

SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO



MinMinas
Ministerio de Minas y Energía

PROSPERIDAD
PARA TODOS

***IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES
PARA LA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS VOLCÁNICOS, PARA
LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA DEL VOLCÁN
PURACÉ ACTUAL: TEPHRA 2, TITÁN 2D, LAHAR Z, LAVA PL***

Bogotá, diciembre de 2014

PROYECTO
INVESTIGACIÓN Y MONITOREO DE LA AMENAZA VOLCÁNICA
DIRECCIÓN DE GEOAMENAZAS

***IMPLEMENTACIÓN DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES
PARA LA SIMULACIÓN DE FENÓMENOS VOLCÁNICOS, PARA
LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA DEL VOLCÁN
PURACÉ ACTUAL: TEPHRA 2, TITÁN 2D, LAHAR Z, LAVA PL***

Por:

John Jainer Galarza Zambrano
Geógrafo
Indira Zuluaga Mazo
Geóloga
María Luisa Monsalve Bustamante
Geóloga
Carlos Andrés Laverde Castaño
Ingeniero de sistemas

Bogotá, diciembre de 2014

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES.....	18
1.1 LOCALIZACIÓN.....	18
1.2 OBJETIVO	19
2. FENÓMENOS VOLCÁNICOS.....	21
2.1 TIPOS DE FENÓMENOS VOLCÁNICO.....	21
2.1.1 Caídas piroclásticas.....	21
2.1.2 Corrientes de densidad piroclástica: Flujos piroclásticos y Oleadas.....	22
2.1.3 Flujos de lodo (Lahares).....	22
2.1.4 Flujos de Lava.....	22
3. SIMULACIÓN DE CAÍDAS PIROCLÁSTICAS.....	24
3.1 TEPHRA2, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE CAIDAS IROCLÁSTICAS EN EL VOLCÁN PURACÉ	24
3.1.1 Parámetros de entrada.....	25
3.1.2 Post-proceso archivos de simulación obtenidos con TEPHRA2...	36
4. SIMULACIÓN DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS.....	41
4.1 TITAN 2D, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN PURACÉ.....	42
4.2 DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CODIGO TÍTAN 2D.....	42
4.2.1 Especificación de los datos SIG (DEM).....	43
4.2.2 Especificación de los parámetros del sistema.....	43

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

4.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA EL FLUJO DE ESCORIA DEL VPA, UTILIZANDO TITÁN 2D	48
4.3.1	Simulación número uno (SimVPA_01) para flujo de escoria volcán Puracé.....	49
4.3.2	Simulación número dos (SimVPA_02) para flujo de escoria volcán Puracé.....	51
4.3.3	Simulación número tres (SimVPA_03) para el flujo de escoria volcán Puracé.....	53
4.3.4	Simulación número cuatro (SimVPA_04) para el flujo de escoria volcán Puracé.....	55
4.3.5	Simulación número cinco (SimVPA_05) para el flujo de escoria volcán Puracé.....	57
4.4	OBTENCIÓN DEL POLÍGONO CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE ESCORIA DEL VPA, COMO INSUMO PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA	59
5.	SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LODO VOLCÁNICOS (LAHARES).....	63
5.1	LAHAR Z, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LODO EN EL VOLCÁN PURACÉ.....	64
5.2	DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CÓDIGO LAHARZ.....	69
5.2.1	Especificación de los datos SIG (DEM).....	69
5.2.2	Especificación de los parámetros del sistema.....	69
5.3	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA EL FLUJO DE LODOS DEL VPA, UTILIZANDO LAHARZ.....	78
5.3.1	Simulación para la quebrada Río Blanco (SimVPA_LZ01).....	81
5.3.2	Simulación para la quebrada Agua Blanca (SimVPA_LZ02).....	82
5.3.3	Simulación para el río Anambío (SimVPA_LZ03).....	83
5.3.4	Simulación para el río Vinagre (SimVPA_LZ04).....	84
5.3.5	Simulación para el río San Francisco (SimVPA_LZ05).....	85
5.3.6	Simulación para el río Cocuy (SimVPA_LZ06).....	86
5.3.7	Simulación para la confluencia de los ríos Anambío y San Francisco (SimVPA_LZ07).....	87
5.4	OBTENCIÓN DEL POLÍGONO CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE LODOS DEL VPA, COMO INSUMO PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA	88
6.	SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LAVA.....	92
6.1	LAVA PL, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN PURACÉ	93

6.2 DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CODIGO LAVAPL	94
6.2.1 Especificación de los datos SIG (DEM).....	95
6.2.2 Especificación de los parámetros del sistema.....	95
6.2.2 Resultado de las simulaciones para flujos de lava en el VPA, utilizando Lava PL.....	97
 CONCLUSIONES.....	 99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Panorámica del Volcán Puracé. Vista parcial del cono y el cráter actual del VPA y su actividad fumarólica.	19
Figura 2. Localización del área. En A, ubicación de algunos de los volcanes activos de Colombia, entre los que se destaca, con un triángulo en color rojo, los volcanes Puracé y Pan de Azúcar, extremos NW y SE, respectivamente, de la CVLC (mapa de sombras, DEM NASA 30 m). En B, mapa de localización de la CVLC y los principales drenajes que nacen en ella.	20
Figura 3. Ubicación de la zona del volcán Puracé y la CVLC en las planchas topográficas escala 1:25.000 del IGAC, enmarcadas en el modelo de sombras, DEM 30m de la NASA.....	20
Figura 4. Muestra de grilla representativa de la dispersión de tefra alrededor del volcán en las simulaciones deTephra2.	25
Figura 5. Imágenes del procedimiento en laboratorio para la obtención de la densidad del depósito, que consistió en pesar la muestra, luego sumergirla en agua para hallar el volumen que desplaza y así calcular la densidad.....	26
Figura 6. Material lítico acumulado en el cono del volcán Puracé Actual.....	27
Figura 7. Fotografías del material acumulado en los árboles en los alrededores del Volcán Puracé (Vereda Cristales). Nótese la acumulación de fragmentos líticos grises y la vegetación ya cubriéndolos.....	28
Figura 8. Representación inicial sobre base topográfica 1:100.000 de las isópacas luego de la revisión e interpretación de los relatos históricos y su relación con el registro geológico.....	28
Figura 9. Isópacas asumidas para la erupción histórica del volcán Puracé, superpuestas al DEM.....	29
Figura 10. Distribución Gaussiana de tamaños de grano.....	31
Figura 11. Paso 1: Selección del volcán, Herramienta Wind Reanalysis del Vhub (Palma, 2013)	34
Figura 12. Paso 2: Selección del tipo de archivos y el número de perfiles de viento. Nota: esta base de datos contiene 32140 perfiles; si se elige un número menor a este, el programa los selecciona aleatoriamente.	34

Figura 13. Paso 3: Selección del período de tiempo. Puede elegir todo el año o sólo un intervalo específico.	35
Figura 14. Paso 4: Luego de simular, los archivos generados de tipo [* .txt] son almacenados en el espacio Workspace del Vhub. Y luego son exportados a un procesador de texto.	35
Figura 15. Ilustración del formato de presentación de la información de los archivos de viento.	36
Figura 16. Archivos de salida de las simulaciones en Workspace, que contienen los datos de las curvas de isomasas.	37
Figura 17. Ejemplo de gráfico de Isomasas, resultado de cada simulación con los parámetros de entrada iniciales.	37
Figura 18. Algunas de las imágenes de resultados gráficos de Tephra2, sin post-proceso ni condicionamientos y cuyos archivos son los editados con el programa ejecutable de GDAL.	38
Figura 19. Representación de las 1000 simulaciones superpuestas y filtradas con los siguientes criterios: 0,1 mm a 1 cm, zona de amenaza baja (color amarillo); entre 1 cm y 10 cm, zona de amenaza media (color naranja); y mayor a 10 cm zona de amenaza alta (en color rojo).	39
Figura 20. Mapa mostrando el resultado final de las simulaciones, delineando las áreas de amenaza baja, media y alta por caída de piroclastos, según los criterios del SGC.	40
Figura 21. Ecuaciones de conservación de masa (1) y de momentum en los ejes x, y (2 y 3). Modelo para aguas poco profundas con un término de resistencia a la fricción basado en la ley de Mohr-Coulomb.	42
Figura 22. Distribución del flujo de escoria de la UE Vinagre en el volcán Puracé.	44
Figura 23. Espesor del flujo de escoria de la UE Vinagre en el volcán Puracé.	47
Figura 24. Simulación de flujos de escoria, con base en el depósito de la Unidad Eruptiva Vinagre (a), resultados con el cambio en ángulos de fricción basal de 10 (b), 12 (c) y 14 (d) grados, puntos de emisión quebrada Agua Blanca y río San Francisco.	49
Figura 25. Resultado de la simulación número 1 (pilas localizadas sobre los flancos del volcán cada 90 grados): distribución y altura de inundación para un flujo de escoria del VPA.	51
Figura 26. Resultado de la simulación número 2 (cuatro pilas localizadas en los flancos del volcán direccionadas de acuerdo a las principales vertientes que nacen en la zona): distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.	53
Figura 27. Resultado de la simulación número 3 (una pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé): distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.	55

Figura 28. Resultado de la simulación número 4 (una pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé, DEM modificado): Distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.	57
Figura 29. Resultado de la simulación número 5; distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA (Con variación en el volumen).	59
Figura 30. Resultado final de la delimitación de las áreas que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos y oleada acompañante generados en el VPA.	60
Figura 31. Resultado final de la delimitación de las áreas que podrían ser afectadas por flujos de piroclastos en el área de influencia del volcán Puracé.	61
Figura 32. Dispersión de puntos de los valles inundados en área de sección transversal (A) en función del volumen del <i>lahar</i> (V). La gráfica muestra la línea de mejor ajuste de regresión con la cual calcularon la constante de 0.05 para la ecuación de (A) en función (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y la predicción (líneas verdes). (Tomado de Schilling, 2014).....	64
Figura 33. Dispersión de puntos de áreas inundadas en planta (B) en función del volumen del <i>lahar</i> (V). La línea de regresión logarítmica de mejor ajuste, con la cual calcularon la constante de 200 para la ecuación (B) en función de (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y de predicción (líneas verdes). (Tomado de Schilling, 2014).	65
Figura 34. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un <i>lahar</i> , que se utilizan en el programa LaharZ. La relación H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal a partir de la cual comienza la simulación (Tomado de Iverson <i>et al.</i> , 1998; Schilling, 2014)	67
Figura 35. Diagrama de una parte de un DEM y sus correspondientes grillas de hidrología superficial suplementarias. A) DEM donde se almacenan los valores de las celdas de elevación en metros. B) Grilla de dirección del caudal (Flow Direction) derivado del DEM, las flechas representan la dirección del flujo C) La función de acumulación de flujo (Flow Accumulation) utiliza el <i>raster</i> de la dirección del flujo para calcular, en cada celda, el número de celdas “aguas arriba” (“ <i>up stream</i> ”) que fluyen en él. D) Las celdas en los datos de acumulación de flujo establecen que tiene valores (texto negro en C) mayores o iguales a un umbral especificado por el usuario para la delimitación de corriente (en este ejemplo, valores mayores que 500 para las celdas) para identificar las celdas un de flujo (marrón) en un <i>raster</i> de corrientes. (Tomado de Schilling, 2014).....	68
Figura 36. Resultado de la aplicación de la herramienta de dirección de flujo en el DEM para la simulación con <i>LaharZ</i> en VP.....	71
Figura 37. Creación de la red hídrica a partir del DEM para la simulación con <i>LaharZ</i> en VP.....	72

Figura 38. Errores derivados de la generación de la red hídrica a partir del DEM para la simulación con <i>LaharZ</i> en VP.	73
Figura 39. Distribución aproximada para lahar en el sector de Paletará, sobre el DEM GeoSAR, volcán Puracé.	74
Figura 40. Localización y distribución de llenado para los perfiles 2, 3, 4 y 5 en la Q. Río Blanco, sector de Paletará sobre el DEM GeoSAR.	76
Figura 41. Localización y distribución de llenado para el perfil 1 en la Q. Río Blanco, sector de Paletará sobre el DEM GeoSAR.	76
Figura 42. Localización de los sitios de inicio (puntos verdes) para la simulación de flujos de lodo mediante <i>LaharZ</i> , en las redes hídricas de interés en el área de influencia del VP.	77
Figura 43. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el sector de la central hidroeléctrica Florida II (municipio de Popayán), utilizando el método estándar del código (línea en color magenta) y la recalibración para el caso de VP (polígono color verde).	79
Figura 44. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el sector urbano de Popayán, utilizando el método estándar del código (línea en color magenta) y la recalibración para el caso de VP (polígono color verde).	80
Figura 45. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en la quebrada Río Blanco sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.	82
Figura 46. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en la quebrada Agua Blanca sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.	83
Figura 47. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el río Anambío sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP. .	84
Figura 48. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el río Vinagre sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP. .	85
Figura 49. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el río San Francisco sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.	86
Figura 50. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en el río Cocuy sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.	87
Figura 51. Resultado de la simulación con <i>LaharZ</i> en la zona de confluencia sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.	88
Figura 52. Resultado de la aplicación del método propuesto por Worni (2008), para el cálculo de alturas de inundación para la simulación con <i>LaharZ</i> , para el caso de VP.	89
Figura 53. Integración de los resultados del modelamiento de flujos de lodo, mediante <i>LaharZ</i> , para el VPA.	90

Figura 54. Panorámica, en donde se pueden apreciar los depósitos de flujos de lava dejados por erupciones pasadas en el volcán Puracé.	92
Figura 55. Distribución de los depósitos de lava en el volcán Puracé.....	93
Figura 56. Simulación numérica de lavas (Charbonnier S. 2013).	94
Figura 57. Flujos de lava modelados mediante LavaPL para el VPA.....	98

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Volúmenes mínimos estimados para cada Isópaca considerada.	30
Tabla 2. Ángulos de fricción basal propuestos por Stinton (2004), de acuerdo al coeficiente de fricción basal formado entre un flujo y la superficie sobre la que se desliza.	45
Tabla 3. Relación de las estaciones de campo con la información sobre los datos de espesores encontrados en los depósitos de flujo de escoria de la unidad eruptiva vinagre en el VPA.	46
Tabla 4. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.1, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.....	50
Tabla 5. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.2, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.....	52
Tabla 6. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.3, tomando como referencia el volumen y la distribución del flujo de escoria de la Unidad Eruptiva Vinagre.....	54
Tabla 7. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.4 (cráter modificado), tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.	56
Tabla 8. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.5, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.....	58
Tabla 9. Datos usados para calibración del modelo LaharZ (Tomado de Iverson <i>et al.</i> , 1998).	66
Tabla 10. Relación de volúmenes calculados a partir del área cartografiada para la distribución del flujo de lodo en la quebrada Río Blanco, sector de Paletará.74	74
Tabla 11. Relación de volúmenes de simulación calculados a partir de las secciones de llenado del canal para la Quebrada Río Blanco, sector SW área proximal del volcán Puracé.	75
Tabla 12. Sitios de inicio en el sistema de coordenadas UTM, zona 18N, para correr la simulación de flujos de lodo en VP mediante Laharz_py.	78

Tabla 13. Parámetros requeridos por LavaPL para correr la simulación de flujos de lava en VP.....	95
Tabla 14. Sitios de inicio en coordenadas UTM Z18N, definidos para correr la simulación de flujos de lava en VP.....	97

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Gráficas de simulaciones con la herramienta Tephra2.....	104

RESUMEN

Para la actualización del mapa de amenaza volcánica del Volcán Puracé Actual (VPA), se realizaron trabajos de simulación de algunos fenómenos volcánicos usando herramientas computacionales cuyos resultados fueron un insumo importante y complementario en la zonificación de las áreas de influencia del volcán, que podrían ser afectadas en el caso de ocurrir alguno de los fenómenos simulados.

En este informe se presentan las metodologías implementadas para este volcán y los resultados del modelamiento con algunas de las herramientas online disponibles en el portal web del grupo de investigaciones VHUB – (*Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation*) de la Universidad de Buffalo, con la asesoría de los expertos internacionales del mismo grupo; además del uso de Laharz, programa facilitado por parte del USGS.

Los modelos usados fueron TEPHRA2 para las caídas piroclásticas, TITAN2D para los flujos piroclásticos, LAHARZ para flujos de lodo (*lahares*) y LAVA PL para los flujos de lava.

ABSTRACT

To update the volcanic hazard map of Purace Volcano (VPA), simulation work was carried out for some of the volcanic phenomena using computational tools, which results were complementary elements to zoning areas that could be affected around the volcano in case of occurrence of the simulated phenomenon.

This work presents the methodologies implemented and simulation results with the online tools available at VHUB, research group (Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation) from Buffalo University, with the international experts consulting; and the use of LAHARZ, program provided by the USGS.

The used tools were TEPHRA2 for piroclastic falls, TITAN2D for piroclastic flows, LAHARZ for mud flows (lahares) and LAVA PL for lava flows.

INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones respecto a amenaza, vulnerabilidad y riesgo volcánico (gestión integral del riesgo), en beneficio de las comunidades asentadas en áreas de influencia volcánica, se debe soportar en un adecuado conocimiento de la amenaza volcánica, fundamentado en el estudio, entendimiento y caracterización de los fenómenos volcánicos.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en los últimos años, mediante el proyecto AME13-07 (Investigaciones Aplicadas a Amenazas y Riesgos Geológicos) de la Dirección de Geoamenazas, ha venido trabajando en la elaboración y actualización de los mapas de amenaza volcánica para los principales volcanes activos de Colombia, incluyendo el volcán Puracé. Este trabajo parte del conocimiento geológico de sus depósitos, que permite conocer su historia eruptiva, incorporando y promoviendo, complementariamente, el aprovechamiento de herramientas computacionales de simulación, como soporte a la elaboración y actualización de mapas de amenaza asociados a la actividad volcánica; dichos mapas se integran en Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo que la información obtenida, a partir de estos estudios e investigaciones, sea accesible para diversos usuarios.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que la morfología de una zona volcánica puede cambiar, en ocasiones drásticamente, con el material depositado en sus erupciones; y que las condiciones atmosféricas pueden variar, en diferentes épocas del año, se emplean algoritmos que incluyen como insumos características de erupciones pasadas, propiedades físicas de los materiales emitidos, junto con modelos actualizados de elevación del terreno, que permiten “simular” computacionalmente eventos futuros y establecer las zonas que pueden ser potencialmente afectadas por nuevas erupciones. Este proceso ha incorporado la asesoría de expertos internacionales en la materia (VHUB - *Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation*); que ha permitido la evaluación y validación de las herramientas utilizadas para la simulación de cada fenómeno volcánico (TEPHRA 2, TITAN2D, LAHARZ Y LAVAPL). El fruto de la interacción entre los profesionales del SGC y los expertos de Vhub, es la aplicación de los modelos de simulación para la zonificación preliminar por caídas piroclásticas, flujos piroclásticos, *lahares* y flujos de lava, para luego de un exhaustivo análisis de evaluación de la amenaza volcánica por cada uno de

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

estos fenómenos, se puedan actualizar los mapas de los volcanes activos, en este caso particular para el volcán Puracé, bajo los criterios establecidos en la ley colombiana (Ley 1523 de 2011 y Decreto 1807 de 2014).

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN

El volcán Puracé (2°22'N; 76°23'W, 4630 msnm) (Figura 1), es considerado uno de los volcanes más activos de Colombia, ubicado en la Cordillera Central de Colombia, en el departamento del Cauca; se encuentra localizado a 27 km al SE de la ciudad de Popayán y a 360 km al suroccidente de la ciudad de Bogotá (Figura 2). Es el extremo noroccidente de La Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC).

La CVLC está comprendida en la plancha topográfica 365-Coconuco, escala 1:100.000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi -IGAC) (Figuras 2 y 3).

El volcán Puracé es un estrato volcán cuyo registro geológico está representado por depósitos hidrotermalizados, flujos de lava, depósitos de oleadas piroclásticas, flujos de escoria, flujos de bloques, caída de cenizas, *lapilli* y bombas y bloques emitidos como proyectiles balísticos, flujos piroclásticos, depósitos de caída, asociados a erupciones freáticas, freatomagmática y principalmente, estromboliano – vulcaniano. De acuerdo con sus características, la actividad más reciente del volcán se agrupa en una unidad eruptiva denominada Unidad Eruptiva Histórica (UE-H) desde 1849 hasta 1977 (Monsalve *et al.*, 2012).

Su actividad histórica ha sido reportada desde el siglo XVI y más aún en el siglo XIX, en donde se describen eventos explosivos que cobraron víctimas. Las manifestaciones actuales de actividad volcánica están representadas por fumarolas en el interior del cráter y en la parte externa del cono, así como fuentes termales en sus alrededores y la sismicidad baja a intermedia, todas ellas monitoreadas desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán, del Servicio Geológico Colombiano.

La red hidrográfica presente en el área, pertenece a la cuenca del río Cauca, en la cual vierten sus aguas los ríos y quebradas que nacen en el volcán Puracé, tales como Cocuy, San Francisco y La Esperanza al nororiente, Vinagre, Anambío Agua Blanca y Chagartón al noroccidente y la quebrada Río Blanco, al Oeste. El río Cauca continúa hacia el occidente y atraviesa a la ciudad de

Popayán, distante 27 km de la cima del volcán, para continuar luego su recorrido hacia el norte del país.

Las poblaciones cercanas más importantes en el área de estudio son los resguardos indígenas de Puracé, Coconuco y Paletará, en el municipio de Puracé.

También existen otras poblaciones, que están en el área de influencia del volcán como son Polindara, Santa Leticia y la ciudad de Popayán; la población asentada en el área de influencia del volcán se estima en al menos unas 460.000 personas según proyecciones de población municipales por área para el año 2014 (DANE, 2005).

1.2 OBJETIVO

El propósito de este informe, es la elaboración de un documento que detalle el proceso llevado a cabo para realizar las simulaciones de los diferentes fenómenos volcánicos, mediante la incorporación de herramientas computacionales como insumo para la generación o actualización de los mapas de amenaza volcánica considerados como objeto de trabajo por parte de la Dirección de Geoamenazas del SGC, en este caso puntual para la actualización del mapa de amenaza volcánica del Volcán Puracé Actual (VPA).



Figura 1. Panorámica del Volcán Puracé. Vista parcial del cono y el cráter actual del VPA y su actividad fumarólica.

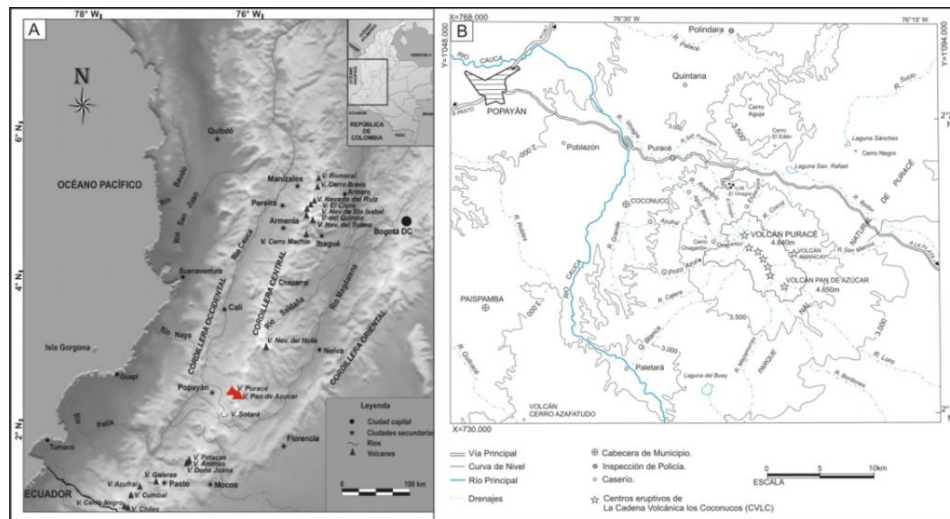


Figura 2. Localización del área. En A, ubicación de algunos de los volcanes activos de Colombia, entre los que se destaca, con un triángulo en color rojo, los volcanes Puracé y Pan de Azúcar, extremos NW y SE, respectivamente, de la CVLC (mapa de sombras, DEM NASA 30 m). En B, mapa de localización de la CVLC y los principales drenajes que nacen en ella.

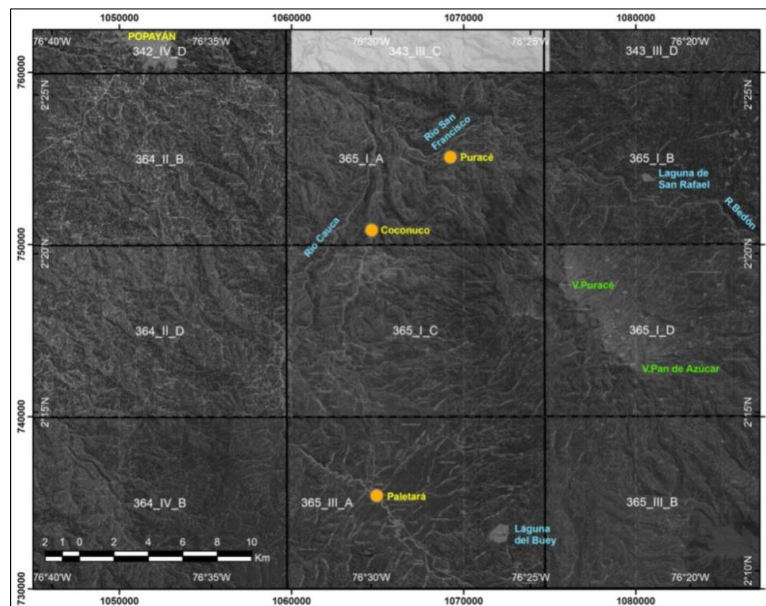


Figura 3. Ubicación de la zona del volcán Puracé y la CVLC en las planchas topográficas escala 1:25.000 del IGAC, enmarcadas en el modelo de sombras, DEM 30m de la NASA.

2. FENÓMENOS VOLCÁNICOS

La actividad volcánica da lugar a erupciones, que dependiendo del tipo de volcán, van a generar fenómenos volcánicos que representan una amenaza en relación con el territorio y las poblaciones que se encuentran en su área de influencia. Esto indica que la afectación va a variar, dependiendo del tipo de fenómeno que se presente (flujos de lava, caída de piroclastos, lahares, entre otros), de su alcance, que está en función del tipo de erupción y los volúmenes de material emitidos; además de las condiciones climáticas y atmosféricas presentes en el territorio.

2.1 TIPOS DE FENÓMENOS VOLCÁNICO

2.1.1 Caídas piroclásticas

Como consecuencia de las erupciones explosivas los volcanes expiden a la atmósfera partículas fragmentadas (piroclastos) que, de acuerdo a su tamaño, se conocen como: ceniza (menor de 2 mm); *lapilli* (2 a 64 mm); bloques y bombas (mayor de 64 mm).

Los piroclastos transportados por el viento (ceniza y *lapilli*) son transportados hasta zonas alejadas del volcán (cientos o miles de kilómetros) y depositados por efecto de gravedad formando capas que siguen la topografía preexistente, y en general cubren un área muy extensa. La cantidad de piroclastos acumulados y su tamaño de grano disminuyen con la distancia al volcán. En la mayoría de las erupciones se producen caídas piroclásticas y su distribución dependerá de la dirección y fuerza del viento predominante de la zona en donde está situado el volcán.

Las bombas y los bloques (con diámetro desde 64 mm hasta métricos) son expulsados con trayectorias parabólicas como proyectiles balísticos desde el cráter a velocidades de decenas a centenares de metros por segundo, por lo general su distribución está restringida a una distancia menor a 10 km desde el punto de emisión.

2.1.2 Corrientes de densidad piroclástica: Flujos piroclásticos y Oleadas

Son nubes de material incandescente compuestas por fragmentos densos y/o vesiculados (pómez o escoria), cenizas y gases calientes (de 300° a más de 800°C) que se mueven a grandes velocidades (de decenas a varios centenares de km/h) desde el centro de emisión, desplazándose por los flancos del volcán tendiendo a seguir los valles y depresiones topográficas; estos fenómenos se pueden originar a partir del colapso gravitacional de columnas eruptivas y por la destrucción gravitacional y explosiva de domos y flujos de lava.

La mayoría de los flujos piroclásticos tienen dos partes: un flujo basal de fragmentos gruesos que se mueve a lo largo de la superficie del suelo y una nube turbulenta de ceniza que se eleva por encima del flujo basal. La ceniza puede caer desde esta nube en un área más amplia.

Las oleadas son flujos turbulentos de baja densidad, que fluyen a grandes velocidades y no están controlados topográficamente.

2.1.3 Flujos de lodo (Lahares)

Los flujos de lodo o *lahares* son una mezcla de fragmentos de roca, arena, limo, arcilla y agua que se desplazan por los cauces de las quebradas y ríos. Un *lahar* en movimiento se presenta como una masa de concreto húmedo que carga fragmentos que varían desde arcilla hasta bloques de más de 10 metros en diámetro; estos eventos varían en tamaño y velocidad, los *lahares* pequeños, de menos de unos pocos metros de ancho y varios centímetros de profundidad, pueden fluir unos pocos metros por segundo, los *lahares* grandes en cambio son de cientos de metros de ancho y decenas de metros de profundidad pueden fluir a varias decenas de metros por segundo.

Estos tipos de flujos se pueden generar durante (primarios) o después (secundarios) de las erupciones volcánicas, por una variedad de mecanismos que permiten la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos.

Las fuentes de agua para formar *lahares* pueden provenir de nieve, de hielo, de lagos cratéricos, de lluvias o de corrientes fluviales o reservorios de agua en el interior del volcán.

2.1.4 Flujos de Lava

Son corrientes de roca fundida, relativamente fluidas, que son emitidas por el cráter o por grietas en los flancos del cono activo. Al salir del cráter forman lenguas que tienden a canalizarse a lo largo de los valles, su velocidad y alcance dependen de su composición, la morfología representada por la pendiente del valle y las barreras topográficas que encuentren a su paso.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Existen lavas fluidas y lavas viscosas, las primeras pueden extenderse hasta decenas de kilómetros desde el foco de emisión, lavas menos fluidas se mueven solamente unos pocos kilómetros por hora y raras veces se extienden a más de 8 km desde los focos de emisión; cuando las lavas son muy viscosas se acumulan en los centros de emisión formando montículos escarpados o en forma de cúpula conocidos como domos de lava, que al enfriarse llegan a taponarlos.

Los domos pueden explotar o colapsar, generando flujos piroclásticos y posteriormente flujos de lodo o *lahares*.

3. SIMULACIÓN DE CAÍDAS PIROCLÁSTICAS

El objeto de simular las caídas piroclásticas como uno de los fenómenos volcánicos más relevantes para la evaluación de la amenaza volcánica, es tener una aproximación por actividad futura de un volcán, o si se quiere, una “predicción” de la acumulación de tefra que pueda ocurrir en una determinada región.

En la actualidad, herramientas como Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2010), son útiles en esta tarea y sus resultados se convierten en un insumo importante para la elaboración de mapas de amenaza volcánica, un apoyo en momentos de crisis volcánicas, mitigación de desastres y como soporte a las medidas de planeamiento regional.

3.1 TEPHRA2, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE CAIDAS PIROCLÁSTICAS EN EL VOLCÁN PURACÉ

Tephra2 es una herramienta computacional diseñada por Bonadonna *et al.*, (2010) y desarrollada en colaboración con la Universidad de South Florida y la Universidad de Hawaii, para pronosticar la acumulación de tefra en erupciones volcánicas explosivas; definida como: “... un modelo Euleriano que describe la solución de las ecuaciones de difusión de partículas, transporte y sedimentación y puede pronosticar la acumulación en el terreno con relación a una fuente de emisión” (Tomado de Bonadonna *et al.*, 2010).

El modelo utiliza el conjunto de parámetros de la erupción proporcionados por el usuario y en términos generales aplica la ecuación de advección-difusión para calcular la masa de partículas en el terreno. Esto involucra una doble integración en cada punto (x, y) de la zona escogida (grilla) (Figura 4) (Ecuación A).

$$M(x, y) = \sum_{i=1}^H \sum_{j=\phi_{\text{mín}}}^{\phi_{\text{máx}}} M_{i,j}^0 f_{i,j}(x, y) \quad (\text{Ecuación A})$$

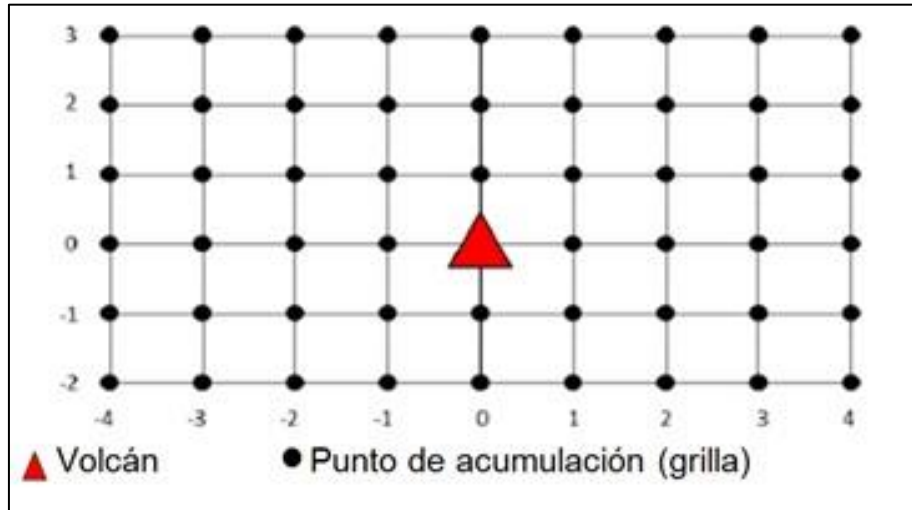


Figura 4. Muestra de grilla representativa de la dispersión de tefra alrededor del volcán en las simulaciones de Tephra2.

Donde los resultados son la distribución de masa por unidad de área de tefra (Kg/m^2) en cada localidad escogida y su dirección de dispersión, mostrados en un mapa de isolíneas (Isomasas), tanto en formato de texto (*.txt), como gráfico (imagen.png), editables en ambientes GIS.

Esta herramienta se trabaja desde el portal: <https://vhub.org/> (Vhub por su significado: *Collaborative Volcano Research and Risk Mitigation*), liderado por Buffalo University, en donde se han desarrollado varios software en línea para simulaciones de fenómenos volcánicos que han demostrado ser muy útiles tanto en la investigación como en la valoración de amenazas.

A continuación se describe la metodología que se siguió a fin de obtener los parámetros de entrada para caída de piroclastos, considerando el comportamiento del volcán Puracé y sus características.

3.1.1 Parámetros de entrada

Altura de la columna: $10000 + 4630 = 14630$ m.

Esta altura es calculada en metros sobre el nivel del mar, es decir debe sumarse la altura del cráter; así, si se considera una altura de 10 Km, se suman 4630 m de altura del cráter.

Se eligió este valor para la altura de la columna basados en el análisis de la actividad histórica del volcán (que se considera actividad vulcaniana),

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

información de archivos históricos e interpretación de datos de campo que indicaban una dispersión predominante hacia el SW-W y los resultados de las simulaciones coincidieron con una altura de vientos cercana a este valor de 10 km, razón por la cual, se emplea esta altura de pluma y no una mayor pues las direcciones de viento por encima de esta altura, dispersan la columna en sentidos diferentes a los que se han encontrado en el registro geológico.

Masa de la erupción: 3.8×10^{10} Kg

Este valor se ha obtenido a partir de la densidad y el volumen del depósito dejado por la actividad más reciente del volcán recolectado en sus laderas. La densidad se pudo hallar mediante un sencillo procedimiento de laboratorio con las muestras recolectadas de campo que se tenían disponibles (Figura 5).



Figura 5. Imágenes del procedimiento en laboratorio para la obtención de la densidad del depósito, que consistió en pesar la muestra, luego sumergirla en agua para hallar el volumen que desplaza y así calcular la densidad.

$$Densidad = \frac{masa [Kg]}{volumen [m3]}$$

$$Densidad\ del\ depósito = 1400 \frac{Kg}{m3} \quad (Aproximado)$$

El valor del volumen del depósito, debió ser calculado infiriendo espesores (isópacas) y áreas de dispersión, esto debido al escaso registro geológico que se conserva de piroclastos de caída en el volcán Puracé, como consecuencia de factores climáticos, lluvias, vientos, y mezcla de material de diferentes emisiones.

