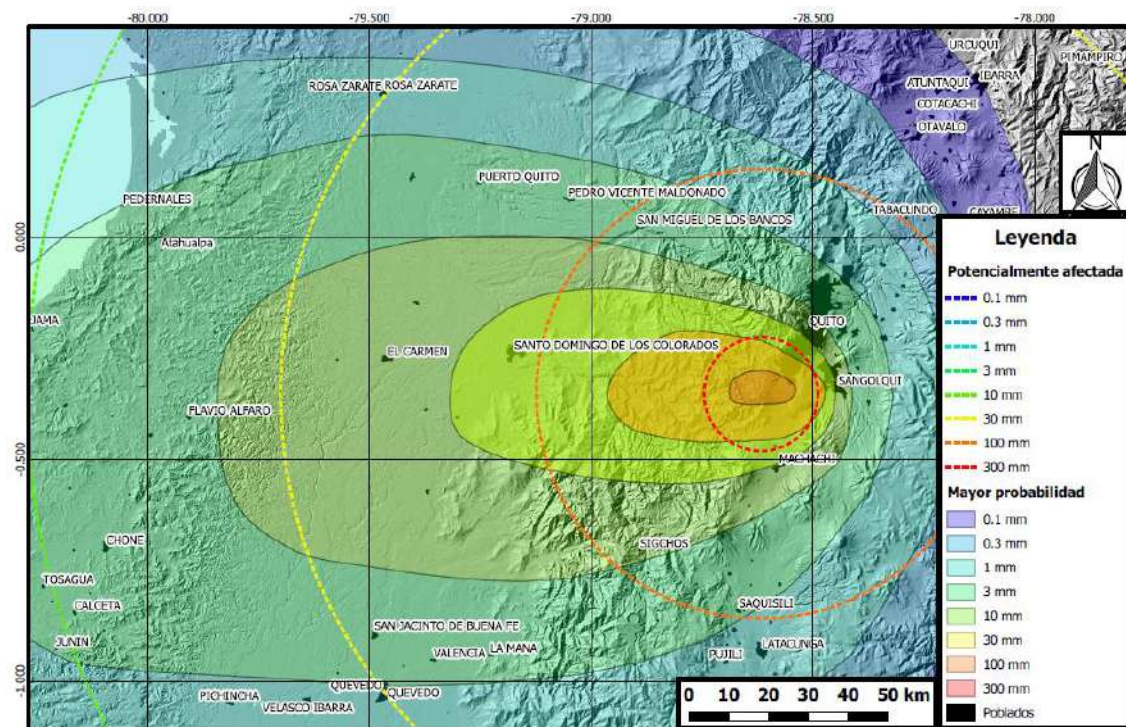
			Puyo, Shell, Palora, Chambo, Babahoyo, Baba, Daule, Olmedo, Vinces, Puerto López.	
		1	San Lorenzo, Mataje, Nueva Loja, Macas, El Tambo, El Triunfo, Troncal, Salinas.	Todo el Ecuador
		0.3	Balao, Machala, Huaquillas, Sigsig, Taisha, Azogues.	Todo el Ecuador
		0.1	Loja, Celica, Pindal, Zamora	Todo el Ecuador

ANEXO 4. Mapas de peligro de caída de piroclastos en función de las direcciones del viento en el año

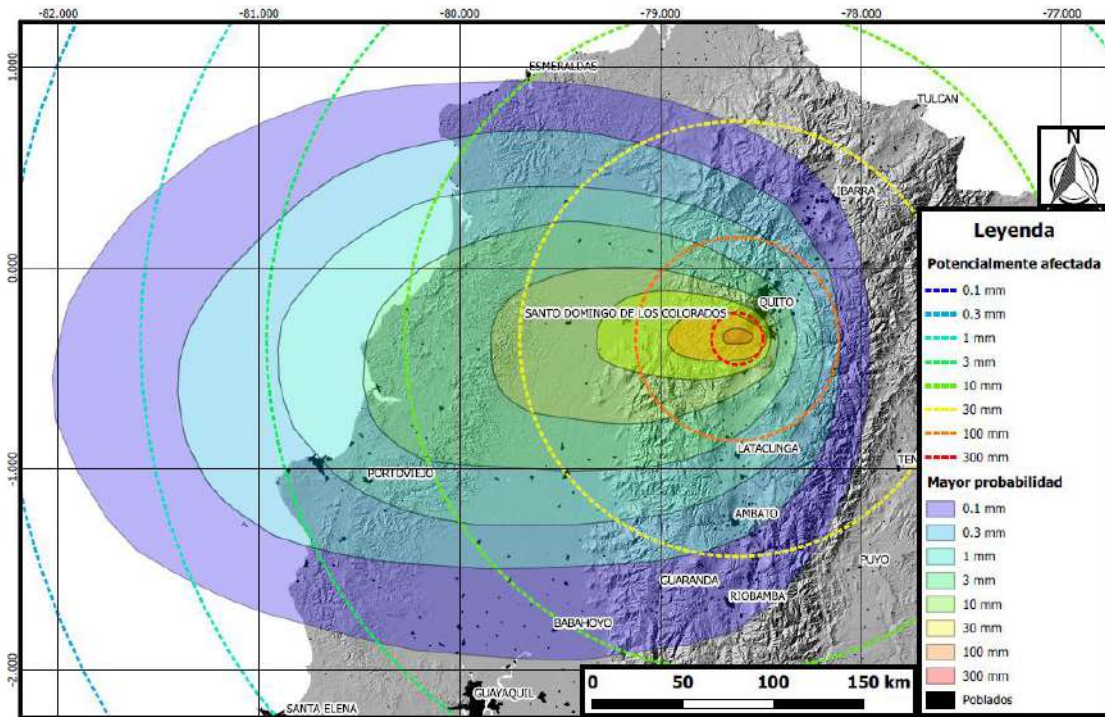
Mapa de peligro por caída de piroclastos – Escenario 1



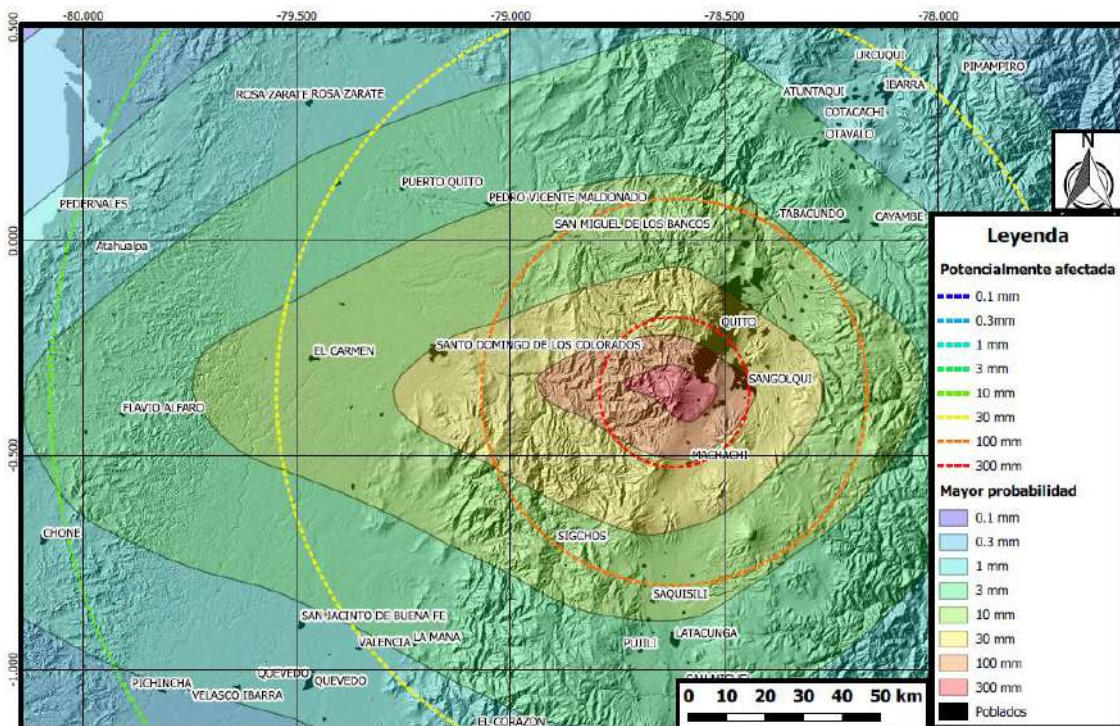
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de febrero a octubre – Escenario 2 – Escala local



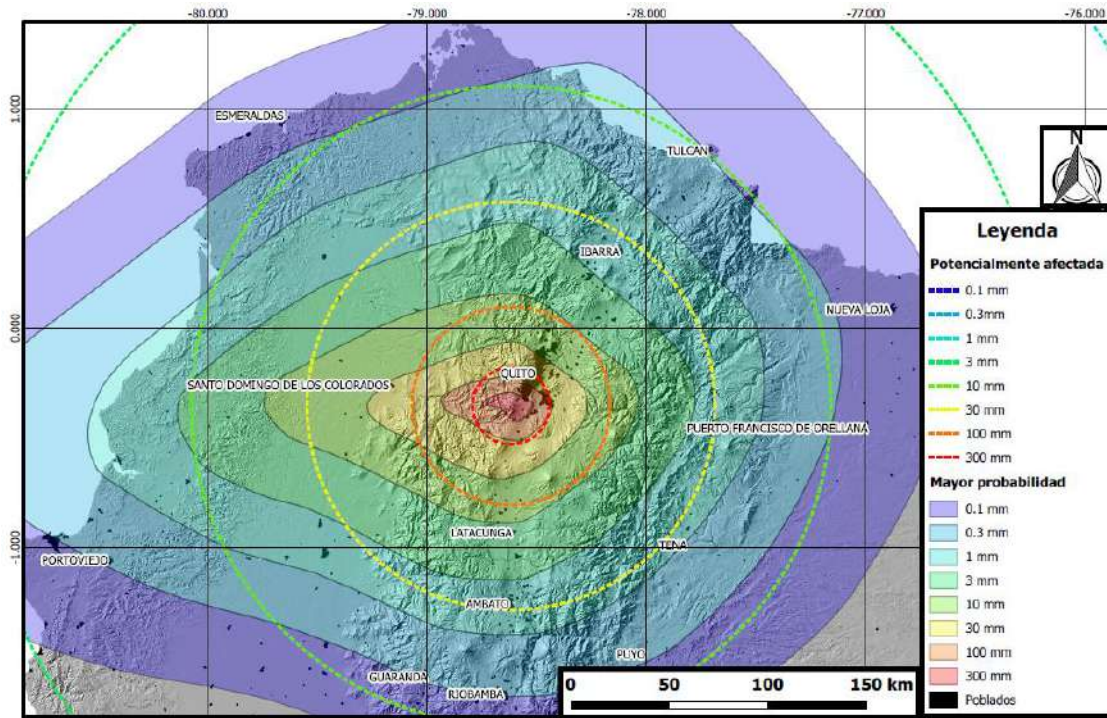
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de febrero a octubre – Escenario 2 – Escala regional



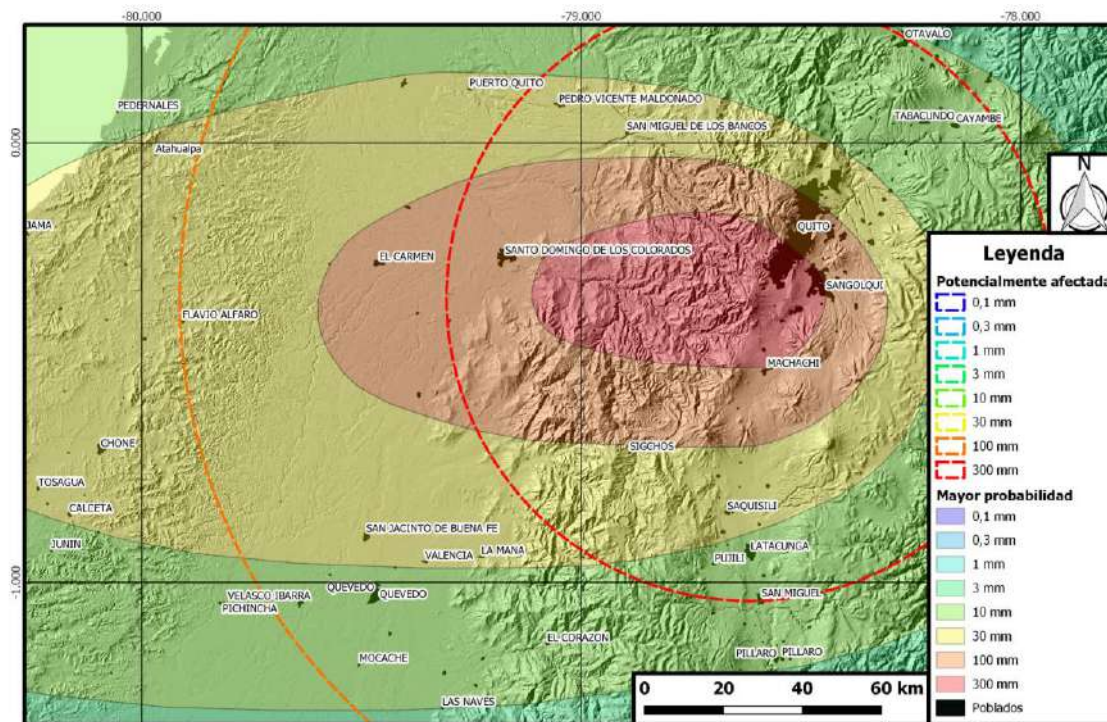
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de noviembre a enero – Escenario 2 – Escala local



