

SERVICIO  
GEOLÓGICO  
COLOMBIANO



MinMinas  
Ministerio de Minas y Energía

PROSPERIDAD  
PARA TODOS

**MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN PURACÉ  
ACTUAL (CAUCA - COLOMBIA) SEGUNDA VERSIÓN (2014).  
MEMORIA**

**Bogotá, octubre de 2014**

**PROYECTO  
INVESTIGACIÓN Y MONITOREO DE LA AMENAZA VOLCÁNICA**

**DIRECCIÓN DE GEOAMENAZAS**

***MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN PURACÉ  
ACTUAL (CAUCA - COLOMBIA) SEGUNDA VERSIÓN (2014).  
MEMORIA***

**Por:**

**María Luisa Monsalve B.**

**Geóloga**

**John Jainer Galarza Z.**

**Geógrafo**

**Indira Zuluaga M.**

**Geóloga**

**Carlos Andrés Laverde C.**

**Ingeniero de sistemas**

**Bogotá, octubre de 2014**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
GENERALIDADES .....	11
LOCALIZACIÓN E INFRAESTRUCTURA.....	12
TRABAJOS ANTERIORES .....	13
METODOLOGÍA.....	13
AGRADECIMIENTOS.....	14
<b>1. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN PURACÉ ACTUAL .....</b>	<b>16</b>
1.1 REGISTRO GEOLÓGICO.....	16
1.2 REGISTRO HISTÓRICO DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN PURACÉ ACTUAL .....	23
<b>2. AMENAZA VOLCÁNICA.....</b>	<b>28</b>
2.1 AMENAZA POR FLUJOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS.....	29
2.2 AMENAZA POR CAÍDA DE PIROCLASTOS .....	31
2.2.1 Amenaza por caída de piroclastos distribuidos por el viento.....	32
2.2.2 Amenaza por caída de piroclastos de proyección balística.....	33
2.3 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA.....	34
2.4 AMENAZA POR FLUJOS DE LODO (LAHARES).....	36
2.5 OTRAS AMENAZAS.....	37
<b>3. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA .....</b>	<b>38</b>
3.1 ZONA DE AMENAZA ALTA .....	38
3.2 ZONA DE AMENAZA MEDIA .....	39

---

3.3	ZONA DE AMENAZA BAJA .....	40
4.	ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN PURACÉ .....	41
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Localización del volcán Puracé - Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), principales drenajes y poblaciones en su área de influencia. a. Ubicación de la CVLC en el contexto del vulcanismo activo de Colombia (triángulos en color rojo, en mapa de sombras DEM NASA 30 m). b. Mapa de localización de la CVLC y los principales drenajes que nacen en ella. ....	13
<b>Figura 2.</b> Volcán Puracé, panorámica desde la ciudad de Popayán. ....	17
<b>Figura 3.</b> Depósito de flujo piroclástico de escoria y oleadas (~2150 años A.P.). Margen derecha río Vinagre, sector de la mina de Azufre. ....	17
<b>Figura 4.</b> El volcán Puracé Actual construido dentro del remanente de Pre - Puracé. El color gris del cono es dado por los remanentes de los depósitos de piroclastos de caída emitidos durante varias fases eruptivas ocurridas en épocas históricas. Adicionalmente resaltado con rojo se observan los depósitos del conjunto denominado “Lavas Rojas” .....	19
<b>Figura 5.</b> Comparación del dibujo dejado por el ingeniero Robert Blake sobre la erupción del 4 de octubre de 1869, con las estructuras de impacto y las bombas generadas durante esa fase eruptiva (tomado de Monsalve <i>et al.</i> , 2012). Las personas en las imágenes c y d, dan la escala.....	20
<b>Figura 6.</b> Depósitos de flujo de lodo (lahares) en la quebrada río Blanco, sector de Paletará. Los paleosuelos que separan estos depósitos fueron datados en 2230 ±30 A.P. para el inferior; y en 1610±30 A.P. para el intermedio. El superior corresponde al suelo actual. ....	21
<b>Figura 7.</b> Noticia emitida por “ <i>The New York Times</i> ” el 7 de noviembre de 1869, indicando la “crecida del río Cauca”, a causa de la erupción del 4 de octubre de 1869. ....	22
<b>Figura 8.</b> Paisaje mítico de Puracé (Faust, 1991), mostrando la cosmogonía puraceña, donde se aprecia al volcán Puracé en actividad. (Mural en la casa del Cabildo de Puracé). ....	23

---

<b>Figura 9.</b> Zona que podría ser afectada por flujos piroclásticos y oleadas generados en una erupción futura del volcán Puracé actual, resultado de la simulación de estos fenómenos utilizando la herramienta de simulación TITAN2D.....	30
<b>Figura 10.</b> Zonas de amenaza por caída de piroclastos en el área de influencia del volcán Puracé.....	33
<b>Figura 11.</b> Mapa de zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos. ....	34
<b>Figura 12.</b> Zonas amenazadas por flujos de lava en el volcán Puracé. ....	35
<b>Figura 13.</b> Zonas que podrían ser afectadas por flujos de lodos desencadenados durante o posterior a la actividad eruptiva del volcán Puracé Actual, según los resultados de la simulación con la herramienta LaharZ. ....	37
<b>Figura 14.</b> Ubicación de fumarolas y fuentes termales asociadas a la actividad del volcán Puracé Actual, a partir del mapa de localización de estaciones y puntos de muestreo en el área de Geoquímica. ....	41
<b>Figura 15.</b> Red de monitoreo del OVSPop para el volcán Puracé a Octubre de 2014. ....	43

## LISTA DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.</b> Registro geológico de la actividad eruptiva del VPA, indicando la edad de los eventos y el tipo de productos generados. No se asigna nombre a los que presentan una distribución muy localizada. El signo “*” indica ocupación humana alrededor del volcán (Patiño, 2013); el signo “?” indica que se infiere su posición estratigráfica a partir de las relaciones de campo y de dataciones en paleosuelos, no mostradas en la tabla (modificado de Monsalve <i>et al.</i> , 2012 y Monsalve, 2014).....	18
<b>Tabla 2.</b> Resumen de la actividad prehispánica (desde 1.400) a histórica del volcán Puracé Actual, modificada de Monsalve (2014).....	26

---

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A.</b> Mapa de amenaza volcánica del Volcán Puracé Actual, segunda versión (2014)	

## RESUMEN

El volcán Puracé Actual (4640 m.s.n.m), es un volcán activo en estado de reposo, que es monitoreado por el Servicio Geológico Colombiano a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop) desde la década de los 80's. Alrededor de 460.000 personas habitan en el área de influencia del volcán el cual es el extremo noroccidente de la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), ubicada en la Cordillera Central de Colombia, en el límite de los departamentos de Cauca y Huila. Nuevos datos geológicos permitieron la revisión de la evaluación de las amenazas volcánicas asociadas a este volcán, aportando los datos necesarios para la actualización del mapa preliminar de amenaza volcánica potencial publicado en 1993. La actividad eruptiva del volcán Puracé Actual podría durar varios años y presentar varias fases eruptivas, en cada una de las cuales se puede generar uno a varios fenómenos volcánicos al mismo tiempo; por tal razón, la delimitación de la mayoría de las áreas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos se llevó a cabo mediante herramientas computacionales para su simulación. Las características de los depósitos dejados por los fenómenos eruptivos pasados, y obtenidas mediante trabajo de campo, constituyen los parámetros de entrada para correr las herramientas de simulación; estos insumos constituyen la base para la actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual (segunda versión, 2014), el cual es el resultado de la superposición de las amenazas por los diferentes fenómenos que podrían ser generados por erupciones, cuyo foco de emisión sea el cráter actual, teniendo en cuenta el daño potencial en las posibles áreas afectadas. Los límites entre las zonas de amenazas, demarcadas con líneas discontinuas, indican una transición de las características de los fenómenos. El área que podría ser más afectada en caso de una futura erupción volcánica sería el sector NW del volcán, en el cual se encuentran la mina de Azufre de EMICAUCA, la población de Puracé y las veredas Tabío, Campamento, Cuaré y Pululó entre otras. La población de Paletará y la ciudad de Popayán podrían verse afectadas por eventuales flujos de lodo o el aumento del caudal en la quebrada Río Blanco y el río Cauca. Las emisiones de ceniza constituyen la amenaza principal para todas las poblaciones alrededor del volcán, además de otros fenómenos como ondas de choque, actividad sísmica y descarga de gases a la atmósfera.

## ABSTRACT

The Current Puracé (4640 m) volcano is an active volcano at rest, which is monitored by the Colombian Geological Service through the Volcanological and Seismological Observatory of Popayán, since the early 80's. About 460,000 people live in the influence area of the volcano which is the northwest end of the Volcanic Chain Coconucos (CVLC), located in the Central Cordillera of Colombia, on the border of the departments of Cauca and Huila. New geological data allowed the revision of the assessment of volcanic hazards associated with this volcano, providing the data needed to update the preliminary volcanic hazard map published in 1993. The eruptive activity of the volcano Puracé could last several years and have several eruptive phases that can generate one or several volcanic phenomena simultaneously. For this reason, the delimitation of most of the areas that may be affected by the different volcanic phenomena was performed by computational simulations tools. The characteristics of the deposits left by the phenomena that occurred in the past and obtained in the field, provided the input parameters for running the simulation tools; these inputs are the basis for updating the hazard map of Puracé volcano (second version, 2014), which is the result of overlapping the areas threatened by the phenomena that could be generated by eruptions, whose focus is the current crater, and taking into account their potential damage on the areas. The boundaries between hazard zones, are demarcated by dashed lines indicating a transition from the characteristics of the phenomena. The area that could be most affected in a future volcanic eruption would be the NW of the volcano, in which are located the Sulphur mine EMICAUCA, Puracé town and Tabio, Campamento, Cuaré and Pululó populations among others. Paletará village and Popayan city may be affected by possible mudflows or floods flow in Río Blanco creek and the Cauca River. Ash emissions are the main threat to all populations around the volcano as well as other phenomena such as shock waves, seismic activity and gas discharge to the atmosphere.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, la amenaza se refiere al *“Peligro latente de que un evento (en este caso, de origen volcánico) se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales”*.

Un mapa de amenaza volcánica es la representación gráfica del resultado de la evaluación de la amenaza, que representaría la actividad eruptiva de un volcán, para su área de influencia y es un documento base en la gestión del riesgo, para la elaboración de planes de contingencia, educación en prevención de desastres, evaluación de vulnerabilidad y riesgo y la elaboración de escenarios de riesgo, entre otros.

En este documento se da a conocer los resultados de la evaluación de la amenaza volcánica del volcán Puracé Actual (VPA), teniendo en cuenta los fenómenos volcánicos que han caracterizado su actividad eruptiva en los últimos 10.000 años y que podrían ocurrir en erupciones futuras, teniendo como foco de emisión el cráter actual del volcán; además se explica la segunda versión del mapa de amenaza volcánica (anexo), que como resultado de esta evaluación, establece la zonificación de las amenazas en alta, media y baja, mostrando las áreas que podrían ser afectadas por uno o varios fenómenos volcánicos, según su potencialidad de daño.

Actualmente, el VPA está en estado de reposo y su actividad se manifiesta por la presencia de fumarolas, fuentes termales y ocurrencia de sismos volcánicos. Esta actividad es monitoreada por una red de vigilancia operada por el Servicio Geológico Colombiano, desde el OVSPop, que se encarga del seguimiento continuo, tanto del comportamiento sismológico y de deformación del edificio volcánico, como de la composición y temperatura de gases, aguas termales y observaciones visuales, con el fin de detectar cambios en el patrón del comportamiento actual del volcán que indiquen su reactivación.

### ✓ GENERALIDADES

El Puracé es un volcán cuyo edificio más reciente, volcán Puracé Actual (VPA), se ha construido por las erupciones ocurridas en los últimos 10.000 años. Es

---

*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*

considerado uno de los volcanes más activos de Colombia debido a su actividad eruptiva casi continua en tiempos históricos.

La actividad del VPA ha sido predominantemente de tipo explosivo y, adicionalmente, el registro histórico muestra que ésta actividad puede ser persistente durante largos períodos de tiempo (al menos 30 fases eruptivas, confirmadas, entre 1849 y 1977, con lapsos de reposo menores a 10 años). El área de influencia del volcán ha sido afectada por sus productos desde épocas prehispánicas (Patiño, 2013), causando principalmente daños a la economía e infraestructura y algunas víctimas fatales a causa de las erupciones más recientes.