Esta inferencia se realizó a partir de la información histórica recopilada por Monsalve et al. 2012, a cerca de la última erupción del volcán ocurrida entre los años 1849 y 1977 y de algunos registros de tefra que aún se conservan alrededor del volcán, producto de su última actividad (Figura 6), aunque algunas veces está mezclado por acción eólica y fluvial de pequeños riachuelos que se forman por las lluvias, además del material de caídas que se conserva en los árboles, reportado por algunos arqueólogos de la Universidad del Cauca, cuando buscaban restos de antiguos asentamientos indígenas en el área del volcán (Figura 7).



Figura 6. Material lítico acumulado en el cono del volcán Puracé Actual.

Los datos históricos, algunos de ellos narraciones coloquiales, describían características del material piroclástico caído en diferentes sitios de la región, con lo cual pudieron interpretarse acumulación y extensión areal de las emisiones, de tal forma que se trazaron varias isolíneas de espesores sobre

una base topográfica 1:100.000 (Figura 8) y se calculó el volumen mínimo para la fase de caída piroclástica.



Figura 7. Fotografías del material acumulado en los árboles en los alrededores del Volcán Puracé (Vereda Cristales). Nótese la acumulación de fragmentos líticos grises y la vegetación ya cubriéndolos.



Figura 8. Representación inicial sobre base topográfica 1:100.000 de las isópacas luego de la revisión e interpretación de los relatos históricos y su relación con el registro geológico.

Estas isópacas corresponden de manera aproximada a los siguientes espesores: 1 m, 50 cm, 20 cm, 10 cm, 5 cm, 1 cm, 0.1 cm, 0.01cm (Figura 9).

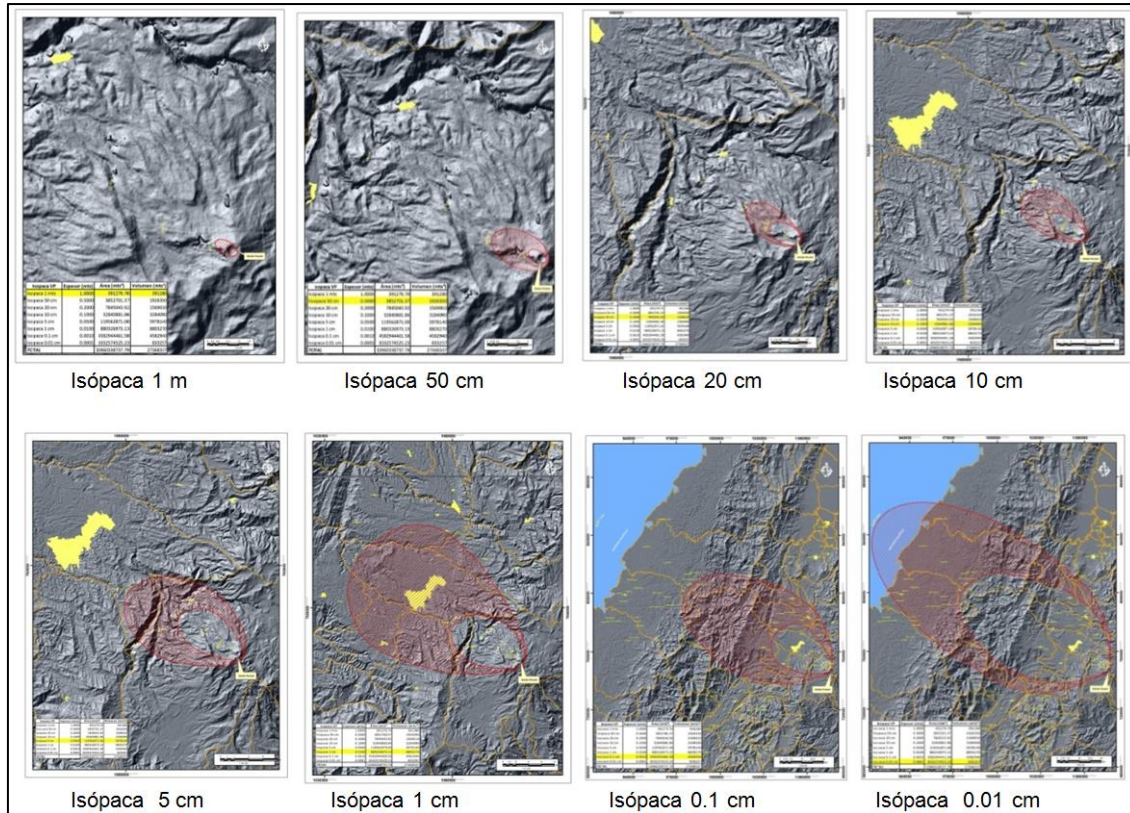


Figura 9. Isópacas asumidas para la erupción histórica del volcán Puracé, superpuestas al DEM.

El volumen estimado es la sumatoria del producto de las áreas y el valor de la Isópaca considerada (espesor). De esta forma los volúmenes mínimos estimados para el tipo de erupción considerada se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Volúmenes mínimos estimados para cada Isópaca considerada.

Isópaca (espesor)	Volumen estimado
1 m	391.230 m ³
50 cm	1'926.350 m ³
20 cm	1'569.010 m ³
10 cm	3'284.090 m ³
5 cm	5'978.140 m ³
1 cm	8'803.270 m ³
1 mm	4'582.940 m ³
0.1 mm	833.257 m ³
	$\Sigma = 27'368.337 \text{ m}^3$

$$\Sigma \text{ área x espesor} = 27'368.337 \text{ m}^3 = 0.002736 \text{ Km}^3$$

(Volumen mínimo de erupción para la fase de caída piroclástica)

Nota: Las áreas se calcularon usando ArcGIS.

Para hallar la masa de la erupción:

$$\text{masa} = \text{Densidad del depósito} * \text{volumen}$$

$$\text{masa} = 1400 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 27'368.337 \text{ m}^3$$

$$\text{Masa de la erupción} = 3.8 \times 10^{10} \text{ Kg} \text{ (Aproximada)}$$

Desviación estándar del tamaño de grano: 1

También conocida como selección; mide la uniformidad en tamaño de grano dentro de una muestra. El tamaño de partículas se modela como una distribución Gaussiana. Este parámetro describe la amplitud de esta campana (Figura 10).

Aunque en general las distribuciones de los depósitos son bimodales, pero con un pico dominante y más pequeño, el pico dominante puede ser tomado como

una distribución Gaussiana. Aquí se ha tomado el valor de 1 asumiendo una buena selección (simetría).

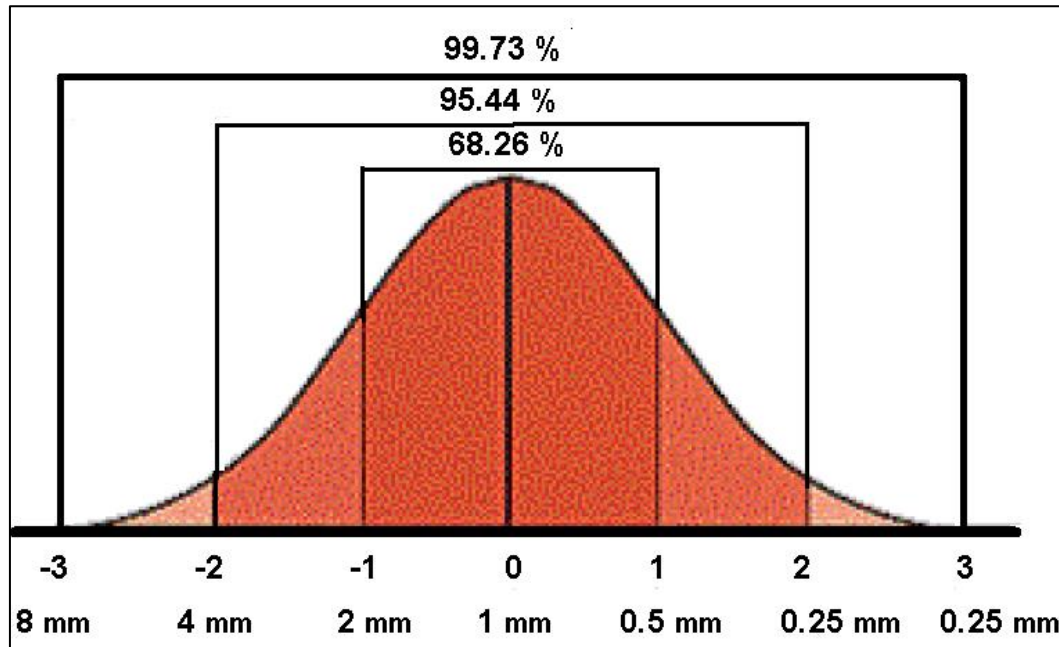


Figura 10. Distribución Gaussiana de tamaños de grano.

Coordenadas este y norte del cráter (utm): 344842 E; 255828 N

Corresponden a las coordenadas en unidades UTM del cráter del volcán.

Elevación del cráter (m): 4630 m.s.n.m

Elevación del cráter en metros sobre el nivel del mar.

Constante de eddy: 0.04

Valor de esta constante es específico para la Tierra.

Coeficiente de difusión (m²/s): 600 m²/s

Este valor ha sido calculado basado en las siguientes ecuaciones del trabajo de dispersión de Tephra de Suzuki (1983):

$$t'_i = (0.2z'_i)^{2/5} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$t'_i = \frac{0.0032z'_i^2}{K} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Dónde:

z_i = altura de la columna eruptiva (en metros). $z_i = 14630$ m

t'_i = cambio en el ancho de la columna eruptiva con la altura.

Entonces:

$$t'_i = ((0.2) (14630)^2)^{\frac{2}{5}} = 1128.78 \text{ m}^2$$

Luego, reemplazando en la Ecuación 2:

$$K = \frac{0.0032z_i^2}{t'_i}$$

$$K = \frac{0.0032(14630)^2}{1128.78}$$

$$K = 606.77 \text{ m}^2/\text{s}$$

Y puede aproximarse a 600 m/s pues para las simulaciones no son realmente muy sensibles los decimales.

Umbral del tiempo de caída (s): 1'000.000

Límite máximo de tiempo en que las partículas caerán. Es el intervalo de tiempo que permite a la mayor parte de ellas caer, garantizando que el modelo puede “lanzar” todas las partículas de tefra. Se toma un valor grande para asegurar que todo el material expulsado en la erupción sea esparcido.

Densidad de clastos pequeños (líticos) (Kg/m³): 1500

Densidad de clastos grandes (pómez) (Kg/m³): 1500

Para este modelo, la densidad de “pómez” es la correspondiente a las partículas más grandes, “menos densas” del depósito. La densidad de líticos hace referencia a la densidad de las partículas pequeñas “densas”. Los valores utilizados, han sido discutidos ampliamente con los geólogos que han trabajado estas caídas y conociendo, por los registros geológicos e históricos, que son caídas líticas, sólo se asumen valores de densidad para partículas grandes menos densas, pero no están siendo consideradas como pómez “*per se*”.

Nota: para transformar el valor de las curvas de isomasas (Kg/m²) en isópacas, se divide el valor de isomasa entre la densidad del depósito que se esté valorando.

Ejemplo.: Isomasa 100 Kg/m^2 : $100 \text{ Kg/m}^2 / 1400 \text{ Kg/m}^3 = 0.07 \text{ m}$, es decir una isópaca de 7 cm. El valor de la densidad del depósito se obtuvo como se describe en el parámetro de masa de la erupción.

Capas de la columna: 100

Este parámetro indica el número de segmentos en los que se quiere que el modelo divida verticalmente la columna eruptiva. Por ejemplo un valor de 100 indica que el modelo fracciona la columna en 100 capas verticales que se acumulan una sobre la otra. Se utilizó este número de divisiones por ser un dato sugerido en los instructivos de los autores del modelo.

Modelo de columna: 0

Describe la difusión de las partículas en la columna eruptiva con base en la masa expulsada. Puede tomar 2 valores: 0 o 1. Valor 0 corresponde a una pluma bien mezclada; Valor 1 corresponde a una distribución Suzuki. Sin embargo, se prefirió usar el valor de 1 ya que el modelo asume una columna bien mezclada.

Proporción de la columna: 0.7

Este parámetro puede tomar valores entre 0 y 1. Un valor de 0 indicará que las partículas serán liberadas a partir de toda la masa de la columna. Un valor de 0.9 indica que las partículas son liberadas sólo desde el último 10% de la columna (la parte más superior). Un valor de 0.2 indica la liberación del 80% de la masa de la columna.

Obtención de archivos de viento

Una vez se analizaron, escogieron y calcularon cada uno de los parámetros eruptivos, debieron obtenerse perfiles de viento para el inicio de las simulaciones, a través de la herramienta Wind Reanalysis (Palma, 2013) también perteneciente al portal Vhub, correspondiente a una base de datos que contiene información eólica de los años 1990 a 2011 y se seleccionaron aleatoriamente mil de estos archivos para realizar igual número de simulaciones (Figuras 11 a 15).

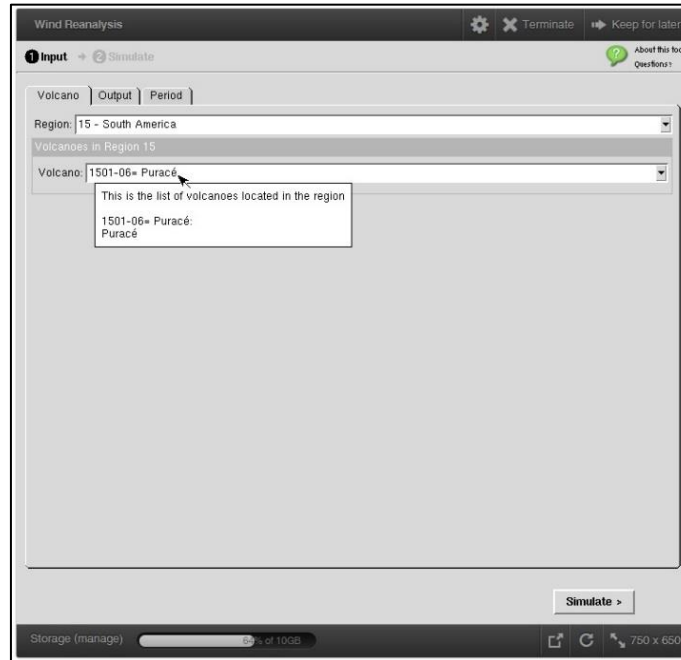


Figura 11. Paso 1: Selección del volcán, Herramienta Wind Reanalysis del Vhub (Palma, 2013)

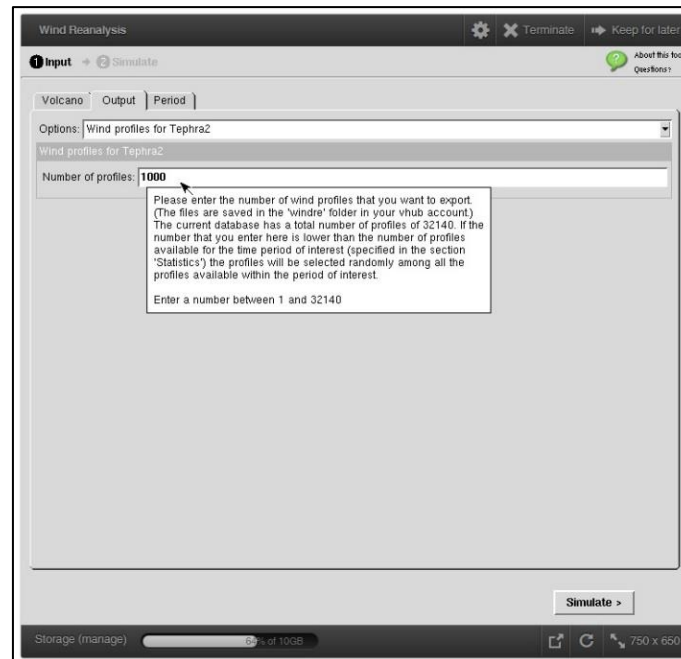


Figura 12. Paso 2: Selección del tipo de archivos y el número de perfiles de viento. Nota: esta base de datos contiene 32140 perfiles; si se elige un número menor a este, el programa los selecciona aleatoriamente.

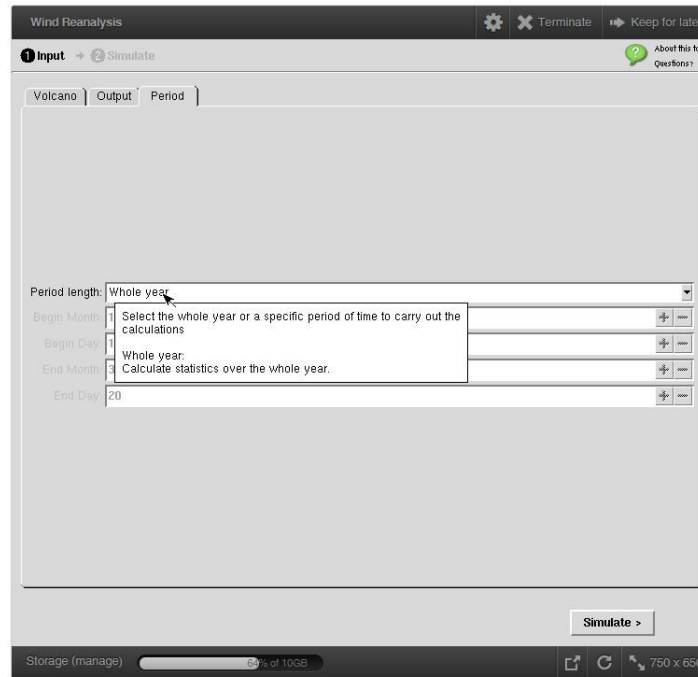


Figura 13. Paso 3: Selección del período de tiempo. Puede elegir todo el año o sólo un intervalo específico.

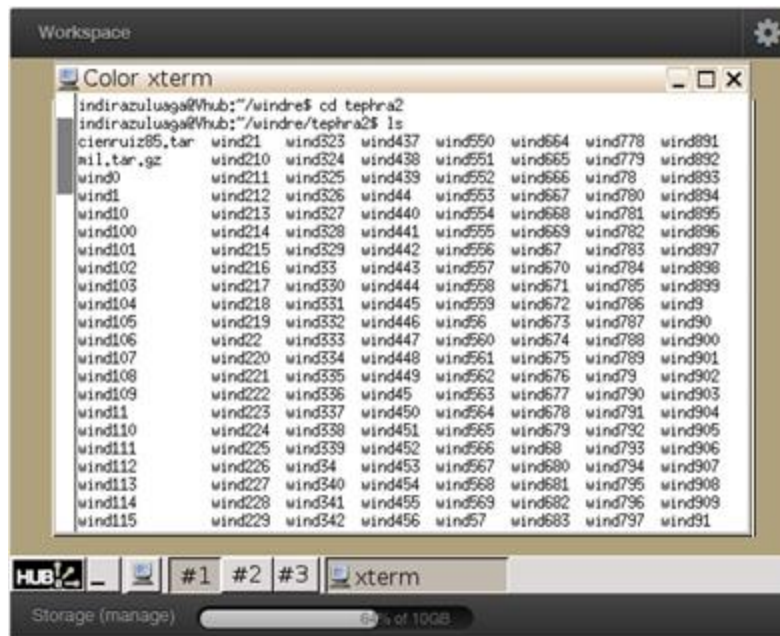


Figura 14. Paso 4: Luego de simular, los archivos generados de tipo [* .txt] son almacenados en el espacio Workspace del Vhub. Y luego son exportados a un procesador de texto.

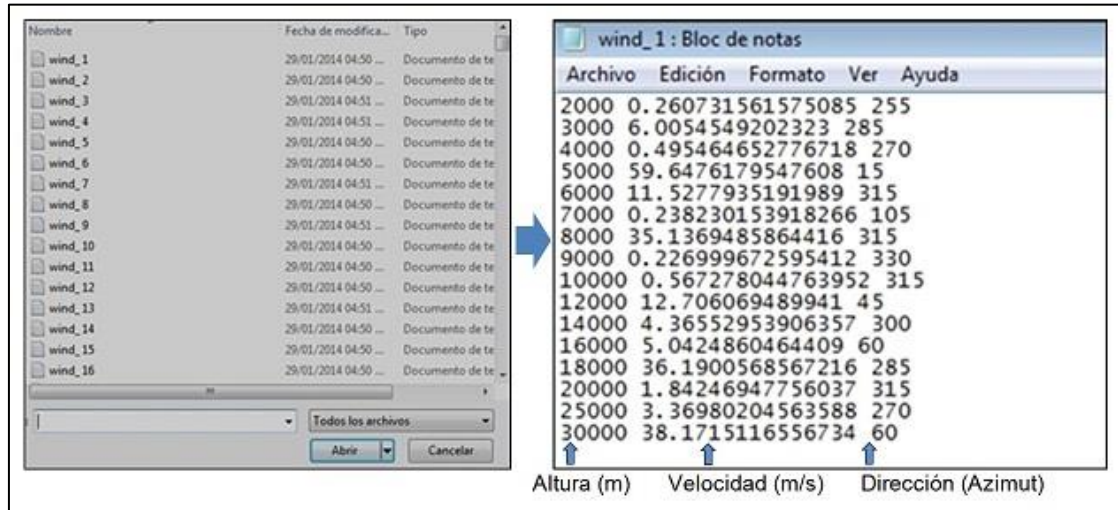


Figura 15. Ilustración del formato de presentación de la información de los archivos de viento.

3.1.2 Post-proceso archivos de simulación obtenidos con TEPHRA2

Dado el número de simulaciones requeridas para una representatividad estadística adecuada, el equipo técnico de Vhub, diseñó un aplicativo denominado Tephra2Automatic para correr en menor tiempo y maximizar el proceso de cómputo, con el cual se obtienen los mismo resultados (archivos y gráficos) que con Tephra2 (Figuras 16 a 18), correspondientes a datos de curvas de isomasa (Kg/m^2) (Figuras 18 y Anexo A). Estos datos de las curvas, se transformaron en isópacas con el valor de la densidad del depósito hallado anteriormente, que muestran la dirección acumulación en la dirección preferencial de los vientos. Para esto, se desarrolló un programa ejecutable con herramientas de GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) que transforma los archivos tipo `[* .dat]` y/o `[* .txt]` de salida de Tephra2 y Tephra2Automatic, a archivos de puntos en formato shapefile.

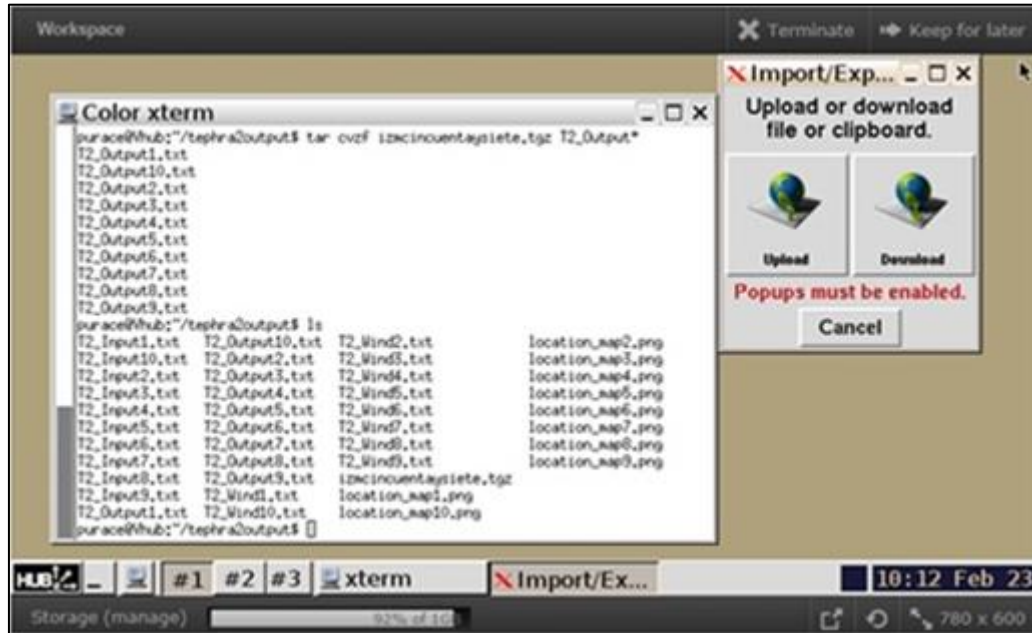


Figura 16. Archivos de salida de las simulaciones en Workspace, que contienen los datos de las curvas de isomasas.

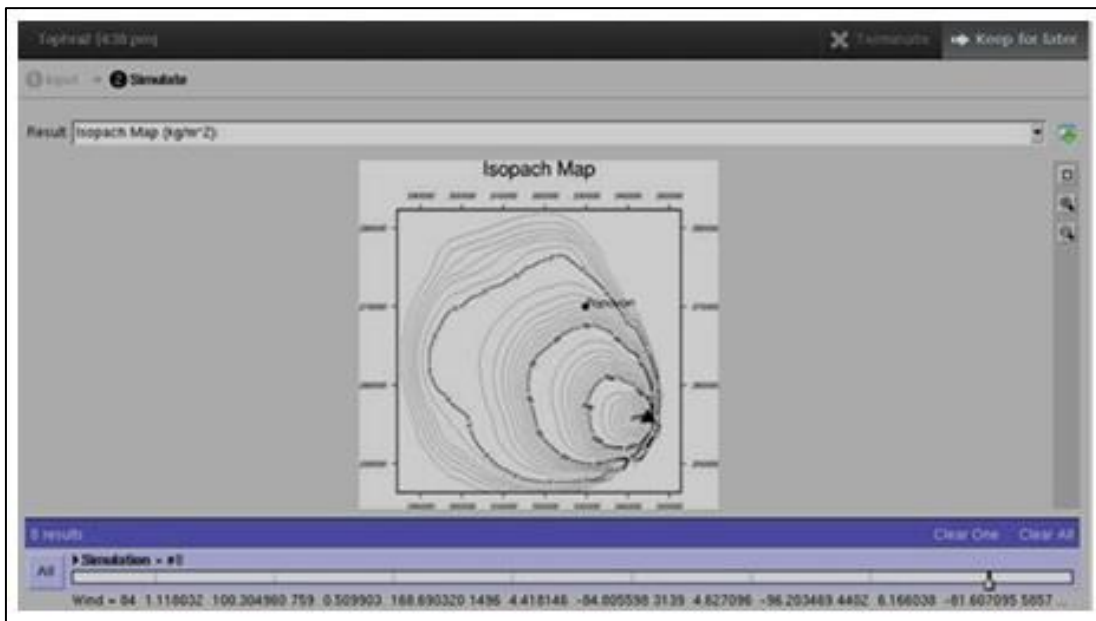


Figura 17. Ejemplo de gráfico de Isomasas, resultado de cada simulación con los parámetros de entrada iniciales.

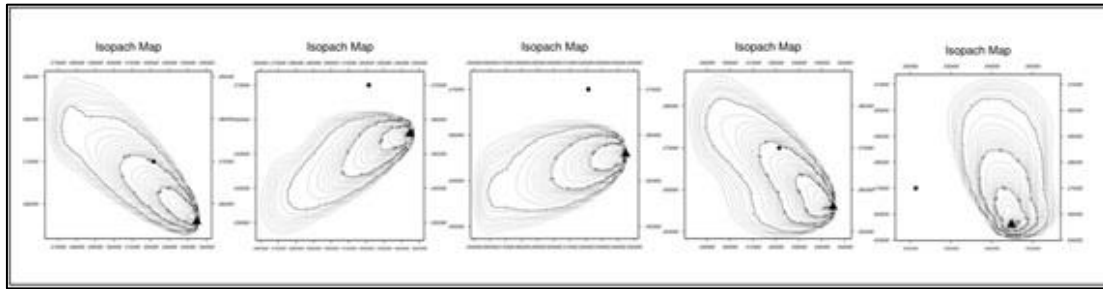


Figura 18. Algunas de las imágenes de resultados gráficos de Tephra2, sin post-proceso ni condicionamientos y cuyos archivos son los editados con el programa ejecutable de GDAL.

Una vez transformados, se genera una grilla con los valores de espesores de tefra para cada simulación realizada, con el objeto de delimitar las diferentes zonas de amenaza por caída piroclástica para el volcán, acorde con los criterios del SGC referentes a las delimitaciones de zonas de amenaza por el fenómeno de caída de tefra. Esta zonificación (Figuras 19 y 20), se hizo condicionando las áreas por depositación así: límites de 0,1 mm a 1 cm como la zona de amenaza baja (en color amarillo); entre 1 cm y 10 cm como zona de amenaza media (en color naranja); y mayor a 10 cm hasta la parte más cercana al cráter del volcán delimita la zona de amenaza alta (en color rojo), como se muestra en la figura 19.

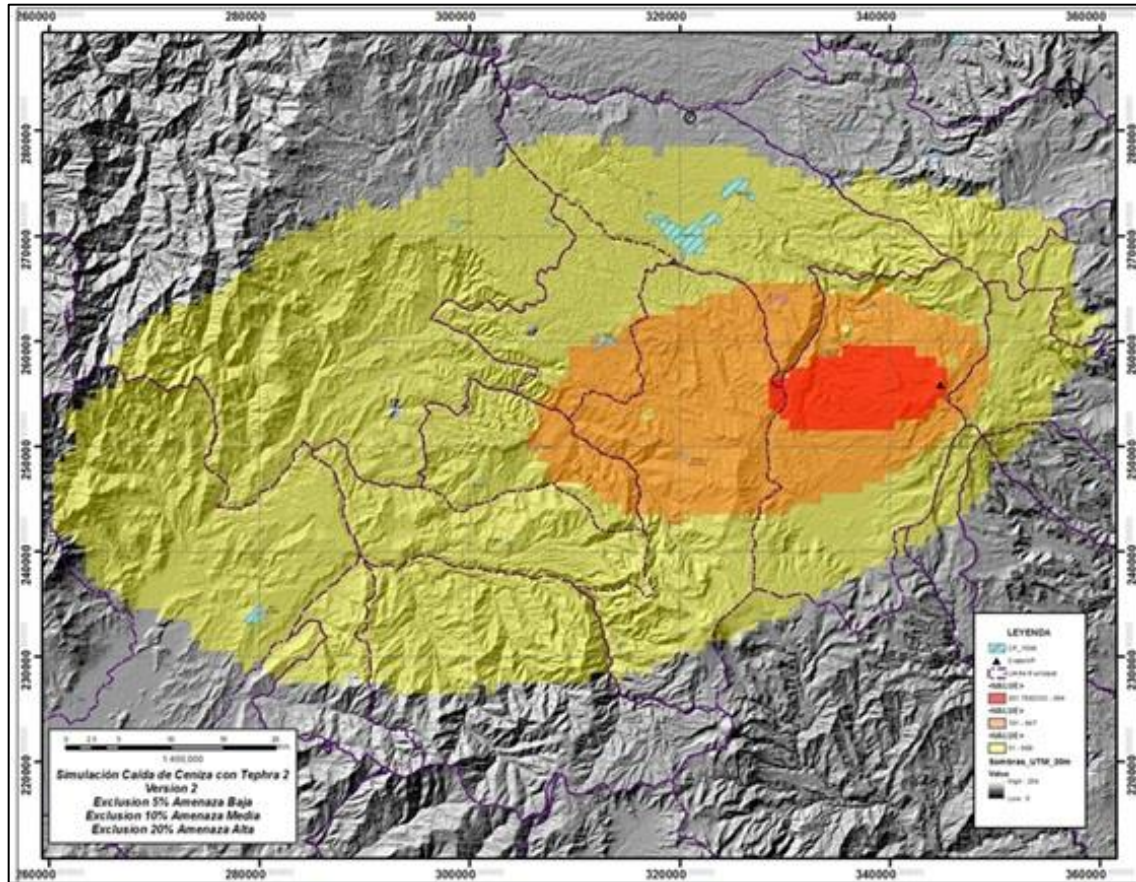


Figura 19. Representación de las 1000 simulaciones superpuestas y filtradas con los siguientes criterios: 0,1 mm a 1 cm, zona de amenaza baja (color amarillo); entre 1 cm y 10 cm, zona de amenaza media (color naranja); y mayor a 10 cm zona de amenaza alta (en color rojo).

Adicional a estas delimitaciones, se trazan tres círculos punteados (Figura 20) con centro en el punto de emisión (cráter actual del volcán), complementando las áreas de amenaza alta, media y baja en los mismos colores arriba mencionados, marcando las zonas que se verían afectadas si debido a la época del año ocurriera una distribución de material en direcciones diferentes a las de los vientos predominantes o en el caso de que se presente una columna eruptiva de altura diferente a la usada para las simulaciones (10 Km).

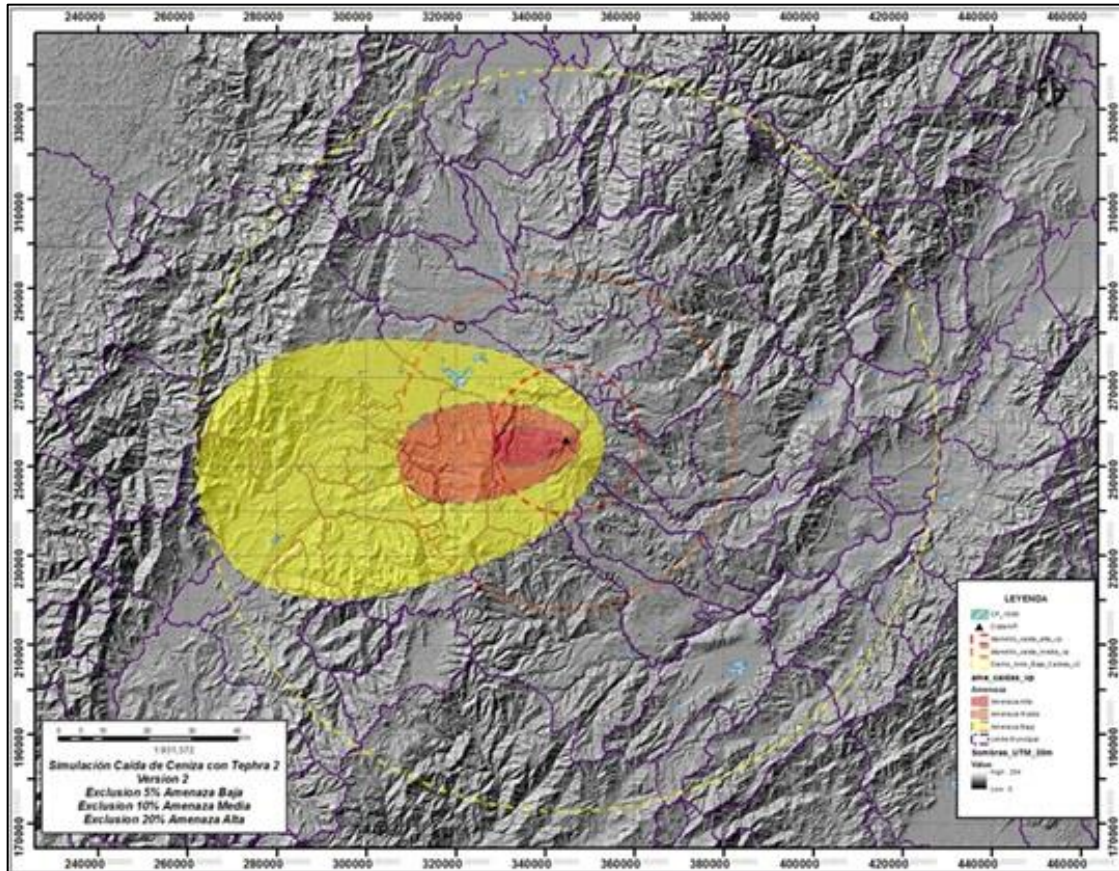


Figura 20. Mapa mostrando el resultado final de las simulaciones, delineando las áreas de amenaza baja, media y alta por caída de piroclastos, según los criterios del SGC.

4. SIMULACIÓN DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS

Para obtener los resultados de simulación presentados en este capítulo se optó por utilizar el programa TITAN 2D (Patra *et al.*, 2005), involucrando un dato del volumen estimado para los flujos piroclásticos, basado en los datos de campo, así como la determinación de diferentes parámetros, como son los coeficientes de fricción basal (la razón entre la altura descendida y la distancia recorrida por un flujo), el ángulo de fricción interna y la definición del sitios de inicio a partir de la generación de una pila que contiene el volumen a modelar; realizando diferentes test o pruebas, que permitieron analizar los mejores resultados que representarían las condiciones en las que se esperaba se produzca el fenómeno modelado.