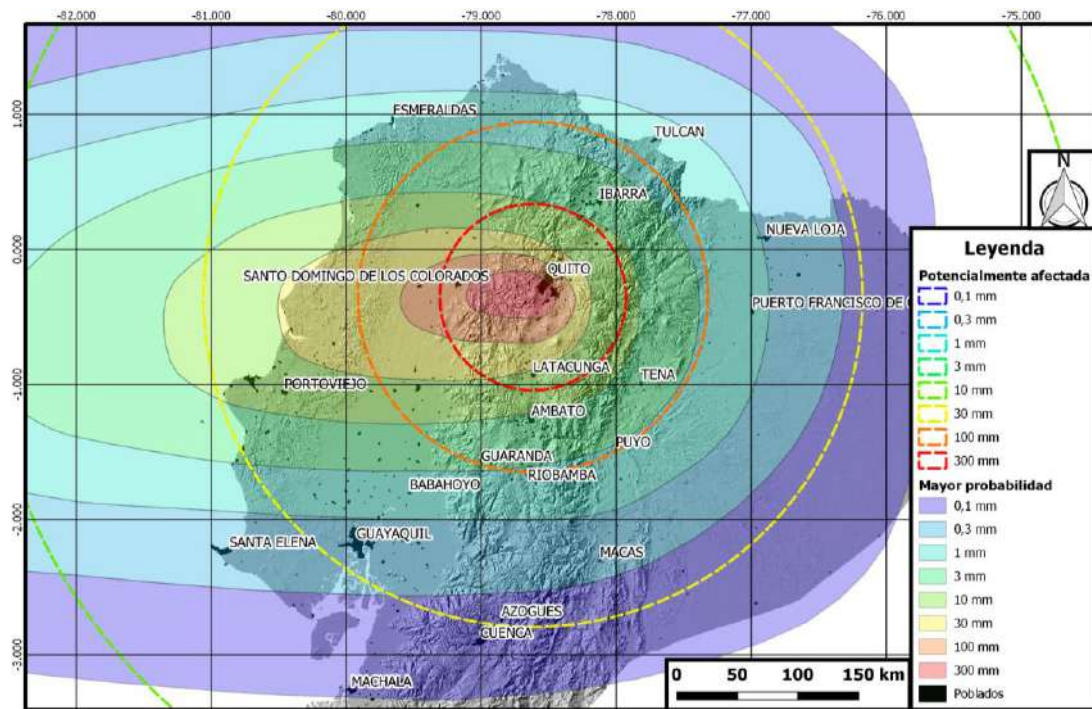
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de noviembre a enero – Escenario 2 – Escala regional



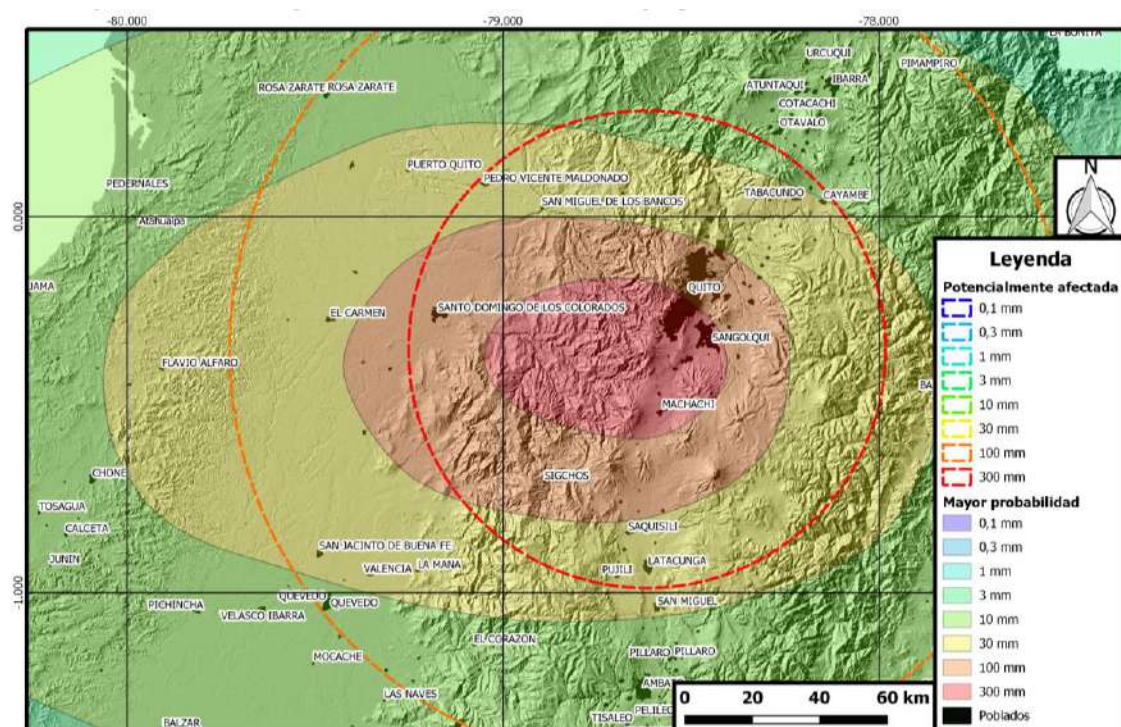
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de febrero a octubre – Escenario 3 – Escala local



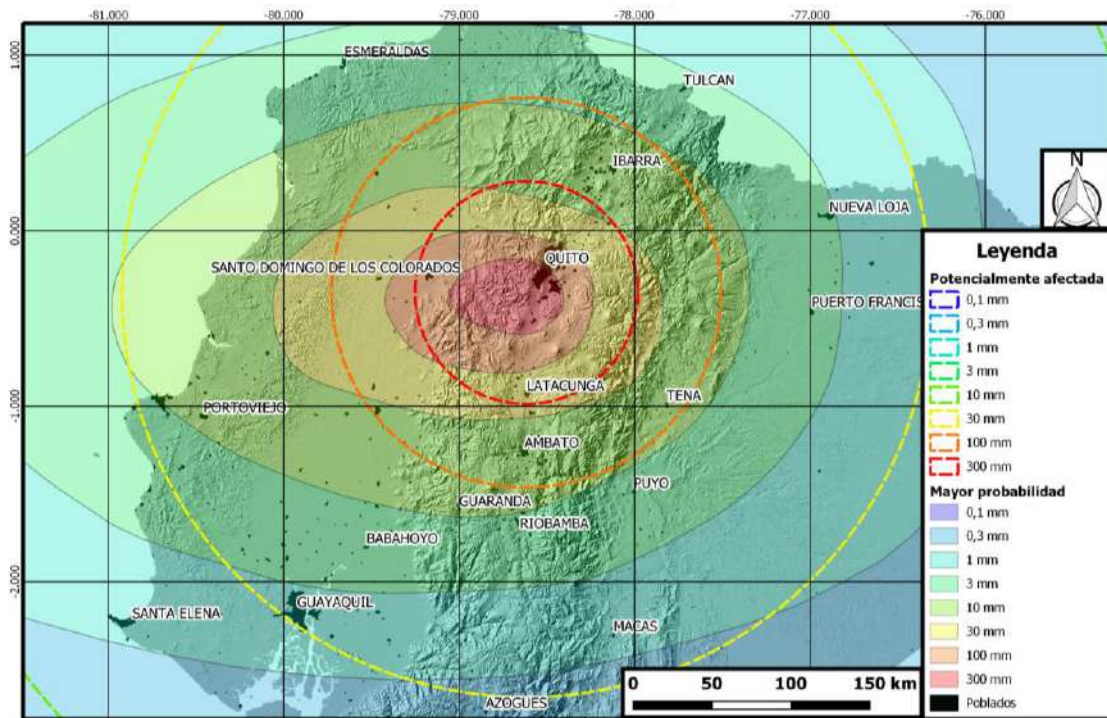
Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de febrero a octubre – Escenario 3 – Escala regional



Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de noviembre a enero – Escenario 3 – Escala local



Mapa de peligro por caída de piroclastos entre los meses de noviembre a enero
 – Escenario 3 – Escala regional



ANEXO 5. Base de datos de simulaciones realizadas para FBC

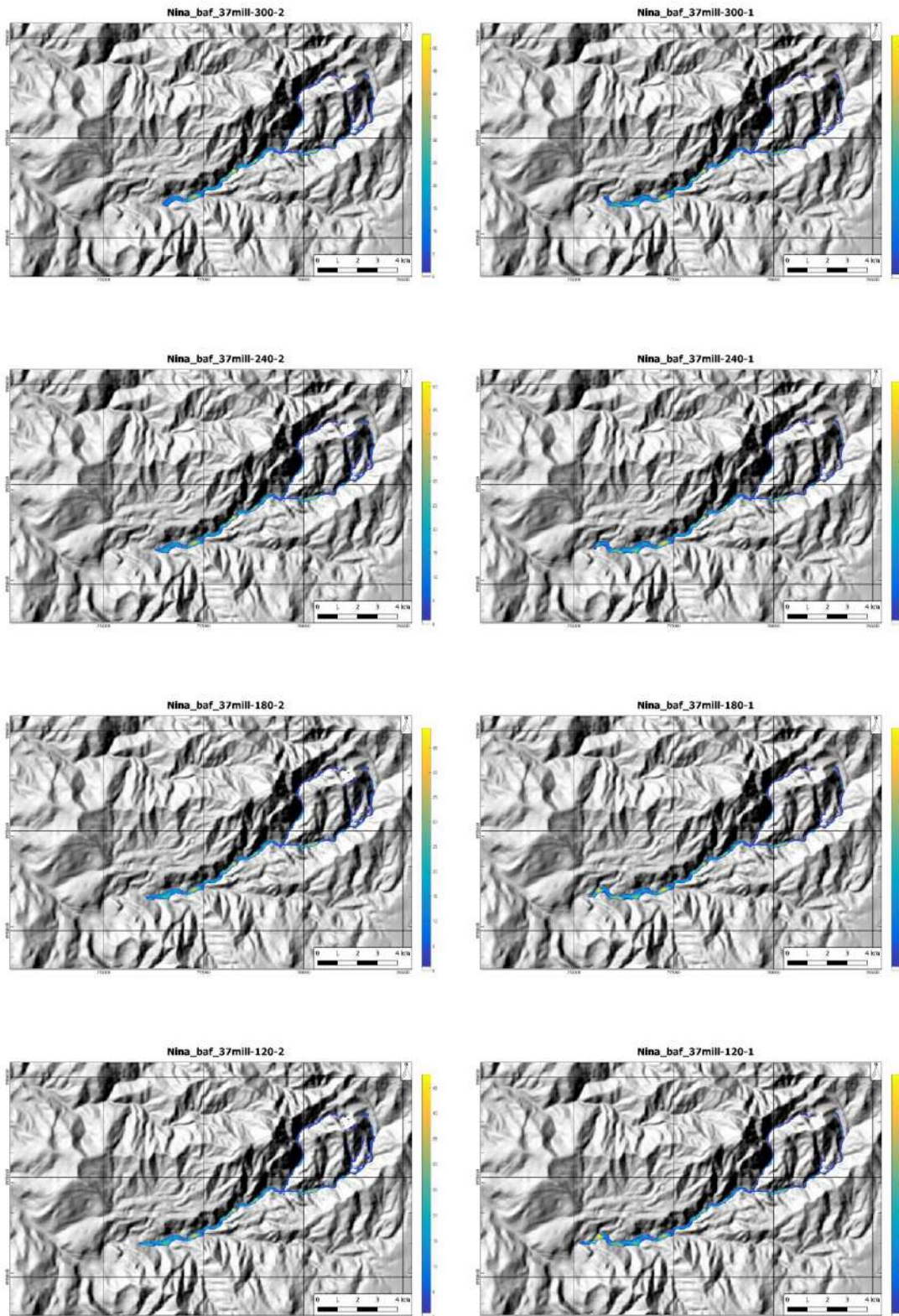
Escenario 2							
NOMBRE	Collisional stress coef	Viscosidad (Pa/s)	Cohesion (Pa)	Densidad (kg/m ³)	Active duration collapse (s)	Volumen (10e6 m ³)	Alcance máximo (m)
nina_baf_17mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	17	10082
nina_baf_27mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	27	12358
nina_baf_37mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	37	13727
nina_baf_17mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	17	7629
nina_baf_27mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	27	10480
nina_baf_37mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	37	12098
nina_baf_17mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	17	9970
nina_baf_27mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	27	12317
nina_baf_37mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	37	13540
nina_baf_17mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	17	7669
nina_baf_27mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	27	10437
nina_baf_37mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	37	11969
nina_baf_17mill-90-1	0,01	0	3500	1200	90	17	9900
nina_baf_27mill-90-1	0,01	0	3500	1200	90	27	12123
nina_baf_37mill-90-1	0,01	0	3500	1200	90	37	13379
nina_baf_17mill-90-2	0,01	0	7500	1500	90	17	7575
nina_baf_27mill-90-2	0,01	0	7500	1500	90	27	10343
nina_baf_37mill-90-2	0,01	0	7500	1500	90	37	11809
nina_baf_17mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	17	9692
nina_baf_27mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	27	11896
nina_baf_37mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	37	13128