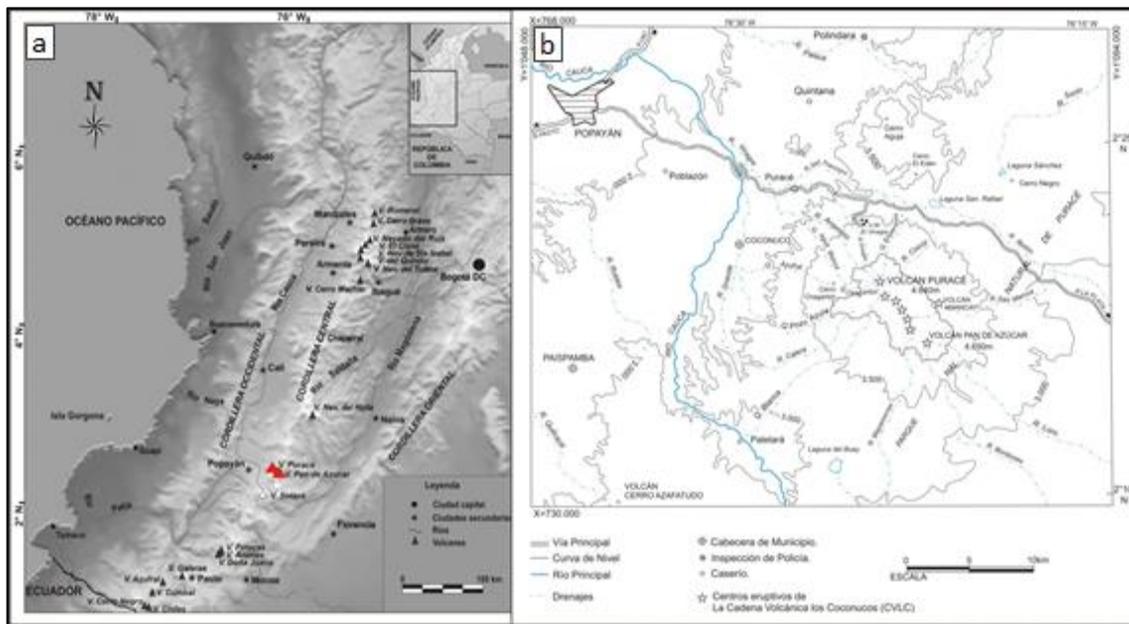
### ✓ LOCALIZACIÓN E INFRAESTRUCTURA

El volcán Puracé (4640 m.s.n.m), localizado a 02° 18' 50" de latitud N y 76° 23' 50" de longitud W, es el extremo NW de la Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), ubicada en la Cordillera Central de Colombia, en el límite de los departamentos de Cauca y Huila, haciendo parte del Parque Nacional Natural Puracé. Se encuentra a 27 km al SE de la ciudad de Popayán (Departamento del Cauca) y a 360 km al SW de la ciudad de Bogotá D.C. (Figura 1).

En cercanías al cono volcánico se encuentran poblaciones y veredas del municipio de Puracé, con alrededor de 15.000 habitantes, según las proyecciones de población municipales por área para el año 2014 (DANE, 2011); entre otros se localiza la mina de azufre El Vinagre (EMICAUCA), que representa una de las principales actividades económicas para los moradores del municipio y complejos turísticos, por la presencia de fuentes termales en los sectores de San Juan y Coconuco. Adicionalmente, el volcán mismo es un centro turístico relevante en la región, visitado frecuentemente por nacionales y extranjeros.

Los ríos y quebradas que nacen en el cono actual del volcán son (Figura 1): ríos Cocuy, San Francisco, Vinagre, Anambío y las quebradas La Esperanza, Agua Blanca y Río Blanco, los cuales vierten sus aguas al río Cauca, el segundo río en importancia de Colombia, el cual atraviesa al NW, a 27 km en línea recta del volcán, a la ciudad de Popayán, capital del departamento del Cauca, con cerca de 245.000 habitantes en el casco urbano y unos 30.000 en la zona rural del municipio (DANE, 2011).

Teniendo en cuenta los reportes sobre erupciones históricas, otras poblaciones más alejadas del volcán fueron afectadas en el pasado por caídas de cenizas, lo que supone al menos unas 460.000 personas asentadas en el área de influencia del volcán (DANE, 2011).



**Figura 1.** Localización del volcán Puracé - Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), principales drenajes y poblaciones en su área de influencia. a. Ubicación de la CVLC en el contexto del vulcanismo activo de Colombia (triángulos en color rojo, en mapa de sombras DEM NASA 30 m). b. Mapa de localización de la CVLC y los principales drenajes que nacen en ella.

## ✓ TRABAJOS ANTERIORES

Monsalve & Pulgarín (1993) presentaron la primera versión del mapa de amenaza volcánica potencial del volcán Puracé, basados en la identificación y distribución de sus depósitos y los reportes sobre su actividad histórica recopilada, entre otros, por Ramírez (1975), Espinosa (1989) y las reseñas consignadas en los diarios del país, especialmente en “El Liberal”, periódico local de la ciudad de Popayán, con circulación desde 1938.

## ✓ METODOLOGÍA

En la memoria de la primera versión del mapa de amenaza del volcán Puracé (Monsalve & Pulgarín, 1993), se estipuló la necesidad de su actualización a medida que se obtuviera un mayor conocimiento sobre el volcán, su comportamiento histórico y el actual.

La evaluación de la amenaza volcánica del Puracé Actual (Monsalve, 2014), para la elaboración de la segunda versión del mapa de amenaza, se realizó teniendo en cuenta el conocimiento geológico sobre el volcán adquirido recientemente (Monsalve & Pulgarín, 1999; Marín-Cerón, 2004; Monsalve *et al.*,

*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*

2009; Monsalve & Arcila, 2009; Monsalve *et al.*, 2012), complementado con estudios arqueológicos en el área (Patiño, 2013), que arrojaron importantes datos sobre las culturas prehispánicas asentadas en el área de influencia del volcán, nueva información acerca de la actividad histórica (Espinosa, 2011), análisis más detallados de los reportes de esta actividad (Monsalve *et al.*, 2012), y el conocimiento del comportamiento interno del volcán derivado del monitoreo continuo desde 1993 a cargo del OVSPop (<http://www.sgc.gov.co/Popayan/Publicaciones.aspx>)

Las áreas que podrían ser amenazadas por los fenómenos volcánicos fueron delimitadas, para algunos de ellos, a partir de los resultados de simulaciones computarizadas, mediante herramientas de la plataforma VHUB (<http://www.vhub.org>), empleando como insumo modelos digitales de terreno (DEM), los cuales permiten tener un mejor acercamiento a su distribución al ser generados en erupciones futuras. Para el caso del VPA se llevaron a cabo simulaciones de flujos piroclásticos, flujos de lodo, flujos de lava y caída de piroclastos (Galarza *et al.*, 2014), tomando como parámetros de entrada para las diferentes herramientas los datos obtenidos en trabajos de campo, según la identificación de los fenómenos asociados al volcán. Algunos de estos no fueron simulados y para la delimitación de las áreas únicamente se consideraron los datos de campo.

Mediante la superposición de las áreas que podrían ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, teniendo en cuenta el grado de afectación al que se verían expuestas, se llevó a cabo la zonificación en amenaza alta, media y baja, que definen la segunda versión del mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual.

#### ✓ AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Geo-Amenazas del SGC en la cual se encuentra inscrito el proyecto institucional para la evaluación, elaboración y actualización de los mapas de amenaza de los volcanes activos de Colombia.

Al personal del OVSPop, cuyo trabajo y dedicación en el monitoreo, geología y socialización del conocimiento de los volcanes de su región, hacen posible el avance en el entendimiento de los fenómenos volcánicos; especialmente al geólogo Bernardo Pulgarín por su colaboración y gran conocimiento sobre el volcán y los fenómenos volcánicos.

A las autoridades (Gobernadores y Cabildos indígenas) de los municipios de Puracé, Coconuco, Paletará y Poblazón, comunidad, profesores y estudiantes del colegio Manuel María Mosquera y personal de la mina de Azufre, siempre atentos a colaborar para el buen desarrollo de los trabajos de campo, tanto

---

geológicos como de monitoreo volcánico, así como en participar en el conocimiento que se va adquiriendo sobre el volcán.

Un agradecimiento muy especial a Ricardo Villota y a nuestros guías de campo Carlos Julio Mideros, Javier Yacumal, Wilson Aguirre y Patricia su esposa, con quienes a lo largo de las jornadas de campo y socialización, generosamente nos han compartido su conocimiento, historia y visión del volcán y de su región; y quienes, estamos seguros, son eje fundamental para transmitir este y el nuevo conocimiento vulcanológico, los beneficios y las amenazas del volcán Puracé, a la comunidad.

A los asesores de VHUB y otros expertos en modelamiento, por sus enseñanzas y discusiones sobre la simulación de los fenómenos volcánicos, en especial a los doctores Jorge Bajo, Sylvain Charbonier, Leah Courtland, Peter Johnson, Karim Kelfoun y Larry Mastin.

## 1. REGISTRO GEOLÓGICO E HISTÓRICO DEL VOLCÁN PURACÉ ACTUAL

El VPA (Figura 2) se construyó sobre los remanentes de un volcán anterior (Pre-Puracé). Los estudios geológicos y dataciones obtenidas para los depósitos dejados por la actividad del VPA registran, desde el inicio de su actividad, estimada en alrededor de 10.000 años A.P. (Monsalve, 2014), al menos 27 “eventos eruptivos” (cada uno de los cuales puede durar varios años e incluir varias “fases” eruptivas); la mayoría de estos eventos corresponden a un lapso donde la actividad explosiva fue dominante, dando lugar a caídas piroclásticas, flujos piroclásticos y oleadas, seguidos, algunas veces, por la generación de flujos de lodo; mientras que la actividad efusiva se restringe a la construcción del edificio con la generación de flujos de lava y la extrusión de domos, estos últimos colapsando o explotando posteriormente.

En el registro geológico, no siempre es posible establecer cuanto tiempo duró en actividad el volcán para cada uno de los “eventos eruptivos” identificados; sin embargo, los datos de los reportes históricos han permitido definir una duración aproximada de 130 años para el más reciente, tiempo durante el cual el volcán presentó una actividad casi continua, con cortos intervalos de reposo.

### 1.1 REGISTRO GEOLÓGICO

La Tabla 1 resume la historia eruptiva del VPA, indicando los principales “eventos eruptivos” identificados en el registro geológico, los tipos de fenómenos volcánicos originados por la actividad y la edad asignada por dataciones radiométricas o estimadas por relaciones de campo.

Como se aprecia en la Tabla, los fenómenos más frecuentes en la actividad del volcán son los flujos y oleadas piroclásticas (ver explicación de cada uno de los fenómenos en el mapa anexo), principalmente los generados por la extrusión y posterior destrucción de domos (flujos de bloques y oleadas líticas), cuyos depósitos se encuentran en las partes altas a distancias menores de 8 km del cráter. Adicionalmente, los flujos piroclásticos de escoria también son comunes y el evento eruptivo más importante, ocurrido hace aproximadamente 2150 años, generó este tipo de fenómeno, el cual afectó todos los flancos del volcán simultáneamente, dejando depósitos a más de 10 km del centro de emisión

(Figura 3). Otro tipo de flujos piroclásticos y oleadas son los generados por el ascenso del magma y su interacción con el sistema hidrotermal, los cuales son comunes en las primeras etapas de reactivación del volcán.