Al volcán Puracé se asocian principalmente dos tipos de flujos piroclásticos; Los más comunes, flujos de ceniza y bloques debido a la explosión y colapso de domos, cuyo registro geológico generalmente se restringe a las partes altas del volcán y flujos de escoria generados por colapso de columna eruptiva, los cuales se alternan con los anteriores a lo largo de su historia eruptiva (Monsalve *et al.*, 2012). Según la evaluación de la amenaza volcánica (Monsalve, 2014), se toma como referencia para la simulación de flujos piroclásticos, los depósitos de flujo de escoria, registro de la actividad eruptiva ocurrida alrededor de 2100 A:P y que constituye, por sus características y distribución, el evento más importante ocurrido en el volcán Puracé.

Las simulaciones realizadas con el modelo Titán 2D, fueron trabajadas de manera determinística, es decir, se definieron una serie de parámetros y condiciones de inicio para el flujo de escoria, basados en la información de campo y en la literatura encontrada como soporte teórico para este ejercicio (Charbonnier *et al.*, 2011; Murcia *et al.*, 2010). Luego se corrieron las simulaciones sobre un Modelo de Elevación Digital (DEM) de cinco metros (del año 2009) facilitado por el IGAC.

El objetivo de estas simulaciones tiende al análisis y evaluación de los resultados obtenidos con el fin de ser utilizados como insumo a ser incluidos en la actualización del mapa de amenaza volcánica para el VPA.

4.1 TITAN 2D, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS PIROCLÁSTICOS EN EL VOLCÁN PURACÉ

Para el trabajo de modelamiento, se utilizó el código en línea TITAN 2D, el cual es un programa informático de libre acceso desarrollado por el grupo GMFG (Geophysical Mass Flow Group, 2007) en Suny Buffalo (EE.UU.). Para mayor información sobre el programa, consultar la documentación y casos de estudio dispuestos en [HTTPS://VHUB.ORG](https://vhub.org) y [HTTP://WWW.GMFG.BUFFALO.EDU/](http://www.gmfg.buffalo.edu/). El programa fue originalmente diseñado para simular flujos granulares secos con un área original de colapso sobre una superficie de terreno natural (Pitman *et al.*, 2003; Patra *et al.*, 2005), pero también es adecuado para simular corrientes de densidad piroclásticas que se generan del colapso de una porción importante de domos de lava, o bien a partir de colapso de columnas eruptivas pequeñas.

El programa está basado en las ecuaciones de la *conservación de la masa* y de *Momentum* y el modelo *Mohr-Coulomb*:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh \sin \alpha_x - \frac{1}{2} k_{actpass} \frac{\partial}{\partial x}(gh^2 \cos \alpha) + \tau_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hvu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) = gh \sin \alpha_y - \frac{1}{2} k_{actpass} \frac{\partial}{\partial y}(gh^2 \cos \alpha) + \tau_y \quad (3)$$

Figura 21. Ecuaciones de conservación de masa (1) y de momentum en los ejes x, y (2 y 3). Modelo para aguas poco profundas con un término de resistencia a la fricción basado en la ley de Mohr-Coulomb.

Las ecuaciones de conservación de masa y de momentum son resueltas utilizando un término de fricción de Coulomb para la interfaz entre el material granular y la superficie basal, y un término de fricción interna del flujo (Pitman *et al.*, 2003).

4.2 DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CODIGO TITAN 2D

Los datos y parámetros utilizados para realizar las simulaciones mediante titán 2D se listan a continuación:

4.2.1 Especificación de los datos SIG (DEM)

De acuerdo a varios autores contar con un DEM de la zona de estudio que tenga una resolución espacial adecuada, provee la base para un buen resultado en el modelamiento del flujo (es importante anotar que se debe siempre realizar un análisis de la calidad del DEM); para el caso del VPA se cuenta con imágenes de radar del sensor GeoSAR (con resolución espacial de 5 metros); suministradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi; estas imágenes se empalmaron y organizaron en una estructura de datos en formato GRASS que contiene el DEM de la zona de estudio en coordenadas UTM Zona 18N, que es el sistema que acepta el código TITAN 2D.

4.2.2 Especificación de los parámetros del sistema

Los parámetros utilizados para correr la simulación fueron definidos y evaluados con base en el informe de Geología y Estratigrafía del Volcán Puracé Actual (VPA) (Monsalve *et al.*, 2012); el asesoramiento de los expertos del grupo VHUB y por medio de la revisión del estado del arte referente a la aplicación de investigaciones para la simulación computacional de fenómenos volcánicos a nivel mundial.

Inicialmente se analizó la información contenida en el informe de Geología y Estratigrafía del VPA, retomando los datos sobre el depósito de flujo de escoria (base de la parametrización para el modelamiento) que hace parte de la Unidad Eruptiva Vinagre definida por Monsalve *et al.*, (2012), la cual está constituida por depósitos de corriente de densidad piroclástica (CDP), que presentan una amplia distribución alrededor del volcán, aflorando desde la base del cono del VPA, recorriendo los principales valles de los ríos y quebradas que nacen en él; de tal modo, se recreó la distribución original del flujo de escoria con base en los datos de las estaciones de campo, especificando su espesor en diferentes puntos del área cartografiada (figura 22); este ejercicio permitió obtener el volumen del flujo de escoria, estimado en un valor de 21×10^6 m³, dato de referencia para realizar las simulaciones con Titán 2D.

Internamente TITAN 2D requiere ingresar para las simulaciones las siguientes especificaciones:

4.2.2.1 Tiempo de simulación y número máximo pasos computacionales

Este valor hace referencia al tiempo que se debe definir para la duración de la simulación; para esta caso se determinó en 50.000 pasos computacionales, tomando como referencia el evento geológico que se está simulando (flujo piroclástico de escoria), ya que este valor determinó, según los ensayos

computacionales, lo que se consideró fuera el avance de este flujo durante su emplazamiento.

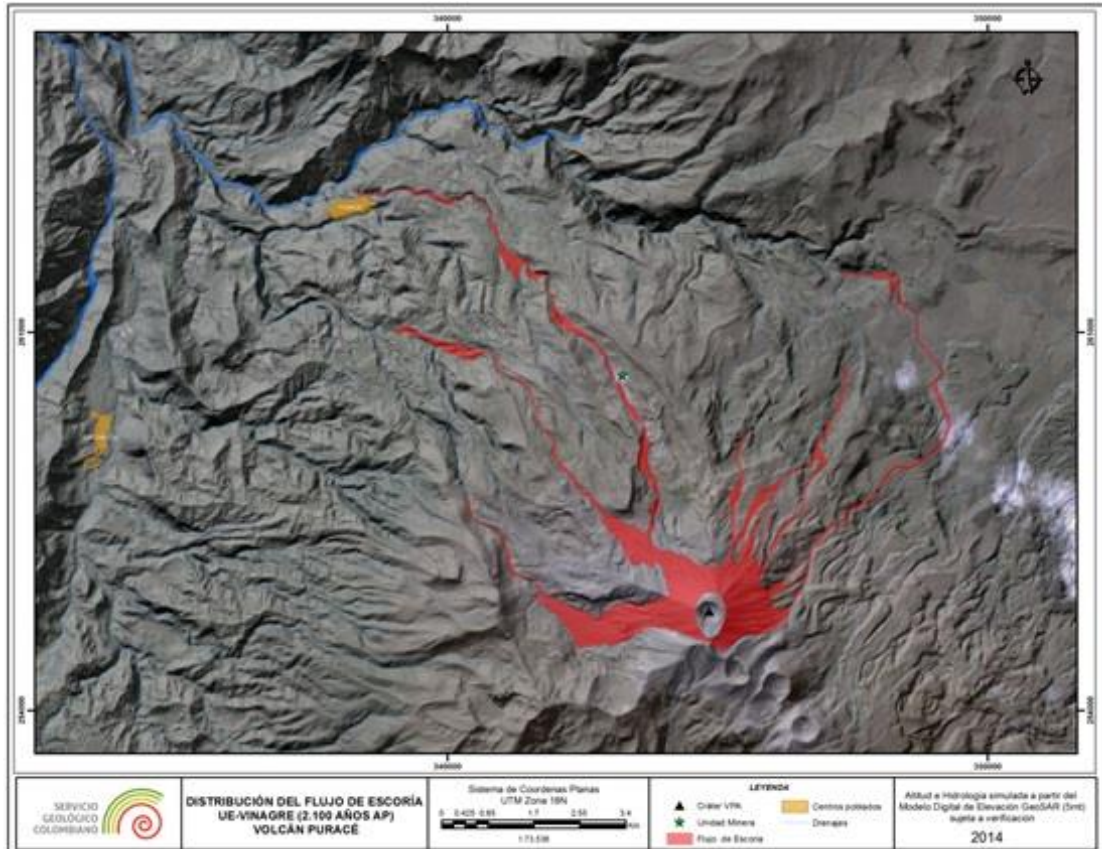


Figura 22. Distribución del flujo de escoria de la UE Vinagre en el volcán Puracé.

4.2.2.2 Propiedades del material

Las propiedades del material están relacionadas con la aproximación a las características físicas y de reología del flujo; en este caso se empleó un valor de 34° para el ángulo de fricción interno y un valor de 10° para el ángulo de fricción basal. En el caso del ángulo de fricción basal se tuvo en cuenta el cálculo del coeficiente de Heim y la clasificación que propone Stinton *et al.*, (2004) en donde se correlaciona las superficies sobre las que se mueven los flujos con su respectivo coeficiente de fricción, definiendo un rango de ángulos de fricción basal asignados a cada superficie, (Tabla 2).

Tabla 2. Ángulos de fricción basal propuestos por Stinton (2004), de acuerdo al coeficiente de fricción basal formado entre un flujo y la superficie sobre la que se desliza.

Material superficie	Coefficientes de fricción basal	Ángulos de fricción basal
Hielo glaciario y nieve	0.037-0.50	2-26°
Depósitos aluviales	0.10-0.20	6-11°
Pendientes con vegetación	0.21-0.75	12-37°
Depósitos glaciofluviales	0.15-0.30	9-17°
Roca fresca	0.38-0.95	21-44°

Realizando los cálculos para obtener el coeficiente de fricción basal mediante la aplicación de la relación (H/L), tomando como referencia los puntos de interés desde el cráter hasta los lugares con afloramientos del flujo de escoria (Quebrada Agua Blanca, Río Anambío, Río Vinagre, Río Cocuy y Río San Francisco), se obtiene un rango que oscila entre 0,25 y 0,27 que de acuerdo a Stinton *et al.*, (2004) se puede aplicar para trabajar con ángulos de fricción desde los nueve hasta diecisiete grados.

4.2.2.3 Volumen simulado

El volumen simulado se estableció con base en el trabajo de campo; tomando como referencia los datos de espesor encontrado en los depósitos de escoria de las estaciones localizadas a lo largo de la zona de influencia del volcán (Tabla 3), estableciendo un valor de $21 \times 10^6 \text{ m}^3$ (figura 23).

Tabla 3. Relación de las estaciones de campo con la información sobre los datos de espesores encontrados en los depósitos de flujo de escoria de la unidad eruptiva vinagre en el VPA.

Código	Depósito	Fuente inferida	Espesor máximo	Espesor mínimo	Este UTM	Norte UTM	Altura msnm	Alcance observado desde la fuente (km)
MLVP003	F. ESCORIA	VP	7 MTS	7 MTS	1072907	747870	3362	3.4
MLVP004	F. ESCORIA	VP	8 MTS	8 MTS	1073003	747635	3360	3.2
MLVP017	F. ESCORIA	VP	7 MTS	7 MTS	1073989	749317	3935	2.9
MLVP019	F. ESCORIA	VP	9 MTS	9 MTS	1074346	749041	3989	2.6
MLVP027	F. ESCORIA	VP	4 MTS	4 MTS	1074386	751337	3665	4.4
MLVP030	F. ESCORIA	VP	6 MTS	6 MTS	1074056	752151	3528	5.3
MLVP040	F. ESCORIA	VP	4 MTS	4 MTS	1079491	753220	3408	6.8
MLVP044	F. ESCORIA	VP	3 MTS	3 MTS	1071030	755148	3557	9.4
LPVP046	F. ESCORIA	VP	4 MTS	3 MTS	1072566	753911	3107	7.5
MLVP047	F. ESCORIA	VP	3 MTS	3 MTS	1072172	754273	3044	7.9
LPVP067	F. ESCORIA	VP	15 MTS	15 MTS	1074974	749680	ND	2.6
MLVP163	F. ESCORIA	VP	15 MTS	15 MTS	1074725	750749	3580	3.7
MLVP141	F. ESCORIA	VP	8 MTS	8 MTS	1075365	748498	4090	1.5
MLVP151	F. ESCORIA	VP	10 MTS	4 MTS	1074755	750469	3660	3.4
MLAP042	F. ESCORIA	VP	1 MTS	ND	1076147	749193	4164	1.8
MLAP043	F. ESCORIA	VP	1 MTS	ND	1076900	749006	4300	1.8
LNAP006	F. ESCORIA	VP	ND	ND	1074369	749219	3959	2.6
LNAP002	F. ESCORIA	VP	ND	ND	1075076	748552	4156	1.7

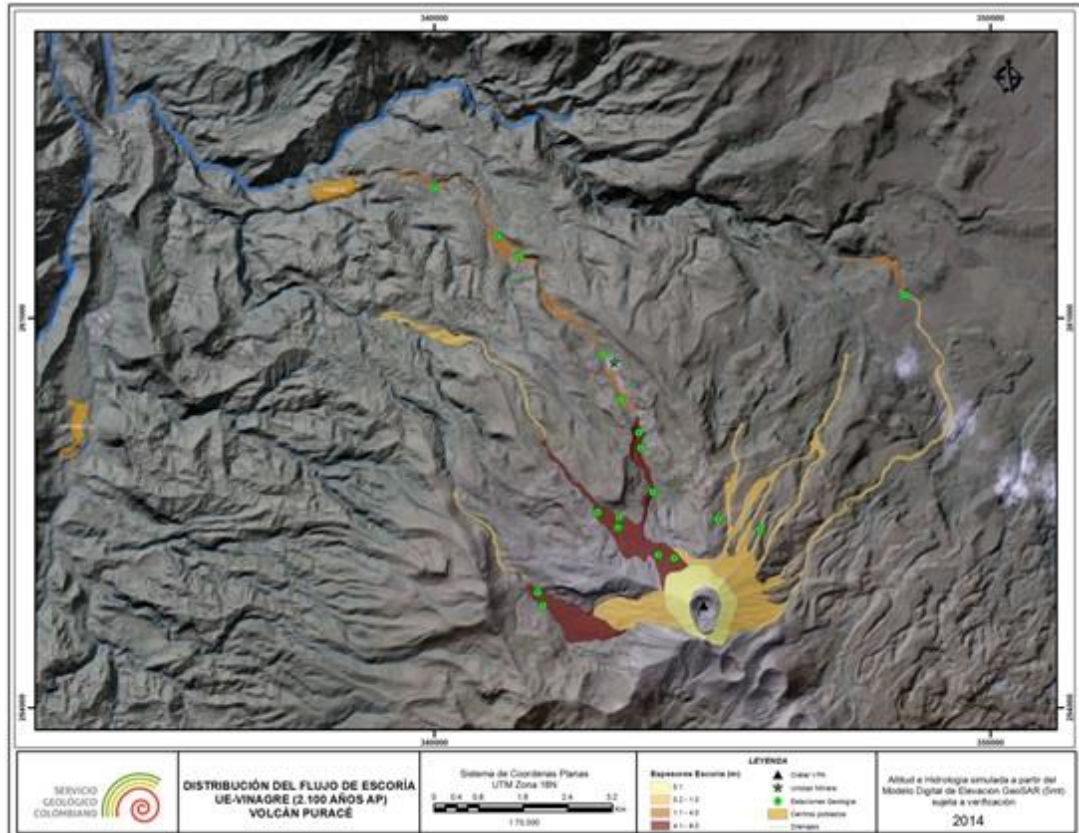


Figura 23. Espesor del flujo de escoria de la UE Vinagre en el volcán Puracé.

4.2.2.4 Espesor mínimo del depósito final

Titán 2D requiere del ingreso de un valor para el espesor mínimo del flujo simulado con el objeto de evitar que las celdas en la margen exterior del flujo almacenen una capa de material muy delgada físicamente ficticia; este valor se estableció en 0.1 metros considerando el volumen del flujo a simular.

4.2.2.5 Coordenadas de origen y dirección de la simulación

Esta opción permite definir las coordenadas asignadas para el punto del cráter desde donde se originará la simulación (origen de la pila) y la dirección de colapso de la columna eruptiva que origina el flujo de Piroclastos.

4.2.2.6 Velocidad inicial

La velocidad inicial probable del flujo, asumiendo una altura de colapso, es posible determinarla mediante la relación entre la energía cinética y la energía potencial, siendo la velocidad equivalente a $v = \sqrt{2gh}$, donde “g” corresponde a la

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

aceleración debida a la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$) y “h”, a la altura del colapso de la columna (Murcia et al., 2010).

Para el presente informe se trabajó con alturas de colapso de 200 metros con un volumen de $21 \times 10^6 \text{ m}^3$, obteniendo una velocidad inicial de 59 m/s; este valor de velocidad se implementó en las simulaciones iniciales (test para calibración de los parámetros a trabajar en los modelamientos del flujo de escoria con la herramienta TITAN 2D), pero de acuerdo a las recomendaciones expresadas en las reuniones con los expertos de VHUB, para las simulaciones finales se trabajó con “0 m/s” como parámetro de velocidad a ingresar en el programa; esto debido a que según consideraciones expresadas por los expertos, este tipo de flujos (piroclásticos) no tiene una velocidad inicial incorporada, al contrario de lo que pasa como, por ejemplo, en un *blast* o una explosión lateral dirigida, en donde la velocidad inicial que tiene el fenómeno reviste una mayor consideración.

Cabe aclarar que este parámetro de “velocidad inicial” se refiere a la componente horizontal del vector velocidad, que para el caso del colapso gravitacional de una columna eruptiva, se considera, en un uso apropiado de la herramienta Titan2D, como 0 m/s para la dirección horizontal del movimiento. En este caso, sólo se contempla una velocidad inicial en sentido vertical, que varía de acuerdo a la altura de colapso y la aceleración de la gravedad.

4.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA EL FLUJO DE ESCORIA DEL VPA, UTILIZANDO TITÁN 2D

Para el trabajo de simulación de flujos piroclásticos, como procedimiento metodológico, se estableció la realización de pruebas de simulación (alrededor de 80 test) que contemplaran el cambio en datos exigidos por el código buscando analizar el impacto de ciertos parámetros como la altura de colapso de la pila, el ángulo de fricción basal y los sitios de inicio, logrando observar su incidencia en los resultados obtenidos con el uso de la herramienta de simulación.

Como ejemplo, en la figura 24 se puede observar la incidencia del ángulo de fricción basal en el resultado de las simulaciones; entre mayor el valor asignado al parámetro, el recorrido, cubrimiento y alcance del flujo es menor respecto de su punto de emisión.

Luego de haber realizado los test respectivos se optó por trabajar en cinco simulaciones que se presentan como producto del trabajo realizado y de las cuales se tomó la simulación número cinco como insumo para la actualización del mapa de amenaza volcánica de Puracé en su segunda versión.

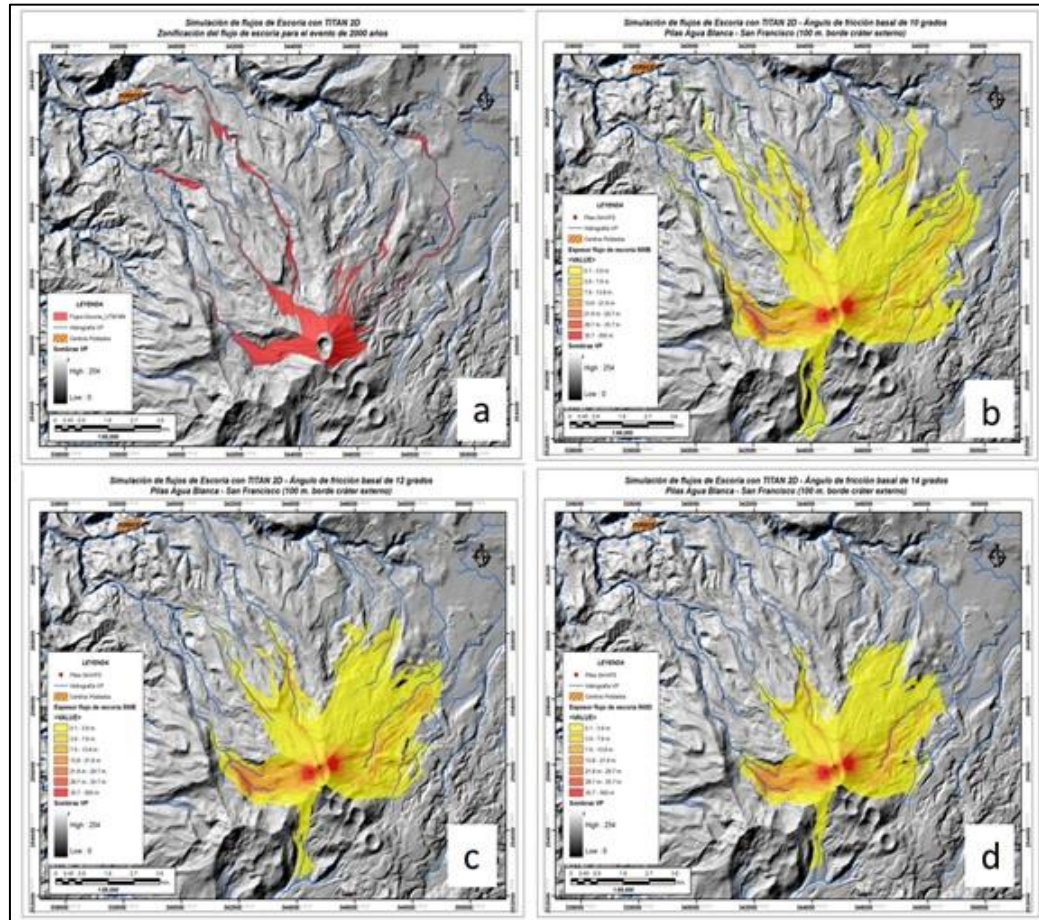


Figura 24. Simulación de flujos de escoria, con base en el depósito de la Unidad Eruptiva Vinagre (a), resultados con el cambio en ángulos de fricción basal de 10 (b), 12 (c) y 14 (d) grados, puntos de emisión quebrada Agua Blanca y río San Francisco.

Titán 2D genera archivos que deben ser descargados desde el servidor de VHUB y procesados para poder ser leídos y manipulados en un software GIS; Los resultados obtenidos dependerán del archivo seleccionado para el análisis e interpretación que se requiere obtener, ya que Titán 2D arroja datos de área total cubierta por el flujo y su espesor, datos de velocidades y recorrido del flujo (expresado en m/s) y el archivo de distribución y espesor de los depósitos (expresado en metros) para cada escena de simulación.

4.3.1 Simulación número uno (SimVPA_01) para flujo de escoria volcán Puracé

La simulación número uno, se realizó tomando como criterios la ubicación de cuatro pilas (puntos de emisión), localizadas sobre los flancos del volcán cada

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

90 grados, cubriendo todos los sectores por donde pueda ocurrir un colapso de columna en una futura erupción del VPA.

Para la simulación número uno que se corrió sobre Titán 2D se ingresaron los siguientes parámetros (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.1, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.

CODIGO SIMULACIÓN		PILA							ORIGEN PILA (WGS84 - UTM Zona 18N)	
Sim	No. de Pilas	Angulo de Orientación	Velocidad Inicial (m/s)	Dirección Inicial	Espesor máximo Inicial (m)	Extensión Eje Mayor (m)	Extensión Eje Menor (m)	Volumen por Pila (m ³)	Coord. Este	Coord. Norte
SimVP 01	4	0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	344841	256411
		0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	345468	255793
		0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	344851	255241
		0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	344272	255791
Propiedades del Material										
Ángulo de Fricción Interno: 34°					Ángulo de Fricción Basal: 10°					

Resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se reparte por todos los flancos del volcán cubriendo los valles de las quebrada Agua Blanca y Río Blanco, y los valles de los ríos Vinagre, Anambío, Cocuy y San Francisco. Como se observa en la figura 25, es evidente que se presenta un mayor control topográfico hacia el sector noroccidente del volcán, en donde el flujo llega a alcanzar una distancia de aproximadamente diez kilómetros respecto de los puntos de emisión; hacia el sector oriental el flujo tiene una menor canalización y se esparce de forma radial, extendiéndose hasta unos seis kilómetros de distancia respecto del VPA.

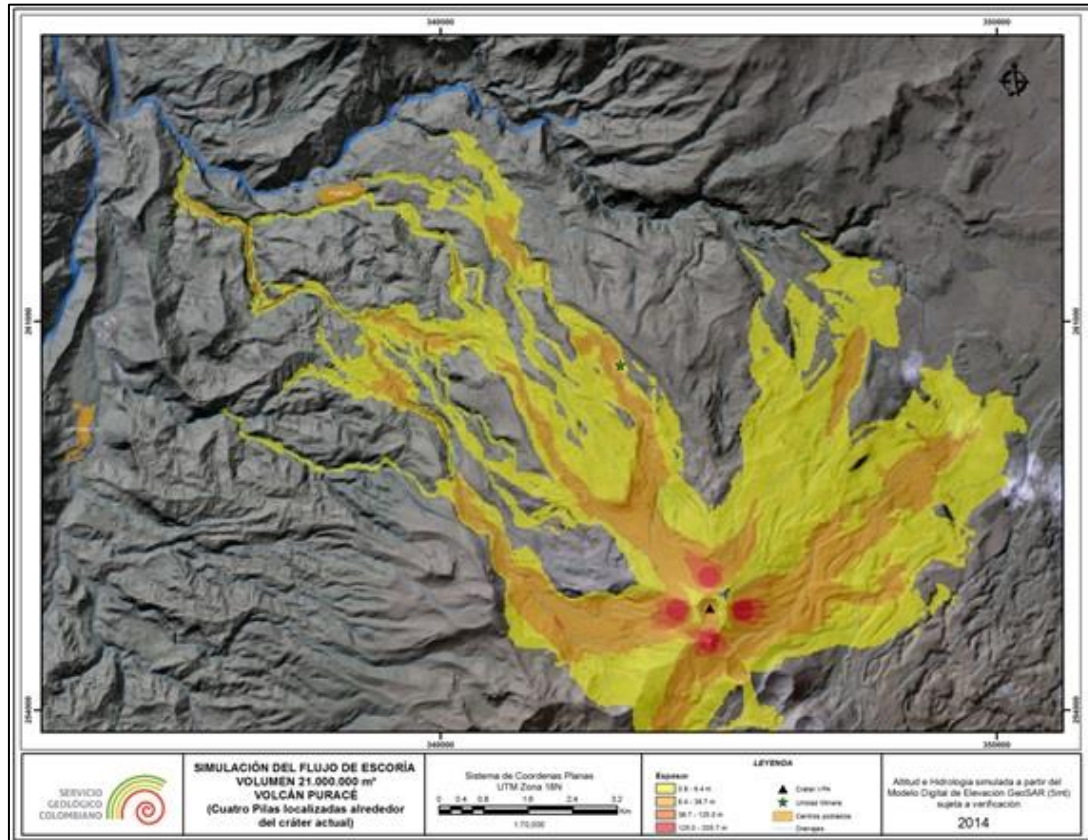


Figura 25. Resultado de la simulación número 1 (pilas localizadas sobre los flancos del volcán cada 90 grados): distribución y altura de inundación para un flujo de escoria del VPA.

4.3.2 Simulación número dos (SimVPA_02) para flujo de escoria volcán Puracé

Para la simulación número dos el volumen de referencia ($21 \times 10^6 \text{ m}^3$), se repartió en cuatro pilas localizadas sobre los flancos del volcán y direccionadas en relación con la distribución de las principales vertientes que nacen en la zona. El volumen se distribuyó con base en los datos de espesor encontrado en los afloramientos y colectados en las estaciones de campo realizadas como parte del trabajo compilado en el informe de Geología y Estratigrafía del VPA.

Las zonas identificadas para la localización de las pilas y su volumen correspondiente son: Zona Quebrada Agua Blanca ($6.340.000 \text{ m}^3$), zona Anambío - Vinagre ($11.490.000 \text{ m}^3$), zona Río San Francisco ($1.420.000 \text{ m}^3$) y Zona Río Cocuy ($1.785.000 \text{ m}^3$).

Para la simulación número dos que se corrió sobre Titán 2D se ingresaron los siguientes parámetros (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.2, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.

CODIGO SIMULACIÓN		PILA							ORIGEN PILA (WGS84 - UTM Zona 18N)	
Sim	No. de Pilas	Angulo de Orientación	Velocidad Inicial (m/s)	Dirección Inicial	Espesor máximo Inicial (m)	Extensión Eje Mayor (m)	Extensión Eje Menor (m)	Volumen por Pila (m ³)	Coord. Este	Coord. Norte
SimVP 02	4	-175°	0	0°	200	110	92	6340000	344299	255787
		138°	0	0°	200	145	126	11490000	344439	256257
		68°	0	0°	200	60	38	1420000	345061	256312
		5°	0	0°	200	65	44	1785000	345445	255791
Propiedades del Material										
Ángulo de Fricción Interno: 34°					Ángulo de Fricción Basal: 10°					

Resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por sectores específicos del volcán cubriendo los valles de la quebrada Agua Blanca y los valles de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco.

Como se observa en la figura 26, se presenta un mayor distribución y control topográfico hacia el sector noroccidente del volcán en los valles de la Quebrada Agua Blanca y los Ríos Anambío y Vinagre, en donde el recorrido del flujo llega a alcanzar una distancia de aproximadamente 9.4 km respecto de los puntos de emisión localizados en esta zona; hacia el sector nororiental el flujo se esparce de forma radial y con un control de la topografía mucho mejor en comparación con los resultados para la misma zona en la simulación número uno.

En comparación a la simulación anterior los espesores alcanzados por el flujo modelado en varios sectores son mucho menores, eso es debido a que el volumen se ha repartido y por lógica las áreas alcanzadas y su nivel respecto de la base del terreno es considerablemente diferente.

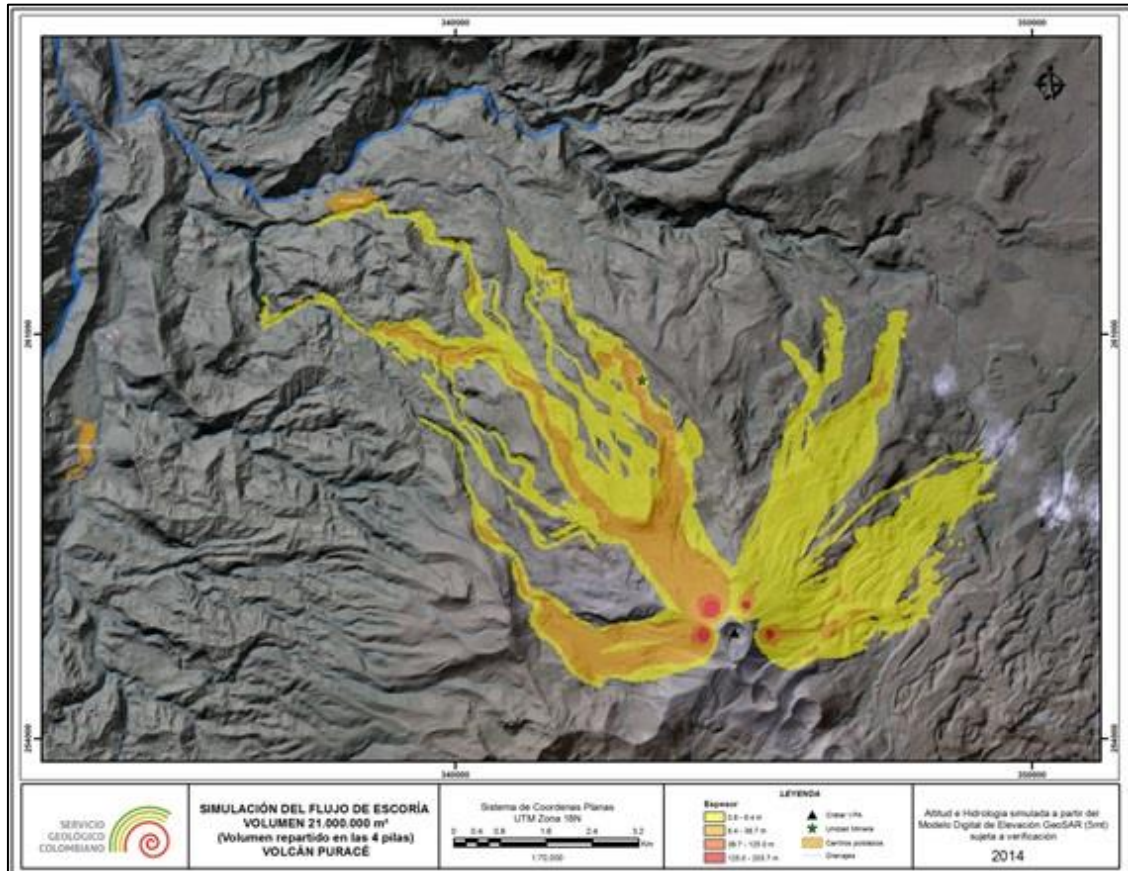


Figura 26. Resultado de la simulación número 2 (cuatro pilas localizadas en los flancos del volcán direccionadas de acuerdo a las principales vertientes que nacen en la zona): distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.

4.3.3 Simulación número tres (SimVPA_03) para el flujo de escoria volcán Puracé

Para la simulación número tres el volumen de referencia ($21 \times 10^6 \text{ m}^3$), se concentró en una única pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé. En la simulación número tres que se corrió sobre Titán 2D se ingresaron los parámetros listados en la tabla 6.

En los resultados de la simulación se observa una distribución del flujo en forma radial, pero a diferencia de las anteriores, este tiene menor dispersión, cubriendo en menor proporción los valles de la quebrada Agua Blanca y los valles de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco.

Tabla 6. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.3, tomando como referencia el volumen y la distribución del flujo de escoria de la Unidad Eruptiva Vinagre.

CODIGO SIMULACIÓN		PILA							ORIGEN PILA (WGS84 - UTM Zona 18N)	
Sim	No. de Pilas	Angulo de Orientación	Velocidad Inicial (m/s)	Dirección Inicial	Espesor máximo Inicial (m)	Extensión Eje Mayor (m)	Extensión Eje Menor (m)	Volumen por Pila (m ³)	Coord. Este	Coord. Norte
SimVP 03	1	0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	344845	255790
Propiedades del Material										
Ángulo de Fricción Interno: 34°					Ángulo de Fricción Basal: 10°					

En la figura 27, se observa que el área cubierta por el flujo hacia el sector noroccidente del volcán en el valle de la Quebrada Agua Blanca y los Ríos Anambío y Vinagre es mucho menor, al igual que las alturas alcanzadas por el mismo a sus paso por esta zona; alcanzando distancias de aproximadamente 8.5 km respecto del punto de emisión. Hacia el sector oriental el flujo se esparce con mayor incidencia en la cuenca del Río San Francisco, alcanzando distancias de más o menos cinco kilómetros con respecto al cráter actual del VPA.

En esta simulación su pudo determinar que casi una tercera parte del volumen (7.000.000 m³) se quedó concentrado en el área cubierta por el cráter actual del volcán (que tiene un diámetro aproximado de 500 metros y una profundidad de más o menos 100 metros), esto debido a las características de la topografía del mismo y por la definición del sitio seleccionado para localizar la pila en la simulación.