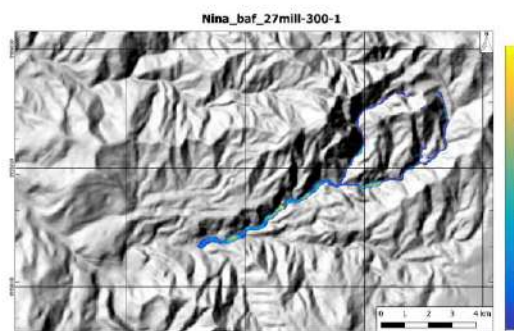
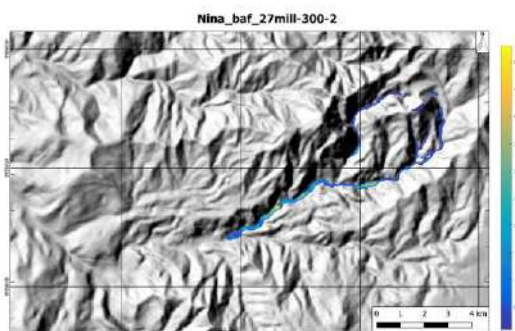
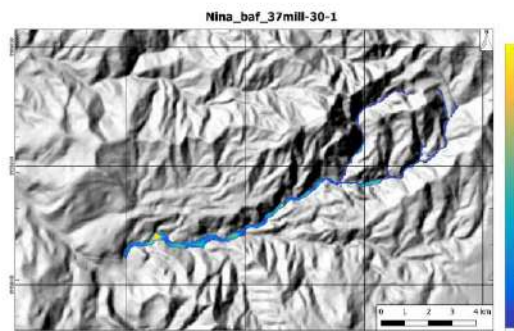
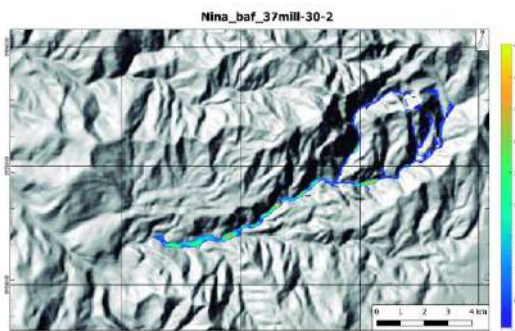
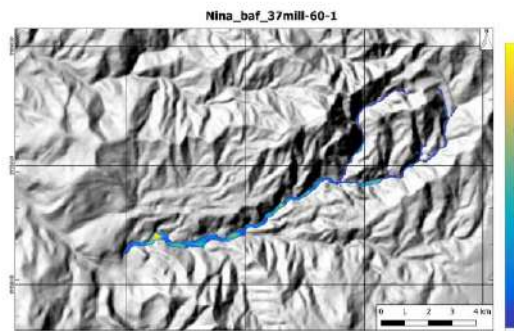
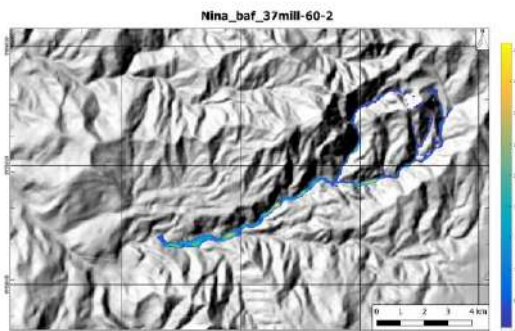
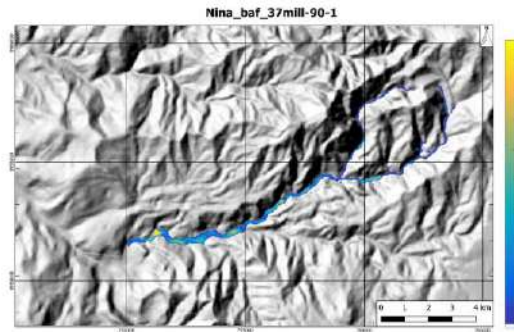
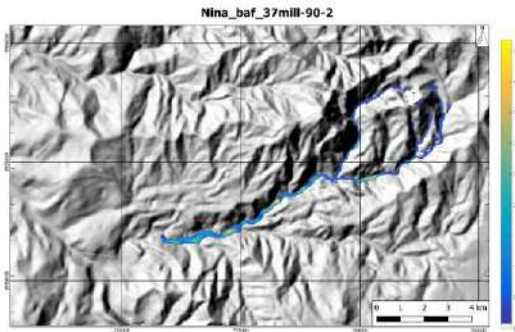
nina_baf_17mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	17	7549
nina_baf_27mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	27	10107
nina_baf_37mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	37	11830
nina_baf_17mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	17	9545
nina_baf_27mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	27	11667
nina_baf_37mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	37	12689
nina_baf_17mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	17	7440
nina_baf_27mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	27	9925
nina_baf_37mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	37	11529
nina_baf_17mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	17	9180
nina_baf_27mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	27	11240
nina_baf_37mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	37	12374
nina_baf_17mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	17	7251
nina_baf_27mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	27	9671
nina_baf_37mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	37	11145
nina_baf_17mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	17	8522
nina_baf_27mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	27	10723
nina_baf_37mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	37	11871
nina_baf_17mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	17	7069
nina_baf_27mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	27	9414
nina_baf_37mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	37	10800

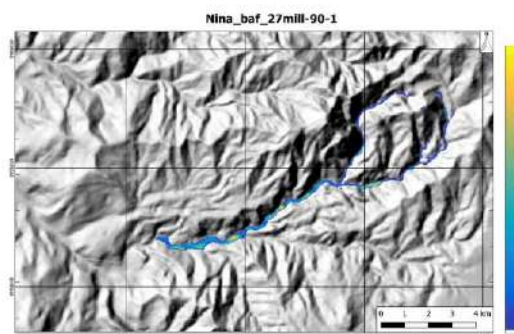
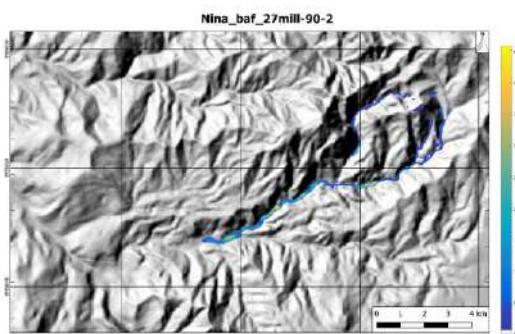
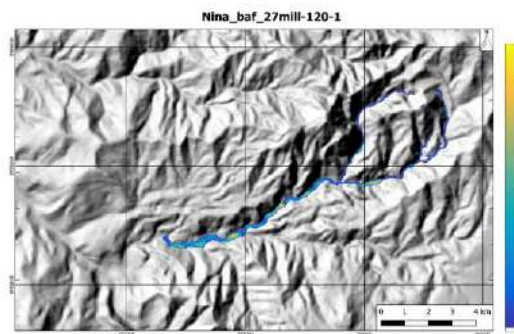
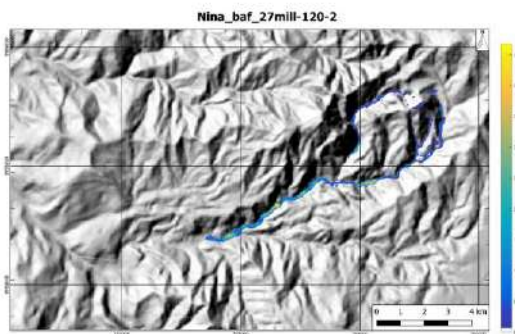
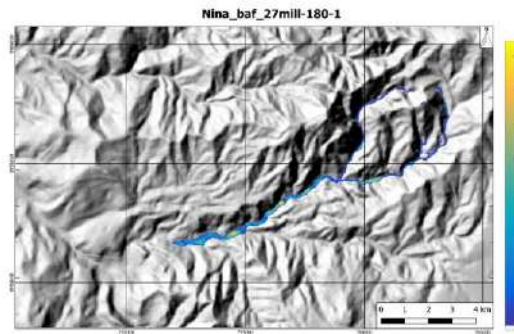
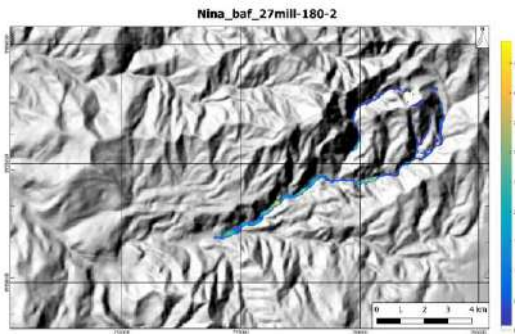
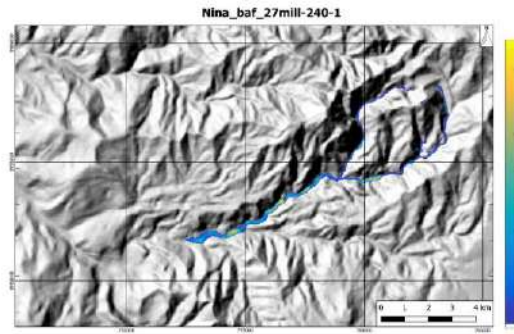
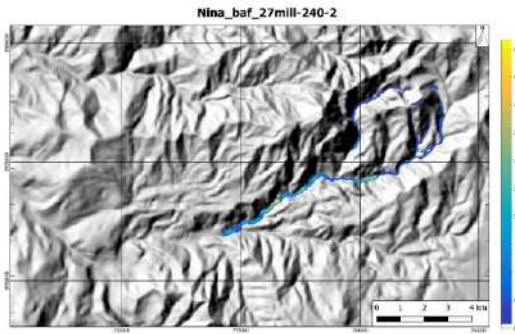
Escenario 3							
NOMBRE	Collisional stress coef	Viscosidad (Pa/s)	Cohesion (Pa)	Densidad (kg/m ³)	Active duration collapse (s)	Volumen (10e6 m ³)	Alcance máximo (m)
nina_baf_176mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	176	22679
nina_baf_276mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	276	25648
nina_baf_376mill-30-1	0,01	0	3500	1200	30	376	27537
nina_baf_176mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	176	21282
nina_baf_276mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	276	24275
nina_baf_376mill-30-2	0,01	0	7500	1500	30	376	26319
nina_baf_176mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	176	22536
nina_baf_276mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	276	25492
nina_baf_376mill-60-1	0,01	0	3500	1200	60	376	27256
nina_baf_176mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	176	21041
nina_baf_276mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	276	24180
nina_baf_376mill-60-2	0,01	0	7500	1500	60	376	26135
nina_baf_176mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	176	21603
nina_baf_276mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	276	24717
nina_baf_376mill-120-1	0,01	0	3500	1200	120	376	26442
nina_baf_176mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	176	20202
nina_baf_276mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	276	23395
nina_baf_376mill-120-2	0,01	0	7500	1500	120	376	25476
nina_baf_176mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	176	20881
nina_baf_276mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	276	23516
nina_baf_376mill-180-1	0,01	0	3500	1200	180	376	25513
nina_baf_176mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	176	19615
nina_baf_276mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	276	22454
nina_baf_376mill-180-2	0,01	0	7500	1500	180	376	24556