**Figura 2.** Volcán Puracé, panorámica desde la ciudad de Popayán.



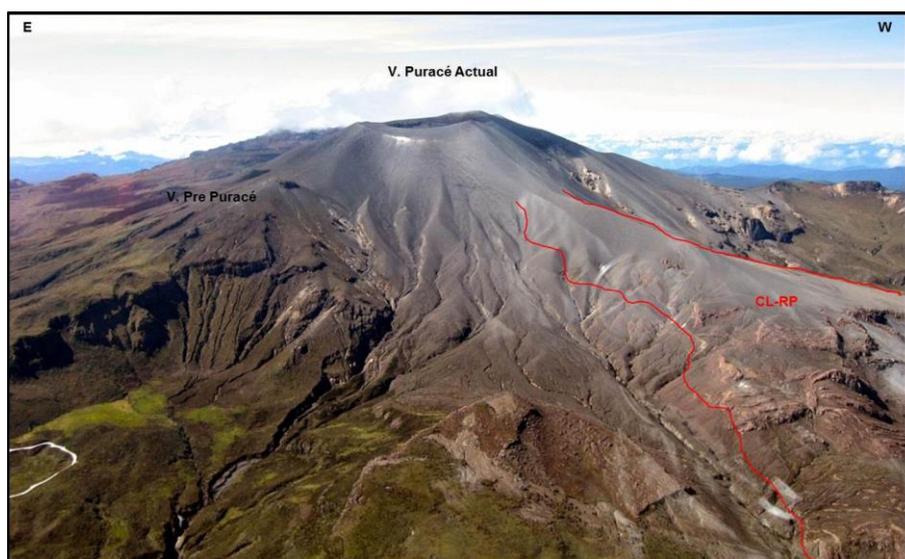
**Figura 3.** Depósito de flujo piroclástico de escoria y oleadas (~2150 años A.P.).  
Margen derecha río Vinagre, sector de la mina de Azufre.

**Tabla 1.** Registro geológico de la actividad eruptiva del VPA, indicando la edad de los eventos y el tipo de productos generados. No se asigna nombre a los que presentan una distribución muy localizada. El signo “\*” indica ocupación humana alrededor del volcán (Patiño, 2013); el signo “?” indica que se infiere su posición estratigráfica a partir de las relaciones de campo y de dataciones en paleosuelos, no mostradas en la tabla (modificado de Monsalve *et al.*, 2012 y Monsalve, 2014).

UNIDAD ERUPTIVA	EDAD	TIPO DE FENÓMENO VOLCÁNICO
* Histórica	1849 – 1977	Extrusión de domos, flujos de bloques, caídas de ceniza y lapilli, flujos de escoria – pómez, oleadas y flujos de lodo.
* Cenizales	Histórica (anterior a1849) - Prehispánica	Extrusión de domos, flujos de ceniza, caídas de cenizas, oleadas, flujos hidrotermalizados y flujos de lodo.
Colibrí	?	Flujos de ceniza y líticos hidrotermalizados.
* Granizo	610 ± 30 A.P.	Extrusión de domos, flujos de bloques, oleadas, caídas de ceniza (?) y flujos de lodo.
* Cristales	1160 ± 30 A.P.	Caída de cenizas y oleadas piroclásticas.
	?	Extrusión de domos y flujo de bloques.
	Entre suelo actual paleosuelo 1610±30 A.P.	Flujo de lodo.
	Entre paleosuelos 1610±30 y 2230±30 A.P.	Flujo de lodo.
	1730 ± 30 A.P.	Extrusión de domos, oleadas piroclásticas y flujos de bloques.
* Vinagre	2130 ± 30 A.P. - 2050 ± 30 A.P. - 2020 ± 30 A.P.	Flujos de escoria, oleadas y piroclastos de caída.
	Anterior a paleosuelo de 2230±30 A.P.	Flujo de lodo.
		Flujo de lodo.
*	2500 ± 30 A.P.	Oleadas piroclásticas.
		Flujo de bloques hidrotermalizado.
	2810 ± 30 A.P.	Oleadas piroclásticas.
Agua Blanca	?	Extrusión de domos, flujos de bloques y oleadas.
Conjunto Lavas Somitales	?	Lavas.
Piroclastos de Anambío	Sobre paleosuelo 5710±30 A.P.	Oleadas piroclástica y piroclastos de caída.
		Extrusión de domos y flujo de bloques.
		Oleadas y caída de cenizas.
		Flujo de bloques hidrotermalizado.
*	?	Flujo de escoria y pómez.
Conjunto lavas rojas	?	Lavas.
		Depósitos hidrotermalizados y oleadas.
Cocuy		Extrusión de domos, flujo de bloques y oleadas.
	8230 ± 40 A.P.	Oleadas.
Depósitos hidrotermalizados (DH)	≈ 10.000 A.P.	Flujos de ceniza y líticos hidrotermalizados, brechas hidrotermales.

La caída de piroclastos, distribuidos por el viento, es igualmente un fenómeno frecuente en la actividad del volcán. Sin embargo, su registro geológico no está bien conservado, ya que los depósitos cuando se generan, si no alcanzan un espesor importante, son fácilmente erosionados por las lluvias y los vientos.

En el registro geológico, los piroclastos de caída están representados por varios niveles de ceniza y *lapilli* que corresponden, principalmente, a los de las erupciones históricas, que cubren el cono del volcán hasta una altura aproximada de 3300 m.s.n.m., con una dirección predominante NNW (Figura 4). La extensión de las áreas que fueron afectadas por este fenómeno en épocas históricas es inferida a partir de las anotaciones y observaciones en aquellos lugares donde se reportaron caídas de cenizas, como en la ciudad de Popayán y poblaciones como Paispamba, Timbío y El Tambo, a más de 50 km de distancia del volcán (Pérez, 1862; Ramírez, 1975; Espinosa 2011).

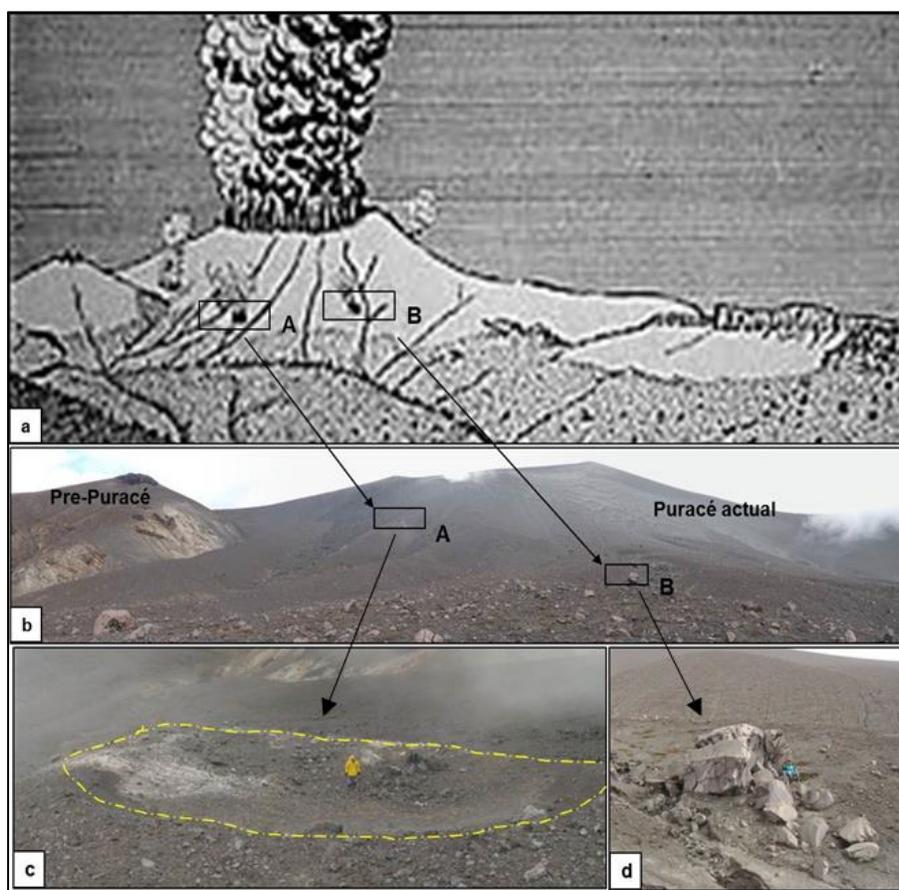


**Figura 4.** El volcán Puracé Actual construido dentro del remanente de Pre - Puracé. El color gris del cono es dado por los remanentes de los depósitos de piroclastos de caída emitidos durante varias fases eruptivas ocurridas en épocas históricas. Adicionalmente resaltado con rojo se observan los depósitos del conjunto denominado “Lavas Rojas”

El registro geológico de bloques y bombas (piroclastos de caída que por su tamaño son emitidos como “proyectiles balísticos”) corresponde a los generados durante fases eruptivas de explosión de domos entre 1849 – 1977. Stübel (1906) reporta haber escuchado las explosiones generadas en la fase eruptiva de octubre 4 de 1869, desde la ciudad de Túquerres (Nariño), donde se generaron este tipo de piroclastos de caída (Figura 5). Cerca al cráter del volcán se han observado bombas y bloques con tamaños entre 5 y 10 m; hasta

3 km de alrededor de 1 m y tamaños menores a estos hasta 5 km de distancia del volcán (Monsalve *et al.*, 2012).

Los depósitos de lava asociados a la actividad del VPA, se encuentran en las partes altas del volcán y se han dividido en dos conjuntos principales que corresponden a diferentes etapas de construcción del edificio. No se cuenta con dataciones que indiquen cuando tuvo lugar la actividad que las generó, pero su posición estratigráfica es inferida a partir de las relaciones de campo y las dataciones en otros depósitos. Son lavas de composición andesítica (Monsalve & Pulgarín, 1993; Monsalve *et al.*, 2012), con un espesor promedio de 10 m y un alcance máximo de 6 km, para algunos de los flujos generados en el evento que dio lugar al conjunto de “Lavas Rojas” (Figura 4).



**Figura 5.** Comparación del dibujo dejado por el ingeniero Robert Blake sobre la erupción del 4 de octubre de 1869, con las estructuras de impacto y las bombas generadas durante esa fase eruptiva (tomado de Monsalve *et al.*, 2012). Las personas en las imágenes c y d, dan la escala.

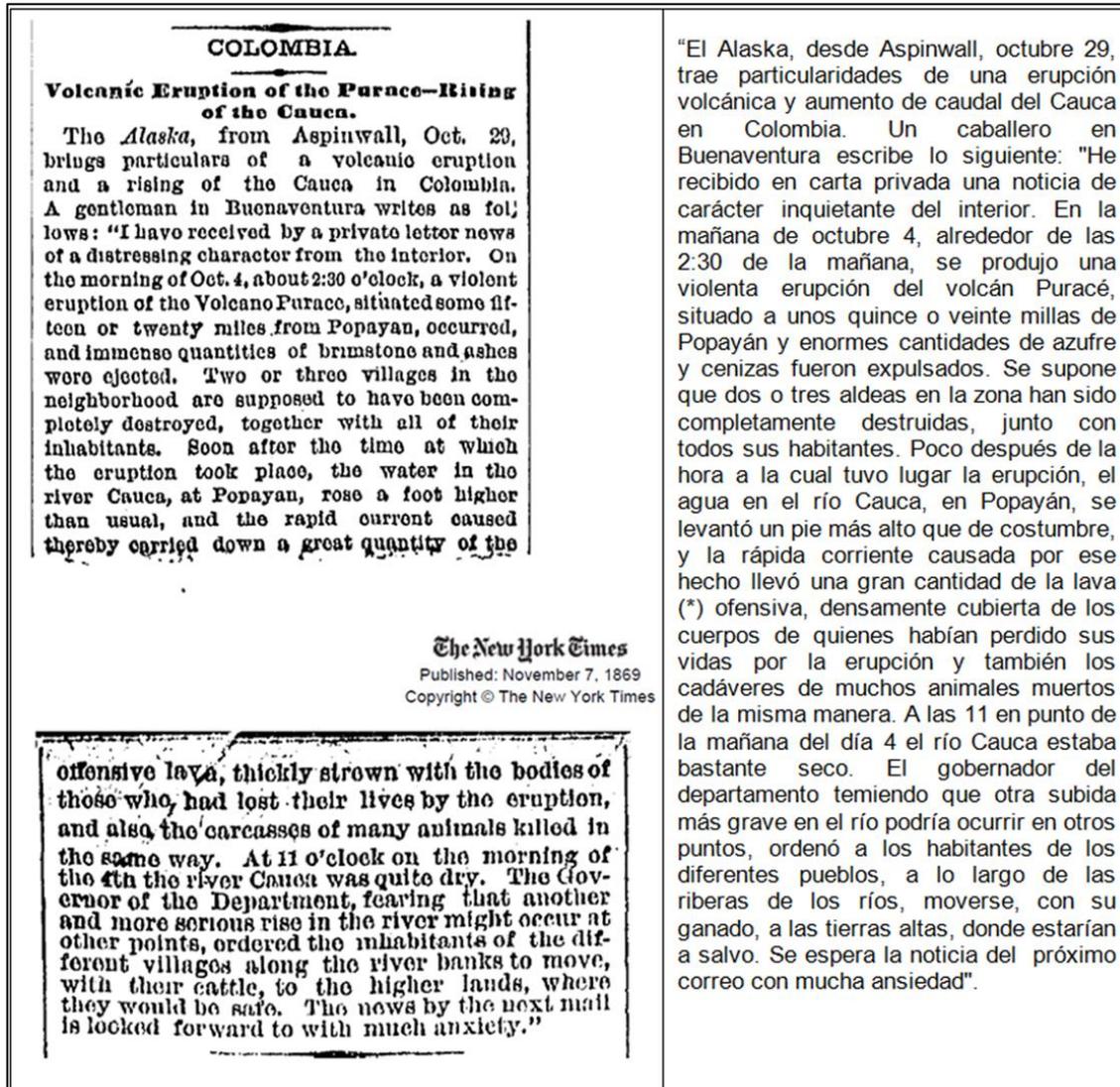
Adicionalmente, en muchos de los eventos eruptivos, hubo generación de flujos de lodo (*lahares*), ocurridos durante las fases eruptivas o posteriores a ellas, cuyos depósitos se preservan en los ríos y quebradas que nacen en el volcán y seguramente, los de mayor magnitud fueron generados cuando el volcán presentaba cobertura glaciar. El registro más completo de este tipo de depósitos se encuentra en la quebrada Río Blanco, hacia el sector de Paletará, donde se han identificado cinco depósitos de este tipo, algunos de ellos observados a distancias mayores a los 18 km en línea recta desde el volcán (Figura 6).