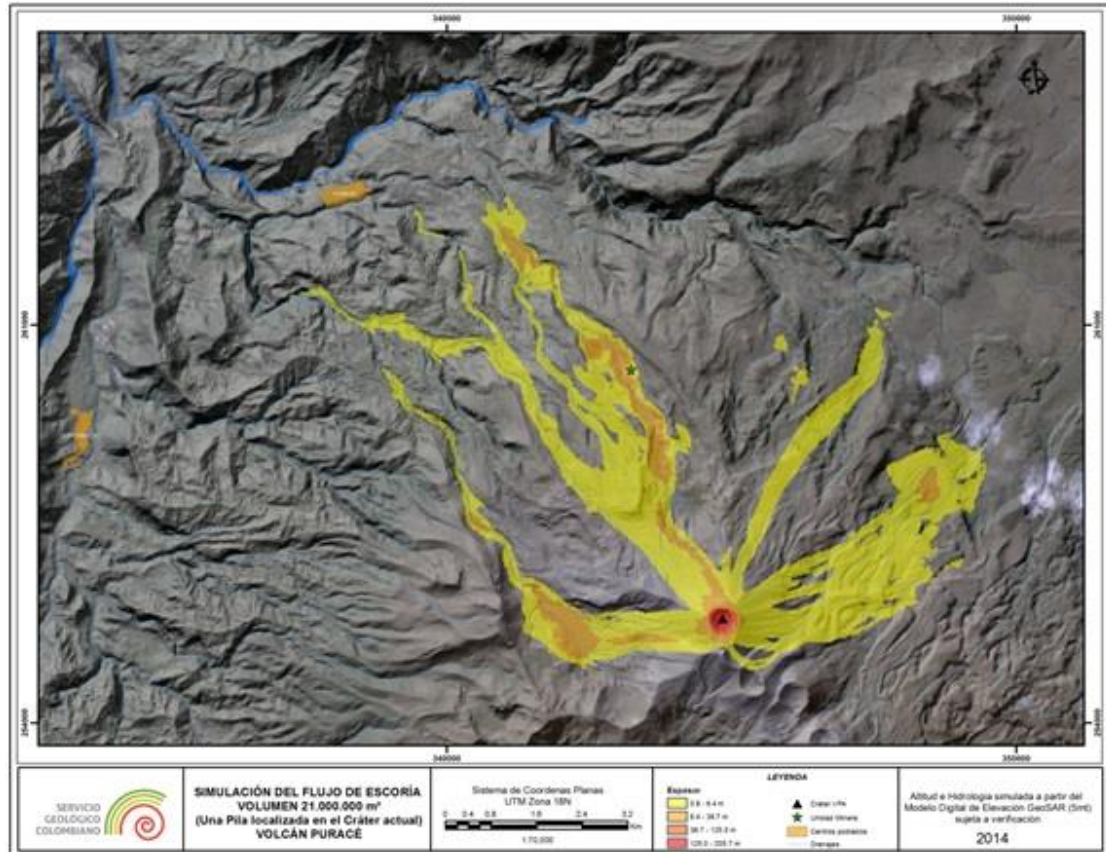


Figura 27. Resultado de la simulación número 3 (una pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé): distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.

4.3.4 Simulación número cuatro (SimVPA_04) para el flujo de escoria volcán Puracé

Para la simulación número cuatro, al igual que en la simulación anterior, el volumen de referencia ($21 \times 10^6 \text{ m}^3$), se concentró en una única pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé.

En este caso en particular el modelo digital de elevación se modificó en su estructura (variación de los píxeles), con el objetivo de alterar la forma del cráter actual del VPA, buscando rellenarlo, para lograr que el volumen que se estaba quedando concentrado en el cráter no se perdiera y se dispersará por los flancos del volcán.

Para la simulación número cuatro que se corrió sobre Titán 2D se ingresaron los siguientes parámetros (Tabla 7).

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Tabla 7. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.4 (cráter modificado), tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.

CODIGO SIMULACIÓN		PILA							ORIGEN PILA (WGS84 - UTM Zona 18N)	
Sim	No. de Pilas	Angulo de Orientación	Velocidad Inicial (m/s)	Dirección Inicial	Espesor máximo Inicial (m)	Extensión Eje Mayor (m)	Extensión Eje Menor (m)	Volumen por Pila (m ³)	Coord. Este	Coord. Norte
SimVP 04	1	0°	0	0°	200	182	182	21x10 ⁶	344845	255790
Propiedades del Material										
Ángulo de Fricción Interno: 34°					Ángulo de Fricción Basal: 10°					

En los resultados de la simulación se sigue observando la tendencia a una distribución del flujo en forma radial, pero a diferencia de la simulación número tres el volumen que se queda en el cráter es menor (esto se debe a que al variar los valores de elevación del DEM en la zona del cráter, se está modificando la topografía del sitio, logrando una forma que se asemeja a una meseta desde donde se distribuye el material de la simulación); el flujo sigue tendiendo a canalizarse, cubriendo los valles de la quebrada Agua Blanca y los valles de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco.

En la figura 28, se observa que el área cubierta por el flujo se acerca al resultado de la simulación número dos, con una cobertura un poco mayor hacia la zona sur del cráter, pero con la diferencia de que las alturas alcanzadas por el flujo es mucho menor a su paso por los valles de la Quebrada Agua Blanca y por la zona correspondiente a los cauces de los ríos Anambío y Vinagre.

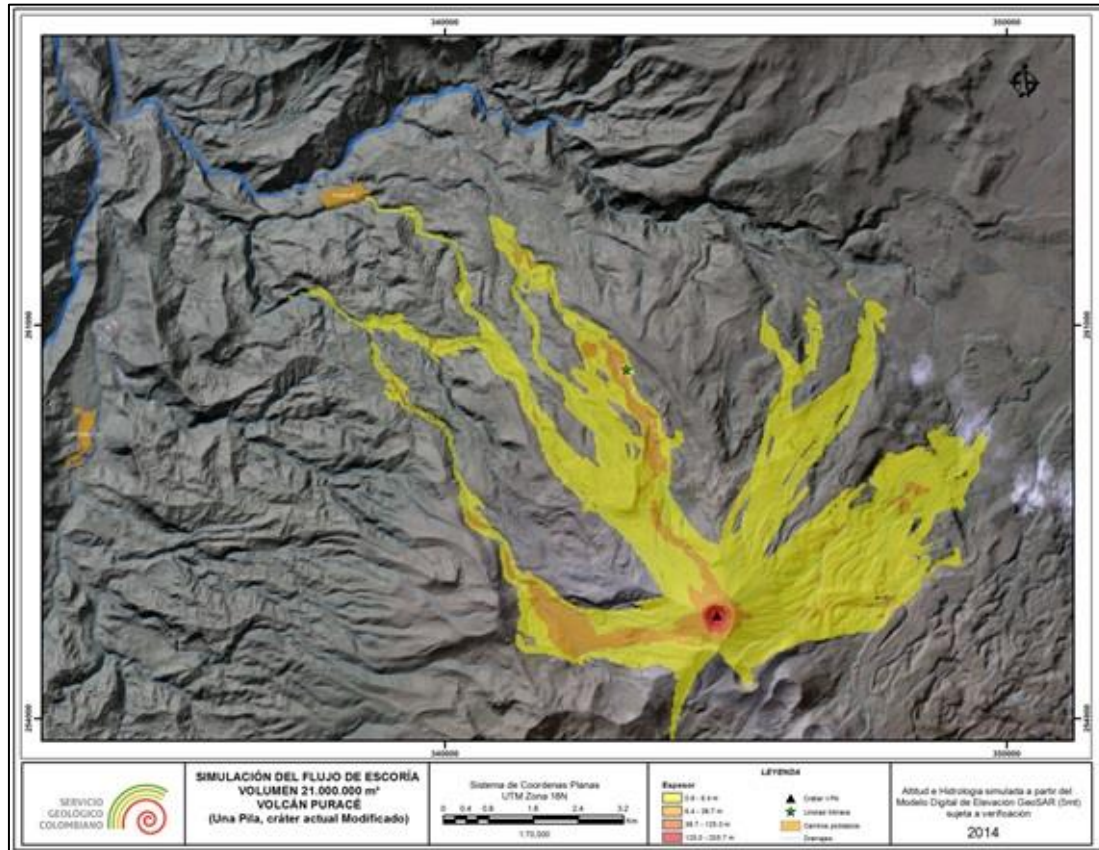


Figura 28. Resultado de la simulación número 4 (una pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé, DEM modificado): Distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA.

4.3.5 Simulación número cinco (SimVPA_05) para el flujo de escoria volcán Puracé

Para la simulación número cinco, se varió el volumen de referencia de 21×10^6 m³ a 28×10^6 m³, manteniendo el uso de una única pila localizada en el centro del cráter actual del volcán Puracé sin modificar las características de elevación de la zona (al aumentar el volumen, también se está aumentando el diámetro de la pila en la simulación).

El objetivo de la variación del volumen de simulación, radicó en poder utilizar el DEM original, con lo que se está respetando la morfología actual del volcán, pero además, logrando incluir en el modelamiento el volumen que se estaba quedando concentrado en el cráter y que estaba incidiendo en los resultados del alcance logrado por el flujo a través de la topografía existente.

En la simulación número cinco que se corrió sobre Titán 2D se ingresaron los siguientes parámetros:

Tabla 8. Parámetros requeridos por el programa Titán 2D en la simulación No.5, tomando como referencia el volumen y la distribución de la Unidad Eruptiva Vinagre.

CODIGO SIMULACIÓN		PILA							ORIGEN PILA (WGS84 - UTM Zona 18N)	
Sim	No. de Pilas	Angulo de Orientación	Velocidad Inicial (m/s)	Dirección Inicial	Espesor máximo Inicial (m)	Extensión Eje Mayor (m)	Extensión Eje Menor (m)	Volumen por Pila (m ³)	Coord. Este	Coord. Norte
SimVP 05	1	0°	0	0°	200	210	210	28x10 ⁶	344845	255790
Propiedades del Material										
Ángulo de Fricción Interno: 34°					Ángulo de Fricción Basal: 10°					

En los resultados de la simulación número cinco se observa la tendencia a una distribución del flujo en forma radial, este tiende a canalizarse, tratando de respetar la topografía existente, cubriendo los valles de la quebrada Agua Blanca y los valles de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco.

Como se puede observar en la figura 29, el área cubierta por el flujo hacia el sector noroccidente del volcán en el valle de la Quebrada Agua Blanca y los Ríos Anambío y Vinagre es similar a la de las anteriores simulaciones, con las diferencias del caso en altura alcanzada, debido a la parametrización empleada; pero sigue alcanzando distancias de aproximadamente 8.5 km respecto del punto de emisión. Hacia el sector oriental el flujo se esparce con menor control topográfico en las cuencas de los ríos Cocuy y San Francisco, alcanzando distancias de más o menos cinco kilómetros con respecto al cráter actual del VPA.

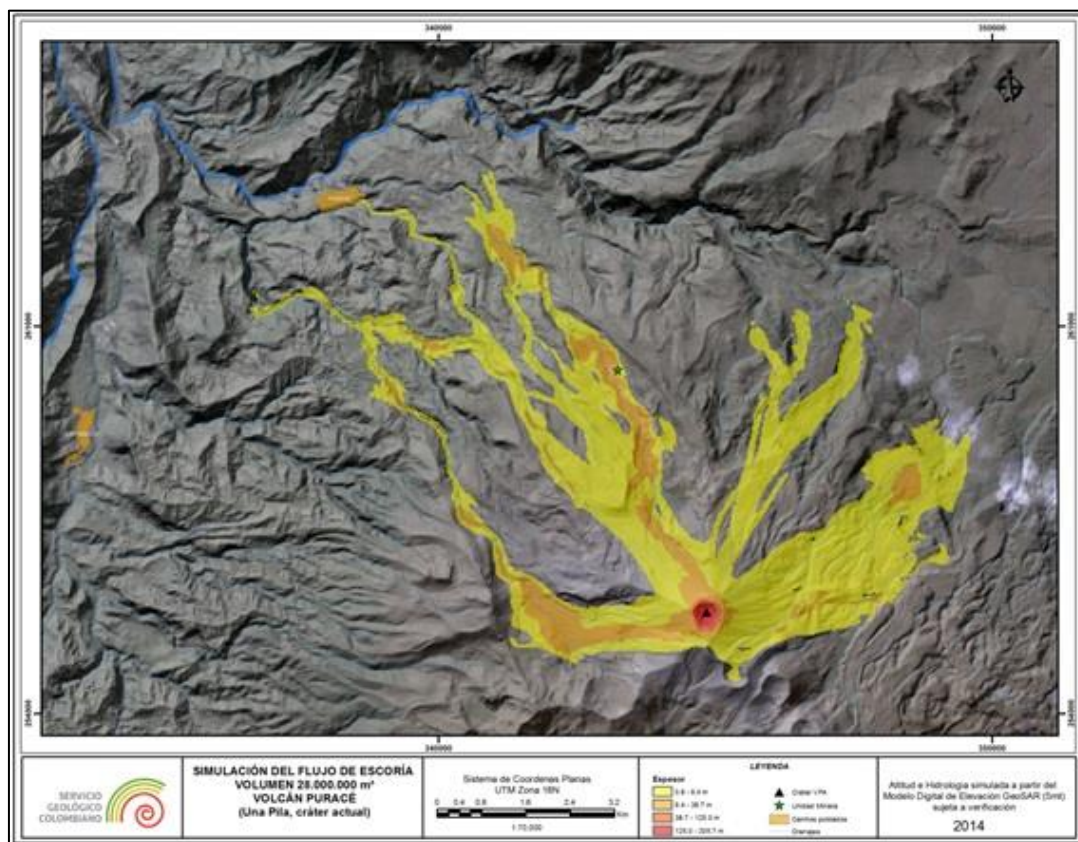


Figura 29. Resultado de la simulación número 5; distribución y altura de inundación para el flujo de escoria del VPA (Con variación en el volumen).

4.4 OBTENCIÓN DEL POLÍGONO CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE ESCORIA DEL VPA, COMO INSUMO PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA

El trabajo de simulación realizado para el modelamiento del flujo de piroclastos en el VP fue discutido y analizado por parte de los autores del presente informe, retomando las consideraciones y observaciones realizadas por los expertos de VHUB, llegando a la conclusión de que los resultados obtenidos en la simulación número cinco representan una distribución de flujo que refleja de una mejor manera las características de los depósitos encontrados en campo en las inmediaciones del volcán Puracé (teniendo presente que en ningún momento se buscó reproducir el depósito).

El análisis contempló las distancias alcanzadas en las simulaciones y la dispersión del fenómeno sobre la topografía existente (tomada del DEM GeoSAR de 5 metros de resolución), acotando que el avance del flujo simulado

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

y su distribución depende en gran medida del ángulo de fricción basal asumido; ya que con valores bajos (como el utilizado de 10°) el material se comporta de manera más fluida, alcanzando distancias considerables, con espesores que varían en altitud de acuerdo a la topografía por donde este circulando.

La figura 30 muestra el resultado de la simulación de los flujos piroclásticos y de la oleada que lo acompaña. Para la zonificación de las oleadas acompañantes del flujo, (polígono con achurado en color negro), se utilizó como metodología la definición de un zona de influencia (buffer) de longitud variable (de acuerdo a la pendiente), de entre 100 y 200 metros, teniendo en cuenta que las oleadas se caracterizan por su menor densidad y mayor movilidad y considerando esta distancia como un margen aceptable en referencia a los impactos de este tipo de procesos, a lado y lado de los límites del flujo piroclástico resultado de la simulación.

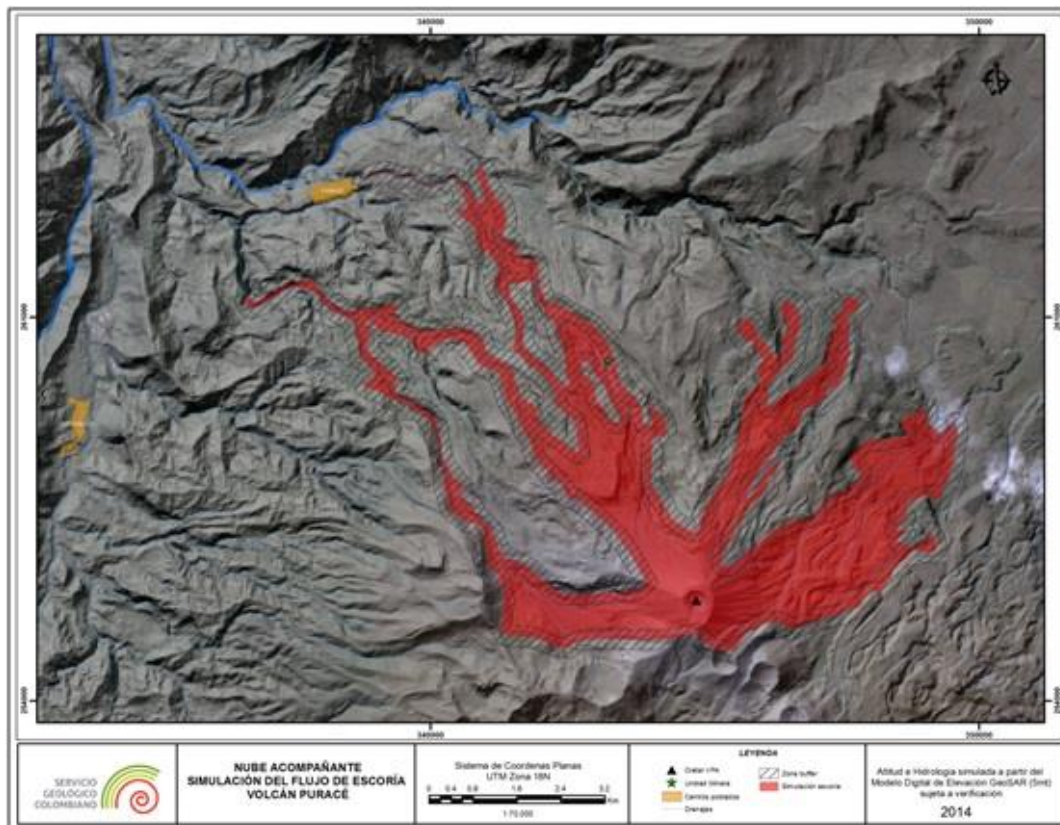


Figura 30. Resultado final de la delimitación de las áreas que podrían ser afectadas por flujos piroclásticos y oleada acompañante generados en el VPA.

El modelamiento desarrollado en este trabajo presenta como resultado el alcance del área de inundación de flujos piroclásticos y nube acompañante ante una posible erupción del volcán Puracé (figura 31), considerando parámetros

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

establecidos con base en los datos tomados en campo y el conocimiento que se tiene del comportamiento del volcán.

Se puede apreciar que las zonas que podrían ser afectadas por este tipo de fenómeno incluyen las partes altas del volcán y la mayoría de los valles de los ríos y quebradas que nacen en este sector.

La zona simulada incluye entonces las áreas que podría llegar a ser afectada por flujos piroclásticos menores generados por colapso y explosión de domos generados en el volcán, fenómeno muy común a lo largo de su historia eruptiva.

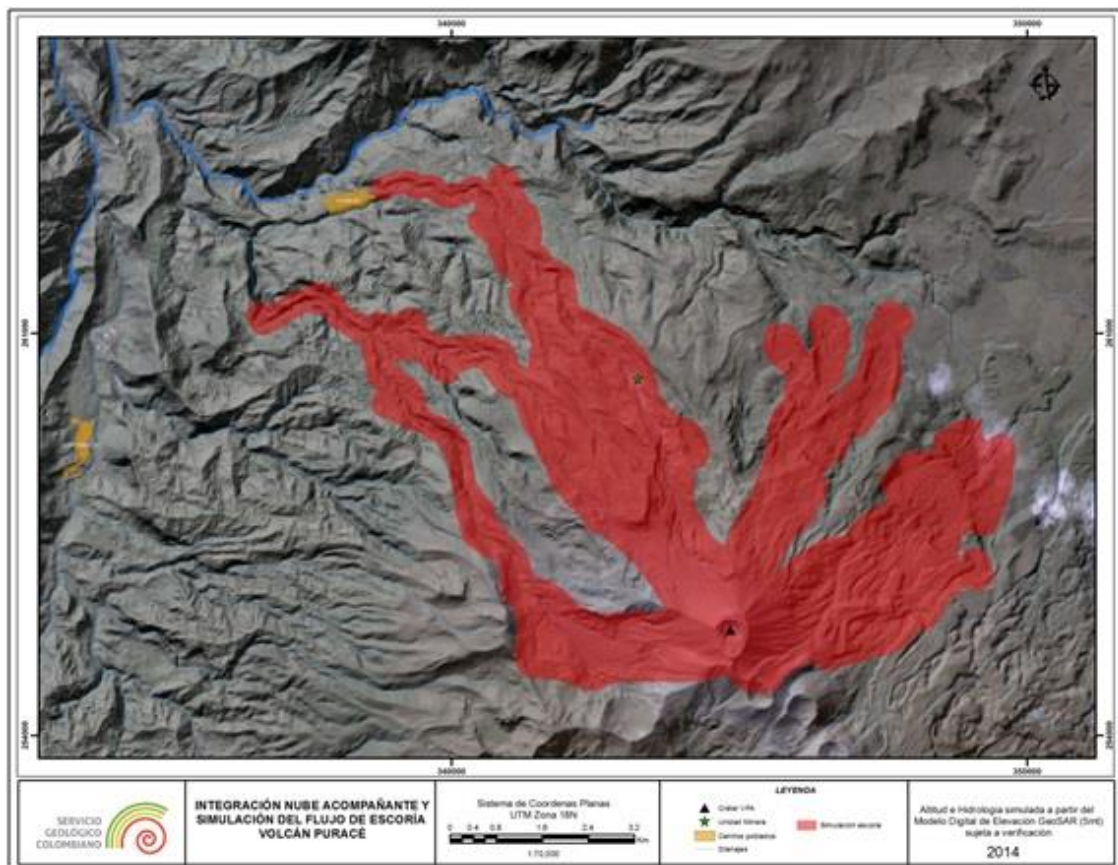


Figura 31. Resultado final de la delimitación de las áreas que podrían ser afectadas por flujos de piroclastos en el área de influencia del volcán Puracé.

Finalmente, cabe aclarar, que se deben tener en consideración los errores propios en el modelo de elevación digital utilizado para desarrollar las simulaciones (datos con elevaciones distorsionadas en celdas específicas de DEM - que se trataron de minimizar al máximo aplicando filtros propios de ArcGIS) y que inciden en los resultados del modelamiento obtenido mediante Titan 2D; por lo que se deben analizar zonas específicas en donde el flujo

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

simulado alcanza a sobrepasar y cubrir áreas con barreras topográficas que poseen alturas de consideración, y que a consideración de los autores del trabajo son zonas que no deberían estar afectadas por el flujo modelado.

Esto supone la edición del archivo vectorial final, producto del modelamiento en Titán 2D, con el objeto de ajustar el polígono en las zonas de consideración, tratando de mejorar la distribución y cobertura del flujo en concordancia con la topografía de la zona y las consideraciones en términos de los parámetros ingresados para trabajar la simulación.

5. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LODO VOLCÁNICOS (LAHARES)

Los flujos de lodo volcánicos o *lahares* son uno de los fenómenos con mayor posibilidad de ocurrencia en una futura erupción del VPA, ya que pueden originarse durante o posterior a cualquier tipo de erupción que presente el volcán y, por lo tanto, revisten gran importancia en la actualización del mapa de amenaza, debido a su capacidad de daño, si se tiene en consideración el territorio y la población que pueda llegar a afectar en su recorrido, desde el sitio de generación hasta su máximo alcance.

Para implementar el trabajo de simulación de este tipo de evento, se optó por aplicar la herramienta *LaharZ_Py* (Schilling, 1998; Schilling, 2014), desarrollada por investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), que funciona como una caja de herramientas bajo el entorno del *software* ArcGIS en su versión 10.2. Esta herramienta tiene la capacidad de delimitar, de una forma aproximada, las áreas probables de inundación de un *lahar* sobre un modelo digital de elevación. Al igual que otros códigos de simulación, se requiere de la determinación de parámetros de referencia basados en la geología y colectados en campo, que identifican los depósitos asociados a erupciones y condiciones del volcán en el pasado y que son la base de la parametrización en el programa, que permiten obtener resultados pertinentes y acordes con el conocimiento que se tenga del este tipo de fenómeno.

El volcán Puracé presenta un registro amplio de depósitos de *lahares*, la mayoría de ellos posiblemente formados cuando el volcán presentaba masa glaciár.

Para este trabajo y considerando los mecanismos que pueden detonar los flujos de lodo, se tomó como referencia los depósitos encontrados en el sector de Paletará, para determinar los parámetros que permitieron simular el recorrido y extensión del flujo mediante *LaharZ*, logrando definir de forma aproximada las áreas que podrían llegar a ser afectadas en una posible erupción del volcán; todo esto como insumo para ser integrado en la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé en su segunda versión.

5.1 LAHAR Z, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LODO EN EL VOLCÁN PURACÉ

Para efectuar las simulaciones de *lahares* en el VPA, se utilizó el software *Laharz_py*, suministrado por uno de sus autores, el Dr. Steve Schilling, del Servicio Geológico de Los Estados Unidos (USGS). La teoría y funcionamiento de éste método se puede consultar en Iverson *et al.*, (1998). Cabe resaltar que este método funciona con ecuaciones semi-empíricas, que involucran conservación de la masa (y del volumen), sin tener en cuenta introducción o sustracción de volúmenes ajenos a aquel que se simula. El método tiene dos ecuaciones fundamentales que lo gobiernan e indican que, tanto el área transversal de inundación (sección transversal) como el área planimétrica de inundación (en planta), son directamente proporcionales al volumen involucrado en el evento:

$$A = 0.05 V^{2/3} \quad \text{y} \quad B = 200 V^{2/3}$$

Donde “A” es el área planimétrica de la inundación y “B”, es el área transversal de la inundación. Este método fue concebido y calibrado a partir del estudio y tratamiento estadístico de datos de áreas transversales y en planta de inundaciones causadas por 27 *lahares* y flujos de escombros ocurridos en 9 volcanes del mundo y para varios experimentos de canal (Figuras 32 y 33, Tabla 9).

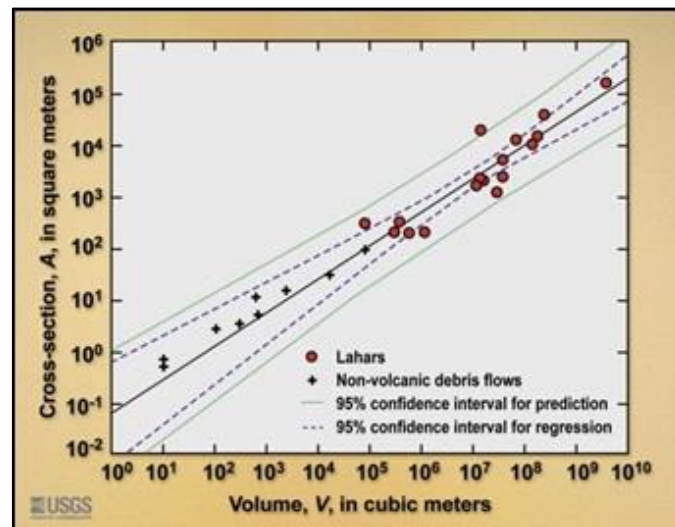


Figura 32. Dispersión de puntos de los valles inundados en área de sección transversal (A) en función del volumen del *lahar* (V). La gráfica muestra la línea de mejor ajuste de regresión con la cual calcularon la constante de 0.05 para la ecuación de (A) en función (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y la predicción (líneas verdes). (Tomado de Schilling, 2014)

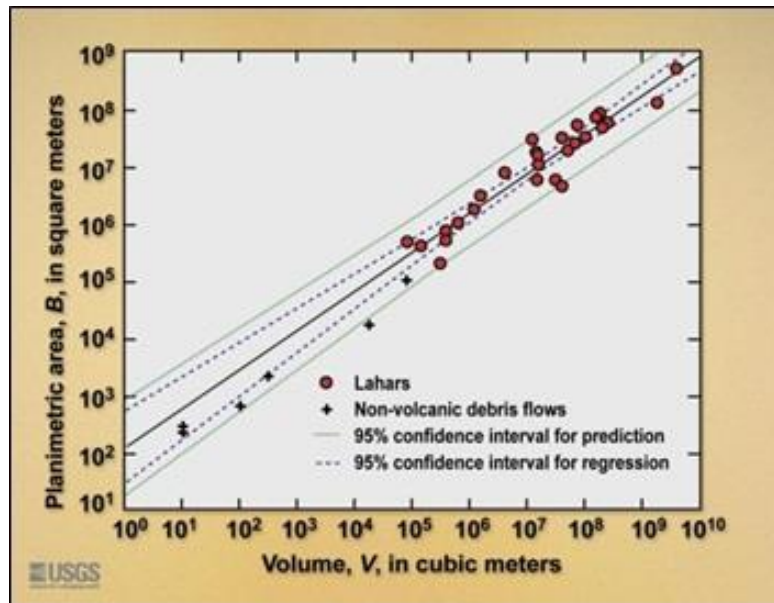


Figura 33. Dispersión de puntos de áreas inundadas en planta (B) en función del volumen del lahar (V). La línea de regresión logarítmica de mejor ajuste, con la cual calcularon la constante de 200 para la ecuación (B) en función de (V) y los intervalos de confianza del 95% para la regresión (líneas discontinuas) y de predicción (líneas verdes). (Tomado de Schilling, 2014).

Laharz_py está escrito en el lenguaje de programación *Python* y se ejecuta dentro de *ArcGIS* (versión 10 o posterior) como un conjunto de *scripts* que son agrupados dentro de un conjunto de herramientas de *ArcGIS* (*ArcToolbox*). Estas herramientas utilizan las ecuaciones mencionadas, un modelo de elevación digital (DEM), en este caso, el DEM GeoSAR de 5 m de la zona de estudio; volúmenes de *lahar* a simular especificados por el usuario, basados en registros históricos y en el conocimiento geológico del área; una relación H/L, o cono de pendiente, que delimita una zona proximal al cono volcánico (Figura 34) y que intenta abarcar la mayoría de las cabeceras de los drenajes que nacen en el cono (y por la que puede esparcirse un *lahar* en la parte alta), a través de los cuales se van a realizar las simulaciones que se van a correr aguas abajo del límite de ese cono y por cada cañón o drenaje.

También se puede escoger un punto arbitrario del cañón para comenzar la simulación (sin tomar la opción del H/L para generar un cono de pendiente), método que se acogió en este trabajo, definiendo valores de coordenadas de inicio en sitios específicos que referencian en su mayoría los nacimientos de ríos y quebradas en las inmediaciones del volcán Puracé.

Tabla 9. Datos usados para calibración del modelo LaharZ (Tomado de Iverson *et al.*, 1998).

Name of event	Location and date	Data source	Flow volume, V (m ³)	Inundated cross section Area, A (m ²)	Inundated planimetric area, B (m ²)
Osceola	Mount Rainier, United States, 5000 B.P.	Vallance and Scott, 1997	4.0×10^9	1.5×10^5	5.5×10^8
Teteltzingo	Citlaltepeltl, Mexico, 18000 B.P.	Carrasco-Núñez <i>et al.</i> , 1994	1.8×10^9	N.D.	1.4×10^8
Electron	Mount Rainier, United States, 530–550 B.P.	Crandell, 1971	2.5×10^8	3.7×10^4	6×10^7
Round Pass	Mount Rainier, United States, 2700 B.P.	Crandell, 1971	2×10^8	N.D.	5×10^7
Dead Man Flat	Mount Rainier, United States, 1100 B.P.	K. Scott <i>et al.</i> , 1995; J.W. Vallance, unpublished data	1.8×10^8	1.4×10^4	9.0×10^7
National	Mount Rainier, United States, 500–1800 B.P.	K. Scott <i>et al.</i> , 1995; J.W. Vallance, unpublished data	1.5×10^8	1.0×10^4	7.8×10^7
Paradise	Mount Rainier, United States, 4500–5000 B.P.	Crandell, 1971	1×10^8	N.D.	3.4×10^7
Zigzag	Mount Hood, United States, 1700 B.P.	J. W. Vallance, unpublished data	7.3×10^7	1.2×10^4	5.5×10^7
Trout Lake	Mount Adams, United States, 6000 B.P.	Vallance, 1998	6.6×10^7	N.D.	2.7×10^7
Middle Fork Nooksack	Mount Baker, United States, 6000 B.P.	Hyde and Crandell, 1978	5×10^7	N.D.	2×10^7
Kautz Creek	Mount Rainier, United States, 1947	Crandell, 1971; Scott and Vallance, 1995	4×10^7	5000	4.5×10^6
Azufrado	Nevado del Ruiz, Columbia, 1985	Fritz <i>et al.</i> , 1986; Pierson <i>et al.</i> , 1990	4×10^7	2300	3.4×10^7
Molinos Nereidas (Chinchina)	Nevado del Ruiz, Columbia, 1985	Fritz <i>et al.</i> , 1986; Pierson <i>et al.</i> , 1990	3×10^7	1100	6.0×10^6
Guali	Nevado del Ruiz, Columbia, 1985	Fritz <i>et al.</i> , 1986; Pierson <i>et al.</i> , 1990	1.6×10^7	2000	1.1×10^7
Salt Creek	Mount Adams, United States, 200 B.P.	Vallance, 1998	1.5×10^7	N.D.	1.6×10^7
Tahoma	Mount Rainier, United States, 400–500 B.P.	Scott <i>et al.</i> , 1995	1.5×10^7	1.9×10^4	6.0×10^6
Pine Creek + Muddy River	Mount St. Helens, United States, 1980	Pierson, 1985	1.4×10^7	2100	1.8×10^7
South Fork Toutle	Mount St. Helens, United States, 1980	Janda <i>et al.</i> , 1981; Fairchild and Wigmosta, 1983	1.2×10^7	1500	3×10^7
Whitney Creek	Mount Shasta, United States, 1935	Osterkamp <i>et al.</i> , 1986	4×10^6	N.D.	8×10^6
Bolum Creek	Mount Shasta, United States, 1897	Osterkamp <i>et al.</i> , 1986	1.5×10^6	N.D.	3×10^6
Mabinitt Eruption Lahars	Mayon, Philippines, 1984	Rodolfo, 1989	1.2×10^6	200	1.8×10^6
Tahoma Creek	Mount Rainier, United States, 1988	Walder and Driedger, 1994; J.S. Walder, unpublished data	6×10^5	190	1×10^6
Blue Lake	Mount St. Helens, United States, 1980	Major, 1984; Major and Voight, 1986	3.8×10^5	320	7.5×10^5
Butte Canyon	Mount St. Helens, United States, 1980	Major, 1984; Major and Voight, 1986	3.8×10^5	300	5.0×10^5
Mabinitt Typhoon Saling	Mayon, Philippines, 1985	Rodolfo, 1989; Rodolfo <i>et al.</i> , 1989	3×10^5	200	2×10^5
Middle	Mount St. Helens, United States, 1980	Major, 1984; Major and Voight, 1986	1.4×10^5	N.D.	4.0×10^5
Polallie Creek	Mount Hood, United States, 1980	Gallino and Pierson, 1984; T.C. Pierson, unpublished data	8×10^4	300	4.7×10^5

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Name of event	Location and date	Data source	Flow volume, V (m ³)	Inundated cross section Area, A (m ²)	Inundated planimetric area, B (m ²)
West Dodson	Columbia Gorge, Oregon, United States, 1996	R. M. Iverson, unpublished data	8×10^4	90	1×10^5
Mayflower Gulch	Tenmile Range, Colorado, United States, 1961	Curry, 1966	1.7×10^4	30	1.6×10^4
Oddstad	Pacifica, California, United States, 1982	Howard et al., 1988	2300	15	N.D.
Big Bend	Pacifica, California, United States, 1982	Howard et al., 1988	660	5	N.D.
Yosemite	Pacifica, California, United States, 1982	Howard et al., 1988	610	11	N.D.
B1	Nigel Pass, Canada, recent	Owens, 1972	300	3.3	2000
N32	Nigel Pass, Canada, recent	Owens, 1972	100	2.7	600
N2	Nigel Pass, Canada, recent	Owens, 1972	10	0.7	200
USGS flume experiments	30 experiments, 1993–1996	Major, 1996; Iverson, 1997	10	0.4 – 0.6	200–300

Note: N.D. = no data; USGS = U.S. Geological Survey

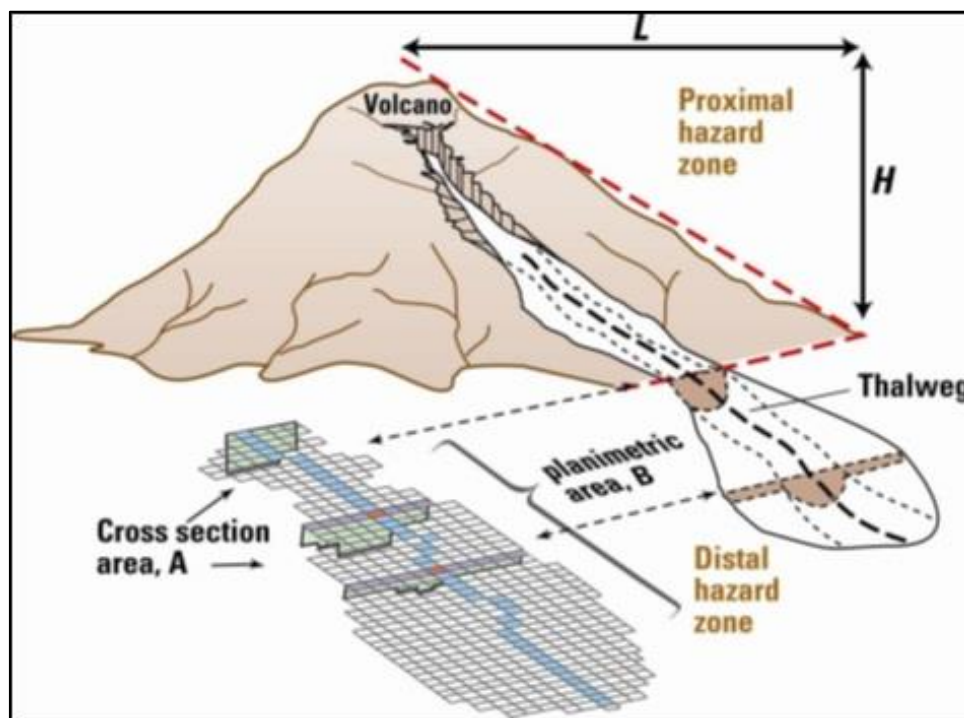


Figura 34. Sección transversal (A) y planimétrica (B) definidas para un lahar, que se utilizan en el programa LaharZ. La relación H/L describe el alcance de la zona de peligro proximal a partir de la cual comienza la simulación (Tomado de Iverson *et al.*, 1998; Schilling, 2014)

Antes de iniciar las simulaciones con el software es importante realizar un tratamiento de calidad al modelo de elevación digital (DEM), con el objeto de minimizar al máximo los errores que este pueda presentar. Se deben crear sobre el DEM funciones de enrutamiento del flujo para generar mallas complementarias que describen la dirección del flujo hidrológico y la acumulación del flujo a lo largo de la superficie del DEM; *LaharZ* utiliza estas mallas de hidrología superficial para mover hacia abajo una corriente especificada por el usuario (con un determinado volumen) y de esta forma crear las zonas de inundación debidas a un *lahar* (Figura 35).