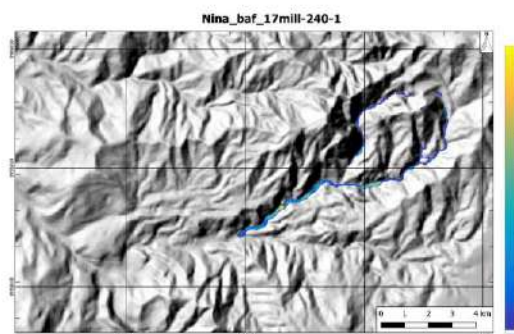
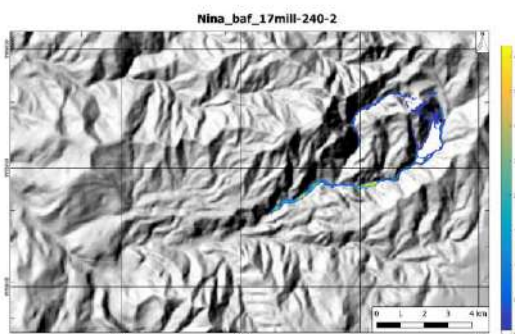
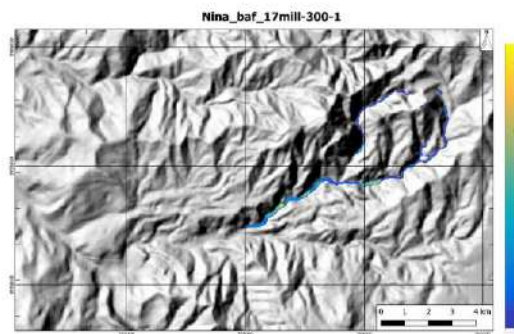
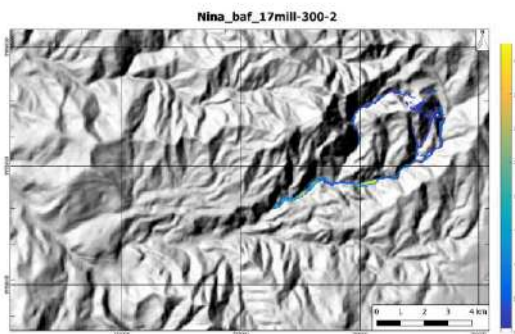
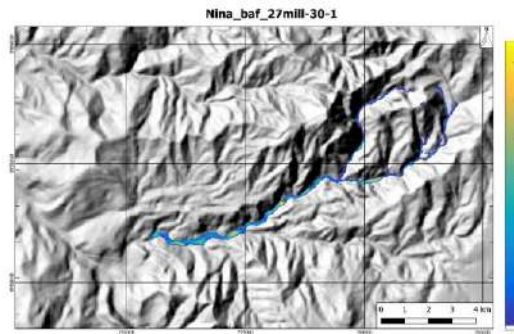
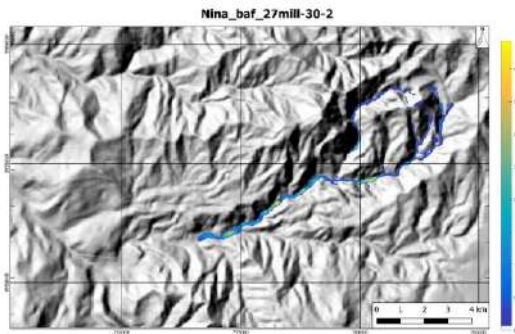
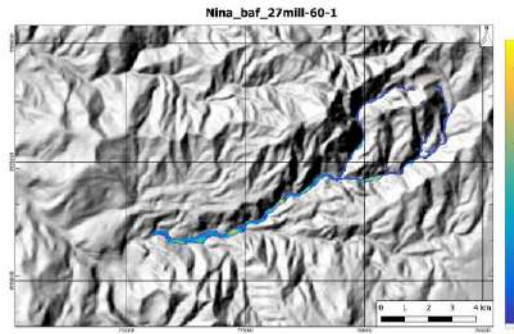
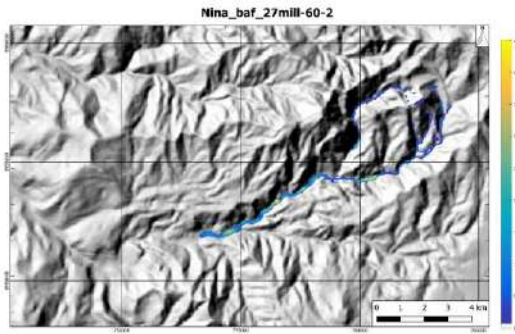
nina_baf_176mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	176	19957
nina_baf_276mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	276	22597
nina_baf_376mill-240-1	0,01	0	3500	1200	240	376	24438
nina_baf_176mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	176	18948
nina_baf_276mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	276	21703
nina_baf_376mill-240-2	0,01	0	7500	1500	240	376	23414
nina_baf_176mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	176	19069
nina_baf_276mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	276	21784
nina_baf_376mill-300-1	0,01	0	3500	1200	300	376	23272
nina_baf_176mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	176	17983
nina_baf_276mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	276	20819
nina_baf_376mill-300-2	0,01	0	7500	1500	300	376	22576

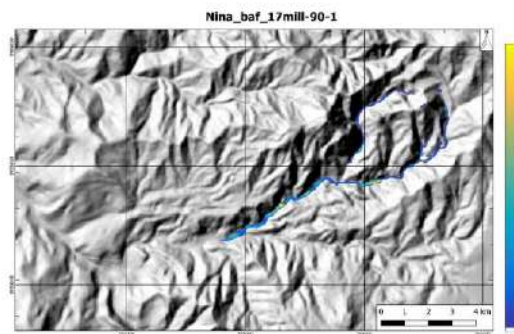
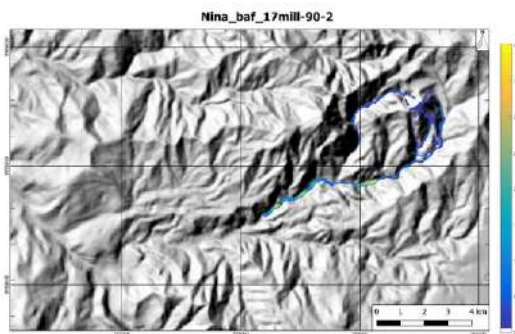
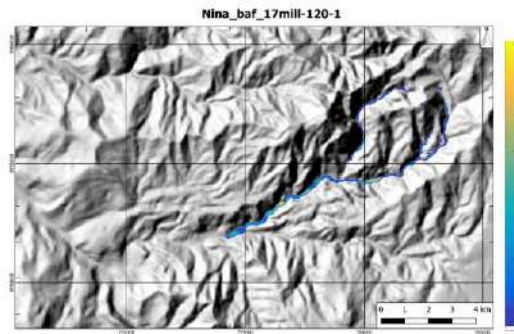
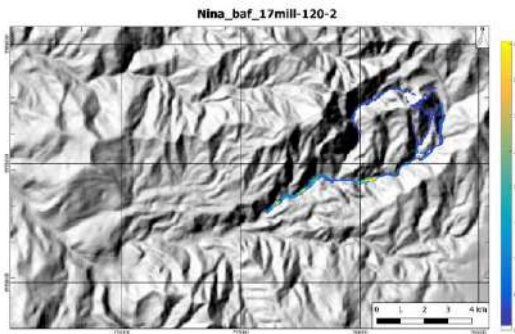
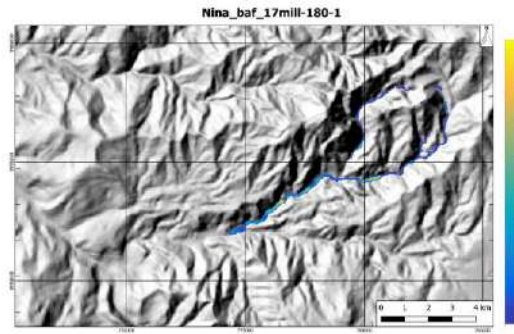
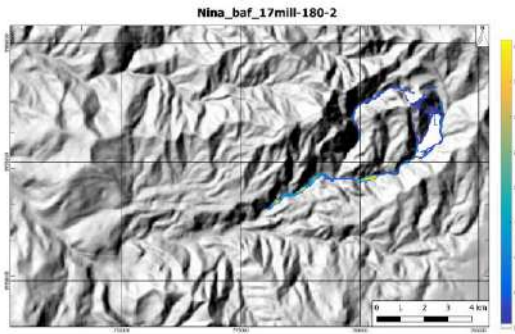
ANEXO 6. Mapas de espesores realizados para FBC

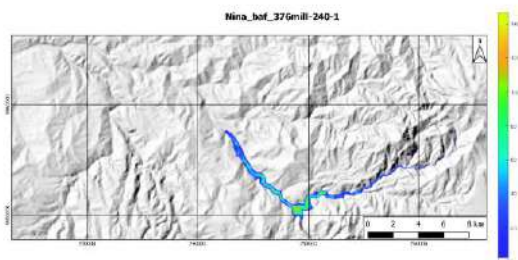
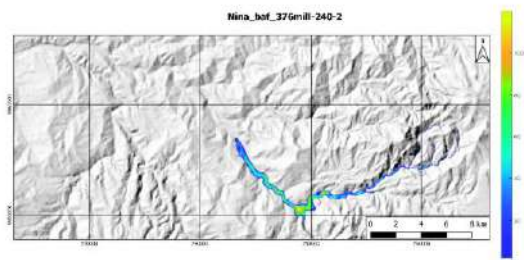
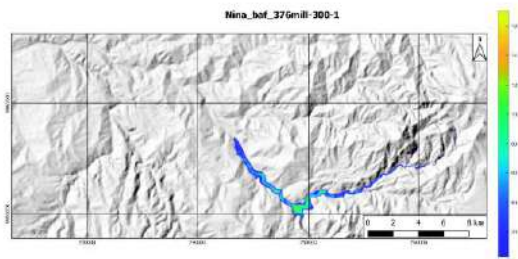
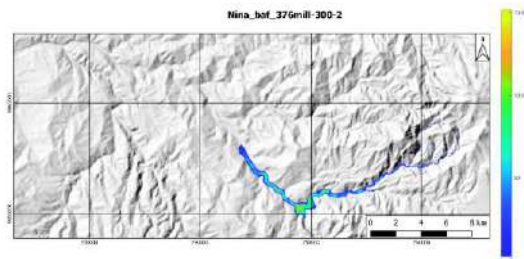
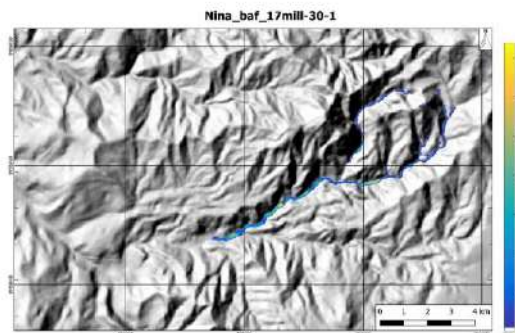
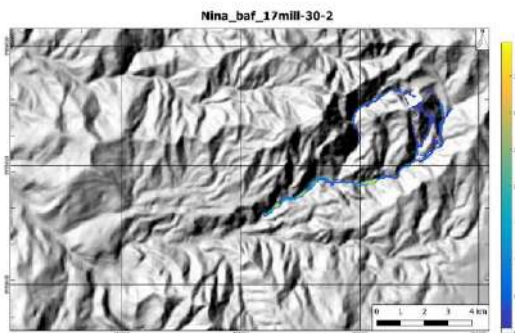
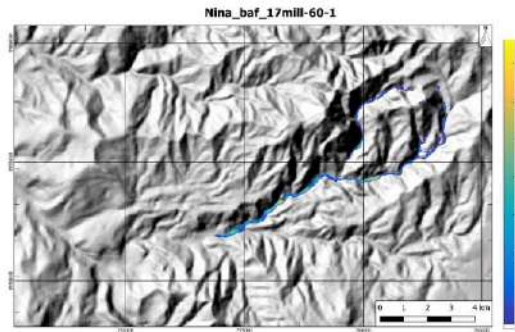
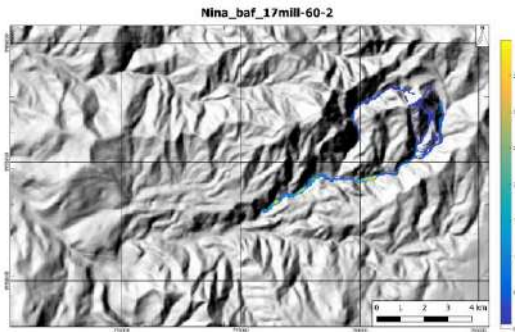