**Figura 6.** Depósitos de flujo de lodo (*lahares*) en la quebrada río Blanco, sector de Paletará. Los paleosuelos que separan estos depósitos fueron datados en  $2230 \pm 30$  A.P. para el inferior; y en  $1610 \pm 30$  A.P. para el intermedio. El superior corresponde al suelo actual.

Remanentes importantes de flujos de lodo y escombros se encuentran en los ríos Anambío, Vinagre y Cauca (a la altura de la represa Florida II), los cuales se han asociado a actividad más antigua del volcán, debido posiblemente a erupciones y deshielo de grandes masas glaciares. Hacia el río Cauca, en cercanías a Popayán los depósitos de flujo de lodo no cuentan con dataciones que permitan correlacionarlos con la actividad eruptiva del VPA, sin embargo, como lo muestra la Figura 7, en una noticia del periódico *The New York Times* (USA), que hace alusión a la erupción del 4 de octubre de 1869, se reportan crecientes en el río Cauca con aumento de la altura del río de aproximadamente 30 cm en inmediaciones de Popayán y un posterior represamiento del mismo.

*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*



**Figura 7.** Noticia emitida por "The New York Times" el 7 de noviembre de 1869, indicando la "crecida del río Cauca", a causa de la erupción del 4 de octubre de 1869.

Otras alusiones a crecientes en el río Cauca a la altura de Popayán se encuentran en Puerta (1991), refiriéndose a una descripción de "don Ángel y José Rufino J. Cuervo"; sin embargo, este flujo de lodo no parece haber tenido su origen en la actividad del volcán (según alusión de Puerta), sino en un sismo ocurrido el 18 de noviembre de 1927, que causó deslizamientos y represamiento en los afluentes del río Cauca.

## 1.2 REGISTRO HISTÓRICO DE ERUPCIONES DEL VOLCÁN PURACÉ ACTUAL

La tradición oral de los pobladores en cercanías al volcán, es muestra de su actividad desde tiempos pre-hispánicos (Figura 8). Hay alusiones a actividad eruptiva desde la época de la colonia, aunque no hay descripciones precisas sobre ella, tal como lo relata Francisco Guillen Zaparro en 1583 (Transcripción de Ponce Leiva, 1991):

“El señor de la tierra se llamaba Popayán, era señor principal... Hay volcán 5 leguas de allí y hay en él un poco de agua caliente donde van a tomar baños los que están malos de dolores y bubas.... El nacimiento del río Cauca sale de junto a Popayán y la sierra nevada se deshace la nieve y hace crecer este río mucho y revienta muy a menudo el volcán”.

“De Santa Fe, 17 de febrero de 1583. FRANCISCO GUILLEN ZAPARRO”.



**Figura 8.** Paisaje mítico de Puracé (Faust, 1991), mostrando la cosmogonía puraceña, donde se aprecia al volcán Puracé en actividad. (Mural en la casa del Cabildo de Puracé).

La descripción de la actividad histórica del volcán se encuentra recopilada en los trabajos de Ramírez (1975), Hantke & Parodi (1966), Pulgarín *et al.* (1994) y la más completa de ellas en Espinosa (2011). Adicionalmente, en Monsalve *et*

al. (2012) se lleva a cabo un análisis de los eventos principales. Las mejores descripciones son hechas a partir del siglo XIX, entre las cuales vale destacar:

**1849:** Reclus (1893), en el capítulo “Montañas, Guanacas, el Puracé”, se refiere a la erupción en el año de 1849 de la siguiente manera:

“Hacia el Sur de Colombia la cordillera central acerca sus conos volcánicos y sus focos aumentan en actividad. En 1849 (2), entonces terminado en una cúpula de forma regular, estalló de repente arrojando cenizas, á la vez que sus fundidas nieves descendieron en forma de alud mezcladas con lodo: las aldeas vecinas fueron arropadas por el fango y hasta la ciudad de Popayán, á 27 kilómetros de distancia al Oeste del volcán, se vio en peligro. Desde entonces tiene la cima el aspecto de un cono truncado y, el dicho de los indígenas, el nivel inferior de las nieves ha disminuido á causa del aumento del calor en el suelo...”

La nota (2) en el párrafo anterior corresponde al pie de página insertado en la misma obra por su traductor (Vergara y Velasco) y en la cual describe esta misma erupción de la siguiente manera:

“(2) El volcán Puracé al principiar el siglo tenía forma perfecta de pan de azucar, se le llamaba *páramo*, y no anunciaba su condición sino por un cráter en la falda y grandes ruidos (*bramidos*), que se escuchaban de tiempo en tiempo y eran contestados por el Sotará, cuando, en la prima noche del miércoles 4 de diciembre de 1849, se verificó un cataclismo que aterró a los habitantes de Popayán; a uno de esos ruidos sucedía fenómeno extraño: el Puracé aparecía lleno de luces y al siguiente día pudo verse transformado en un cono truncado con penacho de humo que por las noches se hacia luminoso a la vez que *la llovía ceniza*, que en la ciudad mortificaba a los transeuntes. La autoridad tomó cartas en el asunto, y al visitar el volcán se le halló con un cráter anchuroso en la copa en vez del que habia en el flanco y limpiaban de tiempo en tiempo los indios del Puracé pagados al efecto, cuando el Puracé bramaba, por lo cual las explosiones no eran tan frecuentes ni causaban daños. Empero, yá á principios de 49, la operación de limpieza se hizo difícil y por último imposible con la apertura de la boca y de las grietas en la falda, á lo cual siguió la catástrofe de 1869, y luego otra que arruinó mucho la ciudad en 1885, y que como la anterior también rebajó el cono, que así resulta haber perdido como unos 400 metros de altura...”

**1869:** La actividad del volcán en octubre de 1869 es la mejor descrita, ya que el ingeniero Robert Blake White fue comisionado para inspeccionar el volcán el mismo día de la erupción (Blake White, 1869). La descripción de la actividad corresponde a la explosión de un domo que generó, además de fuertes emisiones de ceniza, piroclastos emitidos como proyectiles balísticos (bombas y

bloques) y flujos de lodo secundarios (Monsalve *et al.*, 2012). Basados en las descripciones, trabajos de campo permitieron reconocer y confirmar algunas de las bombas emitidas durante esta actividad (Figura 5).

**1949:** La actividad de mayo de 1949 es notable, principalmente por haber causado la muerte de 16 estudiantes del anexo de la Universidad del Cauca, hecho principal resaltado por los principales diarios del país (i.e., El Liberal, 1949). Aunque la descripción misma de la erupción no es detallada, del análisis de la información se concluye que de nuevo se trató de una actividad, a menor escala, de explosión de domo y las bombas y bloques emitidos, los causantes de la muerte y heridas a los estudiantes.

A partir del análisis del registro de la actividad del volcán Puracé, entre 1400 y 1977, se han reportado al menos 51 eventos eruptivos, de los cuales están confirmados 28 por relatos históricos y al menos 7 dataciones confirman la actividad en época prehispánica (Tabla 2). Entre la actividad ocurrida en 1849 hasta la última descrita para 1977 se reportan al menos 27 fases eruptivas, de las cuales algunos depósitos fueron reconocidos en los trabajos de campo, permitiendo la identificación de la denominada “unidad eruptiva histórica 1849-1977 (Monsalve *et al.*, 2012), que corresponde a un lapso de actividad, casi continua del volcán, caracterizada por un estilo eruptivo particular de ascenso de domos y su destrucción por colapso o explosión, generando oleadas piroclásticas, flujos piroclásticos, fases menores con emisiones de cenizas y proyectiles balísticos. Estas erupciones fueron precedidas, acompañadas o sucedidas de otros fenómenos como fueron sismos, flujos de lodo, ondas de choque, y del cambio morfológico del edificio volcánico o su cráter, tal como se deduce de las descripciones sobre la actividad histórica del volcán.

**Tabla 2.** Resumen de la actividad prehispánica (desde 1.400) a histórica del volcán Puracé Actual, modificada de Monsalve (2014).

Año erupción	Actividad	Datación	Fenómeno descrito	Observaciones	Estimado (1) Reposo/años
1440		510±30 BP			≈350
1540	?		Erupción		
1550	?	400 +/- 30 A.P			
1559-60	?				
1564					
1566					
1583					
1670		280 +/- 30 A.P			
1736					
1751					
1785					
1789	?				
1792		158±0,6 pMC			
1801			Cráteres laterales	Humboldt	
1810		140±0,6 pMC			
1812					
1814					
1815					
1816	?		Explosiones?	Junio 1 o 2, horas de la noche y Diciembre 12	
1819					
1823					
1826					
1820	?				
1827			Fumarola, sismo		
1828					
1829					
1830	?				
1831			"Bocas" - Aguas termales	Boussingault	
1832					
1833					
1834					
1835	?	115,5±0,4 pMC	Explosiones?	Enero 23.	
1838					
1839					
1840	?				
1841					
1847	?'	103,4±0,3 pMC		Octubre 27 hasta 1852	
1848	?'	102±0,3 pMC			
1849			Erupción de Barro - Ceniza (hasta el pueblo del tambo ) Destrucción de cono (forma de Naranja) resultado: cráter de 100 m.	Noviembre?, 01/12/2004	
1850		100±30 BP			1
1851	?				2
1852					
1855					17
1859	?				
1860	?	90±30 BP			
1868	?				
1869			Erupción	Enero en horas de la noche? Octubre 4, 3 am, Octubre 6, 3 pm?	

Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.