Los DEM con frecuencia contienen elevaciones erróneas, referidas como “hundimientos”, en donde la dirección del flujo no está bien definida. Los hundimientos, que se crean con frecuencia durante la generación de un DEM (Principalmente por factores de ruido atmosférico en el momento de la toma de las imágenes fuente), inhiben el enrutamiento del flujo.

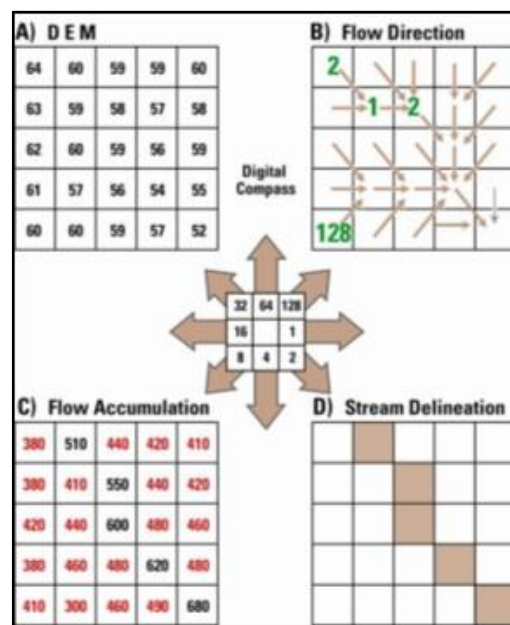


Figura 35. Diagrama de una parte de un DEM y sus correspondientes grillas de hidrología superficial suplementarias. A) DEM donde se almacenan los valores de las celdas de elevación en metros. B) Grilla de dirección del caudal (Flow Direction) derivado del DEM, las flechas representan la dirección del flujo C) La función de acumulación de flujo (Flow Accumulation) utiliza el *raster* de la dirección del flujo para calcular, en cada celda, el número de celdas “aguas arriba” (“*up stream*”) que fluyen en él. D) Las celdas en los datos de acumulación de flujo establecen que tiene valores (texto negro en C) mayores o iguales a un umbral especificado por el usuario para la delimitación de corriente (en este ejemplo, valores mayores que 500 para las celdas) para identificar las celdas un de flujo (marrón) en un *raster* de corrientes. (Tomado de Schilling, 2014).

Sin embargo, algunos hundimientos pueden representar depresiones superficiales reales en el terreno, como canteras o cavidades erosivas y, por lo tanto, es necesario estar familiarizado con las características del terreno representadas por el DEM, con el fin de determinar cuándo los hundimientos en el DEM son errores.

Se pueden usar herramientas en *ArcGIS* para efectuar automáticamente el llenado de los hundimientos que son menos profundos que un valor de umbral especificado por el usuario, en unidades verticales de elevación del DEM (por ejemplo pies o metros). La malla sin depresiones (DEM con llenado) se utiliza entonces para crear mallas de hidrología superficial complementaria y así sobre este modelo rectificado se procede a desarrollar el proceso de simulación.

5.2 DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CÓDIGO LAHARZ

Para la ejecución de las simulaciones del flujo de lodos en el volcán Puracé mediante *LaharZ* se requiere contar tanto con información espacial (DEM de la región de interés) como de las especificaciones de los parámetros que permitan correr el modelo de simulación (análisis hidrológico, volúmenes del flujo y las coordenadas de los sitios de inicio).

5.2.1 Especificación de los datos SIG (DEM)

El modelo de elevación digital es la base para la simulación de flujos de lodo con el código *LaharZ*, por lo que es importante anotar que los resultados que se obtengan del uso de la herramienta estén supeditados a la calidad y resolución del DEM; como se ha mencionado, para el caso del VPA se cuenta con imágenes de radar del sensor GeoSAR (con resolución espacial de 5 metros), suministradas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), con las que se organizó el DEM para la simulación, estructurando un archivo en formato *raster* con las elevaciones del terreno y con una extensión de tipo imagen (.tif para formato GeoTiff), que es la requerida por la herramienta al correr bajo ArcGIS.

5.2.2 Especificación de los parámetros del sistema

La modelación de zonas de inundación por *lahares* en el VP utilizando el código *LaharZ*, se implementó para seis corrientes de agua (los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco; y las quebradas Agua Blanca y Río Blanco), que revisten interés por nacer en el área proximal del volcán y por canalizarse por sectores con presencia de centro poblados, que pueden llegar a ser afectados por la generación de este tipo de fenómenos.

En referencia con los parámetros utilizados para correr las simulaciones, estos fueron definidos con base en los criterios y el conocimiento sobre la geología del volcán Puracé; además de la revisión sobre la literatura existente acerca del uso del programa de simulación.

Para efectuar las simulaciones de *lahares*, es necesario cargar el conjunto de herramientas de *Laharz_py* en *ArcGIS*; estas herramientas comprenden:

- *Create Surface Hydrology Rasters*: Crea el conjunto de datos *raster* suplementarios y que son necesarios para los cálculos (DEM con llenado, dirección de flujo, acumulación de flujo y red hídrica).
- *Generate New Stream Network*: Crea una nueva red hídrica en formato *raster*, utilizando un umbral de corriente definida por el usuario.
- *Hazard Zone Proximal*: Crea una zona de amenaza proximal.
- *Lahar Distal Zones*: Crea áreas de posible inundación, a partir de los volúmenes suministrados por el usuario.
- *Lahar Distal Zones with Conf Levels*: Crea las zonas de inundación potencial a partir de un volumen suministrado por el usuario y dos áreas de inundación adicionales que demuestran un rango de posibles resultados, basados en el nivel de confianza seleccionado por el usuario.
- *Merge Rasters by Volume*: Combina zonas a lo largo de drenajes separados derivados de un volumen).
- *Raster to Shapefile*: Convierte de formato *raster* a formato vectorial el conjunto de datos resultados de la simulación con *Laharz_py*.

De las herramientas descritas, se hizo uso de *Create Surface Hydrology Rasters*, *Generate New Stream Network* y *Lahar Distal Zones*; cada una de estas herramientas genera un proceso que permite obtener información para correr las simulaciones de flujos de lodo en el volcán Puracé

El modelo *LaharZ* requiere de la especificación de tres parámetros, que integrados en la herramienta, permiten la delimitación de zonas a ser inundadas por un flujo de lodo; en su orden estos parámetros son: Un DEM, el volumen a simular y el punto de partida en que comienza a inundar el fenómeno que se está modelando.

5.2.2.1 Modelo de Elevación Digital (base para el análisis hidrológico)

La primer parte del modelamiento de flujos de lodo bajo el código, consiste en la implementación de un análisis hidrológico sobre el área seleccionada del DEM con la herramienta *Create Surface Hydrology Rasters*; esto permite generar archivos que posteriormente utilizará *LaharZ* para correr las simulaciones. La herramienta permite realizar una operación de “fill” (“llenado”) a pixeles en el DEM, que tienen valores anómalos de elevación respecto de sus pixeles vecinos. Subsiguientemente, crea un archivo *raster* con la dirección de flujo (figura 36), otro con la acumulación del flujo y finalmente se crea un archivo con la red de drenaje derivada del DEM (figura 37).

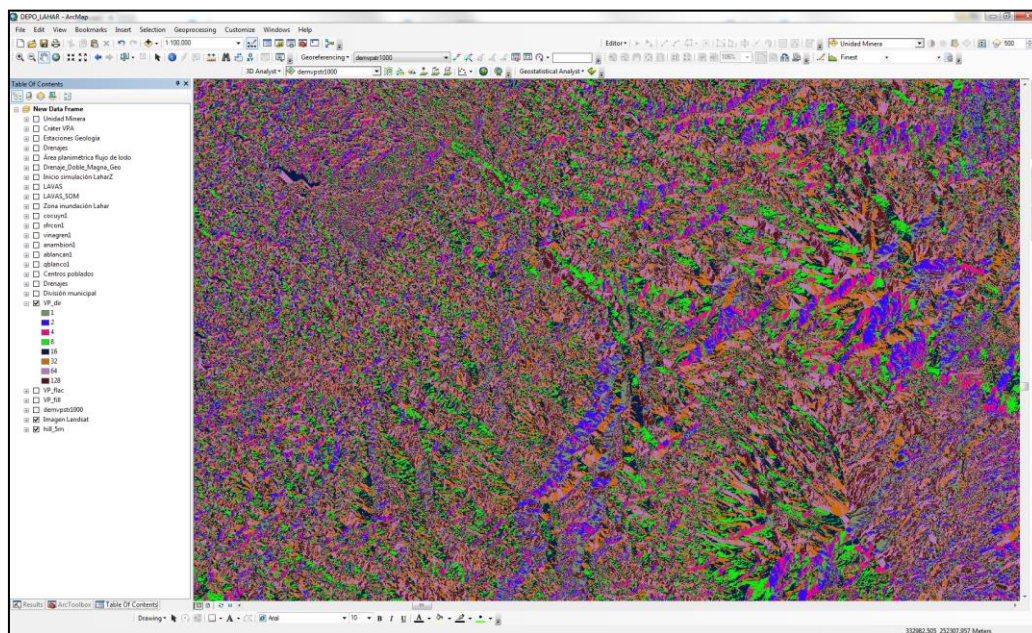


Figura 36. Resultado de la aplicación de la herramienta de dirección de flujo en el DEM para la simulación con *LaharZ* en VP.

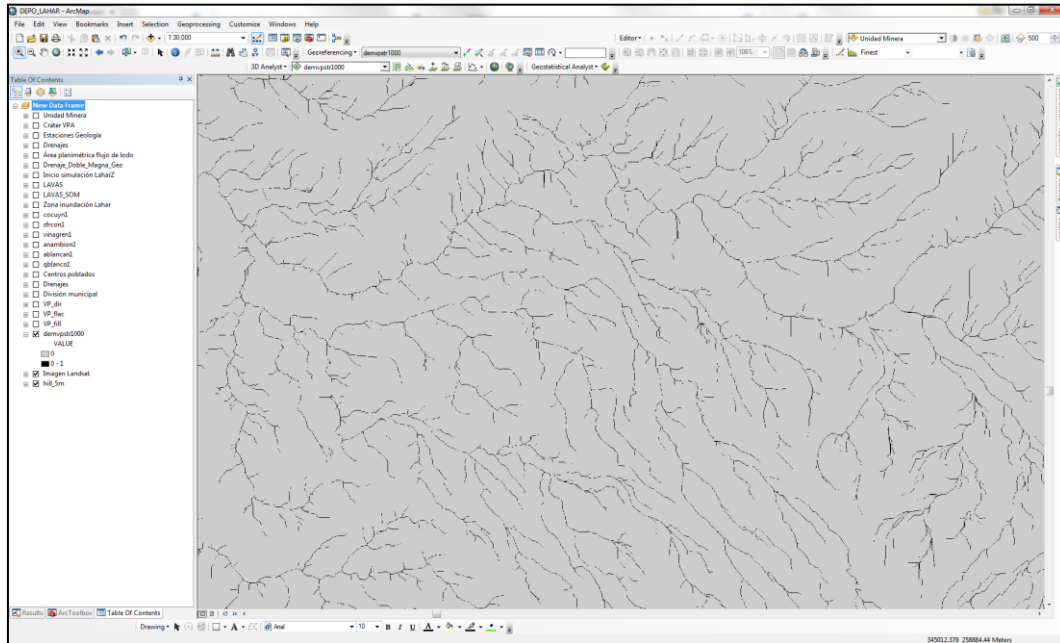


Figura 37. Creación de la red hídrica a partir del DEM para la simulación con *LaharZ* en VP.

Al finalizar la ejecución de la herramienta de análisis hidrológico se obtienen cuatro archivos que retomará el código para simular el lahar por medio de *Lahar Distal Zones*, que es el método acogido para obtener las áreas de inundación de los flujos de lodo; cabe aclarar que los resultados, como se ha mencionado, están supeditados a la calidad y precisión del modelo de elevación digital que se tiene.

Para el caso concreto de las redes hidrológicas derivadas del DEM, estas tienen un mejor comportamiento y tratan de seguir fielmente la hidrología en zonas con pendiente alta y media, como es el caso de las partes alta y media de las cuencas de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco, además de las quebradas Río Blanco y Agua Blanca. Sin embargo, en zonas con pendiente baja la red de drenaje sigue cursos muy rectos, con quiebres abruptos y poco realistas; esto sucede en la parte baja de la quebrada Río Blanco en el sector de Paletará y en la zona plana del río Cauca, en su paso por la ciudad de Popayán.

En la figura 38 se observan errores en el curso de los drenajes generados por medio de la herramienta (ovalado en color rojo). Es evidente que el cauce se desvía del que debería ser su curso normal; esto va a incidir en el resultado de las áreas de inundación que se obtendrán del uso del código *LaharZ*.

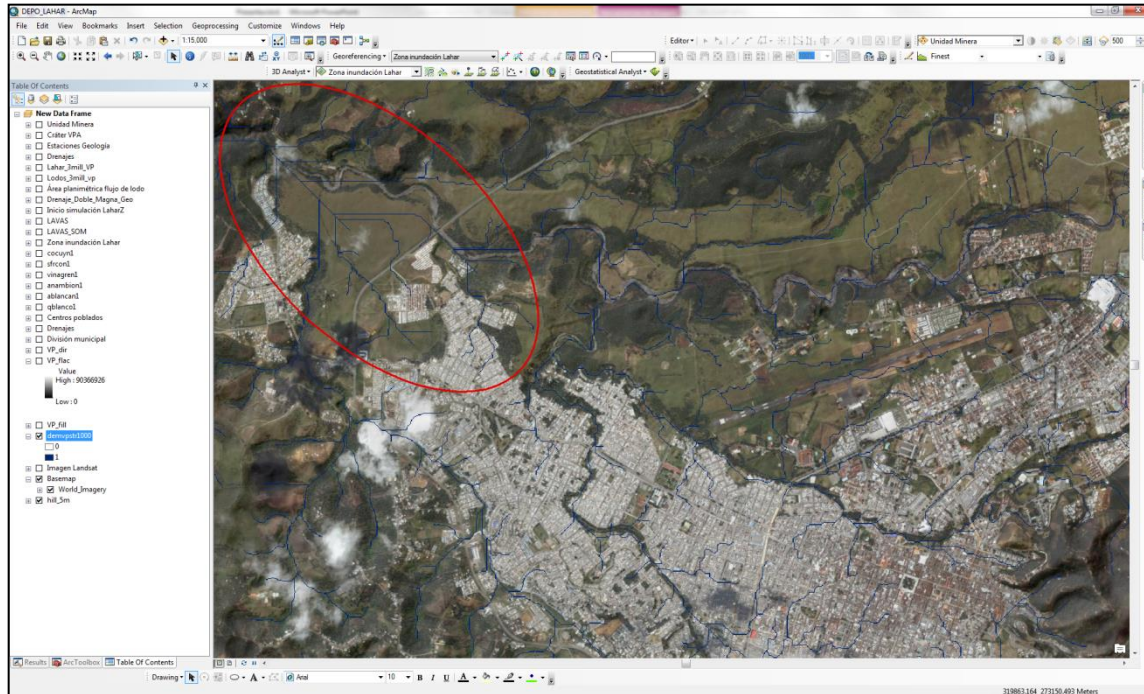


Figura 38. Errores derivados de la generación de la red hídrica a partir del DEM para la simulación con *LaharZ* en VP.

5.2.2.2 Volumen simulado

LaharZ requiere de la introducción de datos de volúmenes a simular mediante un archivo de texto con los valores definidos para el modelamiento del fenómeno; para determinar el rango de volúmenes a modelar en el caso del volcán Puracé, estos fueron establecidos según el criterio geológico tomando como referente los datos de campo recolectados para los depósitos encontrados en las partes media y baja de la cuenca de la quebrada Río Blanco (sector de Paletará).

A partir de la interpretación de la información de campo y con base en el DEM, se estableció un área de referencia para la distribución del flujo de lodo en el sector de Paletará, al SW del volcán Puracé (polígono en achurado de color rojo de la figura 39); este procedimiento permitió obtener el dato para un volumen inicial estimado en $30 \times 10^6 \text{ m}^3$, tomando un espesor promedio de 1.5 metros (Tabla 10).

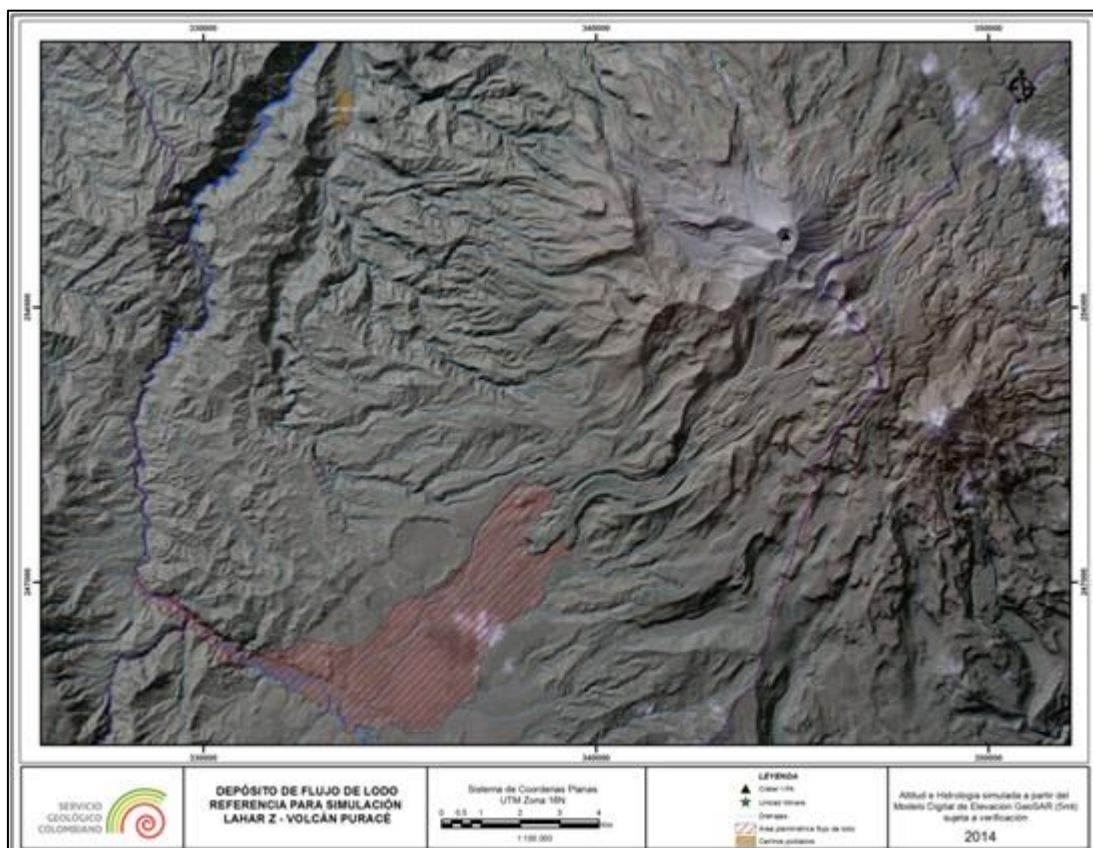


Figura 39. Distribución aproximada para lahar en el sector de Paletará, sobre el DEM GeoSAR, volcán Puracé.

Tabla 10. Relación de volúmenes calculados a partir del área cartografiada para la distribución del flujo de lodo en la quebrada Río Blanco, sector de Paletará.

Sector	Depósito	Fuente inferida	Área (m ²)	Espesor (m)	Volumen (m ³)
Q. Río Blanco (Paletará)	Lahar	VP	20517542.2	0.5	10258771.2
Q. Río Blanco (Paletará)	Lahar	VP	20517542.2	1.0	20517542.2
Q. Río Blanco (Paletará)	Lahar	VP	20517542.2	1.5	30776313.6

En el análisis de los resultados obtenidos con la elaboración de este ejercicio se llegó a la conclusión de que el volumen calculado a partir del área planimétrica está sobrevalorado, por lo que se decidió realizar secciones transversales sobre el cauce de la quebrada Río Blanco, en algunos de los sitios en donde se tiene estaciones de campo, con el fin de obtener volúmenes a partir de sus áreas y espesores (con la ecuación para calcular el coeficiente de la sección transversal

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

que contempla *LaharZ*), consiguiendo ajustar los valores con una metodología más apropiada para el cálculo de los volúmenes a modelar. Se realizaron cinco perfiles (o cortes transversales) en sitios con datos de estaciones de campo sobre la quebrada Río Blanco, como se observa en las figura 40 y 41; Tomando como referencia los perfiles trabajados y los llenados realizados a cada sección (con espesores definidos para 1, 1.5, 2 y 3 metros), se estableció que el volumen a considerar como base para la simulación de flujos de lodo mediante la herramienta es de 1.524.498 m³; el cual corresponde al valor máximo calculado en la sección transversal para el perfil número cinco (Tabla 11).

Tabla 11. Relación de volúmenes de simulación calculados a partir de las secciones de llenado del canal para la Quebrada Río Blanco, sector SW área proximal del volcán Puracé.

ESTACIÓN COD. PERFIL	AREA 1m	Vol. 1m	AREA 1.5m	Vol. 1.5m	AREA 2m	Vol. 2m	AREA 3m	Vol. 3m
VPJG004_RB1	37.1	2.02E+04	62.4	4.41E+04	91.2	7.79E+04	229.2	3.10E+05
VPJG007_RB2	22.2	9.36E+03	42.4	2.47E+04	69.2	5.15E+04	143.7	1.54E+05
VPJG008_RB3	27.9	1.32E+04	60.1	4.17E+04	78.3	6.20E+04	142.9	1.53E+05
VPJG015_RB4	161.9	1.84E+05	259.7	3.74E+05	350.1	5.86E+05	540.7	1.12E+06
VPJG013_RB5	210.4	2.73E+05	317.6	5.06E+05	430.6	7.99E+05	662.3	1.52E+06

La ecuación aplicada para calcular el volumen es $A = 0.05 V^{2/3}$, despejando la fórmula queda un valor de aproximadamente 1.5×10^6 m³; volumen tomado como dato intermedio para el modelamiento. Debido a las incertidumbres propias del método de obtención de volumen, se trabajaron dos volúmenes adicionales, teniendo en cuenta un mínimo, correspondiente al 50% del valor estimado (7.5×10^5 m³), que es cercano al valor máximo, considerando un espesor de 2 m.

Y un volumen máximo, correspondiente al doble de este valor (3×10^6 m³), considerando que la medición del depósito no tiene en cuenta el volumen de agua involucrado y que autores como Pierson *et al.*, (1990), aducen que este porcentaje de agua puede ser de hasta un 50%. Estos valores se encuentran dentro de un rango razonable para eventuales lahares generados en el área del VPA, en sus condiciones actuales.

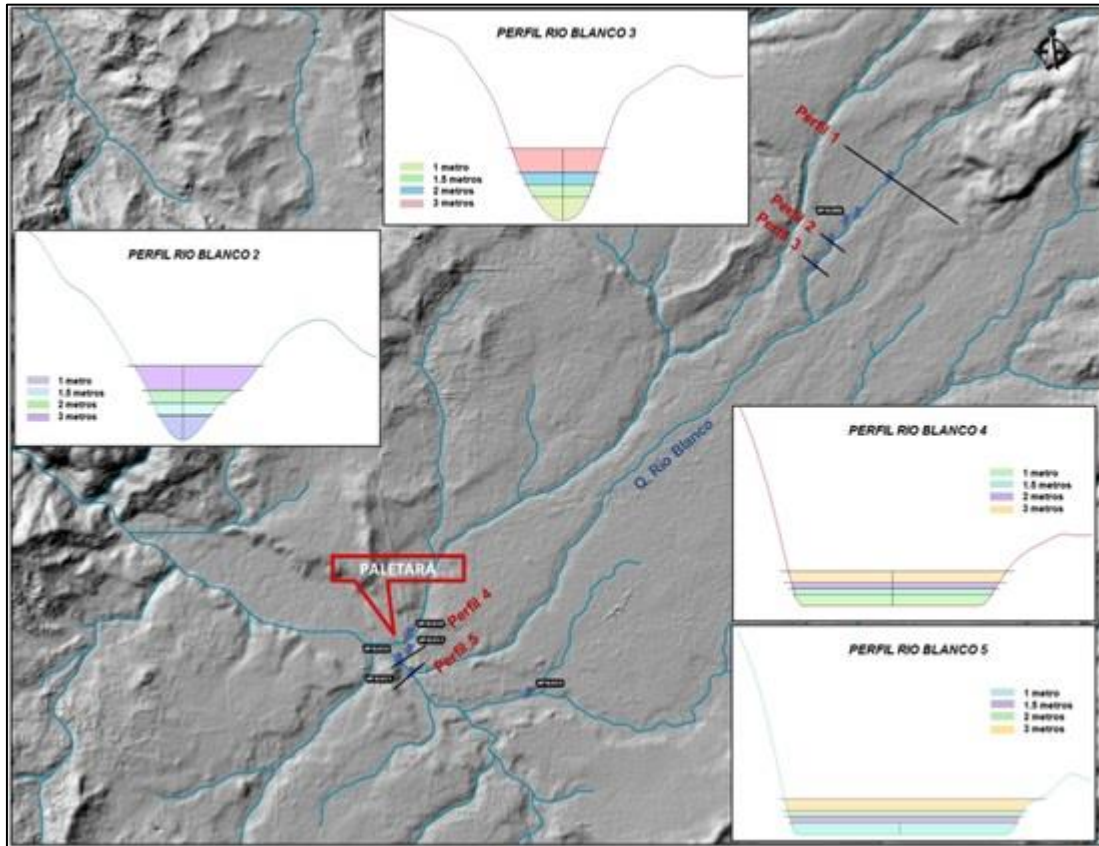


Figura 40. Localización y distribución de llenado para los perfiles 2, 3, 4 y 5 en la Q. Río Blanco, sector de Paletará sobre el DEM GeoSAR.

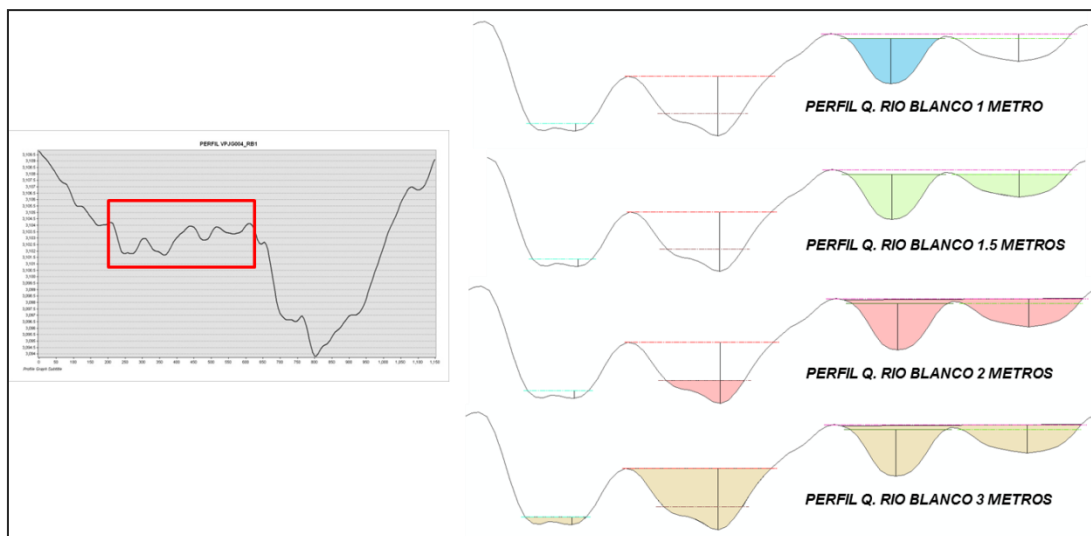


Figura 41. Localización y distribución de llenado para el perfil 1 en la Q. Río Blanco, sector de Paletará sobre el DEM GeoSAR.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

5.2.2.3 Sitios de inicio simulación

El otro parámetro que se requiere para correr *LaharZ*, corresponde a la determinación de uno o varios puntos de inicio de los lahares; estos datos deben organizarse en un archivo de texto que debe contener las coordenadas planas de los sitios definidos para el inicio de la simulación en proyección UTM.

Para este trabajo se definieron siete puntos de inicio, que en su mayoría están localizados en las cabeceras de los drenajes que nacen en las inmediaciones del volcán Puracé, o en lugares que por su interés deben ser analizados para el trabajo en mención, como es el caso del sitio denominado SimVP_LZ07, que corresponde al sector de la confluencia de varias de las fuentes hídricas por donde se distribuye la simulación.

En la figura 42 y en la tabla 12, se presentan los sitios de inicio propuestos para la simulación (puntos en color verde) y sus coordenadas en el sistema proyectado UTM, zona 18N, además de los volúmenes utilizados para el proceso de modelamiento.

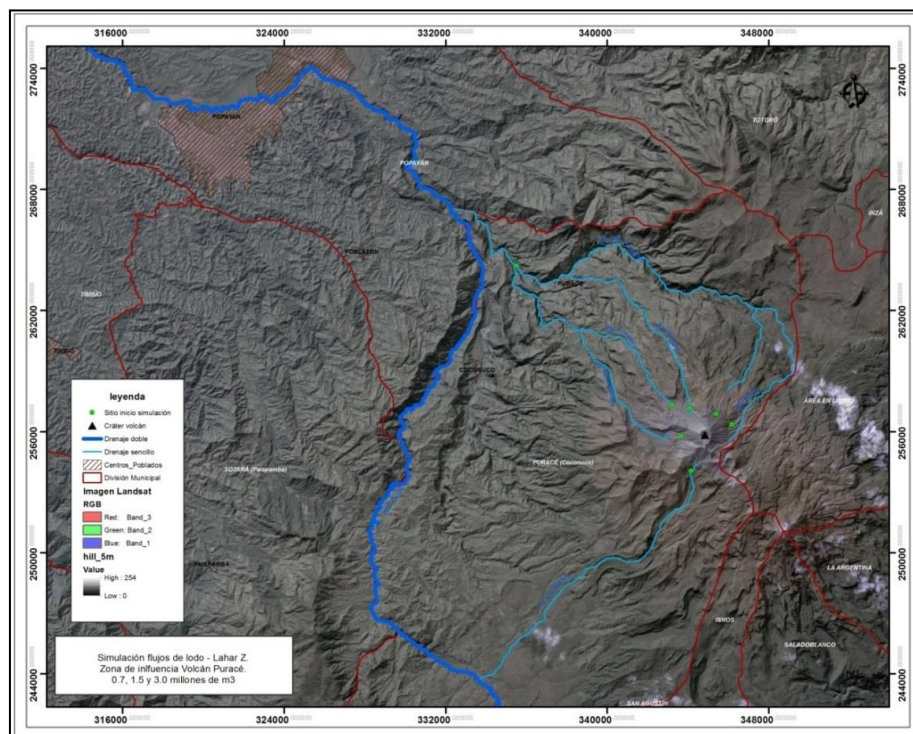


Figura 42. Localización de los sitios de inicio (puntos verdes) para la simulación de flujos de lodo mediante *LaharZ*, en las redes hídricas de interés en el área de influencia del VP.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Tabla 12. Sitios de inicio en el sistema de coordenadas UTM, zona 18N, para correr la simulación de flujos de lodo en VP mediante Laharz_py.

CODIGO	REDES HIDRICAS DE INTERES	INICIO SIMULACIÓN		VOLUMEN SIMULADO m ³
		ESTE (m)	NORTE (m)	
SimVP_LZ01	Q. Río Blanco	344169	254046	700.000 1.500.000 3.000.000
SimVP_LZ02	Q. Agua Blanca	343693	255732	
SimVP_LZ03	Río Anambío	343206	257304	
SimVP_LZ04	Río Vinagre	344092	257125	
SimVP_LZ05	Río San Francisco	345408	256867	
SimVP_LZ06	Río Cocuy	346186	256343	
SimVP_LZ07	Sector Confluencia	335511	264187	

5.3 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA EL FLUJO DE LODOS DEL VPA, UTILIZANDO LAHARZ

La simulación de las zonas de inundación por lahares con la herramienta se aplicó en los cauces de los ríos Anambío, Vinagre, Cocuy y San Francisco y sobre las quebradas Río Blanco y Agua Blanca, con volúmenes que van desde 750.000 m³ hasta los 3.000.000 m³ (valores que pueden llegar a representar un rango razonable de volúmenes para eventuales lahares generados en el área del VPA en sus condiciones actuales).

Al igual que para la simulación de los flujos piroclásticos, se optó por la realización de test de simulación para analizar resultados de la herramienta y su correspondencia con las características morfológicas del terreno por donde se distribuye cada simulación; esto permitió observar que al utilizar el modelo *LaharZ* original, calibrado con los datos asumidos por sus autores, el ancho de las zonas inundadas es demasiado extensa (y por ende la altura de inundación asociada) si se considera las observaciones realizadas en campo y, sobre todo, si se tiene en cuenta los sitios que alcanza a inundar en sectores específicos en donde se tiene alturas de consideración.

Debido a esto, se optó por hacer una “recalibración” del método, teniendo en cuenta otros ejemplos a nivel mundial en los que se empleó *LaharZ* con parametrización estándar y se obtuvieron anchos y alturas de inundación exagerados, como en el caso de los trabajos de simulación en el río Páez, para el Nevado del Huila (Cardona & Pulgarín, 2008); en el río Gualí, para el Nevado del Ruiz (Pulgarín *et al.*, 2013); y para los volcanes chilenos Villarrica y Cabulco (Castruccio & Clavero, en preparación).

Como ejemplo, en la figuras 43 y 44 se puede observar el resultado de la simulación utilizando las constantes para área planimétrica y para área transversal que tiene por defecto el programa y la recalibración de estos dos parámetros realizada, tomando como base los datos de campo y la distribución del depósito en la zona de Paletará.