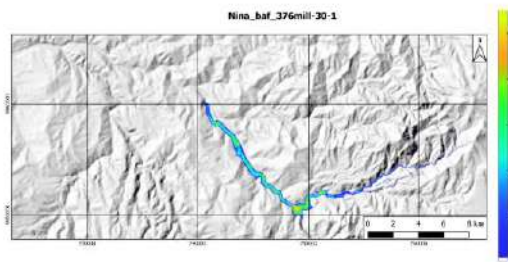
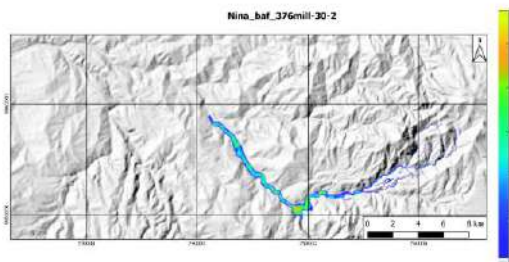
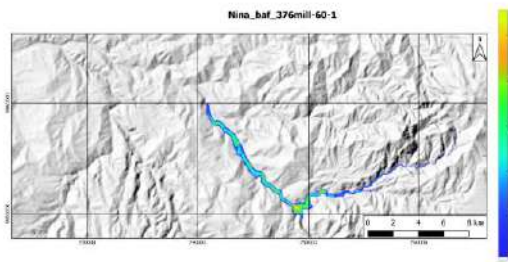
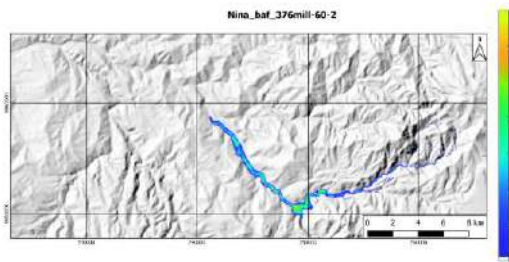
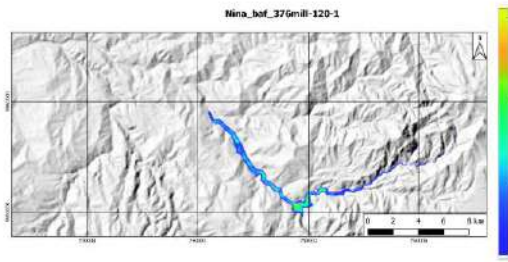
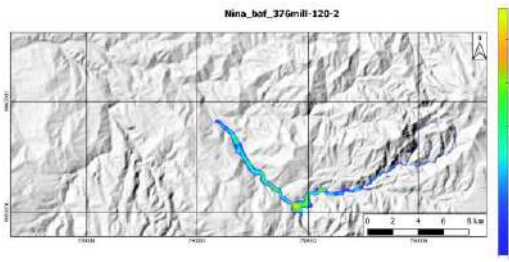
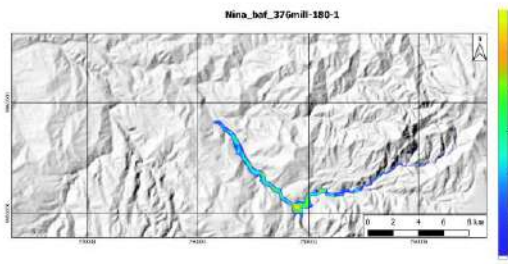
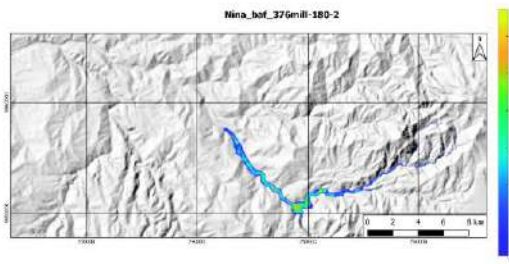


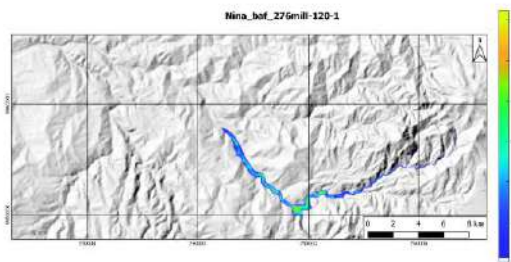
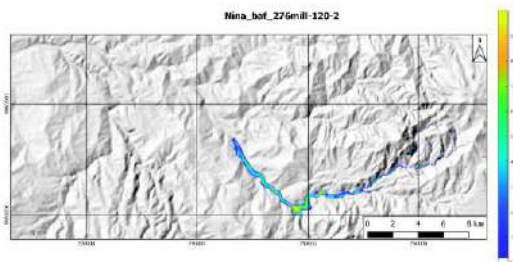
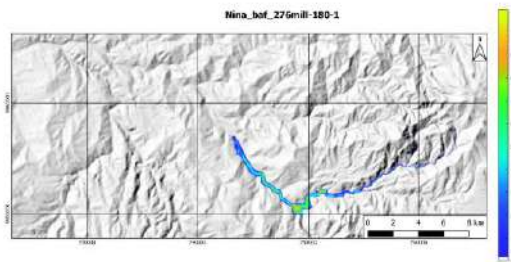
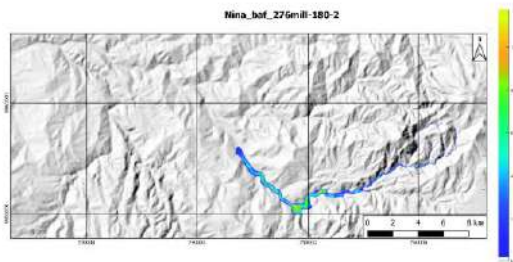
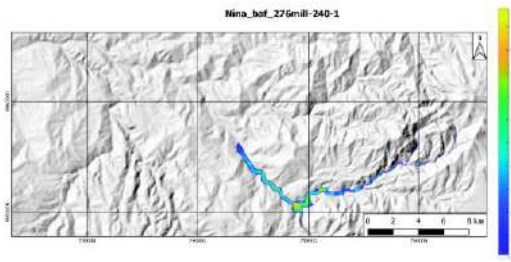
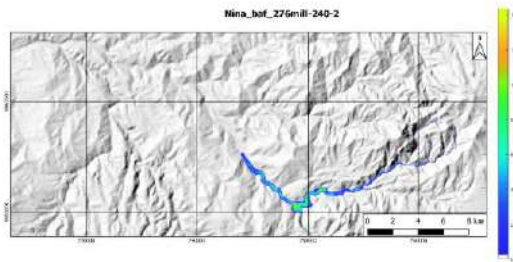
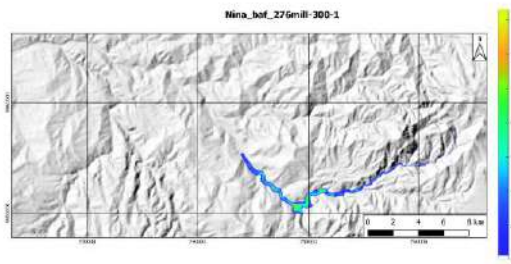
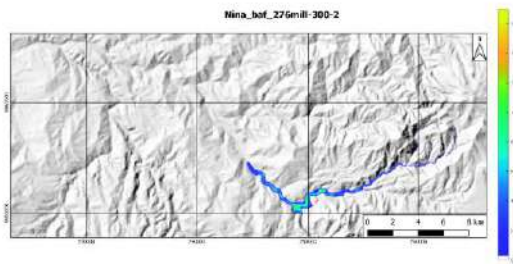


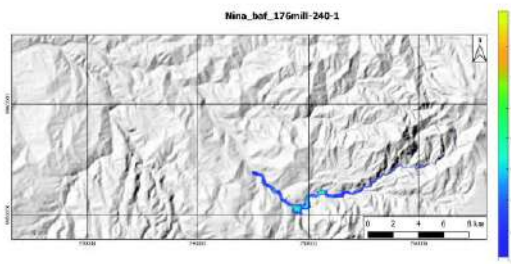
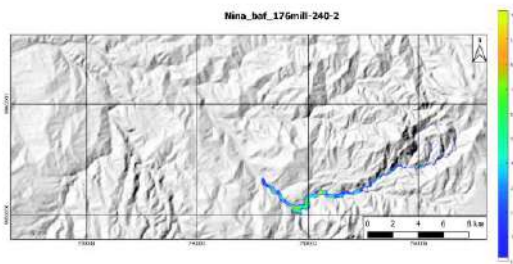
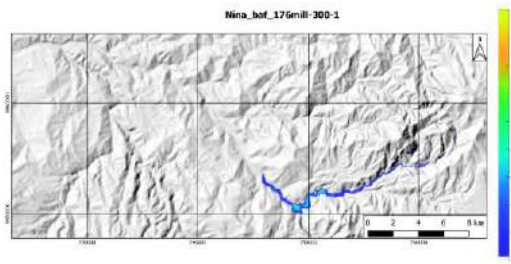
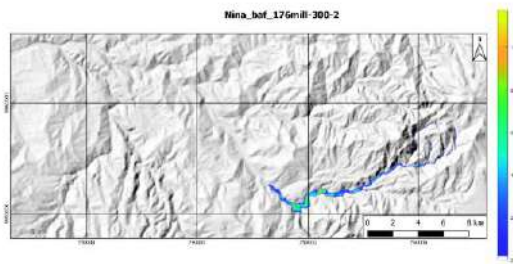
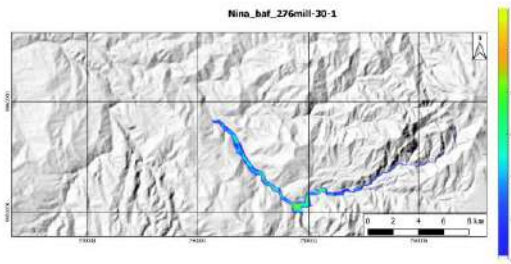
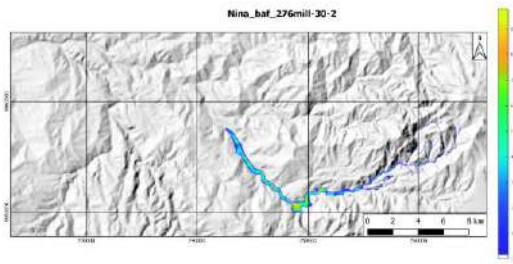
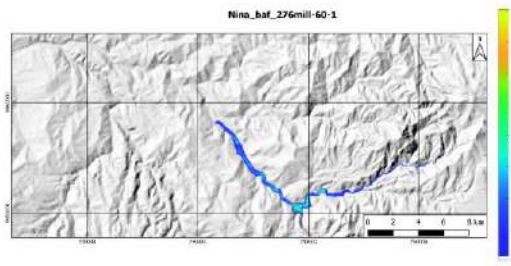
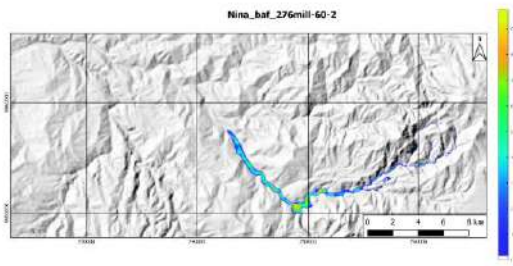


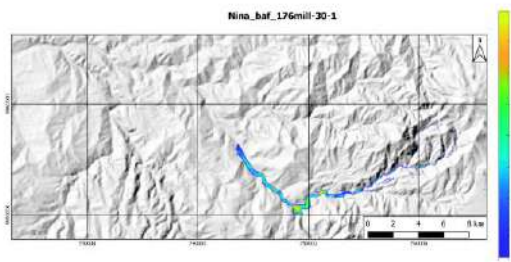
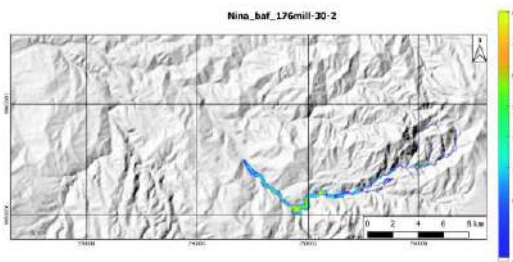
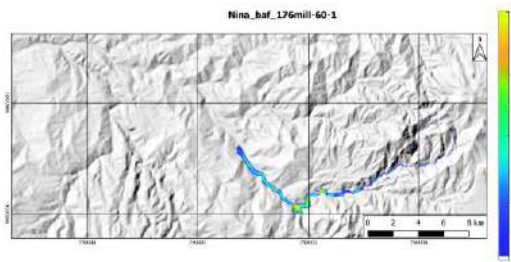
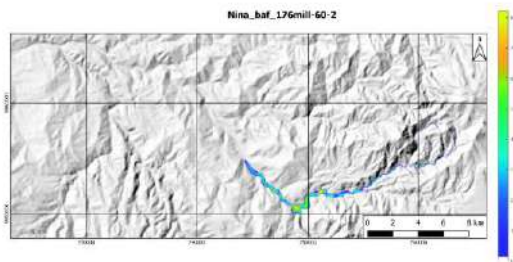
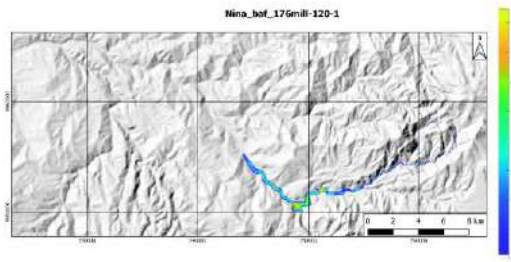
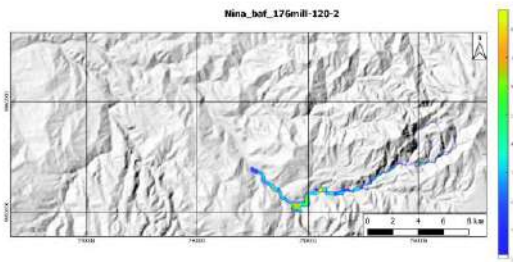
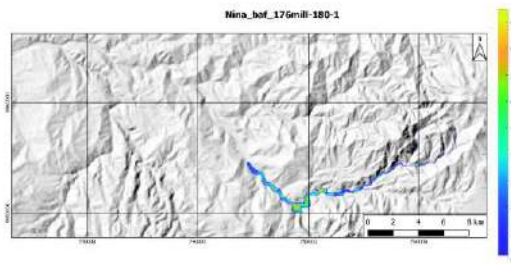
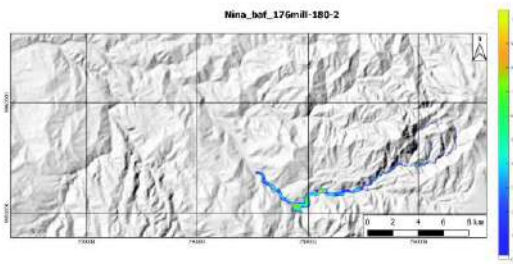












ANEXO 7. Localidades potencialmente afectadas por lahares secundarios.