Año erupción	Actividad	Datación	Fenómeno descrito	Observaciones	Estimado (1) Reposo/años
1870	?				9
1873	?				
1875			Fumarolas		
1878			Ceniza	Agosto 31, 11 am, 01/09/2011	28
1881	?				
1885	?				
1899	?			Noviembre 4.	
1900		50±30 BP			
1902	?				1
1906			Explosiones	Septiembre 29, 9:30 pm	
1907					5
1912					
1914					2
1919			Ceniza (arena)	Enero 24 y 25, hora 6 pm	5
1920			Ceniza	Enero 5, 8 pm	1
1924	?		Fumarolas		5
1925			Explosiones	Julio 9, Octubre 12, Noviembre 5	
1926			Llamas y ceniza	Junio 21, 2 pm Septiembre	1
1927			Explosiones	Octubre 8?, horas de la noche	1
1929	?				9
1930		20±30 BP			
1931	?			6 de julio	
1932					
1936			Explosiones, Onda de Choque	Agosto 2 o 3, horas de la noche	3
1939			Emisión Ceniza	19 de septiembre	
1941			Explosión onda de choque. Emisión de ceniza, en la tarde llegó a Popayán.	Agosto 15 de, 5 pm	2
1944	?				5
1946			Explosiones, Acompañado de un temblor sentido en Popayán	Marzo 29-30?, 2:20 am	
1947	?				3
1949			Explosiones. Emisiones de gas, vapor, bombas volcánicas	mayo 26, Junio 11, Agosto	
1950			Explosiones, Poca ceniza; explosión violenta	Enero 10, julio 26, 2am.	1
1952					2
1954					2
1955	?				2
1956			Explosiones. Emisión de ceniza	Abril (1 o 8), junio 20	
1958				1 de febrero	2
1977			Emisión de ceniza	Marzo 19.	19

Verde: Dataciones radiométricas en depósitos recientes; Oliva: Dataciones ocupación prehispánica (Patiño, 2013); Gris sólido: actividad eruptiva reportada, Gris claro (?) Dudosa o sin confirmar. Azul: Sismicidad reportada para el área de Popayán; Magenta: Observaciones o descripción del volcán.

## 2. AMENAZA VOLCÁNICA

El VPA es un estrato-volcán con predominio de actividad de tipo explosivo en su registro geológico e histórico reciente. Por el reporte histórico de su actividad, ha sido considerado como uno de los volcanes más activos del país. La reactivación del volcán daría lugar, durante un tiempo prolongado (meses a años), a una actividad eruptiva intermitente, afectando de diversa forma, una región que comprende áreas pertenecientes a los departamentos del Cauca y Huila, con una población estimada de alrededor de 460.000 habitantes (DANE, 2011), donde se encuentran centros poblados, infraestructura y vías de comunicación de interés nacional.

La delimitación de las zonas en el mapa de amenaza volcánica, designadas como alta, media y baja, es el resultado de la interpretación de la historia eruptiva del volcán, registrada en los depósitos asociados a su actividad y complementada con la simulación computarizada de algunos de los principales fenómenos que dieron lugar a estos depósitos. Por lo tanto, la evaluación y representación de la amenaza, por actividad futura del volcán, considera erupciones similares a las comprendidas en el registro geológico de los últimos 10.000 años, teniendo como centro o foco de emisión de la actividad futura al cráter actual.

Cada una de estas zonas, que pueden ser afectadas por uno o varios fenómenos simultáneamente durante una fase eruptiva, se designan como “amenaza alta”, “media” y “baja”, dependiendo del potencial daño de los fenómenos a vidas, bienes, infraestructura y el medio ambiente. Las líneas punteadas entre las zonas de amenaza indican un cambio transicional y de ningún modo representan límites absolutos.

Para llegar a la zonificación presentada en el mapa, se evaluaron las amenazas por cada uno de los fenómenos volcánicos que pueden generarse debido a la actividad eruptiva del volcán Puracé Actual (Monsalve, 2014), llevando a cabo la simulación de los principales eventos eruptivos (Galarza *et al.*, 2014), según la información colectada durante los trabajos de campo. Los fenómenos son descritos a continuación en orden de su potencialidad de causar daños.

## 2.1 AMENAZA POR FLUJOS Y OLEADAS PIROCLÁSTICAS

Históricamente, las corrientes de densidad piroclástica (flujos piroclásticos y oleadas), así como los flujos de lodo, son la amenaza volcánica que ha causado mayor número de pérdidas de vida en el mundo (Blong, 1984; Tilling & Punongbayan, 1989; Baxter, 1990; Self, 2006). Los flujos piroclásticos pueden ser de varios tipos y a ellos generalmente se encuentran asociadas oleadas piroclásticas, las cuales también pueden ser generadas independientemente.

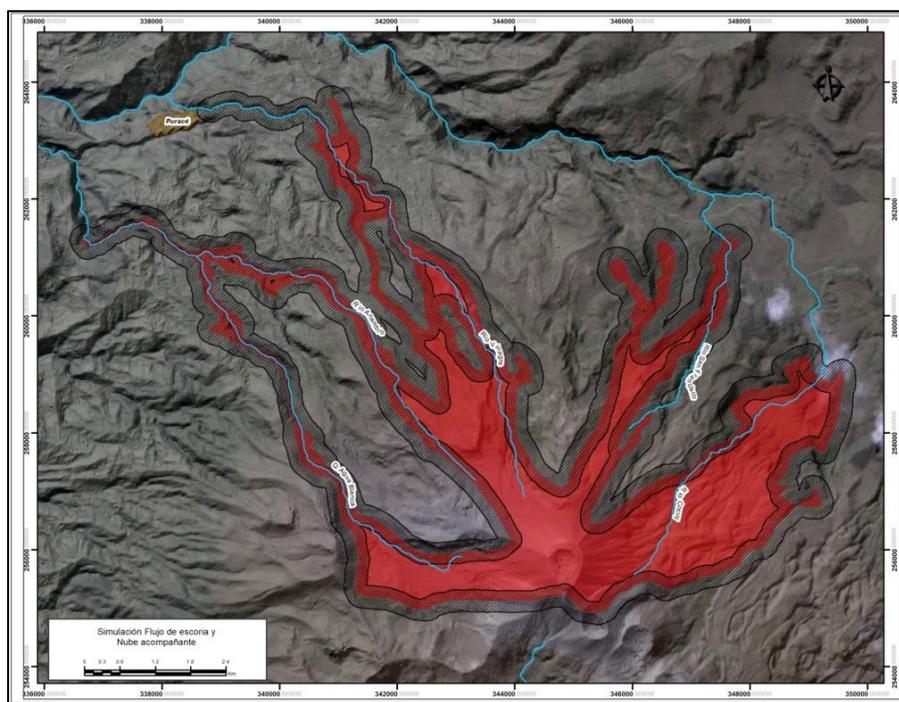
Los flujos y oleadas piroclásticas son potencialmente muy destructivos debido a su alta temperatura (usualmente entre 200 y 800° C), considerable velocidad (mayor a 80 km/hora) y gran movilidad. Algunos de sus efectos incluyen asfixia, quemaduras, enterramiento e incineración; así como la destrucción parcial o total de edificaciones a causa de su velocidad de emplazamiento, e incendios en zonas agrícolas y boscosas (Baxter, 1990; Baxter *et al*, 1998; <http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>, <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/pyroclasticflow>,

<http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>). A partir de los flujos piroclásticos y los depósitos dejados por ellos pueden generarse flujos de lodo (lahares), durante o después de la actividad eruptiva, representando una amenaza adicional en el área de influencia del volcán.

Los flujos piroclásticos y las oleadas son productos muy comunes en la actividad del VPA y sus depósitos se encuentran en la mayoría de las unidades eruptivas que forman el registro geológico del volcán. Los flujos piroclásticos son de tres tipos principales: de escoria, de bloques y de ceniza (Monsalve *et al*, 2012), sus depósitos se observan en todos los ríos y quebradas que nacen en el cono volcánico y a los cuales generalmente están asociadas oleadas piroclásticas.

Cualquiera de estos tipos de flujos piroclásticos son susceptibles de generarse en erupciones futuras del volcán Puracé y para la zonificación de la amenaza por este tipo de fenómeno, se tomó como referencia el depósito de flujo de escoria generado durante una erupción del VPA, ocurrida hace más o menos 2100 años (Monsalve & Pulgarín 1993; Monsalve, 1993; Monsalve *et al*, 2012). Por el tipo de erupción, es el evento que presenta una distribución más amplia alrededor del volcán y el mayor volumen involucrado en una erupción del volcán Puracé ( $2,1 \times 10^7$  m<sup>3</sup>). La zonificación de la amenaza por este tipo de fenómeno incluye, a su vez, flujos piroclásticos de menor volumen que puedan ocurrir durante la actividad futura del volcán y que podrían ser generados por la extrusión y destrucción de domos, fenómeno muy común en su actividad eruptiva, o por actividad freática a freatomagmática.

Tomando como referencia los datos obtenidos en campo, se definieron los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación de este fenómeno utilizando el código TITAN2D (Patra *et al.*, 2005), dispuesto en las herramientas en línea de VHUB (<https://vhub.org/resources/titan2d>); este trabajo fue realizado con la asesoría de expertos de VHUB (Galarza *et al.*, 2014). Para la zonificación de las oleadas acompañantes del flujo, se utilizó como metodología la definición de un zona de influencia (buffer) de longitud variable, de acuerdo a la pendiente, entre 100 y 200 metros a lado y lado de los límites del flujo resultado de la simulación, teniendo en cuenta que éste fenómeno 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. La Figura 9 muestra el resultado de la simulación de los flujos piroclásticos y oleadas y en ella se aprecia 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 él, alcanzando una distancia aproximada de 11 km, a partir del cráter del volcán. En el trayecto del flujo simulado se encuentran, además de parte de la población de Puracé, el complejo minero de EMICAUCA y la población dispersa asentada en las partes cercanas al valle del río Vinagre.



**Figura 9.** Zona que podría ser afectada por flujos piroclásticos y oleadas generados en una erupción futura del volcán Puracé actual, resultado de la simulación de estos fenómenos utilizando la herramienta de simulación TITAN2D.

## 2.2 AMENAZA POR CAÍDA DE PIROCLASTOS

Durante una erupción volcánica, los piroclastos que son emitidos a través de una columna eruptiva son transportados por el viento si son de tamaños hasta de 6 cm y los mayores a este tamaño son emitidos como “proyectiles balísticos”.

Los piroclastos de caída dejan depósitos que disminuyen en espesor y tamaño de las partículas con la distancia. En el caso de los transportados por acción eólica se depositan cubriendo áreas más extensas, que las cubiertas por otros tipos de fenómenos volcánicos, en la dirección preferencial de los vientos en el momento de la erupción y dependiendo de la altura alcanzada por la columna eruptiva (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/tephra/index.php>).

La caída de piroclastos, transportados por el viento, generalmente acompaña la mayoría de las erupciones en un volcán, aunque sus depósitos son fácilmente “borrados” del registro geológico, cuando no son de un volumen considerable, debido a la erosión tanto eólica como fluvial.

Las emisiones de piroclastos a la atmósfera y su transporte por los vientos tienen una afectación general sobre la aviación. Por otra parte, al depositarse, ocasionan enterramiento de edificaciones, colapso de techos, si son cubiertos por depósitos con más de 10 cm de espesor, pérdida de tierras agrícolas, daños a maquinarias y líneas vitales como instalaciones eléctricas, sistemas de drenaje, plantas de tratamiento de aguas, líneas telefónicas, transmisores de radio, televisión, entre otros (<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>, Self, 2006; USGS: <http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/> Volcanic Ash: Effects & Mitigation Strategies). Depósitos de menor tamaño y partículas en suspensión en el aire pueden causar efectos nocivos en los humanos y en los animales, entre ellos, asfixia, intoxicaciones digestivas, afectación del sistema respiratorio, síntomas de irritación de ojos, nariz y garganta (USGS: <http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/> Volcanic Ash: Effects & Mitigation Strategies).

Los efectos causados por los piroclastos emitidos balísticamente (bloques y bombas volcánicas), varía de acuerdo a la fuerza del impacto de los fragmentos, causando daños a infraestructuras e incendios; así mismo, las explosiones que generan este tipo de fenómeno, producidas por la descomprensión del sistema, ocasionan efectos de ondas de choque, que viajan a velocidades mayores a la del sonido y pueden ser sentidas a varios kilómetros de distancia, ocasionando vibraciones, rompimiento de vidrios, fisuras en paredes y conmoción de las personas.

En el volcán Puracé el registro geológico de emisiones de piroclastos de caída, generados durante erupciones históricas, se conserva en las partes altas del volcán y corresponde tanto a bombas y bloques emitidos balísticamente, como a piroclastos transportados por el viento. Los datos de campo sobre los piroclastos emitidos balísticamente, fueron utilizados directamente para la zonificación de la amenaza debido a este fenómeno, mientras que para los piroclastos distribuidos por el viento se utilizó la herramienta computacional Tephra2 (Bonadonna *et al.*, 2005; Courtland, 2011), tomando como información de entrada la obtenida a partir de la reconstrucción de la actividad histórica, mediante trabajos de campo y análisis del registro histórico de la actividad del Puracé (Galarza *et al.*, 2014).