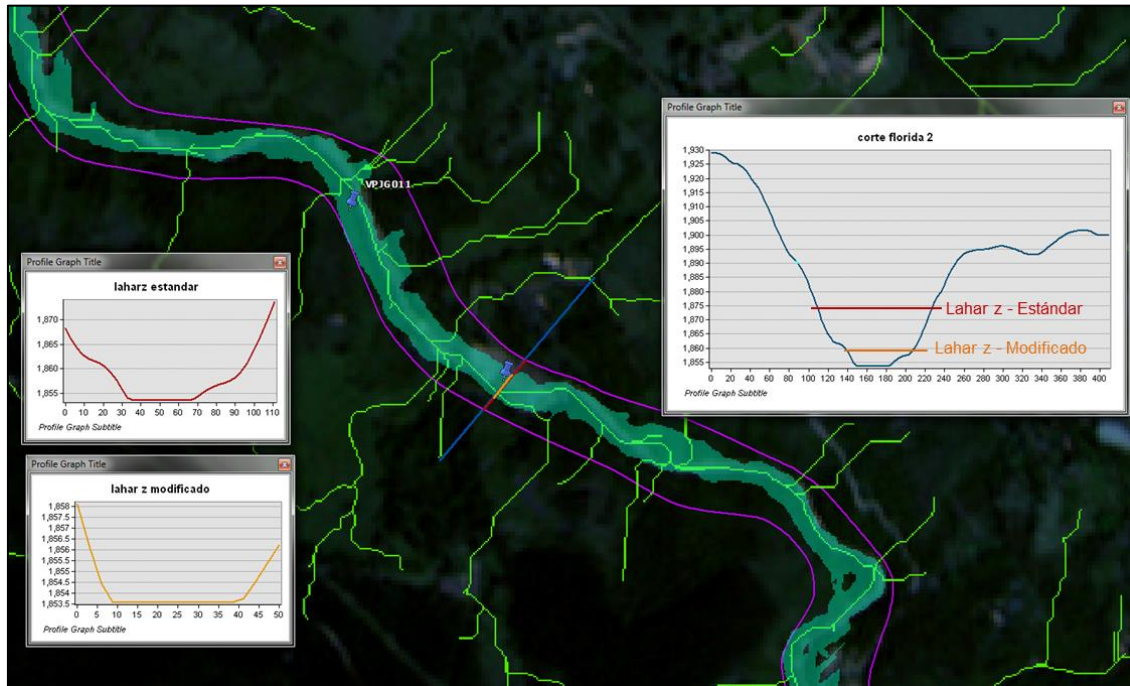


Figura 43. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el sector de la central hidroeléctrica Florida II (municipio de Popayán), utilizando el método estándar del código (línea en color magenta) y la recalibración para el caso de VP (polígono color verde).

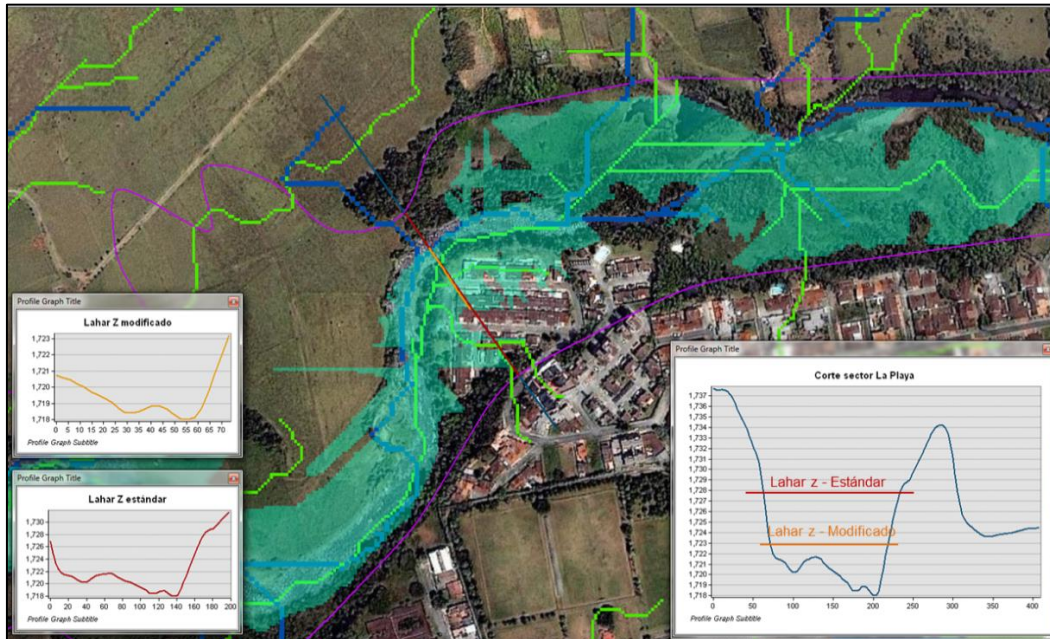


Figura 44. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el sector urbano de Popayán, utilizando el método estándar del código (línea en color magenta) y la recalibración para el caso de VP (polígono color verde).

Como es evidente en las imágenes anteriores, el área inundada por el proceso de simulación generado a partir de la herramienta, con la recalibración de las constantes que utiliza las ecuaciones que gobiernan el programa, tiene una disminución considerable respecto del método estándar y se ajusta de mejor manera a las características de la morfología del terreno, dando además alturas de inundación mucho más bajas y razonables en el contexto del trabajo que se está realizando, para la identificación de posibles zonas a ser afectadas por un lahar en el área de influencia del volcán Puracé.

Para realizar la recalibración de las constantes en el código, se revisaron los parámetros A y B de la ecuación que utiliza *LaharZ*:

Sección transversal = A x Volumen^{2/3}, donde A tiene asignado un valor de 0.05.

Área Planimétrica = B x Volumen^{2/3}, donde B tiene asignado un valor de 200.

Con base en los datos obtenidos de los perfiles realizados sobre la quebrada Río Blanco y con el área obtenida de la distribución del depósito, se recalibraron los valores de las constantes, quedando asignado un valor de **0.006** para **A** y para el caso de **B** de **185**; con esta nueva calibración se desarrollaron las simulaciones de flujos de lodo en el VPA.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Luego de haber realizado los test respectivos y de recalibrar el código, se trabajaron siete simulaciones (para cada afluente de interés) que se presentan como producto del trabajo realizado y que se integraron en un solo archivo como insumo para la actualización del mapa de amenaza volcánica de Puracé en su segunda versión. Para todos los puntos de inicio se hicieron simulaciones para los tres volúmenes de referencia. Para cada caso, los colores establecidos en los mapas que a continuación se muestran, dan cuenta de los volúmenes modelados; el color verde corresponde al volumen de 750 000 m³, el color naranja, al volumen de 1 000 000 m³; y el color rojo, al volumen de 3 000 000 m³.

5.3.1 Simulación para la quebrada Río Blanco (SimVPA_LZ01)

La quebrada Río Blanco drena sus aguas hacia el sector SW del volcán Puracé. El sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 2 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por la quebrada Río Blanco, para luego desembocar en el río Cauca, llegando a alcanzar un recorrido aproximado de 34 kilómetros desde su punto de inicio.

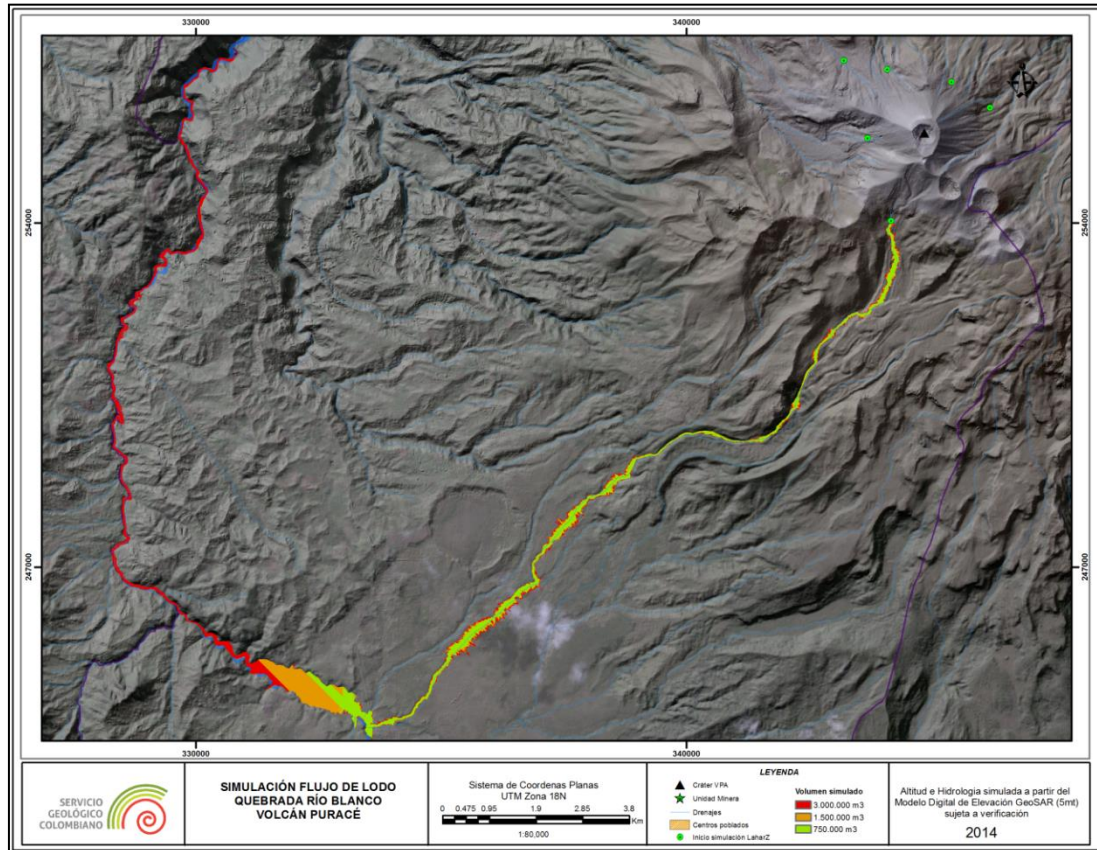


Figura 45. Resultado de la simulación con *LaharZ* en la quebrada Río Blanco sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

Como se observa en la figura anterior (45), en su recorrido el flujo simulado alcanza a pasar por el sector de Paletará, en donde se encuentra población asentada; y luego, se canaliza por el río Cauca, en donde se encuentra población bastante dispersa, al ser un sitio eminentemente rural.

5.3.2 Simulación para la quebrada Agua Blanca (SimVPA_LZ02)

La quebrada Agua Blanca nace en las inmediaciones del volcán y drena sus aguas hacia el sector NW. El sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos un kilómetro del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por la quebrada Agua Blanca, desembocando al río Anambío que drena al río San Francisco y a su vez el flujo alcanza el río Cauca, esta simulación alcanza un recorrido aproximado de 42 kilómetros desde su punto de inicio.

Como se observa en la figura 46, en su recorrido el flujo simulado alcanza a pasar por el área urbana del municipio de Popayán, en donde se encuentra localizada gran cantidad de población y que está asentada sobre sectores aledaños a la margen del río Cauca, luego de pasar por el sector urbano se encañona debido al cambio de morfología en el río Cauca alcanzando el sector rural del municipio.

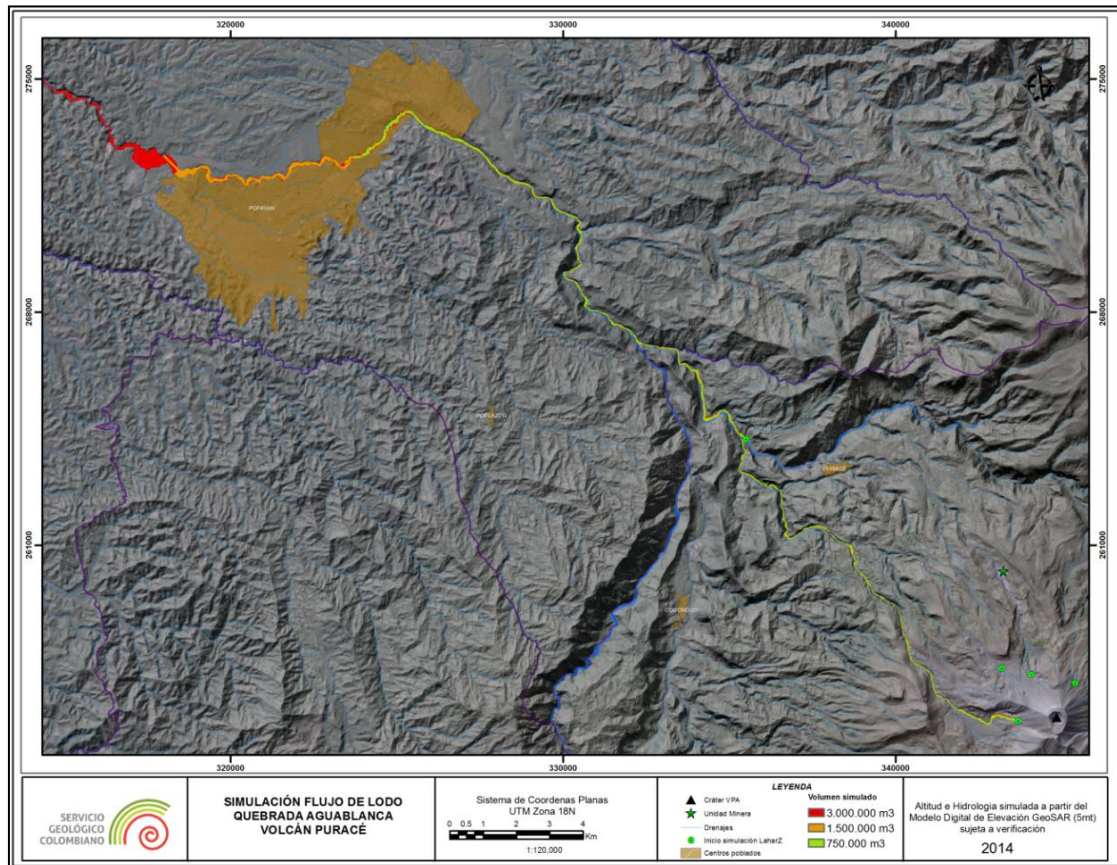


Figura 46. Resultado de la simulación con *LaharZ* en la quebrada Agua Blanca sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

5.3.3 Simulación para el río Anambío (SimVPA_LZ03)

El río Anambío nace en las inmediaciones del volcán y drena sus aguas hacia el sector NW; el sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 2,3 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por Anambío, para luego desembocar en el río San Francisco y a su vez el flujo alcanza el río Cauca, esta simulación alcanza un recorrido aproximado de 42 kilómetros desde su punto de inicio. Como se observa en la

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

figura 47, en su recorrido el flujo simulado alcanza a pasar por el área urbana del municipio de Popayán, en donde se encuentra localizada gran cantidad de población y que está asentada sobre sectores aledaños a la margen del río Cauca, luego de pasar por el sector urbano se encañona debido al cambio de morfología en el río Cauca alcanzando el sector rural del municipio.

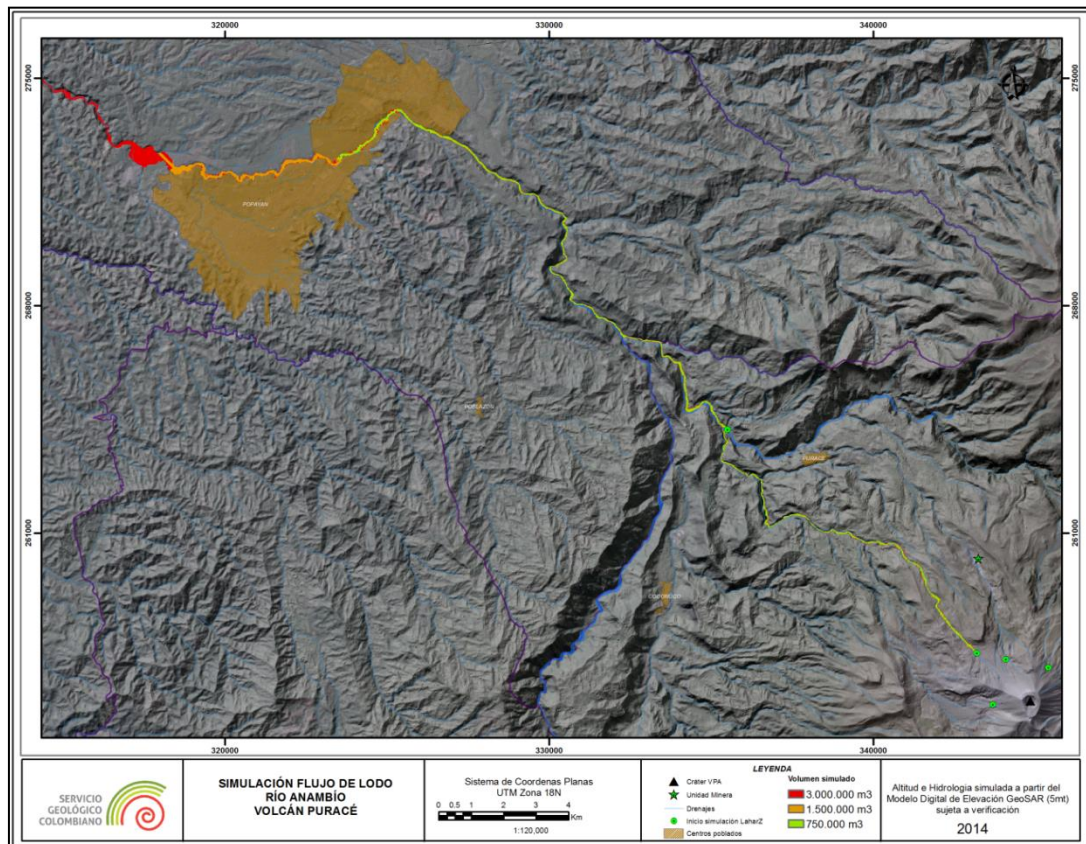


Figura 47. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el río Anambío sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

5.3.4 Simulación para el río Vinagre (SimVPA_LZ04)

El río Vinagre nace en las inmediaciones del volcán y drena sus aguas hacia el sector NW; el sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 1,7 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por el río Vinagre, para luego desembocar en el río San Francisco que su vez drena sus aguas al Cauca, esta simulación alcanza un recorrido aproximado de 41 kilómetros desde su punto de inicio. Como se observa en la figura 48, en su recorrido el flujo simulado alcanza a pasar por el

área urbana del municipio de Popayán, en donde se encuentra localizada gran cantidad de población y que está asentada sobre sectores aledaños a la margen del río Cauca, luego de pasar por el sector urbano se encañona debido al cambio de morfología en el río Cauca alcanzando el sector rural del municipio.

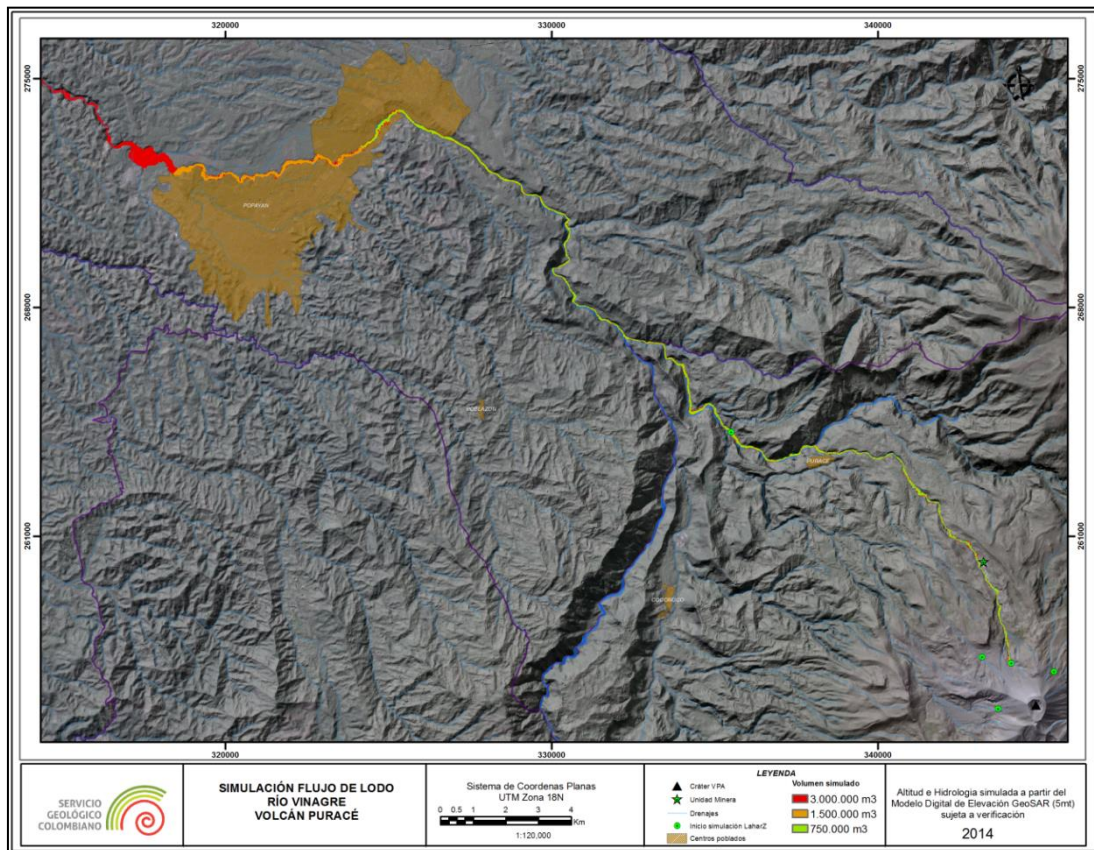


Figura 48. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el río Vinagre sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

5.3.5 Simulación para el río San Francisco (SimVPA_LZ05)

El río San Francisco nace en las inmediaciones del volcán y drena sus aguas hacia el sector NW del mismo; el sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 1,4 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por el río San Francisco, para luego desembocar en el río Cauca, está simulación alcanza un recorrido aproximado de 36 kilómetros desde su punto de inicio y en su paso recorre el área urbana de Popayán, afectando además el sector de la central hidroeléctrica Florida II.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

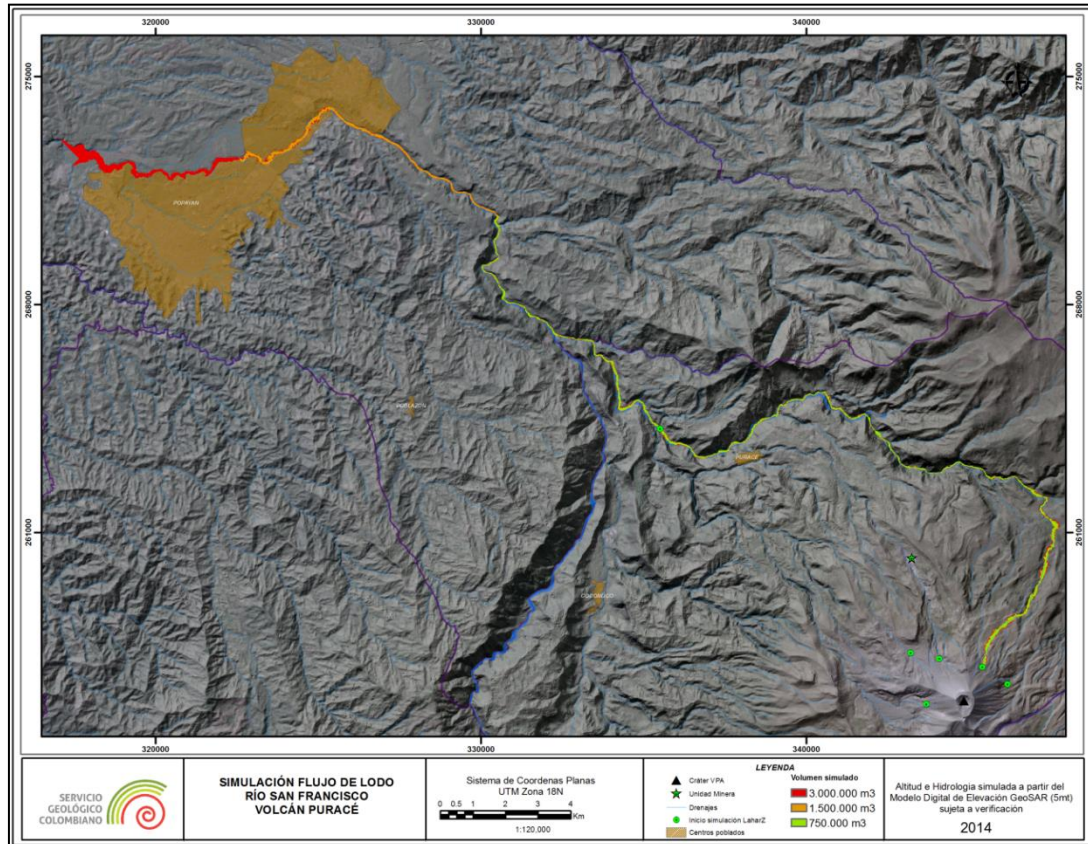


Figura 49. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el río San Francisco sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

5.3.6 Simulación para el río Cocuy (SimVPA_LZ06)

El río Cocuy nace en las inmediaciones del volcán y drena sus aguas hacia el sector NW del mismo; el sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 1,4 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación (figura 50) se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por Cocuy, drenando al río San Francisco y finalmente desembocar en el río Cauca, está simulación alcanza un recorrido aproximado de 35.6 kilómetros desde su punto de inicio y en su paso recorre el área urbana de Popayán, afectando además el sector de Florida II (localizado a pocos kilómetros de la ciudad) en donde se encuentra una planta de generación eléctrica.

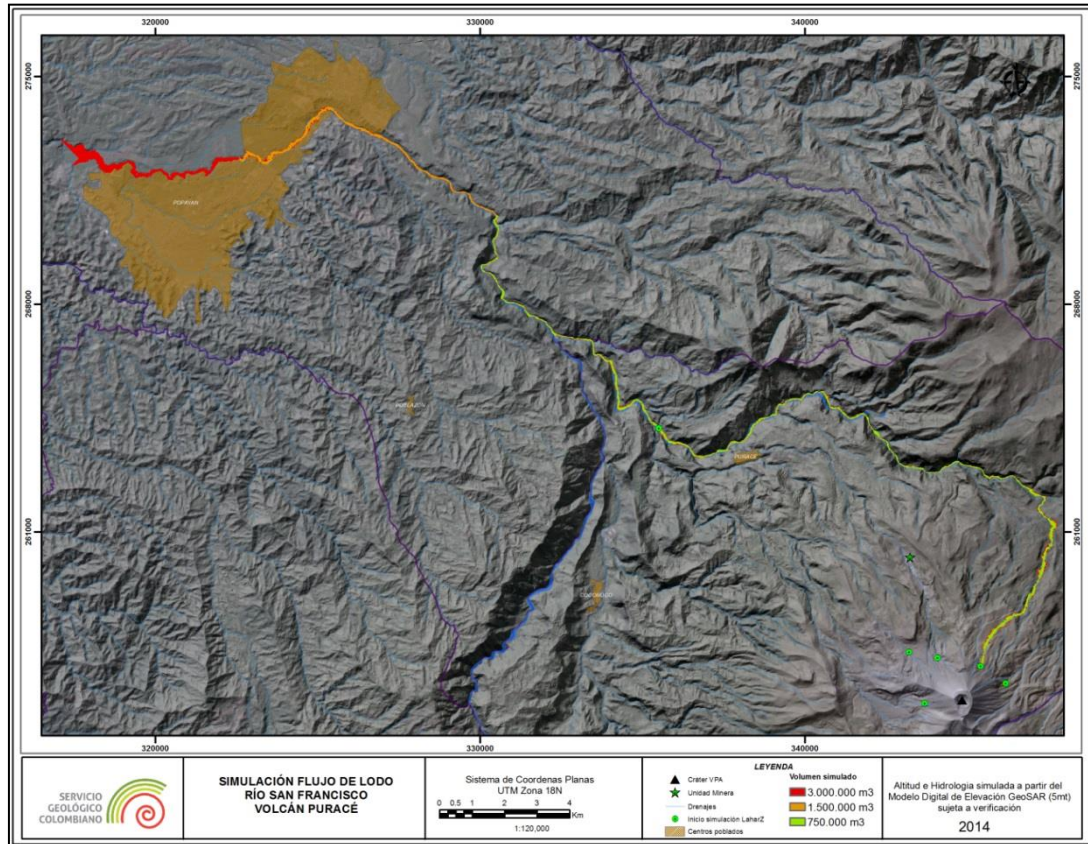


Figura 50. Resultado de la simulación con *LaharZ* en el río Cocuy sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

5.3.7 Simulación para la confluencia de los ríos Anambío y San Francisco (SimVPA_LZ07)

Adicionalmente, se contempló el sector de la confluencia del río Anambío (al que le tributa sus aguas la quebrada Agua Blanca) con el río San Francisco (al que le tributa sus aguas el río Vinagre); esta zona se tomó en consideración ante la posibilidad de que de manera simultánea, flujos de lodo provenientes tanto del río San Francisco como del río Anambío, converjan sumando sus volúmenes, con el consecuente impacto para la población y el territorio en el que esta habita. El sitio de inicio de la simulación está localizado a más o menos 12 kilómetros del cráter del volcán.

Como resultado de la simulación se obtuvo una distribución del flujo simulado que se canaliza por el río San Francisco, para luego desembocar en el río Cauca, está simulación alcanza un recorrido aproximado de 41 kilómetros desde su punto de inicio.

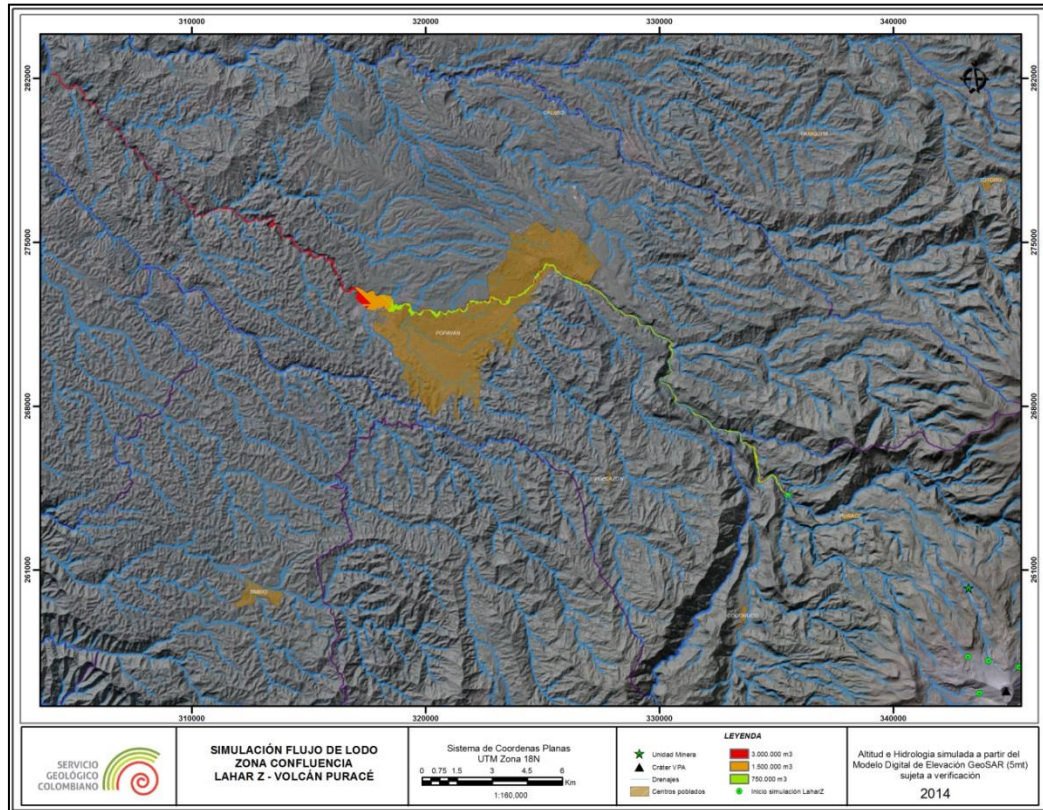


Figura 51. Resultado de la simulación con *LaharZ* en la zona de confluencia sobre el DEM GeoSAR, utilizando el método con la recalibración para el caso de VP.

Como se observa en la figura anterior (51), en su recorrido el flujo simulado también alcanza a pasar por el área urbana del municipio de Popayán, en donde se encuentra localizada gran cantidad de población y que está asentada sobre sectores aledaños a la margen del río Cauca, luego de pasar por el sector urbano se encañona debido al cambio de morfología en el río Cauca alcanzando el sector rural del municipio.

5.4 OBTENCIÓN DEL POLÍGONO CORRESPONDIENTE AL FLUJO DE LODOS DEL VPA, COMO INSUMO PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA

El trabajo de simulación realizado para el modelamiento de *lahares* en el VPA fue ampliamente discutido y analizado por parte de los autores del presente informe, con el apoyo del geólogo Bernardo Pulgarín.

El análisis de los resultados contempló la valoración de las distancias alcanzadas en las simulaciones por los lahares modelados, su distribución sobre la topografía que representa el DEM utilizado y un análisis preliminar de

las alturas alcanzadas por el flujo (dato que no arroja directamente el programa), desarrollado con base a una modificación propia de la metodología propuesta por Raphael Worni en su tesis doctoral denominada **“Volcanic eruption-related impacts on glaciers and modelling of lahars at Nevado del Huila, Colombia”**, desarrollada en el año 2008; en esta metodología se plantea como se pueden obtener las alturas alcanzadas por el modelamiento a partir del uso de los archivos de simulación de *LaharZ* y el uso del DEM con modificaciones a la zona que inunda el programa como se muestra en la figura 52.

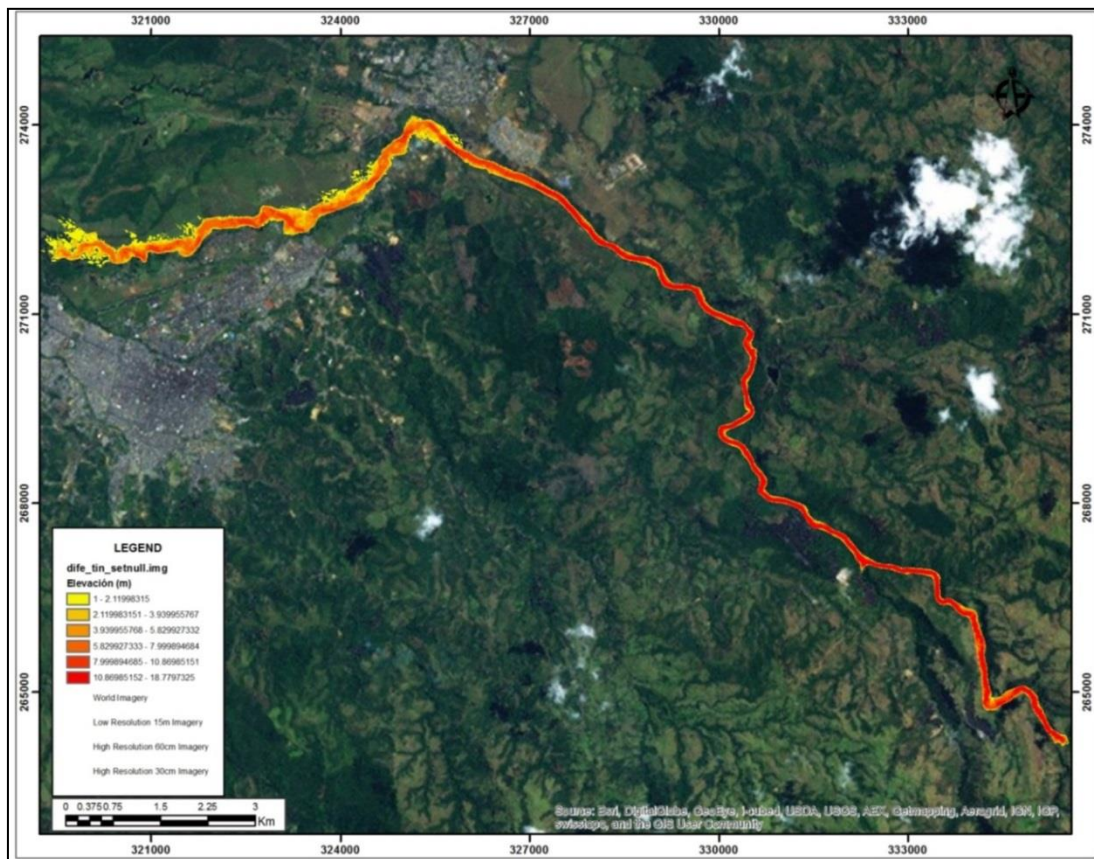


Figura 52. Resultado de la aplicación del método propuesto por Worni (2008), para el cálculo de alturas de inundación para la simulación con *LaharZ*, para el caso de VP.