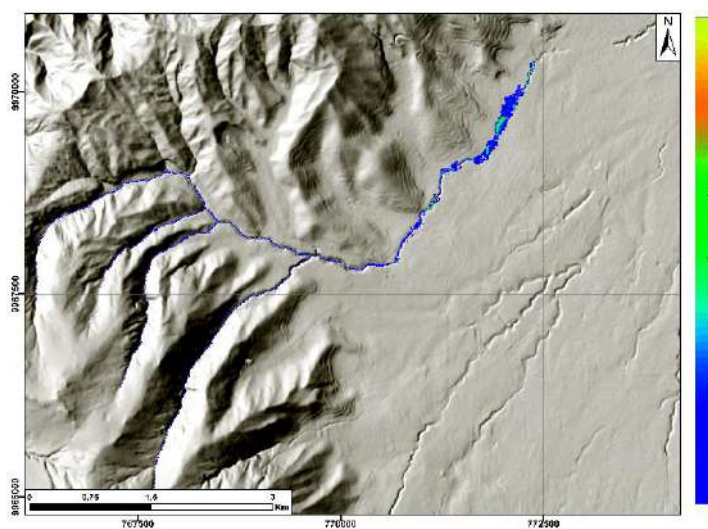
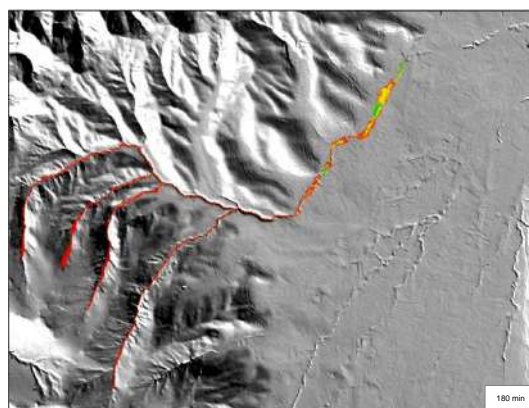
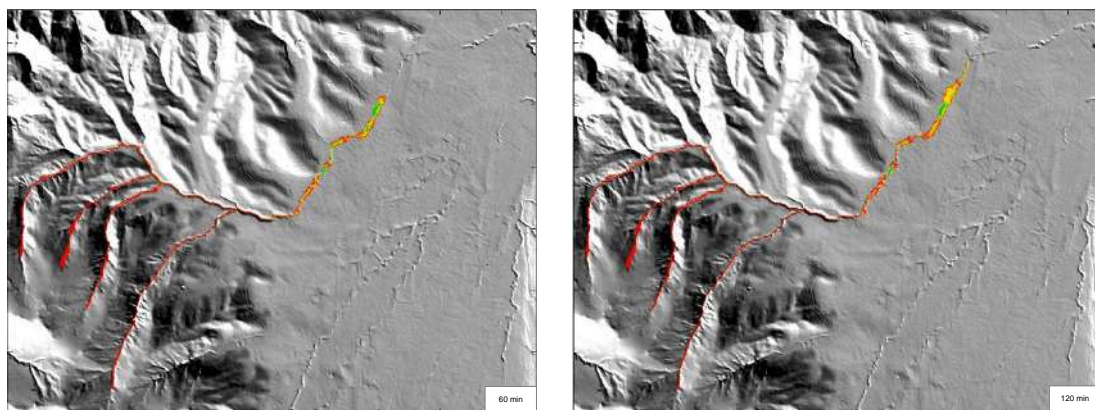
Drenaje	Localidades potencialmente afectadas
Drenaje 1	Barrios del Sur de Quito: San Antonio de Pichincha (Sur de Quito), Eugenio Espejo, Colinas del Sur, Santa Inés 2, Santa Bárbara Baja, El Tránsito, La Estancia, Buenaventura, Mariscal Ayacucho, Santa Martha de Chillogallo Bajo Santa Martha de Chillogallo 1era Etapa, La Libertad, El Girón I, San Gregorio, Chillogallo.
Drenaje 2	Barrios del Sur de Quito: La Independencia, La Merced, San Francisco Sur, 2 de Febrero, Las Orquídeas (Sur de Quito)
Drenaje 3	Barrios del Sur de Quito: Ninallacta, Los Cóndores, San Alfonso, Nuevo Horizonte Sur, Manuelita Sáenz, Las Orquídeas (Sur de Quito), La Ecuatoriana
Drenaje 4	Barrios del Sur de Quito: Los Pedestales, Hemisferio Sur, Ninallacta, Los Cóndores, Nuevo Horizonte Sur, San Francisco Sur, Manuelita Sáenz, Las Orquídeas (Sur de Quito), La Ecuatoriana
Drenaje 5	Barrios del Sur de Quito: Santospamba, Vertientes del Sur, Esperanza Guamal, Turubamba de Monjas, Santa Anita del Sur, Sierra Hermosa, San Vicente Cornejo, Nueva Aurora II, Ejército Nacional 2da Etapa
Drenaje 6	Límite cantones Quito-Mejía, San José de Cutuglahua.
Drenaje 7	San José de Cutuglahua, Santo Domingo de Cutuglahua, Tambillo.
Drenaje 8	Tambillo
Drenaje 9	Tambillo
Drenaje 10	Saloya
Drenaje 11	San Augusto
Drenaje 12	Tandapi

ANEXO 8. Alcances aproximados de lahares secundarios y sus áreas afectadas aproximadas

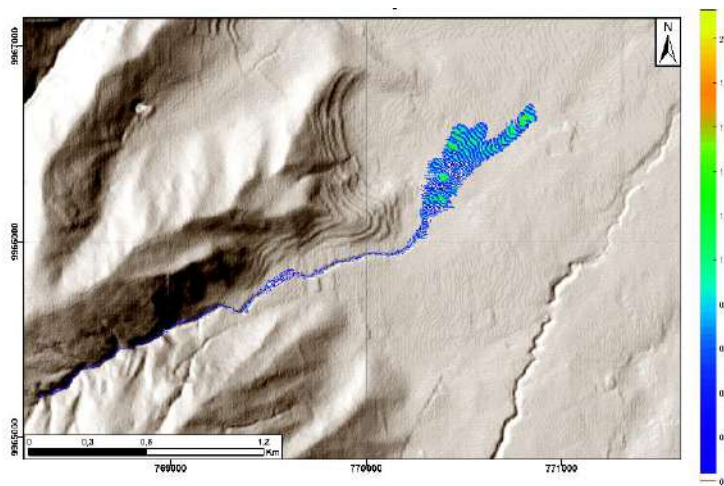
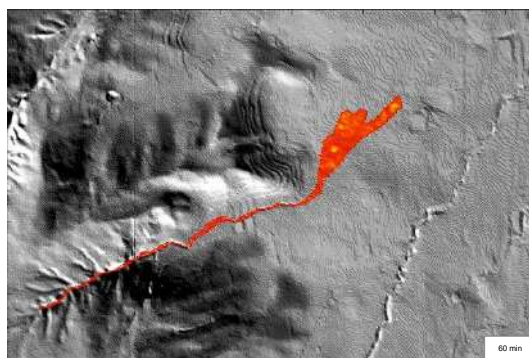
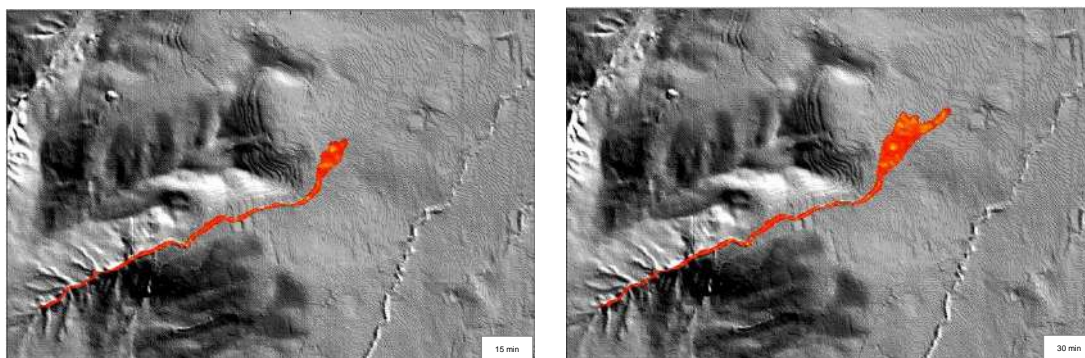
Drenaje	Volumen (m³)	Distancia recorrida (m)	Área afectada (m²)
Drenaje 1	370.000	6.200	854.900
Drenaje 2	70.000	3.000	230.480
Drenaje 3	80.000	5.236	395.000
Drenaje 4	130.000	6.000	570.200
Drenaje 5	70.000	4.900	611.090
Drenaje 6	190.000	7.000	608.850
Drenaje 7	240.000	10.500	940.360
Drenaje 8	370.000	11.600	1'378.000
Drenaje 9	125.000	7.600	490.062
Drenaje 10	4'800.000	25.700	6'210.000
Drenaje 11	7'200.000	34.400	5'975.000
Drenaje 12	7'400.000	27.500	6'909.000

ANEXO 9. Movilización de lahares secundarios en cada drenaje y simulaciones realizadas

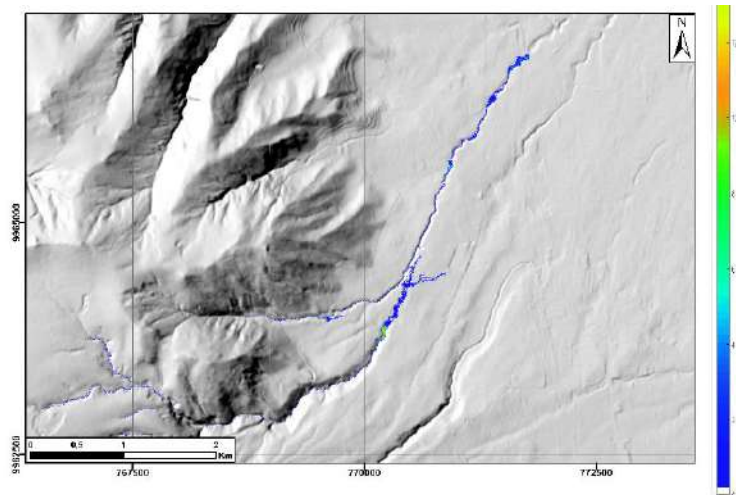
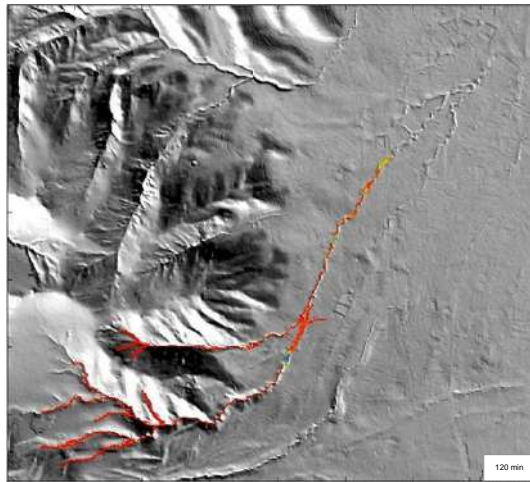
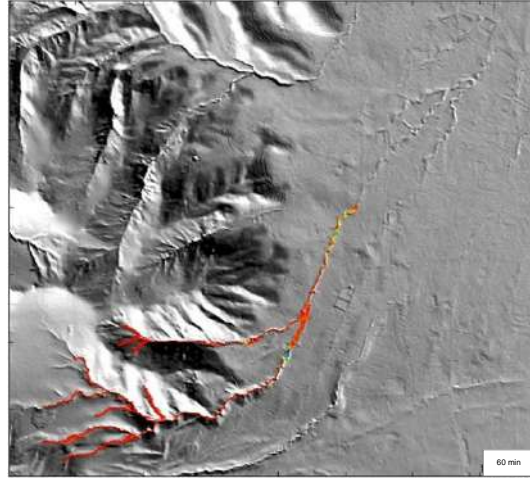
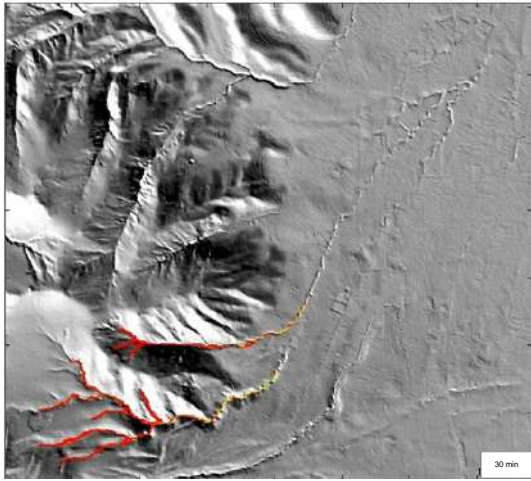
Drenaje 01