### 2.2.1 Amenaza por caída de piroclastos distribuidos por el viento

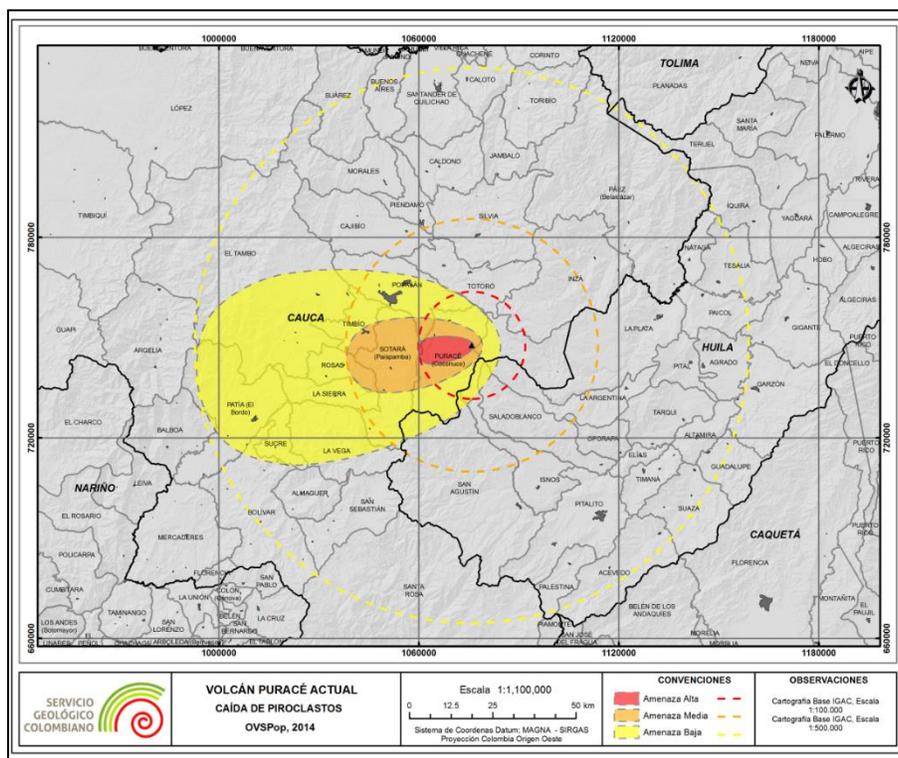
Las caídas de ceniza representan la amenaza más frecuente en el volcán Puracé, pudiendo ocurrir como único fenómeno eruptivo, o acompañando otro tipo de fenómeno.

Para llegar a la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos se emplearon los resultados de simulaciones con la herramienta computacional Tephra2, que se basa en perfiles de viento de varias décadas para la zona del volcán (tomados de información suministrada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Los Estados Unidos –NOAA-). Adicionalmente, se incorporan como parámetros de entrada, además de los físicos como densidad, volumen, granulometría y altura de columna eruptiva, los resultados obtenidos de la reconstrucción de la actividad histórica del Puracé, a partir de los depósitos de ceniza que se conservan en la parte alta del volcán, integrado con el análisis de los reportes históricos.

Según los datos de las erupciones históricas, se consideró una columna eruptiva de 10 km de altura sobre el cráter, para la cual los resultados de las simulaciones muestran una dirección preferencial de dispersión WSW.

La información anterior permitió la zonificación de la amenaza en: **alta**, donde la acumulación de material, con espesor superior a 10 cm, causaría efectos mayores; **media**, con acumulaciones entre 10 cm y 1 cm y **baja**, con acumulaciones entre 1 cm y 5 mm. Adicionalmente, se trazan 3 círculos con origen en el cráter del volcán, delimitando las zonas de amenaza alta, media y baja, que incluyen las áreas que no se encuentran en la dirección preferencial de los vientos, pero que pueden verse afectadas por caída de piroclastos en caso de ocurrir la erupción en otra época del año o en un día, a una hora específica donde la dirección predominante de los vientos sea diferente a la preferencial o que la altura de la columna eruptiva sea diferente a la que se tiene como referencia.

La Figura 10 muestra la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos. En la zona de amenaza alta, en la dirección preferencial de los vientos, se encuentran las partes altas del volcán y la mina de Azufre de EMICAUCA. Centros poblados como Puracé, Coconuco y Poblazón se sitúan en la zona de amenaza media. Popayán, Timbío, Rosas, La Sierra y El Tambo, se ubican en la zona de amenaza baja. En las otras direcciones, la zona de amenaza alta incluiría la parte alta de la Cordillera Central, como es la región del páramo de Gabriel López; en amenaza media estarían Totoró, Belén, Santa Leticia, Isnos; y en amenaza baja, San Agustín, La Plata, Tarqui, entre otros.



**Figura 10.** Zonas de amenaza por caída de piroclastos en el área de influencia del volcán Puracé.

## 2.2.2 Amenaza por caída de piroclastos de proyección balística

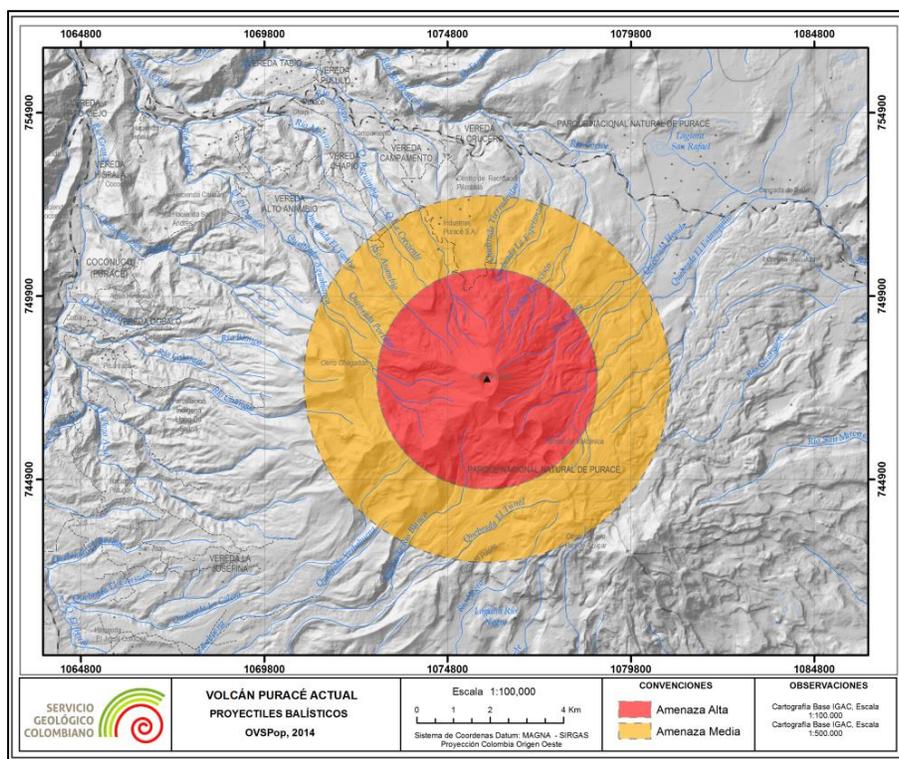
Las bombas y bloques emitidos balísticamente y generados por actividad explosiva de destrucción de domos, son muy comunes en la actividad histórica del volcán Puracé y presentan un amplio registro en las partes altas del volcán.

La zonificación de la amenaza por este tipo de fenómeno se realizó teniendo en cuenta los datos obtenidos en campo, sobre la distancia alcanzada por estos piroclastos y su tamaño. A partir de estos datos, se trazaron dos círculos de 3 y 5 km, con centro en el cráter actual del volcán, que representan,

*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*

respectivamente, la zona de amenaza alta, que puede ser afectada por bloques y bombas con más de 20 cm de diámetro, correspondiente a la zona más alta del volcán; y la zona de amenaza media, donde pueden caer fragmentos de menor tamaño y en la cual se encuentra ubicada la mina de Azufre EMICAUCA (Figura 11).

Adicionalmente, en las explosiones que acompañan la emisión de proyectiles balísticos, se generan ondas de choque (también llamadas ondas de presión), cuyos efectos podrían sentirse en las zonas más lejanas del área de influencia del volcán.



**Figura 11.** Mapa de zonificación de la amenaza por proyectiles balísticos.

## 2.3 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida que se transportan a lo largo de los valles de ríos y quebradas que nacen en los volcanes, destruyendo todo a su paso, dando lugar a enterramiento e incendios, entre otros efectos. Cuando presentan una alta viscosidad, alcanzan cortas distancias desde su fuente y se mueven lentamente, permitiendo que las personas se alejen de su paso (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lava/index.php>).

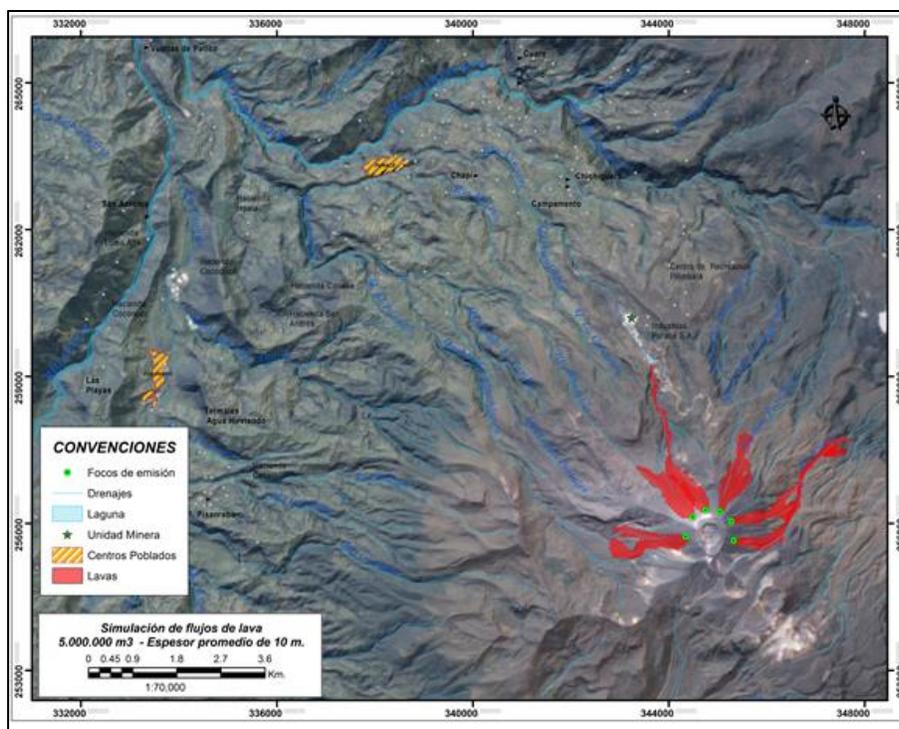
*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*

En el volcán Puracé, el registro geológico de los depósitos de flujos de lava está muy conservado. Por su composición, se caracterizan por ser de viscosidad media a alta.

Para la simulación de flujos de lava, que permite definir Las zonas amenazadas por este tipo de fenómeno, por actividad futura del volcán, se utilizó el código Lava PL, desarrollado por Chuck y Laura Connor de la Universidad del Sur de La Florida (USF), de uso libre y que hace parte de las herramientas fuera de línea del Grupo de Investigación en Amenazas Volcánicas (VHUB) (<https://vhub.org/resources/offlinetools>).

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 asociados al volcán y determinando así el volumen total a simular en  $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Igualmente, se determinaron seis posibles puntos a partir de los cuales fluirían las lavas generadas en el cráter actual del volcán (Galarza *et al.*, 2014).

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 (Figura 12).