La Figura 53 muestra el resultado de la simulación de los flujos de lodo, producto del proceso de modelamiento por los seis drenajes de interés en la zona de influencia de volcán Puracé; se aprecia el posible alcance y la distribución del fenómeno (tomando el resultado de la simulación con 3.000.000 m³, valor máximo de las simulaciones), denotando las zonas que podrían ser afectadas por el *lahar* que incluyen las partes altas del volcán y la mayoría de

los valles de los ríos y quebradas que nacen en este sector, además del alcance logrado hasta el área urbana del municipio de Popayán.

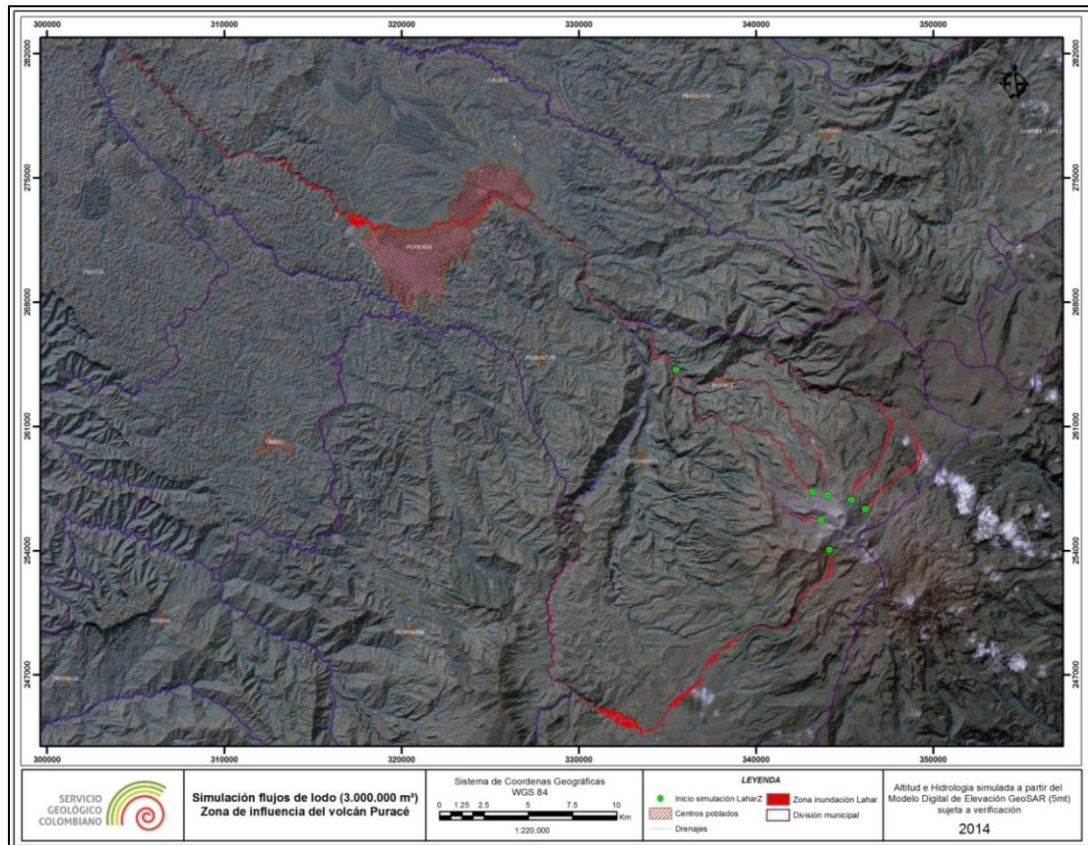


Figura 53. Integración de los resultados del modelamiento de flujos de lodo, mediante *LaharZ*, para el VPA.

LIMITACIONES DEL MÉTODO

LaharZ es un software que ha sido ampliamente usado en el mundo para la estimación preliminar de la amenaza asociada a lahares, como respuesta rápida ante crisis volcánicas, principalmente en el caso de volcanes sobre los cuales no se cuenta con información detallada de su registro geológico y/o actividad histórica y en los que se quiere tener una idea rápida de las zonas que podrían ser inundadas o afectadas por un lahar (Darnell *et al.*, 2013).

En cuanto a los resultados obtenidos empleando LAHARZ, no es posible obtener una estimación confiable de la altura de inundación (especialmente en zonas planas) y de parámetros físicos del flujo como su velocidad o la presión dinámica generada, parámetros esenciales para una posterior estimación de los posibles daños en edificaciones y obras de infraestructura.

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

Sin desconocer el grado de validez de sus resultados (lo que motivó la escogencia y empleo de esta herramienta en el presente trabajo), es importante tener en cuenta que *LaharZ* es un modelo “semi-empírico” (calibrado estadísticamente con eventos ocurridos en algunos volcanes a nivel mundial y ensayos en laboratorio), que sólo considera los cambios de pendiente de un “flujo” de volumen constante que corre sobre una base topográfica; por lo tanto, no es posible con este método tener en cuenta propiedades físicas del flujo como pueden ser su viscosidad, concentración, porcentaje de agua y de sedimento, aporte de volumen adicional derivado del caudal de agua (variable de acuerdo al régimen de lluvias) y de detritos o sedimentos socavados o arrastrados por las corrientes de agua presentes en los cauces de los ríos afectados, entre otras.

Adicionalmente, a partir de las experiencias a nivel mundial de la aplicación de *LaharZ*, se ha identificado como una limitación importante una mayor incertidumbre en sus resultados en las zonas identificadas como inundables con topografía plana (bajas pendientes), que a menudo corresponden a zonas de valles donde se localizan asentamientos humanos rurales y urbanos, donde se requieren estudios más detallados.

Por todo lo anterior, se recomienda validar los resultados preliminares obtenidos con *LaharZ*, empleando un software que involucre variables físicas de los flujos a simular, tanto en su parametrización inicial como en los resultados obtenidos, de manera que sirvan de insumo para posteriores trabajos de estimación de la vulnerabilidad y el riesgo asociados.

6. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LAVA

En el volcán Puracé, el registro geológico de los depósitos de flujos de lava está bastante conservado, como se puede apreciar en la figura 54. Por su composición andesítica, las lavas en el volcán se caracterizan por ser de viscosidad media.



Figura 54. Panorámica, en donde se pueden apreciar los depósitos de flujos de lava dejados por erupciones pasadas en el volcán Puracé.

En referencia a este tipo de productos, en el VP Monsalve *et al.*, (2012) diferencia dos conjuntos de lavas principales, las que forman el cono activo, denominadas lavas somitales, las cuales son generalmente masivas, de corta longitud (menor de 4 km) y espesores promedios de 10 metros y el conjunto lavas rojas, las cuales son un importante apilamiento de lavas de aproximadamente 40 metros de espesor total (individual variable de 3 a 8 m),

Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

que surgen de un punto en el noroccidente del cráter, y alcanzan distancias de hasta 5 km a partir de este (Figura 55).

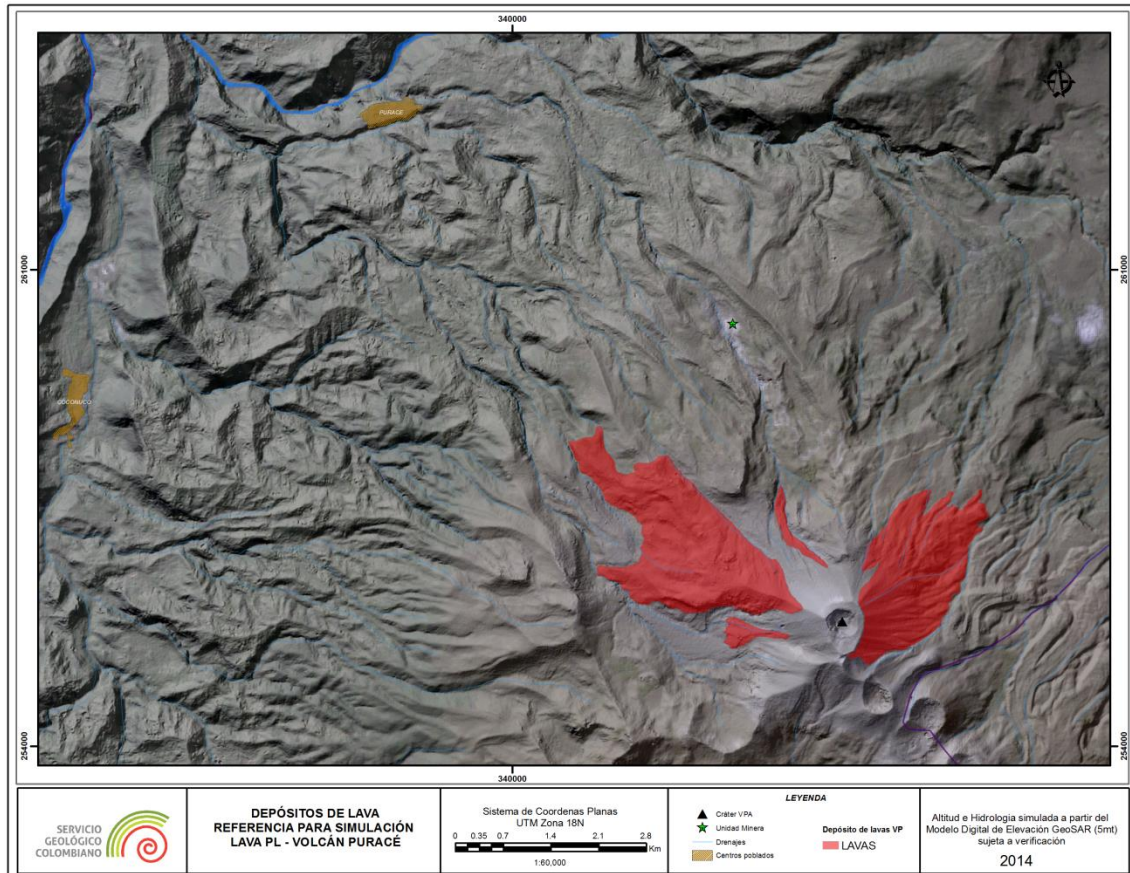


Figura 55. Distribución de los depósitos de lava en el volcán Puracé.

Los parámetros de entrada para las simulaciones se organizaron de acuerdo con los datos obtenidos en campo, tomando como referencia el área y espesor promedio de los depósitos del conjunto de lavas rojas asociados al volcán, determinando así el volumen total a simular; igualmente, se determinaron los posibles puntos, a partir de los cuales, fluirían las lavas generadas en el cráter actual del volcán Puracé.

6.1 LAVA PL, MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE LAVA EN EL VOLCÁN PURACÉ

Para la simulación de flujos de lava en el VPA se utilizó el código LavaPL (Connor *et al.*, 2012) escrito en lenguaje Perl por Chuck y Laura Connor de la Universidad del Sur de la Florida (USF), código de libre acceso y que hace parte de las herramientas offline en la página web de VHUB.

Éste código simula el emplazamiento del flujo a través del análisis de las celdas vecinas del modelo digital de elevación de la superficie (MDE) y de las condiciones particulares de pendiente propia del MDE y del espesor del flujo alcanzado en cada simulación distribuida por cada nueva pulsación o volumen parcial del flujo de lava hasta alcanzar el volumen a simular. El modelo matemático que distribuye el flujo es el del *Autómata Celular*, en el cual, el espacio definido por una o un conjunto de celdas con valores Z definidos, son inducidos a tomar valores H (espesor) a partir de un conjunto finito de estados (K inicial (t_0), K simulado (t_1), K reposo (t_n)) donde cada celda asume un estado en función del estado de las celdas vecinas, las cuales se conservan hasta que son nuevamente modificadas por un nuevo pulso o ejecución del algoritmo.

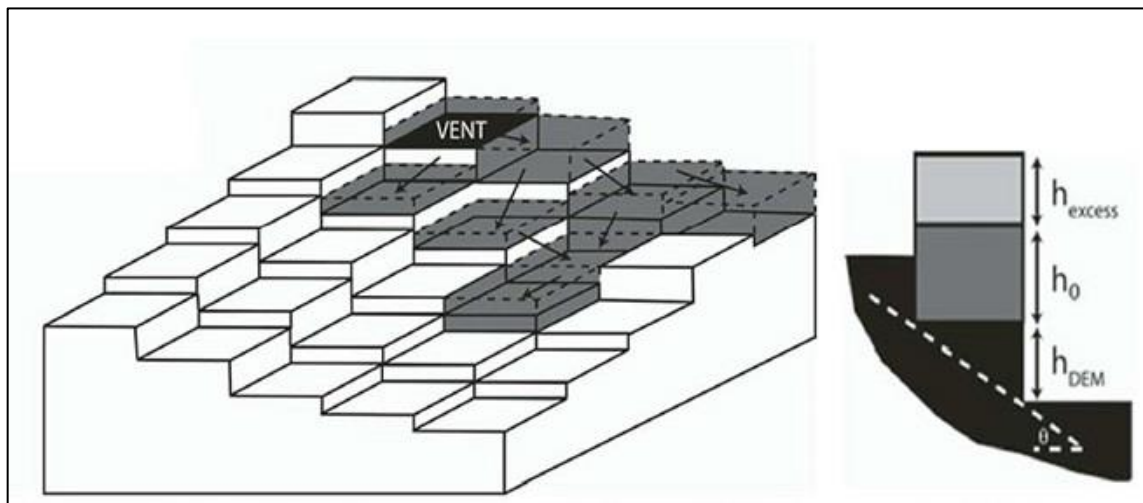


Figura 56. Simulación numérica de lavas (Charbonnier S. 2013).

En el esquema anterior se muestra la simulación numérica del flujo de lava (celdas grises) que se propagan a través de la superficie topográfica en el MDE desde un punto de emisión (celda negra), la superficie que aún no ha sido alcanzada por el flujo se muestra por las celdas blancas. El perfil de la derecha muestra el espesor de la lava que permanecerá en la celda (h_0) y el exceso de espesor (h_{excess}) que avanzará a las celdas vecinas en función de la diferencia de nivel entre las celdas (h_{DEM}) definida a partir de la pendiente máxima (θ) (Connor *et al.*, 2012 y Charbonnier, 2013).

6.2 DATOS Y PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LAS SIMULACIONES CON EL CODIGO LAVAPL

Para la ejecución de las simulaciones del flujo de lava en el volcán Puracé mediante *LavaPL* se requiere contar tanto con información espacial (DEM de la región de interés) como de las especificaciones de los parámetros que permitan

correr el modelo de simulación (Volumen por pulso de lava, puntos de emisión, volumen total a simular y espesor de la lava).

6.2.1 Especificación de los datos SIG (DEM)

El modelo digital de elevación usado para realizar los modelamientos con LavaPL, es el mismo DEM utilizado para las simulaciones ejecutadas con TITAN 2D y LAHARZ, la variación entre los modelos radica en el uso de extensiones específicas para su almacenamiento y que son requeridas por cada código de simulación; para el caso de la simulación de lavas, el DEM adoptado fue el DEM GeoSAR de la banda P con resolución de 5 metros.

6.2.2 Especificación de los parámetros del sistema

Los parámetros de entrada al modelo no están definidos por las características químicas y/o dinámicas del fluido que se pretende modelar (lavas), sino que están determinados por los datos físicos que se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros requeridos por LavaPL para correr la simulación de flujos de lava en VP.

Datos requeridos para el uso de Lava PL	
Modelo	Determinístico
Topografía	Modelo Digital de Elevación en coordenadas proyectadas UTM y formato ASCII
Parámetros	Espesor del flujo de Lava (m) Volumen de Lava emitida por pulso (m3) Volumen Total de Lava a ser distribuida (m3)
Punto de Emisión	Coordenadas proyectadas en UTM del punto de emisión (Vent)

6.2.1.1 Modelo de Elevación Digital (base para la topografía)

El modelo digital de elevación utilizado por el código LavaPL, se obtuvo a partir de una imagen de radar del sensor GeoSAR del año 2009 (con resolución espacial 5 metros para la banda P); esta imagen fue suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, a partir de esta imagen se organizó el DEM para la simulación, estructurando un archivo con las elevaciones del terreno y con una extensión exportada a código Ascii como un archivo de texto, eliminando sus cabeceras y renombrando el archivo a formato *.dem, que es la extensión requerida por la herramienta al correr bajo línea de comandos.

6.2.1.2 Volumen y espesor promedio para el flujo de lava simulado

Para determinar el volumen a simular se tomó como referencia el registro geológico de los depósitos de lava (Conjunto de lavas rojas) en el volcán (datos de su área y espesor promedio), determinando así el volumen total a simular en $5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Con base en el área de los depósitos de las lavas cartografiadas y tomando un espesor promedio de 10 metros, se obtuvo el volumen total a modelar descrito en el párrafo anterior; además de este valor, se necesita determinar el volumen por pulso de lava, que está en función al volumen estimado, el área de la celda del Modelo Digital de Elevación y el espesor promedio del flujo.

De acuerdo a los creadores del código (de acuerdo a comunicación oral), para estimar este valor se pueden aplicar las siguientes formulas, según sea el caso del volumen a modelar así:

- (i) Para volúmenes grandes > 100 millones de m^3 :

$$\text{Volumen pulso de lava} = \text{Volumen total} / (\text{área del pixel MDE} * \text{espesor})$$

- (ii) Para volúmenes pequeños < 100 millones de m^3 y alta resolución del MDE

($> 10 \text{ m}$):

$$\text{Volumen pulso de lava} = \text{área del pixel MDE} * \text{espesor}$$

En el caso del VPA, como el volumen es de $5.000.000 \text{ m}^3$, se adoptó la segunda fórmula dando un volumen por pulso de lava de: 250 m^3 .

6.2.1.3 Sitios de inicio simulación LavaPL

Para analizar la posible zona de inundación de lavas se recomienda definir puntos de emisión en el cráter del volcán, puntos de posible actividad geotermal como campos fumarólicos, zonas de fractura por fallamiento y en general alrededor de las laderas del volcán.

Para el caso del VPA, los puntos de inicio de las simulaciones fueron definidos determinando seis sitios de emisión que se describen en la tabla 14.

Tabla 14. Sitios de inicio en coordenadas UTM Z18N, definidos para correr la simulación de flujos de lava en VP.

Sitio Inicio	Código	Coordenada Este (UTM)	Coordenada Norte (UTM)
Q. Agua Blanca	LavaPL_VP001	344345.58	255734.77
Rio Anambío	LavaPL_VP002	344486.60	256133.24
Rio Vinagre	LavaPL_VP003	344749.46	256274.00
Q. La Esperanza	LavaPL_VP004	345046.06	256242.11
Rio San Francisco	LavaPL_VP005	345277.70	256039.31
Rio Cocuy	LavaPL_VP006	345327.58	255652.49

6.2.2 Resultado de las simulaciones para flujos de lava en el VPA, utilizando Lava PL

Las simulaciones desarrolladas se consideraron como resultados factibles en relación con las características de las lavas encontradas en Puracé (andesitas), que en su composición son poco viscosas y por lo tanto fluidas, el ejercicio se trabajó con un volumen esperado de 5 millones de m³ y para un espesor promedio de 10 metros.

En los resultados se observa la fuerte correlación de las lavas con la topografía, la cual sigue la dirección de máxima pendiente, encauzándose por los cauces de los ríos y quebradas que nacen en el área proximal del volcán cuando el alcance de estas lo permite.

Las lavas que se simularon por el sector W del VP (sector quebrada Agua Blanca), se desplazan por la ladera, alcanzando distancias cortas de más o menos 1.5 km.

Las lavas simuladas por el sector del río Anambío (flanco NW del volcán) se desplazan en sentido de la pendiente alcanzando una distancia aproximada de 1.4 km desde su punto de emisión.

En el caso de las lavas simuladas en dirección al río Vinagre (flanco NNW del volcán), estas se desplazan por las laderas del volcán y se encauzan en el río Vinagre, alcanzando 3 km de recorrido desde su sitio de generación.

Las lavas que surgen al costado NNE (sector correspondiente a la quebrada La Esperanza) se distribuyen por la pendiente de las laderas del volcán y alcanzan un recorrido de 1.6 km.

Para el caso de los sitios de inicio localizados hacia el E y el SE del volcán Puracé, su recorrido no supera los 3.5 km, encauzándose por la cabecera del río Cocuy.

En conclusión el área que podría ser afectada por este tipo de fenómeno incluye las partes altas del volcán y de los ríos y quebradas que nacen en él, alcanzando distancias menores a 5 km, sin afectar zonas pobladas o lugares con algún tipo de concentración de personas (el sitio con presencia permanente de personas más cercano es la unidad minera Vinagre, que es administrada por el Cabildo de Puracé y que está ubicada a unos 4.5 km del cráter del VP); en la figura 57 se presentan los resultados del modelamiento de flujos de lava con su distribución y alcance respecto de los seis sitios de inicio para cada simulación.

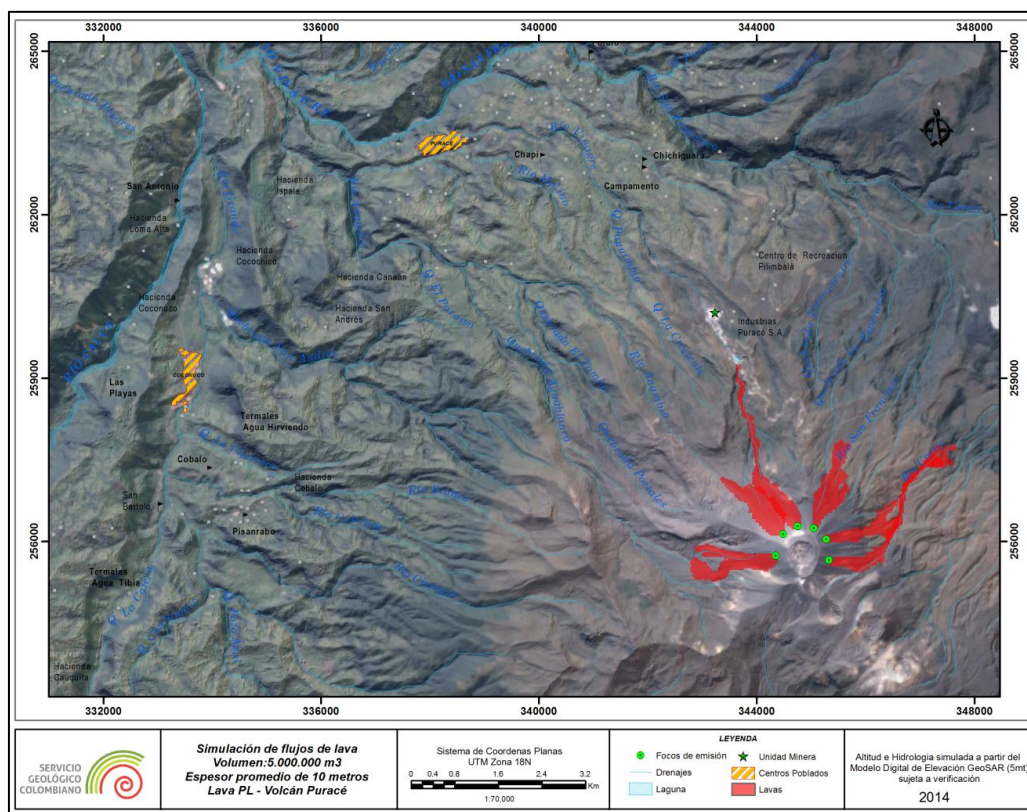


Figura 57. Flujos de lava modelados mediante LavaPL para el VPA.

CONCLUSIONES

La zonificación por caídas piroclásticas, flujos piroclásticos, flujos de lodo (*lahares*) y flujos de lava, es el resultado de la integración del análisis de la actividad eruptiva histórica del volcán, representada en el registro geológico y en el legado histórico. Las herramientas computacionales (TEPHRA2, TITAN2D, LAHARZ, LAVAPL) utilizadas, permitieron realizar aproximaciones de futuros eventos de esta naturaleza, proporcionando un importante insumo para la actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé.

La cantidad de simulaciones para caídas piroclásticas en futuros trabajos de actualización de los mapas de amenaza volcánica, debe ser evaluado con respecto a los conceptos estadísticos, considerando que grandes números de ellas (1000 o mayores), comprometen tiempos largos de computación pero al mismo tiempo aportan mejores aproximaciones sobre la distribución y alcance de los fenómenos volcánicos.

Es importante en el análisis de modelamiento computacional de corrientes de densidad piroclásticas concentradas (flujos piroclásticos), conocer de manera detallada la topografía y morfología del volcán, ya que la configuración de los drenajes y la textura de la superficie del terreno, determinan de manera importante el comportamiento y la distribución del material granular simulado.

Se debe tener presente que aunque los resultados obtenidos con LAHARZ, permiten contar con una aproximación del área inundada por el flujo, dadas las limitaciones propias del programa, no es posible determinar la altura y las velocidades alcanzadas por el flujo en el modelamiento.

Lava PL, permite obtener la distribución espacial de los flujos de lava simulados, ajustándose a la resolución espacial del modelo de elevación digital utilizado, partiendo de posibles sitios de emisión (*vent*) que se especifican en relación con el conocimiento que se tiene del volcán y de acuerdo a las características de la reología del flujo lávico que se pretende modelar.

Se deben realizar nuevas simulaciones si se adquiere un mayor conocimiento acerca del volcán, sus procesos magmáticos y eruptivos; si hay cambios considerables en su morfología y topografía; si se detectan variaciones en su

estilo eruptivo o su centro de emisión, o se cuente con modelos más adecuados para simular los diferentes fenómenos volcánicos.

Los resultados obtenidos con el uso de las herramientas computacionales para las simulaciones de un evento volcánico en particular, deben ser analizados y discutidos por el grupo de investigación para enriquecer el proceso de trabajo y mejoramiento del manejo de estos modelos bajo los lineamientos del SGC, como son aspectos relacionados con escalas de trabajo, representación de la información, entre otros elementos a considerar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONADONNA, C., CONNOR, L. J., CONNOR, C. B., COURTLAND, L. M. 2010 "Tephra2," <https://vhub.org/resources/tephra2>.
- CARDONA C.; y PULGARÍN B. 2008. Ajuste del Método LAHAR-Z a la Cuenca del Río Páez (Colombia), con base en los Flujos de Lodos Ocurridos en los años 1994 y 2007 en el sector del Volcán Nevado del Huila. VII Encuentro internacional del grupo de trabajo de nieves y hielo de América Latina del PHI-UNESCO. Manizales (Colombia).
- CASTRUCCIO, A. & CLAVERO, J. En preparación. 2014. Lahar simulation at active volcanoes of the Southern Andes: implications for hazard assessment. Natural Hazards.
- CHARBONNIER, S. 2013. The Titan2D simulation tool: overview and applications. VHUB working meeting. Manizales, Colombia.
- CHARBONNIER, S. and GERTISSER, R. 2011. Deposit architecture and dynamics of the 2006 block-and-ash flows of Merapi Volcano, Java, Indonesia. *Sedimentology* 58: 1573-1612.
- CONNOR, L., CONNOR, C., MELIKSTIAN, K., and SAVOV, I. 2012. Probabilistic approach to modeling lava flow inundation: a lava flow hazard assessment for a nuclear facility in Armenia. *Journal of Applied Volcanology*.
- COURTLAND, L. 2011. Tephra2 Tutorial Scripts. Tephra2 Tutorial 1: An Introduction, consultada en (<https://vhub.org/resources/tephra2>).
- DARNELL, A. R., PHILLIPS, J.C., BARCLAY, J., HERD, R.A., LOVETT, A.A. & COLE, P.D. 2013 English Developing a simplified geographical information system approach to dilute lahar modelling for rapid hazard assessment. *Bulletin of Volcanology*. Springer-Verlag. Berlin. 16 p.
- GEOPHYSICAL MASS FLOW GROUP. 2007. TITAN 2D User Guide. University at Buffalo, NY, USA.

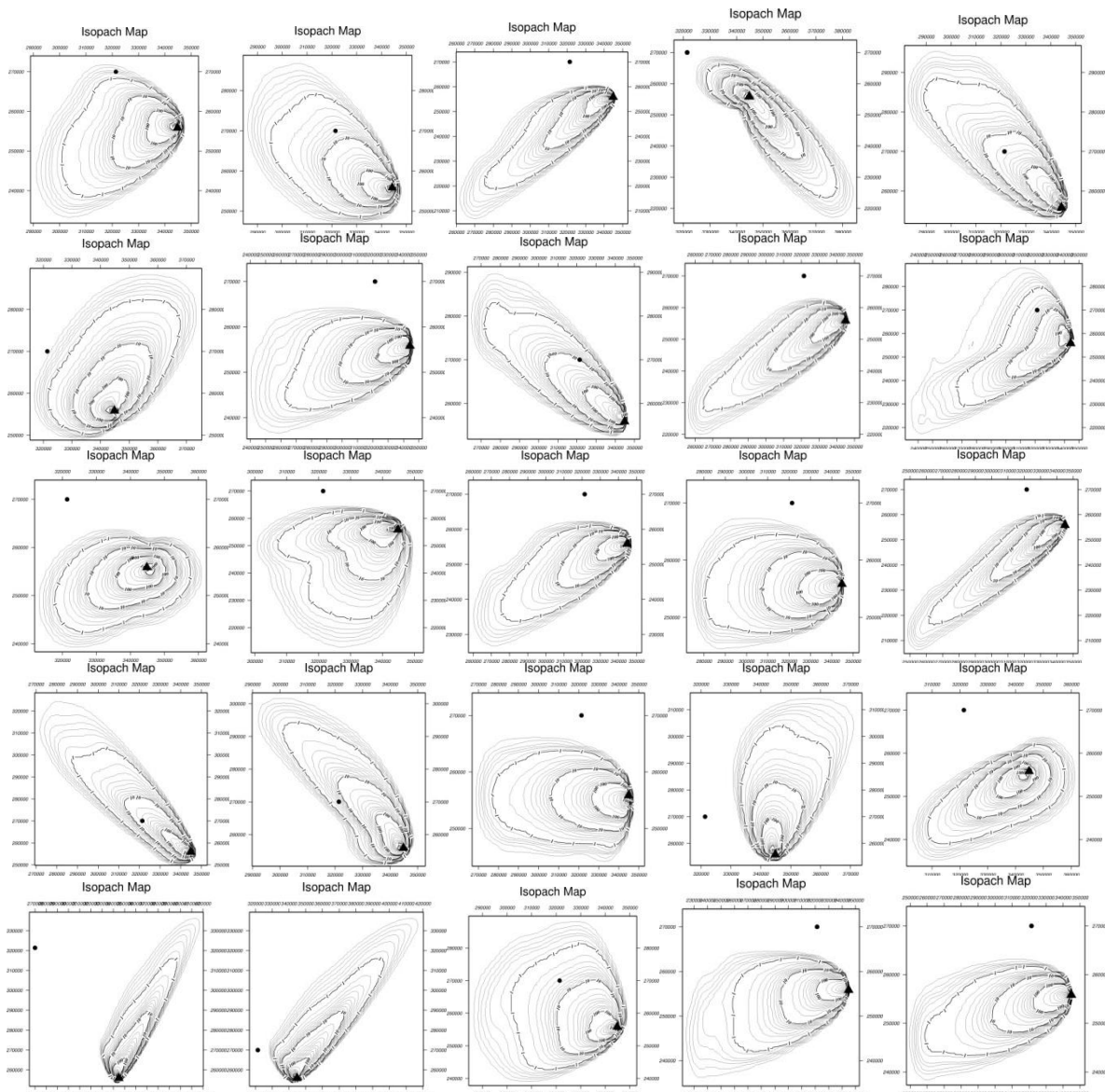
- IVERSON, R.M., SCHILLING, S.P., and VALLANCE, J.W. 1998. Objective delineation of areas at risk from inundation by lahars: Geological Society of America Bulletin, v. 110, no. 8, p. 972–984.
- MONSALVE, M. L. & PULGARÍN, B. 1993. Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé. Revista INGEOMINAS, Vol. 1, No. 2, p. 3-27. Bogotá.
- MONSALVE, M. L. & PULGARÍN, B. 1999. Cadena Volcánica de Los Coconucos: centros eruptivos y productos recientes. INGEOMINAS, Boletín Geológico, Vol. 37, No. 1-3, p. 17-51. Bogotá.
- MONSALVE, M.L., PULGARÍN, B., NARVÁEZ B., AGUIRRE. 2012. Geología y Estratigrafía del Volcán Puracé Actual (VPA). Servicio Geológico Colombiano –SGC-. Bogotá. 188 p.
- MONSALVE, M.L. 2014. Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Colombia), para la actualización del mapa de amenaza volcánica. Servicio Geológico Colombiano –SGC-, Dirección Geoamenazas. 50 p.
- MURCIA, H.F., SHERIDAN, M.F., MACIAS, J.L., CORTÉS, G.P. 2010. TITAN2D Simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín volcano, Colombia: Hazards implications. Journal of South American Earth Sciences. p 161-169.
- PALMA, J. L. 2013. Wind Reanalysis. University at Buffalo, consultada en (<https://vhub.org/resources/windre/>), durante 2013-2014.
- PATRA, A., BAUER A., NICHITA, C., PITMAN, E.B., SHERIDAN, M. F. BURSİK, M., RUPP, B., WEBBER, A., NAMIKAWA, L. and RENSCHLER, C. 2005. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139:1–21.
- PIERSON, T, JANDA, R, THOURET, J, BORRERO, C. 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. J Volcanol Geotherm Res 41: pp. 17-66.
- PITMAN, E.B., PATRA, A., BAUER, A., SHERIDAN, M.F., BURSİK, M.I. 2003. Computing debris flow and landslides. Physics of Fluids 15, 3638–3646.
- PULGARIN, B., CEBALLOS, A., LAVERDE, C. & ORDOÑEZ, M. 2013. Simulaciones Preliminares de Flujos de Lodo en el Volcán Nevado del

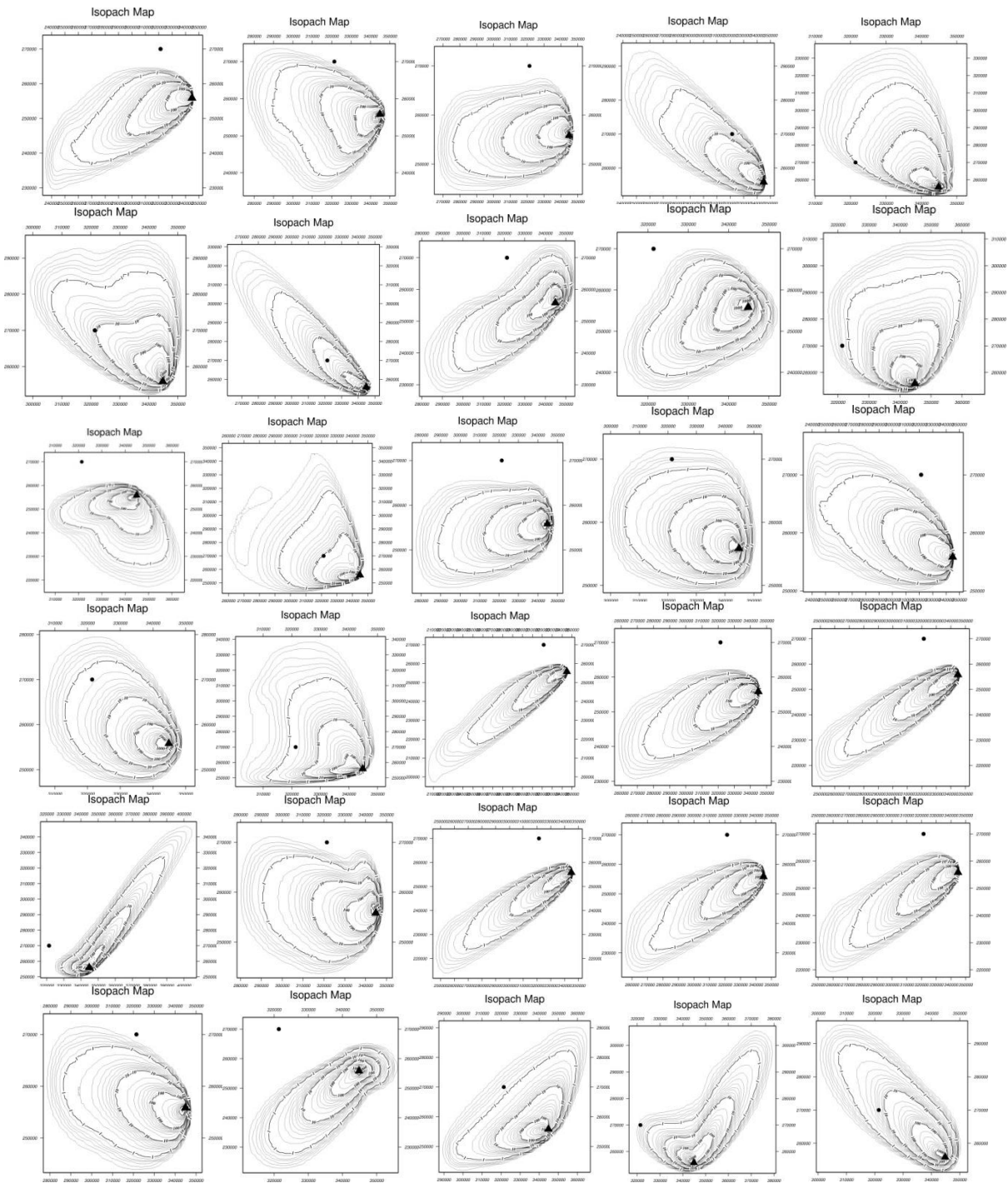
-
- Ruiz (VNR) sobre el Valle del Río Gualí. Servicio Geológico Colombiano. Popayán-Manizales. 41 p.
- SCHILLING, S.P. 1998. *LAHARZ*; GIS programs for automated mapping of *lahar* inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80 p., <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98638>.
- SCHILLING, S.P. 2014. *Laharz_py*—GIS tools for automated mapping of *lahar* inundation hazard zones: U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1073, 78 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141073>.
- STINTON, A.J., SHERIDAN, M.F., PATRA, A., DALBEY, K., AND NAMIKAWA, L.M. 2004. Integrating variable bed friction into TITAN2D mass-flow model: application to the Little Tahoma Peak avalanches. Washington. *Acta Vulcanol.* 16, 153-163.
- SUZUKI, T. 1983. A theoretical model for dispersion of tephra, in *Arc Volcanism, Physics and Tectonics*, edited by D. Shimozuru, and I. Yokoyama, pp. 95-113, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo.
- WORNI, R. 2008. Volcanic eruption-related impacts on glaciers and modelling of *lahars* at Nevado del Huila, Colombia. Diploma Thesis. Universidad de Zurich – SGC, 114 p.