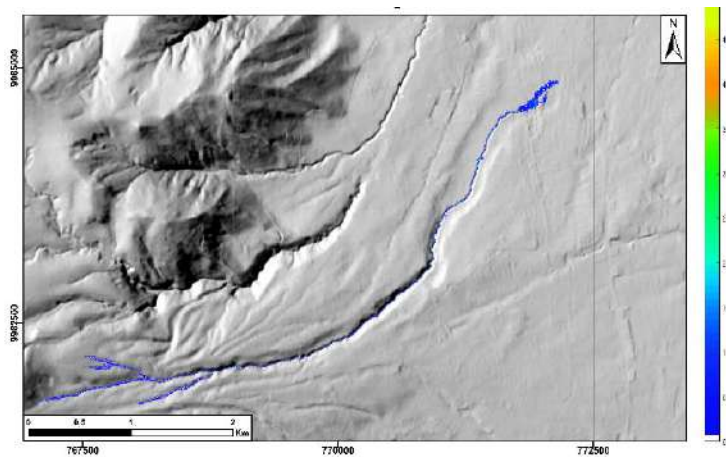
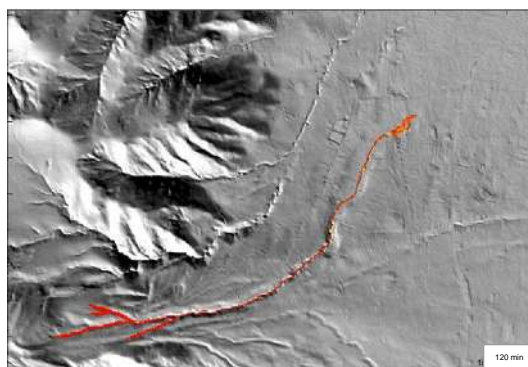
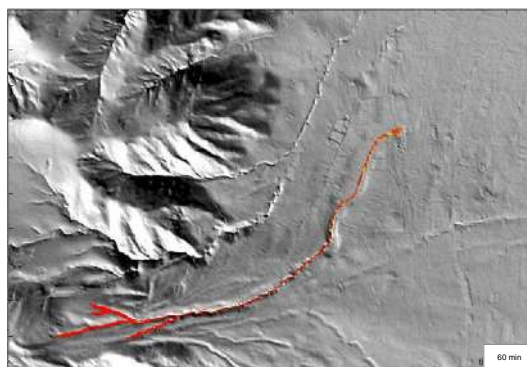
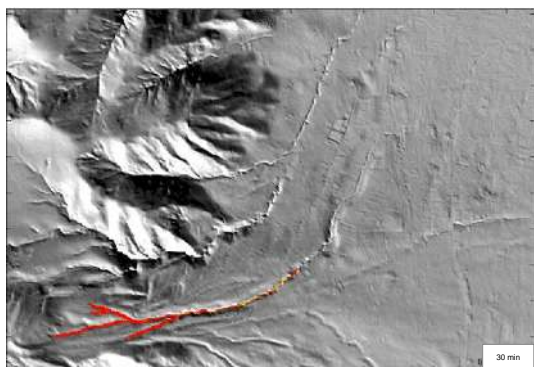
Drenaje 02



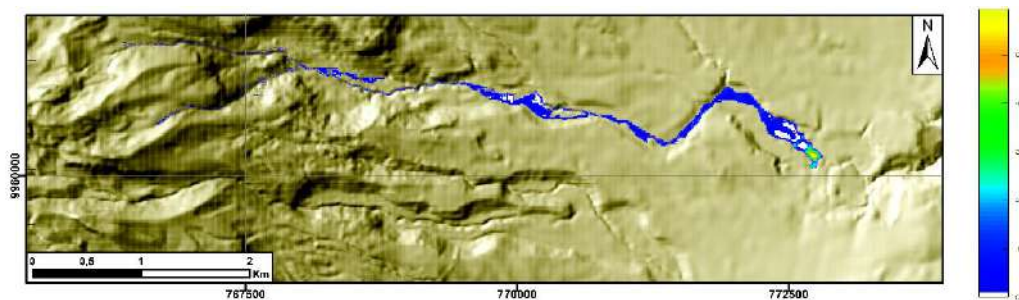
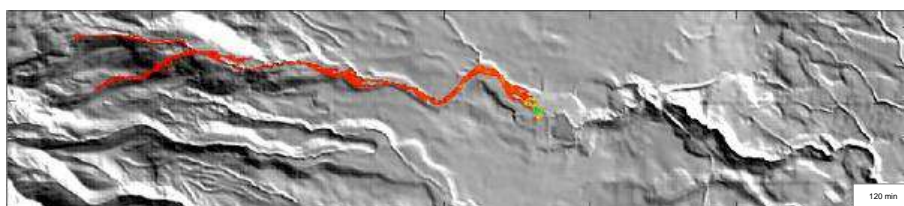
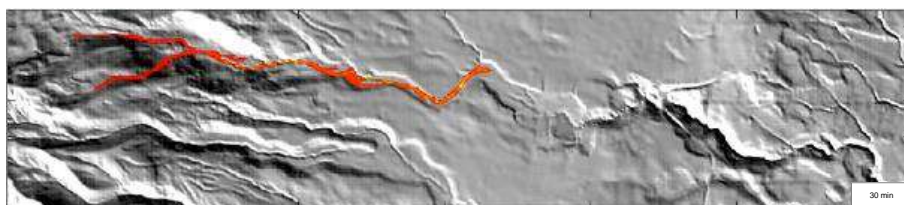
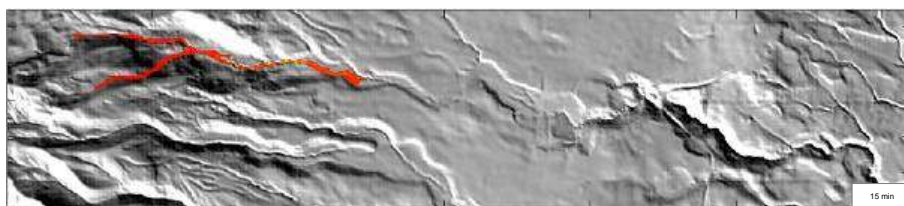
Drenajes 03 – 04



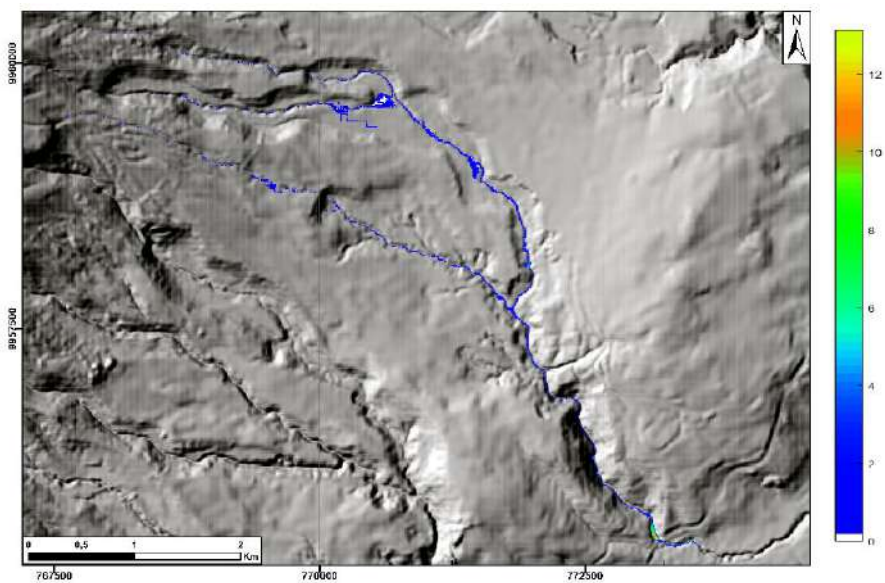
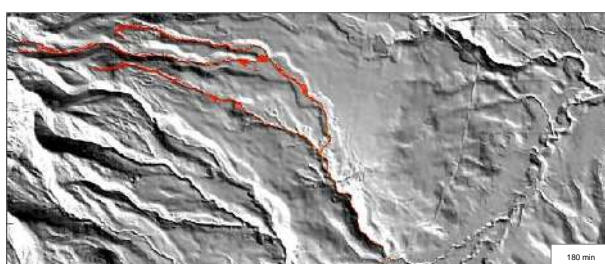
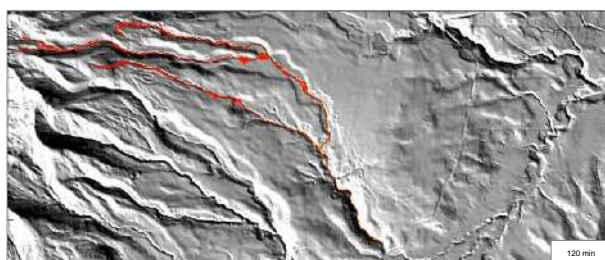
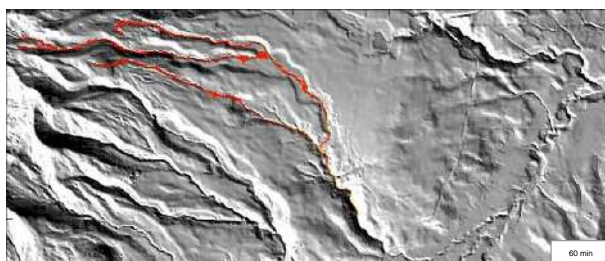
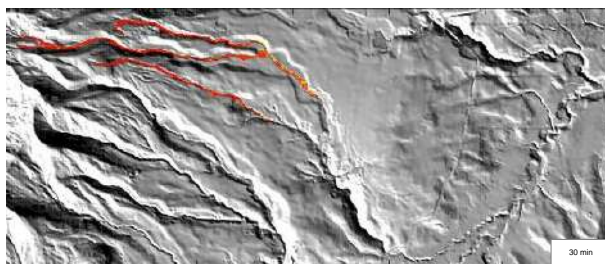
Drenaje 05