**Figura 12.** Zonas amenazadas por flujos de lava en el volcán Puracé.

## 2.4 AMENAZA POR FLUJOS DE LODO (LAHARES)

Los *lahares* o flujos de lodo constituyen la amenaza más común asociada a la actividad eruptiva de los volcanes (Blong, 1984), al generarse, ya sea directamente por la actividad volcánica, o como un fenómeno secundario generado a partir de los depósitos dejados por una erupción, causando devastación total o parcial a su paso. Los *lahares* (flujos de lodo o de escombros) son fluidos compuestos de mezcla de agua y partículas de todos los tamaños. Se originan directa o indirectamente de la acción volcánica y pueden alcanzar grandes distancias a partir de su punto de origen. Estos pueden formarse durante una erupción que genere oleadas o flujos piroclásticos que fluyan sobre nieve o hielo o que entren en los sistemas de cuencas hidrográficas, por erupciones a través de lagos cratéricos o que involucren al sistema hidrotermal de un volcán. Igualmente, los *lahares* pueden formarse después de las erupciones, debido a fuertes lluvias que se mezclan con fragmentos o escombros volcánicos sueltos, es decir, cualquier proceso por el cual las partículas volcánicas se vean saturadas por agua y movimiento pendiente abajo. Pueden moverse con velocidades tan bajas como 1 m/s, hasta 40 m/s en pendientes pronunciadas.

Hacia las partes distales dan lugar a crecientes e inundaciones:

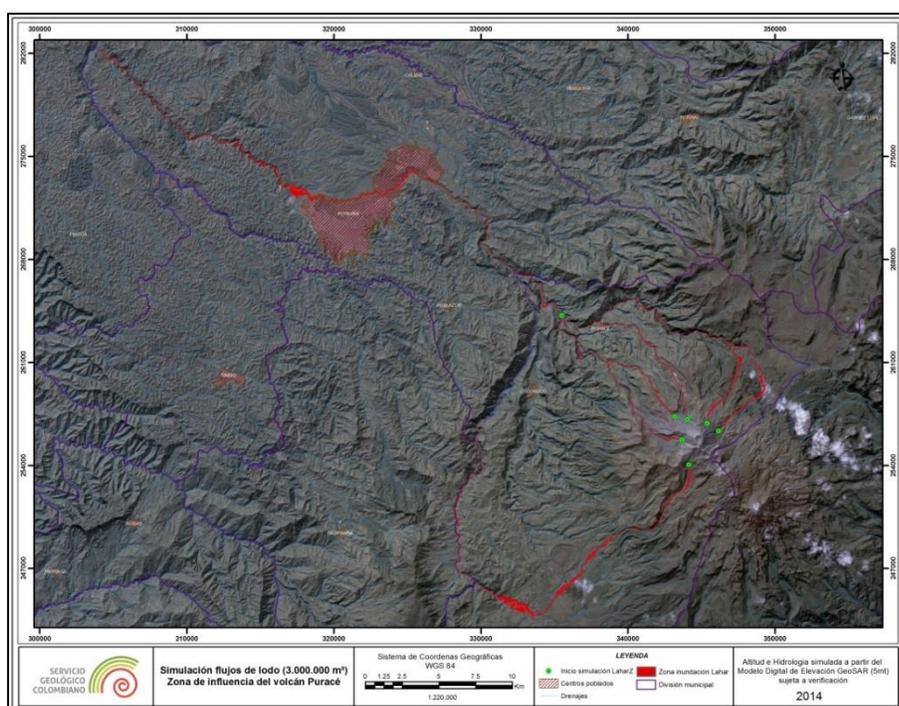
<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>;

<http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>.

El volcán Puracé presenta un registro amplio de depósitos de flujos de lodo o *lahares*, la mayoría de ellos posiblemente formados cuando el volcán presentaba masa glaciaria (edificios previos al VPA). Teniendo en cuenta 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 este fenómeno, mediante la herramienta LaharZ (Schilling, 1998; Schilling, 2014; Galarza *et al.*, 2014) y definir las áreas que podrían llegar a ser afectadas en una posible erupción del volcán.

La Figura 13 presenta el resultado de la simulación para un volumen de  $3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, observándose que todos los *lahares* se encausarían en los valles de los ríos y quebradas que nacen en el volcán, afectando el complejo minero de Azufre EMICAUCA, la población de Puracé (en el sector del valle del río Vinagre), la población de Paletará (que se encuentra en la desembocadura de la quebrada Río Blanco en el río Cauca) y la represa Florida II. Los flujos de lodo pueden alcanzar distancias de más de 50 km y en el caso de que los *lahares* generados en las partes altas del volcán alcancen el río Cauca, en su paso por la ciudad de Popayán, afectando la infraestructura y población asentada cerca al cauce del río.

Se debe tener en cuenta que la simulación de los flujos de lodo mediante la herramienta LaharZ, muestra la zona que podría ser afectada por el fenómeno, pero no indica los parámetros físicos que caracterizarían dichos flujos, como son velocidad y altura de inundación, para lo cual deben utilizarse herramientas de simulación más complejas. En el caso del VPA se aplicó un método alternativo para estimar las alturas alcanzadas por el flujo mediante el análisis raster de los resultados de la simulación y su correspondencia con las elevaciones contenidas en el DEM.



**Figura 13.** Zonas que podrían ser afectadas por flujos de lodos desencadenados durante o posterior a la actividad eruptiva del volcán Puracé Actual, según los resultados de la simulación con la herramienta LaharZ.

## 2.5 OTRAS AMENAZAS

En éstas se incluyen otros fenómenos acompañantes a los principales originados en una erupción volcánica y que no están representados en el mapa, como son las ondas de choque generadas durante erupciones explosivas, lluvias ácidas producidas por gases emitidos a la atmósfera que pueden causar corrosión en estructuras metálicas, acumulación de gases venenosos en depresiones topográficas (como el CO<sub>2</sub>) que pueden causar muerte, sismos volcánicos que precedan a las erupciones o durante ellas causando daños a la infraestructura en las zonas aledañas al volcán, como son las poblaciones de Puracé, Coconuco y Paletará (Monsalve & Pulgarín, 1993).

### 3. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

La representación de la amenaza por actividad futura del volcán considera erupciones similares a las comprendidas en el registro geológico de los últimos 10.000 años y además que el centro o foco de emisión de la actividad futura sea el cráter actual.

El mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé (anexo), presenta tres zonas de amenaza designadas como alta, media y baja, cuyos límites no son tajantes, son transicionales, por lo tanto son trazados con línea discontinua. Esta zonificación está basada en la potencialidad de los daños que causan los diferentes fenómenos volcánicos, considerando la posibilidad de que un área determinada pueda ser afectada por más de uno de ellos simultáneamente. En consecuencia, esta zonificación es el producto de la superposición de los resultados de la zonificación, de acuerdo a los datos obtenidos en campo y de las simulaciones de cada uno de los fenómenos asociados a la historia eruptiva del volcán.

#### 3.1 ZONA DE AMENAZA ALTA

Delimita la zona expuesta a:

-Caída de piroclastos con acumulaciones mayores a 10 cm, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter actual).

-Proyectiles balísticos con diámetros mayores a 20 centímetros.

-Flujos piroclásticos que afectarían las partes altas del edificio volcánico y se canalizarían por los principales drenajes que nacen en el volcán como son los ríos Cocuy, San Francisco, Vinagre, Anambío, la Quebrada Agua Blanca y algunos de sus afluentes. Según el tipo de flujo piroclástico llegarían a alcanzar distancias de alrededor de 10 km a partir del foco de emisión.



-Oleadas piroclásticas que podrían afectar todas las laderas del volcán (éstas podrían originarse como fenómenos aislados o acompañando los flujos piroclásticos).

-Flujos de lodo (*lahares*) que se encauzarían por los valles de los ríos y quebradas que nacen en el volcán. Estos podrían formarse por contenido de agua en las erupciones, represamientos de flujos piroclásticos, por deslizamientos o por fuertes lluvias que arrastren material suelto desde las partes altas del volcán, pudiendo ser generados al mismo tiempo de la erupción o posterior a ella.

-Flujos de lava que descenderían desde el foco de emisión por las laderas del edificio volcánico, canalizándose hacia las partes bajas, por los principales drenajes que nacen en el volcán.

-Acumulación de gases volcánicos emitidos antes, durante y después de las erupciones.

-Ondas de choque debidas a erupciones explosivas.

-Sismos de origen volcánico que podrían ser sentidos con frecuencia debido a la proximidad al foco volcánico; éstos pueden registrarse en estado de reposo y especialmente durante la reactivación del volcán.

Varios de estos fenómenos pueden impactar, simultáneamente, esta zona durante una actividad eruptiva del volcán.

### **3.2 ZONA DE AMENAZA MEDIA**

Delimita la zona expuesta a:

-Caída de piroclastos con acumulaciones entre 10 y 1 cm, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter actual).

-Proyectiles balísticos con diámetros entre 6 y 20 cm.

-Ondas de choque debidas a erupciones explosivas.

-Sismos de origen volcánico de magnitud considerable podrían sentirse con alguna frecuencia en esta zona.

---

### 3.3 ZONA DE AMENAZA BAJA

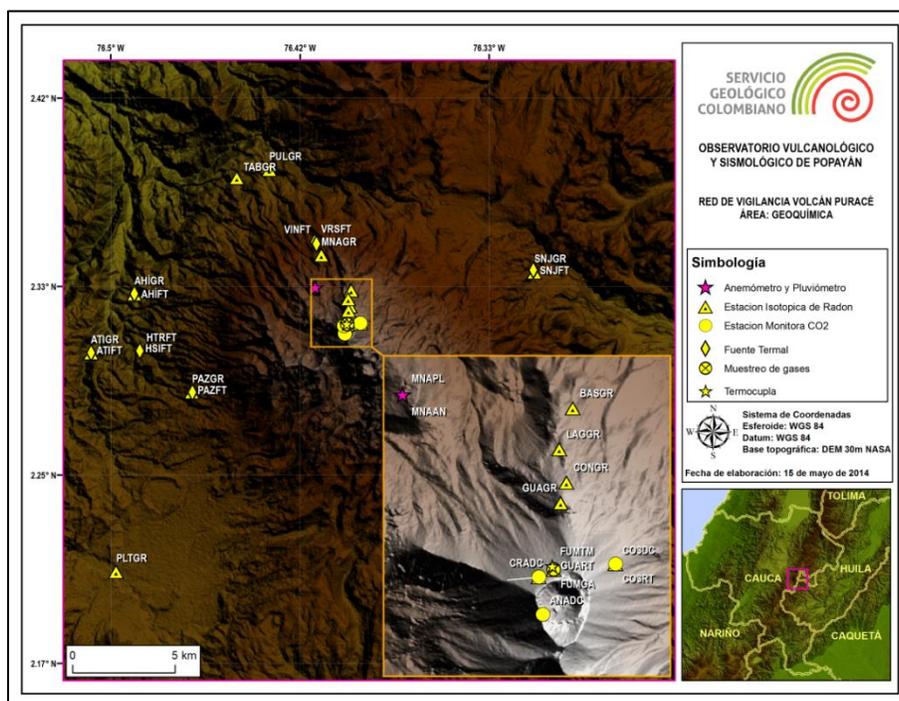
Delimita la zona expuesta a:

-Caída de piroclastos con acumulaciones de 1 cm a 5 mm, según la tendencia predominante de los vientos en el área (para una columna eruptiva de hasta 10 km de altura sobre la cima del cráter actual).

-Ondas de choque debido a la actividad explosiva del volcán y algunos sismos de origen volcánico de magnitud considerable que podrían sentirse con menor intensidad debido a la distancia respecto al volcán.