ANEXO A

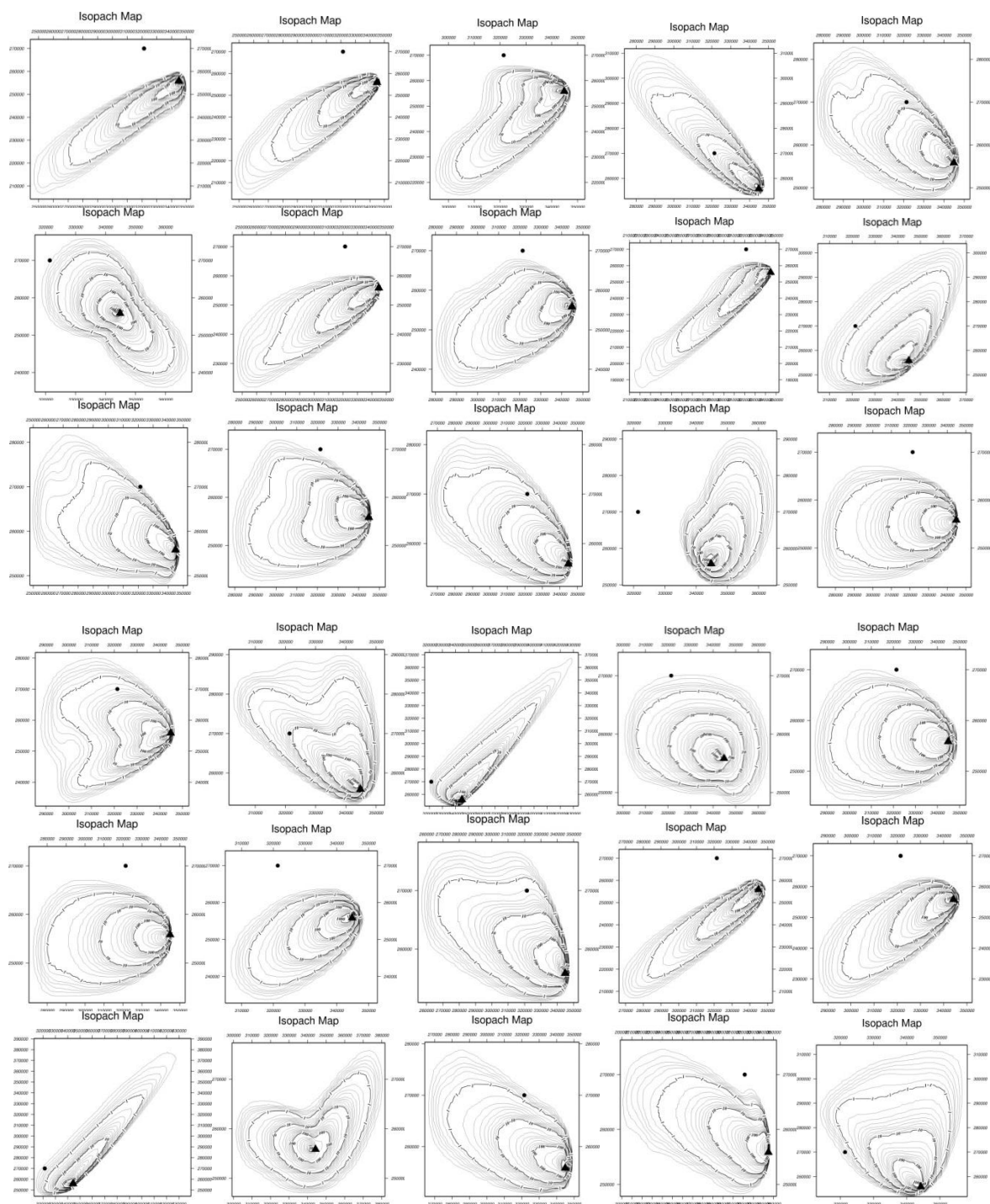
GRÁFICAS DE SIMULACIONES CON LA HERRAMIENTA TEPHRA2

En este anexo se incluye una muestra de los gráficos de las 1000 simulaciones que se corrieron para la evaluación de la amenaza por caídas piroclásticas.

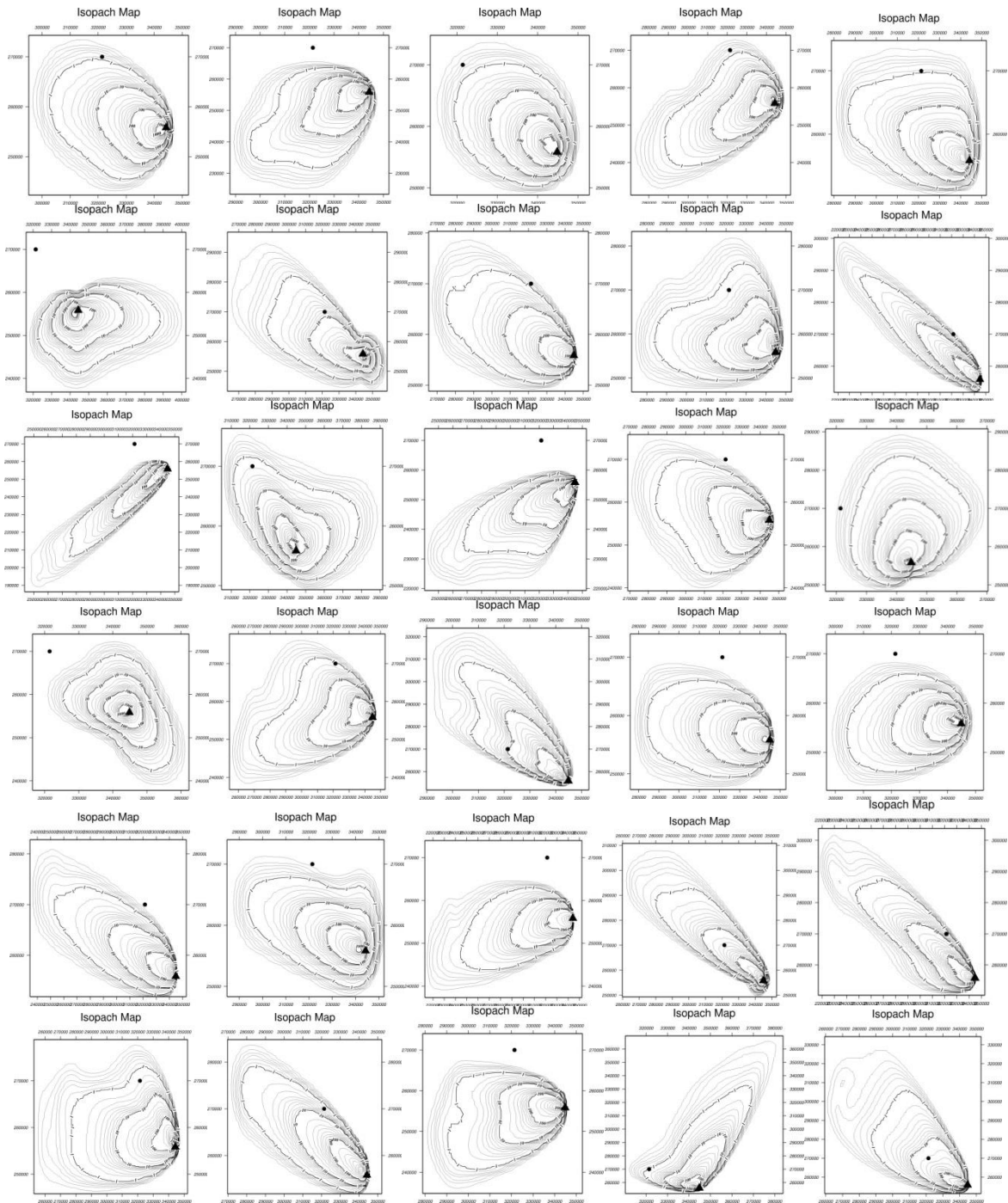




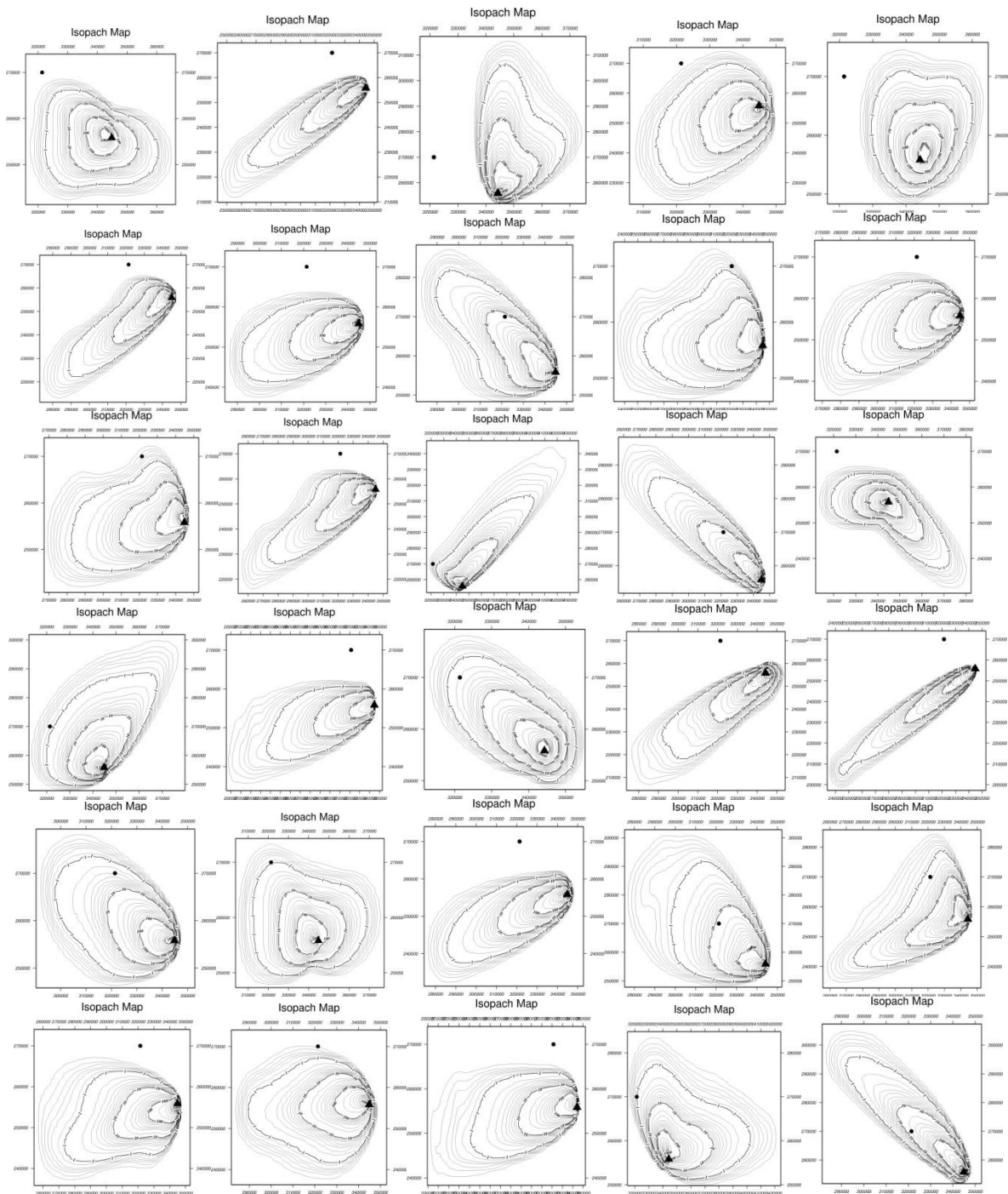
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



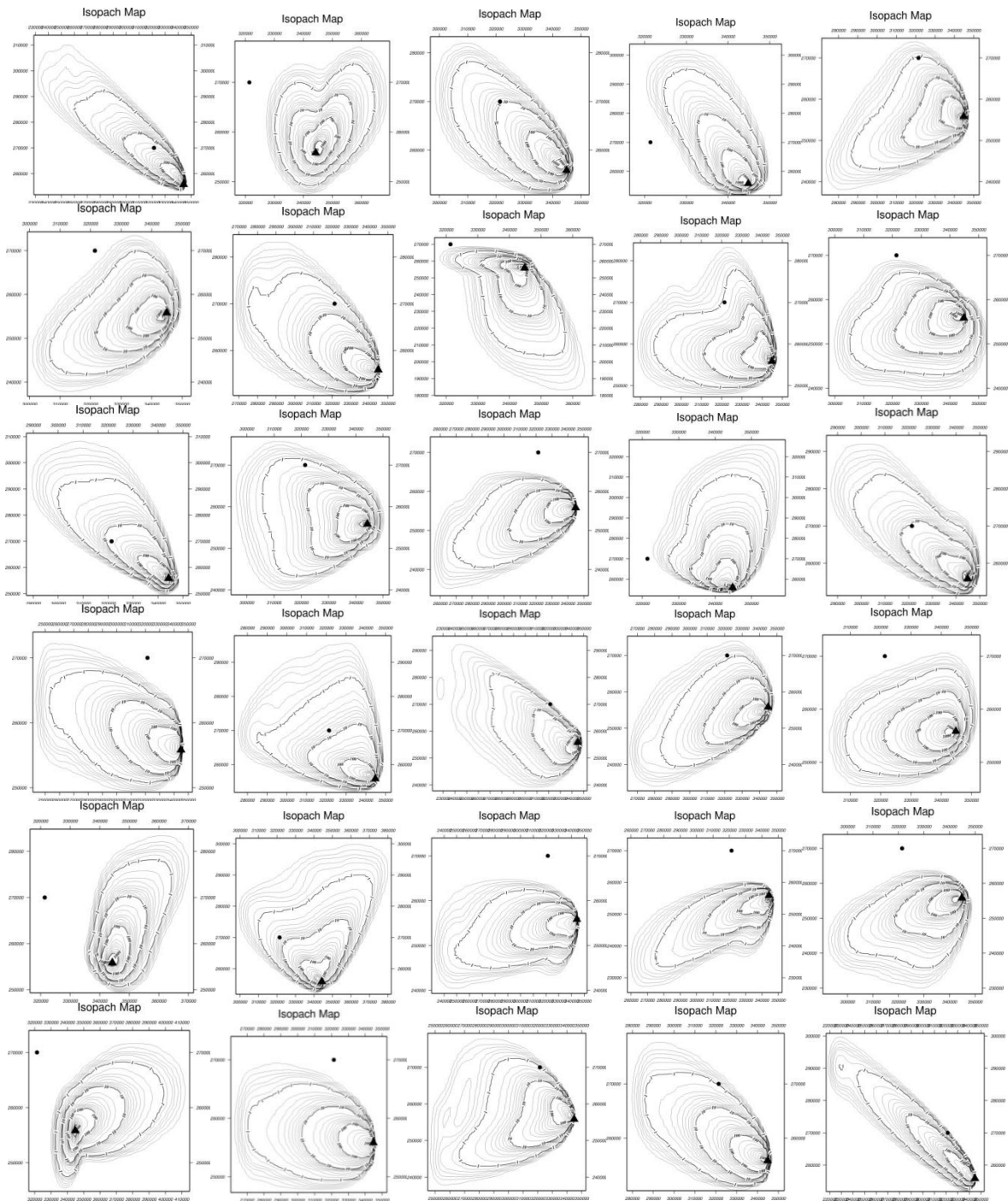
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



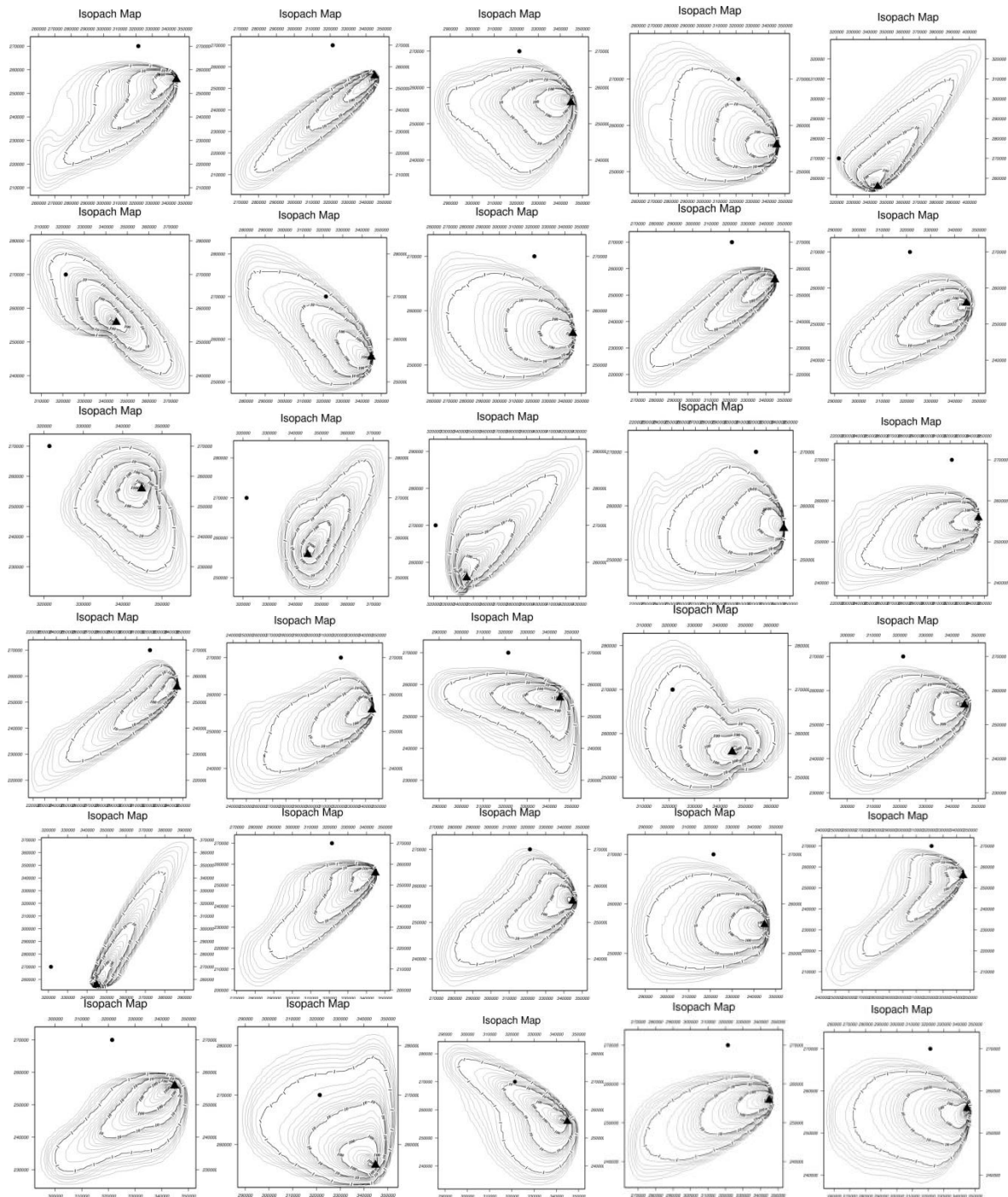
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



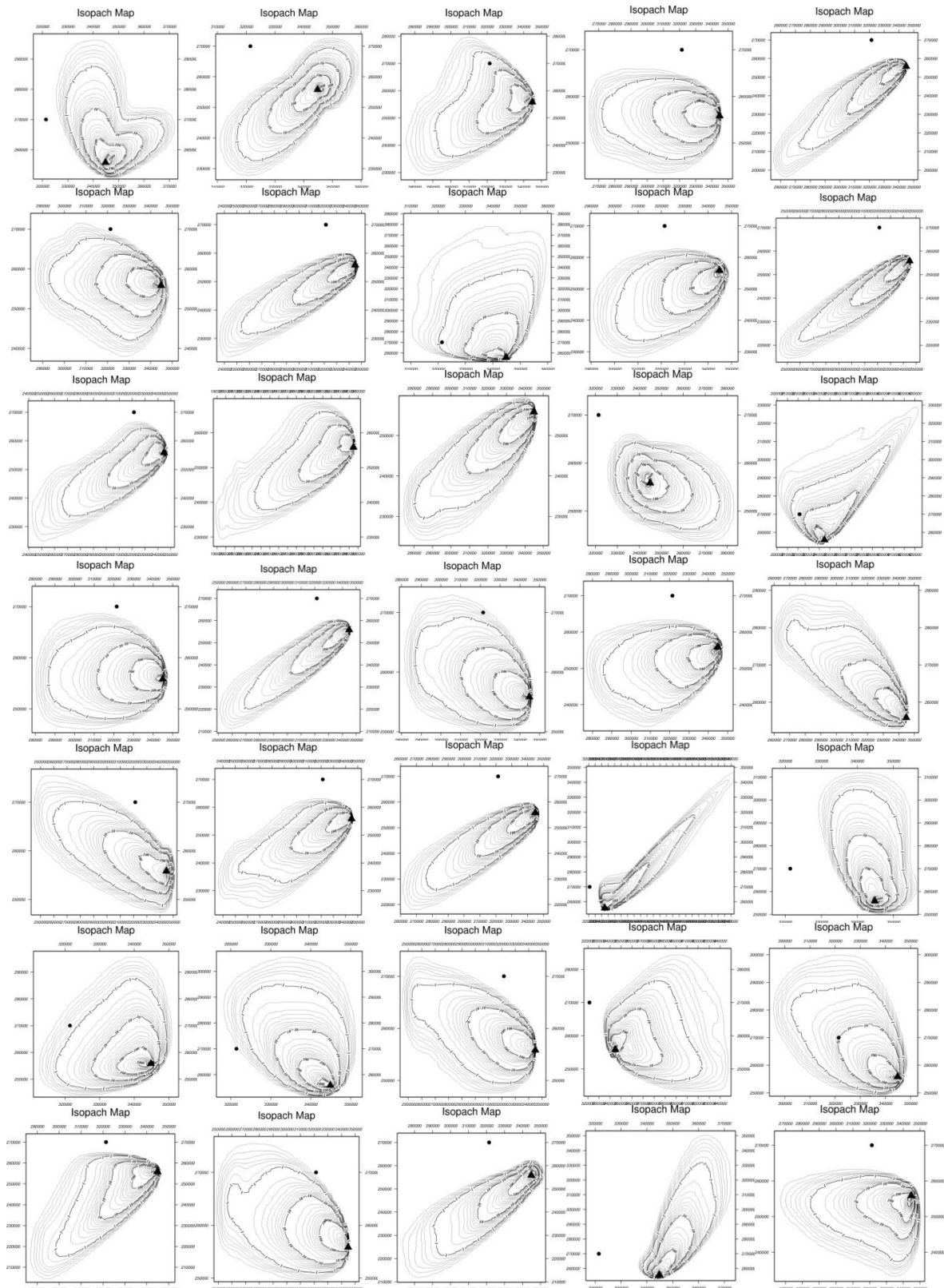
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



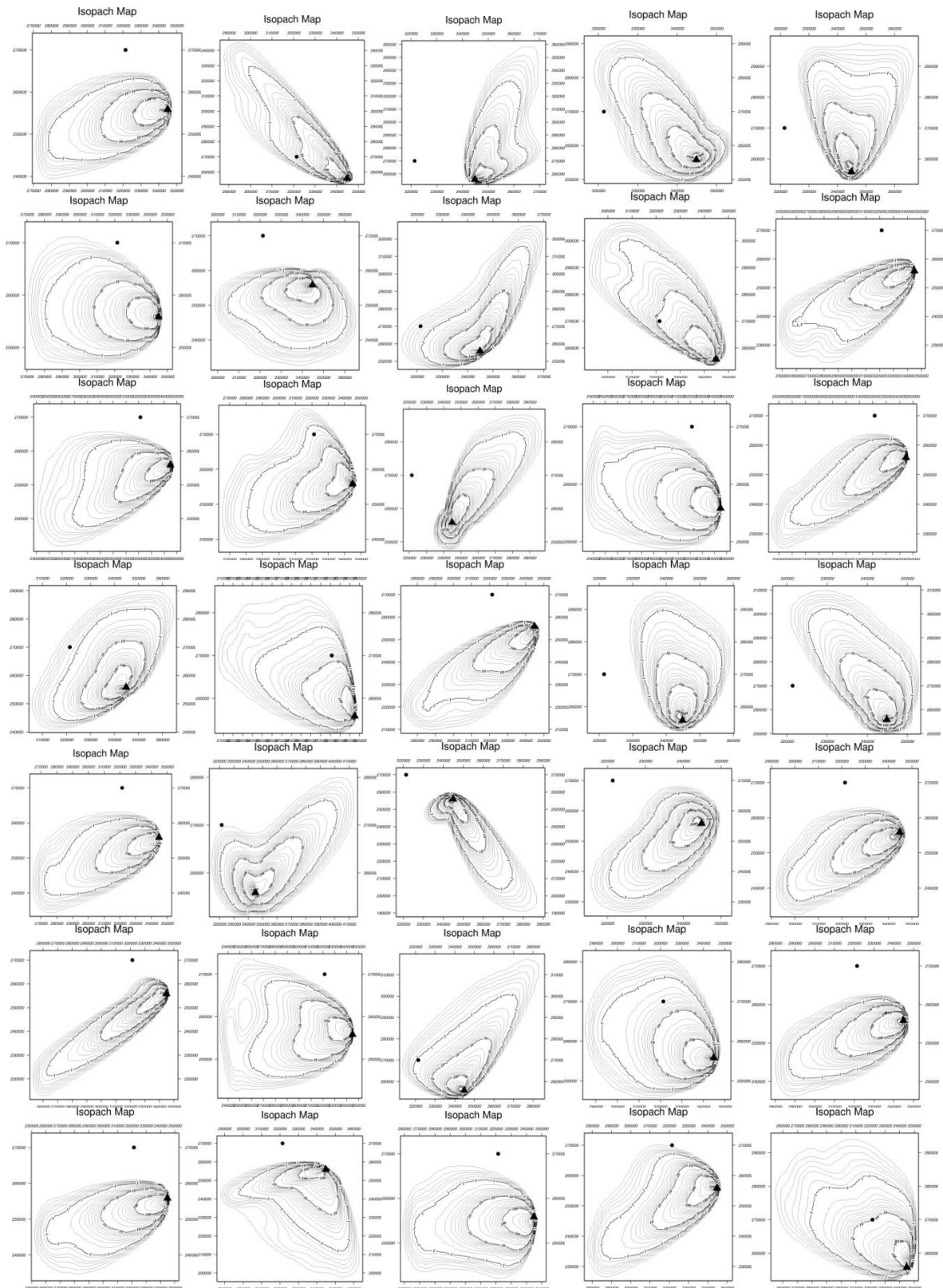
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



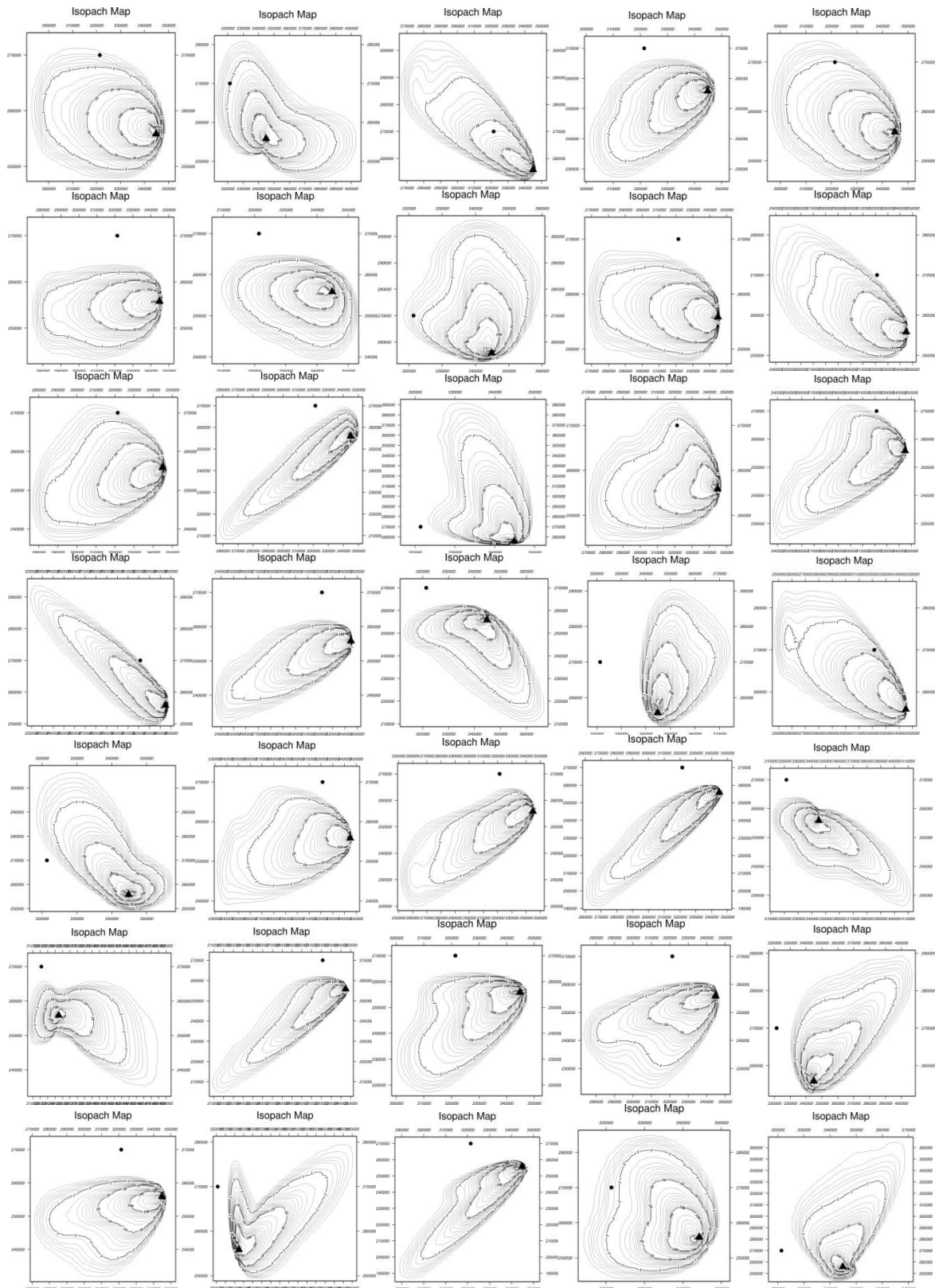
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



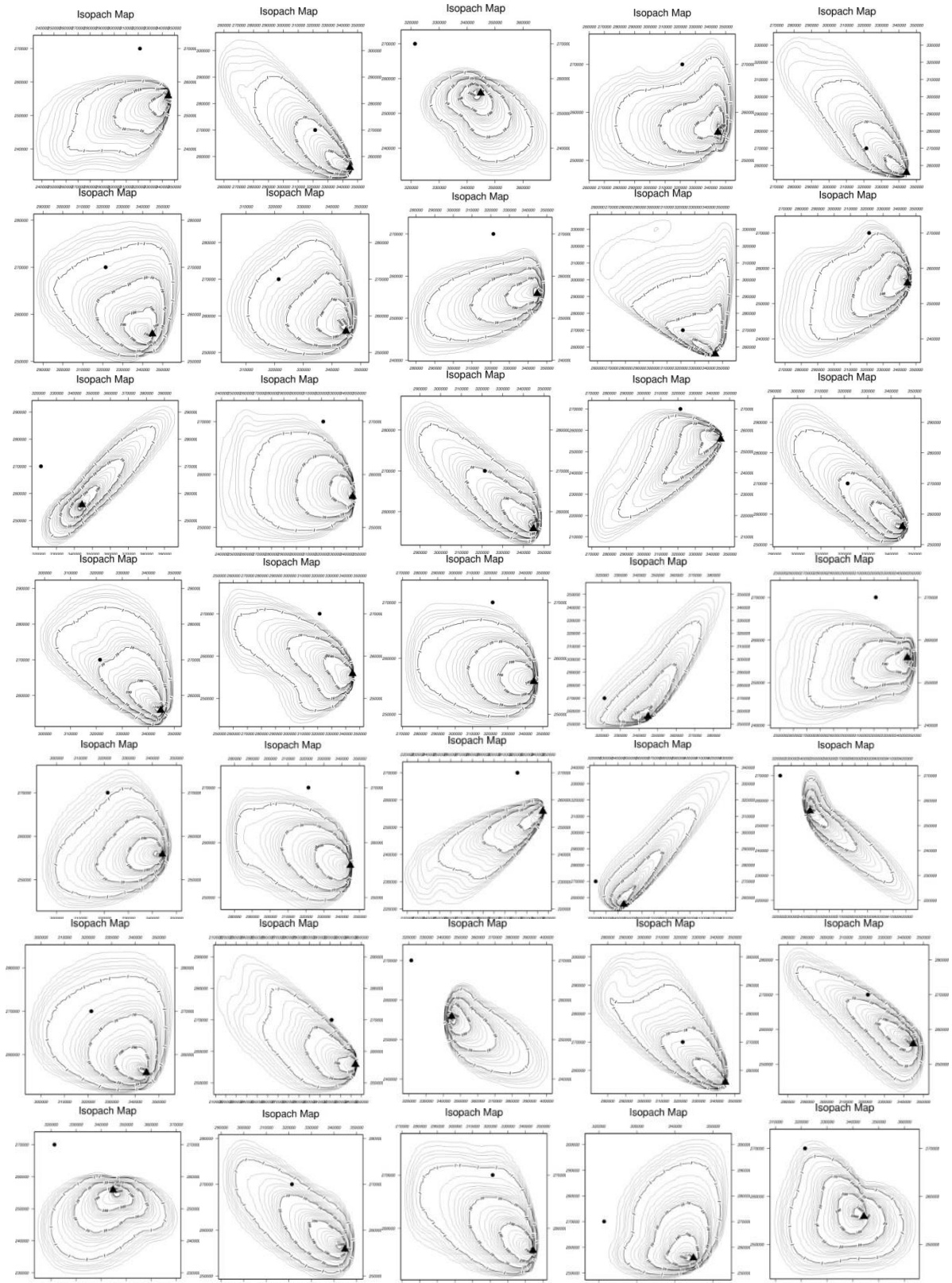
Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL



Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé Actual: Tephra 2, Titán 2D, Lahar Z, Lava PL