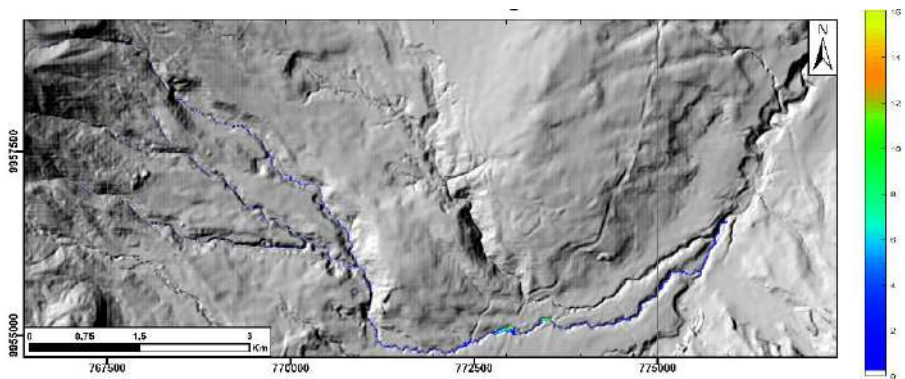
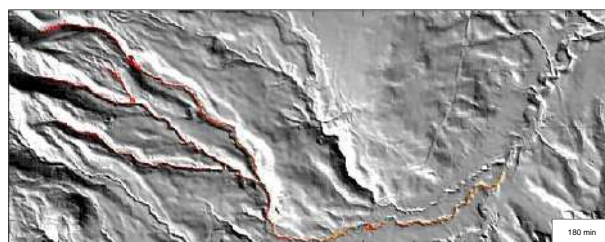
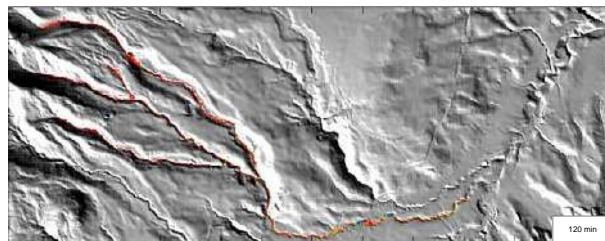
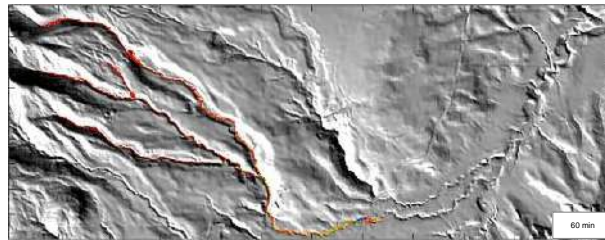
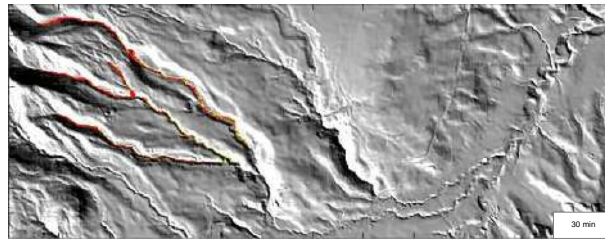
Drenaje 06



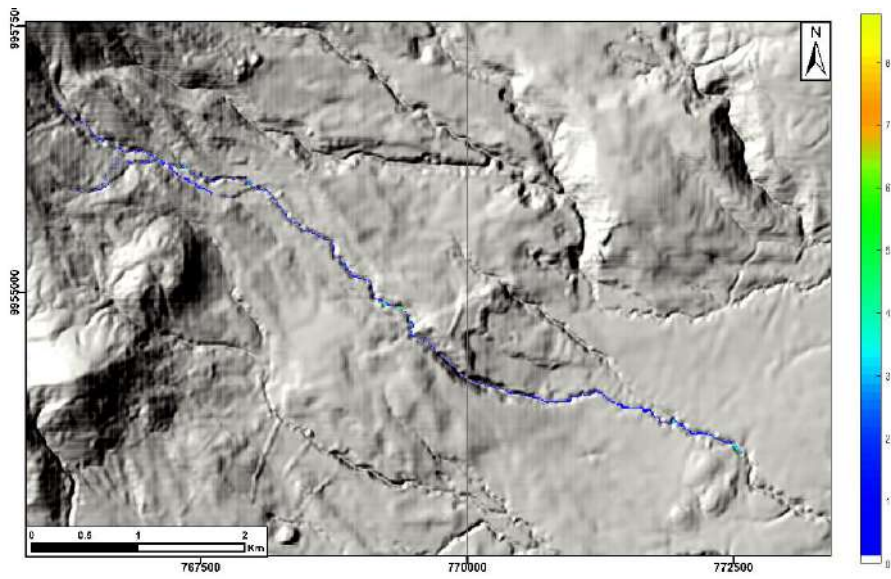
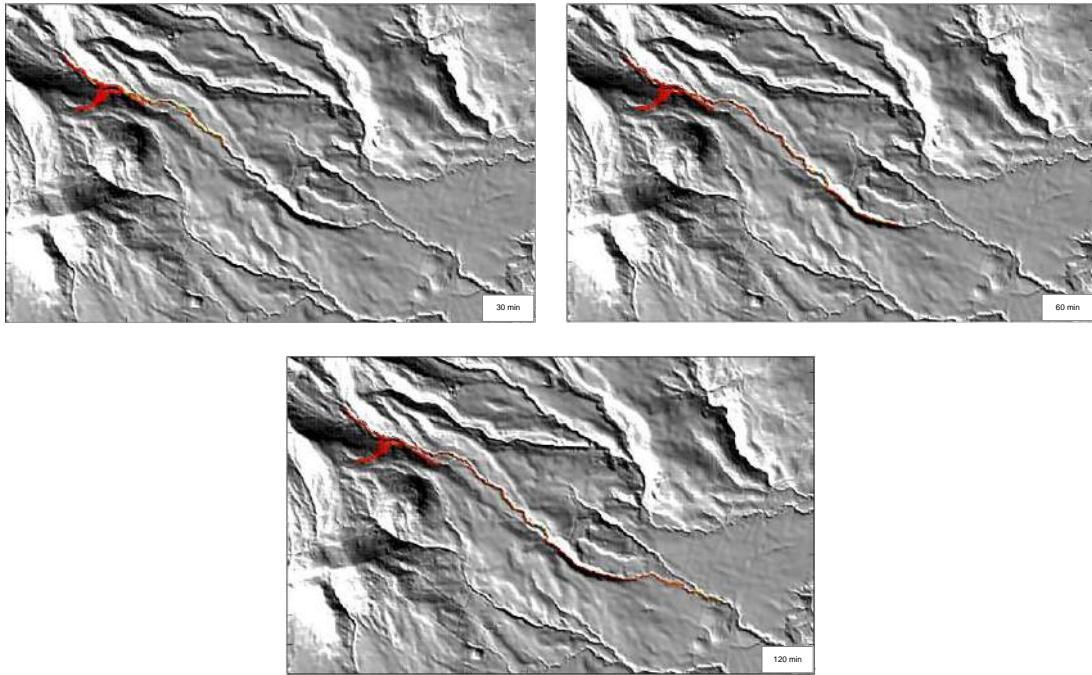
Drenaje 07



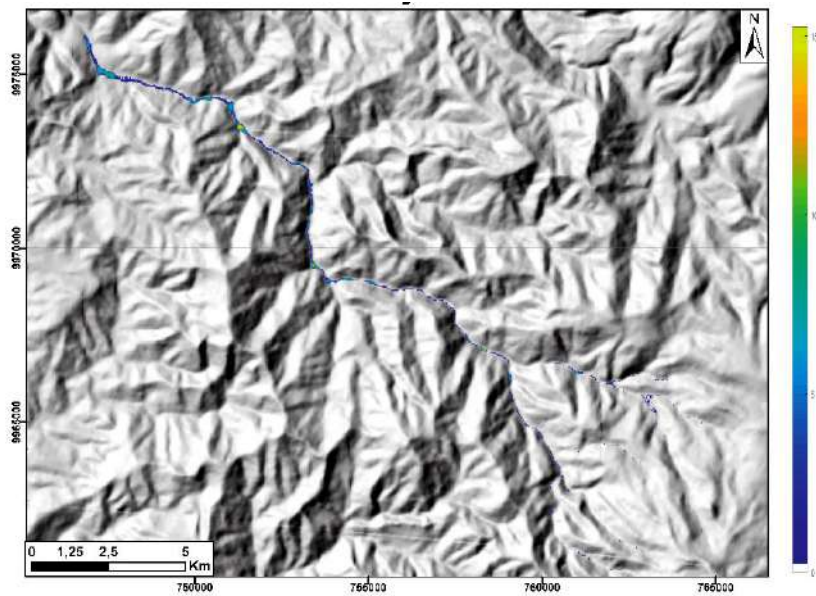
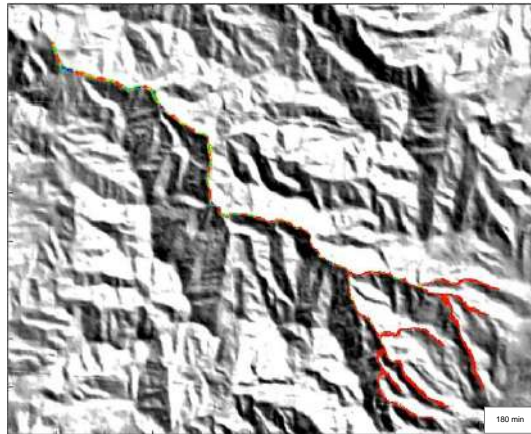
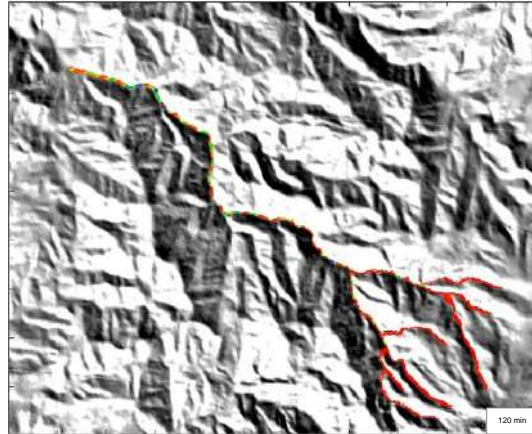
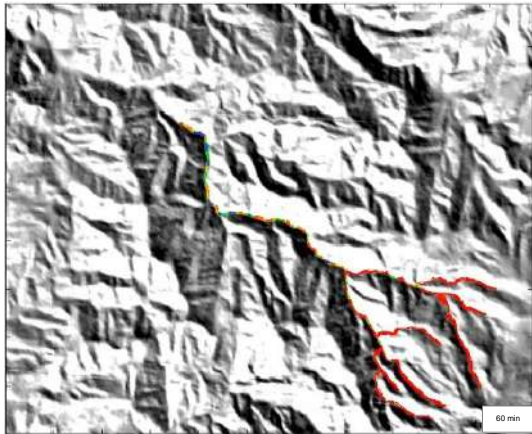
Drenaje 08



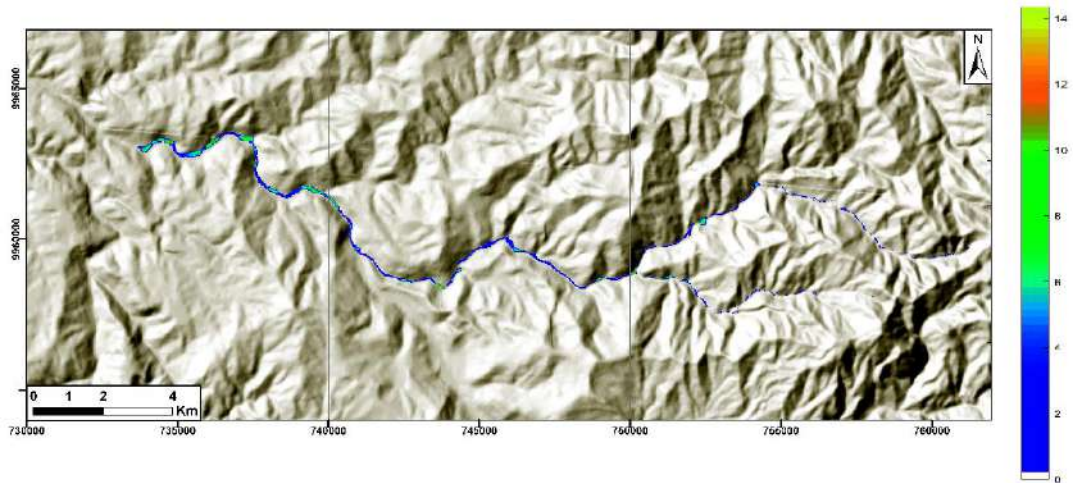
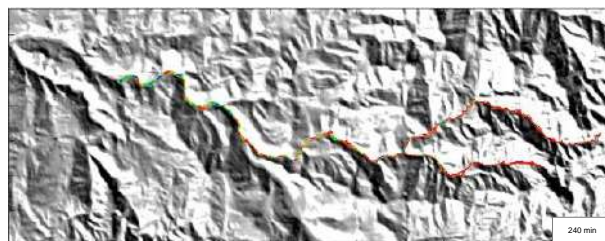
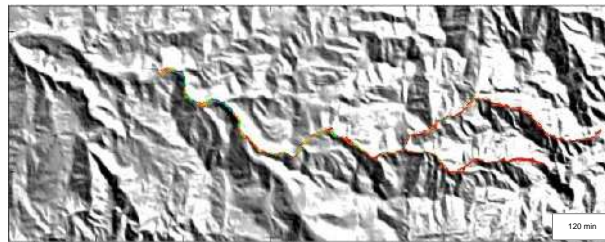
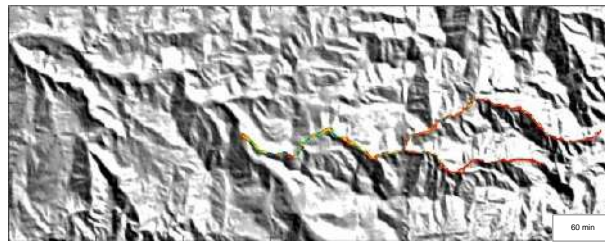
Drenaje 09



Drenaje 10



Drenaje 11



Drenaje 12