## 4. ESTADO ACTUAL DEL VOLCÁN PURACÉ

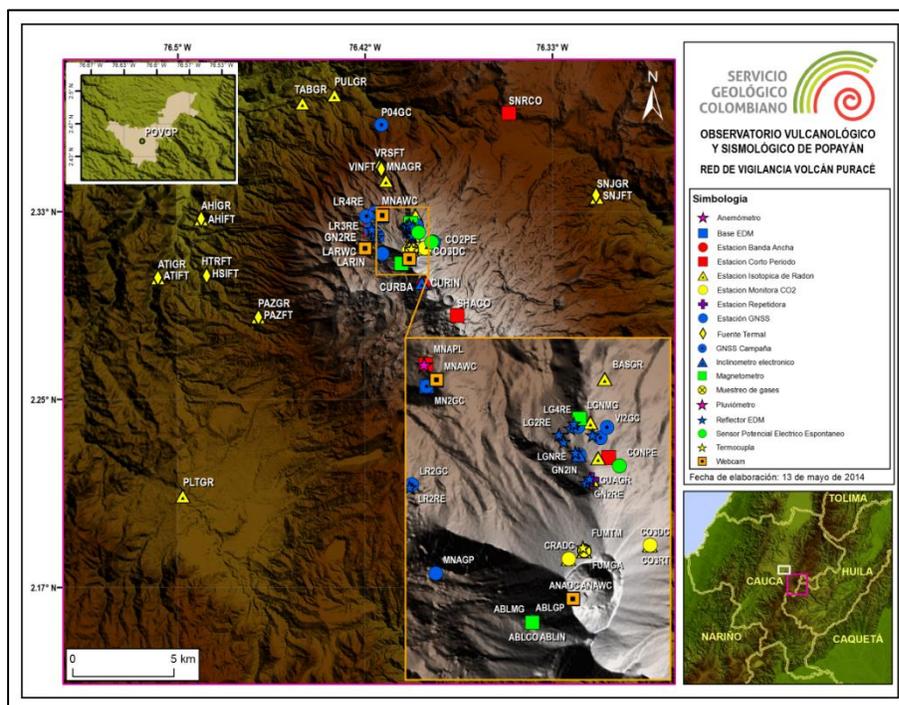
El volcán Puracé Actual se considera activo por la presencia de fumarolas al interior y exterior del cráter, estas últimas estudiadas por personal del Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS), durante las últimas cuatro décadas, fuentes termales alrededor del edificio volcánico (Figura 14) y un importante registro, no sólo de actividad eruptiva histórica documentada por varios autores a través de varios siglos, sino también por los datos sobre la actividad sísmica, obtenidos por la red de monitoreo del Servicio Geológico Colombiano, a través del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop), desde la década de los 80's.



**Figura 14.** Ubicación de fumarolas y fuentes termales asociadas a la actividad del volcán Puracé Actual, a partir del mapa de localización de estaciones y puntos de muestreo en el área de Geoquímica.

Con el fin de conocer los cambios en el comportamiento del volcán Puracé que puedan indicar su reactivación y posibilidad de erupciones futuras, el volcán y la Cadena Volcánica, de la cual hace parte, son vigilados por el SGC a través del OVSPop, mediante una red instrumental de monitoreo consistente (en el momento de elaborar esta memoria) en 12 estaciones sismológicas, que registran la actividad sísmica en tiempo real; 5 inclinómetros electrónicos, 5 estaciones de posicionamiento global (GNSS), 11 líneas para medición electrónica de distancia (EDM) y un total de 9 puntos geodésicos para ocupaciones periódicas con instrumentos GPS de campaña, los cuales permiten conocer la deformación del volcán debida, principalmente, a intrusión de nuevo magma. Por otro lado, en el área de Geoquímica se tienen 16 estaciones de monitoreo de gas Radón (Rn-222), 3 de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en suelo, un sensor de temperatura en la fumarola externa lateral (flanco norte del cono volcánico); así mismo, se realizan muestreos para chequear composición fisicoquímica y temperatura en 7 fuentes termales y en la fumarola lateral, con el fin de detectar cambios que estén relacionados con la reactivación del volcán. Adicionalmente, se monitorean los cambios superficiales en el edificio volcánico con 3 cámaras Web, que permiten observar en tiempo real la morfología del cráter y parte del edificio volcánico, además del comportamiento de los procesos de desgasificación. En el área de campos electromagnéticos se cuenta con 2 sensores para la medición del potencial eléctrico espontáneo así como dos estaciones para el registro de la variación del campo magnético local, los cuales se pueden llegar a asociar a movimiento de volúmenes de material fluido al interior del sistema volcánico (Figura 15).

Los Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos del país, los cuales pertenecen al Servicio Geológico Colombiano, han estandarizado desde el primer trimestre del año 2010 la presentación del análisis del estado de actividad de un volcán en el territorio nacional, derivado de las labores de monitoreo en cada caso particular. Es así como en materia del monitoreo del volcán Puracé, se ha venido reportando de manera periódica el nivel del estado en que se encuentra, realizando la evaluación de su actividad en períodos de semanas y meses. Desde esta fecha, el volcán Puracé ha permanecido en **NIVEL VERDE (IV): VOLCÁN ACTIVO Y CON COMPORTAMIENTO ESTABLE**, lo cual quiere decir que el volcán ha permanecido en un estado base caracterizado por quietud o reposo, con ocurrencia de actividad sísmica, fumarólica y dinámica superficial, lo cual afecta solo la zona más inmediata o próxima al centro de emisión. En el caso de ocurrir cambios en su comportamiento que indiquen una evolución a estados de mayor actividad volcánica, deberán ocurrir incrementos en la sismicidad que se registra actualmente, al igual que en parámetros geofísicos, fisicoquímicos y geodésicos.



**Figura 15.** Red de monitoreo del OVSPop para el volcán Puracé a Octubre de 2014.

Con los registros del monitoreo hasta el presente, se confirma que el Puracé es un volcán activo en estado de reposo; las variaciones en este comportamiento permitirían conocer en un futuro la reactivación del volcán. Esta información, complementada con el conocimiento sobre su historia eruptiva, definen escenarios eruptivos (Monsalve, 2014), los cuales serán replanteados acorde al seguimiento de la actividad durante una reactivación.

La información sobre el volcán, su monitoreo y el seguimiento de su actividad (boletines periódicos), puede ser consultada en la página web del OVSPop:

<http://www.sgc.gov.co/Popayan.aspx>

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El volcán Puracé es un volcán activo en estado de reposo que cuenta con un monitoreo permanente a partir de la década de los 80's.

La evaluación de la amenaza del VPA se basa en el conocimiento que se tiene sobre su actividad pasada, considerando, por el momento, su cráter actual como centro de emisión de erupciones futuras. En caso de detectarse otro centro de emisión, el mapa de amenaza debe modificarse.

Con los datos disponibles y el conocimiento que se tiene de los procesos eruptivos del VPA, no es posible establecer una recurrencia de la actividad del volcán en el tiempo. De acuerdo con su historia eruptiva, una actividad futura podría extenderse por varios años, presentándose fases eruptivas de corta duración seguidas por intervalos de reposo de algunos meses a pocos años (tal como lo demuestra el registro histórico del volcán). El tipo de erupciones que podrían presentarse serían principalmente de carácter explosivo (incluyendo la formación y destrucción de domos), durante las cuales se generarían flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, caídas de ceniza, proyectiles balísticos y *lahares* secundarios, tal como ha ocurrido en la historia más reciente del volcán.

Aunque las erupciones magmáticas efusivas, con generación de flujos de lavas, corresponden principalmente a la construcción inicial del edificio del VPA, se considera que también pueden ser generadas en una actividad futura.

Las áreas que pueden ser afectadas por la mayoría de los fenómenos volcánicos fueron delimitadas mediante simulaciones computacionales, tomando como parámetros de entrada las características de los depósitos asociados a la actividad del VPA encontrados en campo.

Las zonas de las amenazas alta, media y baja, mostradas en el mapa, son el resultado de la superposición de las áreas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, teniendo en cuenta su daño potencial. Los límites entre las zonas de amenaza, designadas con líneas discontinuas, indican una transición de las características de los fenómenos y, por lo tanto, de la amenaza. En ningún caso representan límites tajantes o absolutos entre una y otra zona de amenaza.

El área más afectada, en caso de una futura erupción volcánica, sería el sector NW del volcán, en el cual se encuentran la mina de Azufre de EMICAUCA, la población de Puracé y las veredas Tabío, Campamento, Cuaré y Pululó, entre otras. Muchas de estas zonas podrían quedar incomunicadas, en caso de generación de flujos piroclásticos y flujos de lodos (*lahares*).

Los piroclastos de caída (cenizas) constituyen la amenaza principal para las poblaciones de Coconuco, Poblazón y Timbío; mientras que la población de Paletará y la ciudad de Popayán, también podrían verse afectadas por eventuales flujos de lodo o aumento de caudal en la quebrada Río Blanco y el río Cauca respectivamente.

Erupciones futuras del volcán, en que generen emisiones de cenizas durante los meses donde el régimen de vientos no sigue la tendencia principal (ej. diciembre a mayo), o en que las columnas eruptivas alcancen otras alturas, afectarían áreas diferentes a las delimitadas en la zonificación por este fenómeno y son indicadas, en el mapa de amenaza, con un círculo de líneas discontinuas que designan las zonas de amenaza alta, media y baja por este fenómeno.

El seguimiento de la actividad futura del volcán y el conocimiento del registro geológico permitirán el planteamiento de escenarios que nos permitan tener una respuesta más acertada ante una crisis volcánica.

Se recomienda tener en cuenta el mapa de amenaza para fines de preparación de planes de contingencia, de manejo y ordenamiento territorial y de educación a la comunidad, así como base para estudios de gestión del riesgo.

El presente mapa de amenaza volcánica debe ser modificado 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 su comportamiento.

Se recomienda a autoridades y comunidades mantenerse continuamente informados acerca de la actividad del volcán, mediante la consulta a la información publicada por el SGC en la página web del OVSPop:

<http://www.sgc.gov.co/Popayan.aspx>

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDÍA DE POPAYÁN: [www.popayan-cauca.gov.co](http://www.popayan-cauca.gov.co)

BAXTER, P. J. 1990. Medical effects of volcanic eruptions: 1. Main causes of death and injury. *Bulletin of Volcanology* (1990) 52: 532-544.

BAXTER, P. J., NERI, A. and TODESCO, M., 1998. Physical modelling and human survival in pyroclastic flows. *Natural Hazards* (1998) 17: 163-176.

BLAKE WHITE, R. 1869. Informe del ingeniero Robert B. White sobre la observación hecha de los efectos de la explosión del volcán Puracé, que tuvo lugar el día 4 de octubre de 1869. *Revista Anales de la Universidad*, p. 163-173. Popayán.

BLONG, R.J., 1984. *Volcanic Hazards. A sourcebook on the effects of eruptions.* Academic Press. Sidney.

BONADONNA, C., C.B. CONNOR, B.F. HOUGHTON, L. CONNOR, M. BYRNE, A. LAING, AND T. HINCKS, 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand, *Journal of Geophysical Research*, 110 (B03203).

COURTLAND, L. 2011. *Tephra2 Tutorial Scripts.* Tephra2 Tutorial 1: An Introduction, consultada en (<https://vhub.org/resources/tephra2>).

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), 2011. Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020.

<https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion/>

ESPINOSA, A. 1989. Datos sobre la actividad del volcán Puracé en épocas históricas. INGEOMINAS, Popayán. Informe interno, 22 p. Popayán.

ESPINOSA, A. 2011. *Enciclopedia de Desastres naturales Históricos de Colombia. Erupciones históricas de los volcanes Colombianos 1550 – 2000.*

---

*Mapa de amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Cauca - Colombia). Segunda versión (2014). Memoria.*

Segunda edición. Academia Colombiana de ciencias Exactas, físicas y naturales. Universidad del Quindío, vol. 6, 453 p. Bogotá.

- FAUST, F. 1991. La Cultura de los Indígenas del Macizo Colombiano y Protección de la Naturaleza en el Parque Nacional de Puracé. *Novedades Colombianas* (3):54-62.
- GALARZA, J., LAVERDE C., ZULUAGA I., MONSALVE M. 2014. Implementación de herramientas computacionales para la simulación de fenómenos volcánicos, como soporte para la actualización del mapa de amenaza del volcán Puracé (Uso de Tephra2, Titan2D, Lava PL y LaharZ). SGC. Informe Interno.
- HANTKE, G. & PARODI, A. 1966. Catalogue of the active volcanoes of the world including solfatara fields. Parte XIX Colombia, Ecuador and Perú. IAVCEI, 19, p. 11-18. Roma.
- MARÍN-CERÓN, M. I. 2004. Geochemical variation of late Cenozoic volcanic rocks in time and space, southwestern Colombia. Graduate School of Science. Tesis de maestría. 105 p. Shimane University, Japón.
- MONSALVE, M. L. 1993. Geoquímica y dataciones de episodios tipo San Vicente en el volcán Puracé. *INGEOMINAS, Boletín geológico*, vol. 33, No 1-3, p. 3-17. Bogotá.
- 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. & ARCILA, M. 2009. Contexto tectónico de la zona volcánica del Puracé y Provincia alcalina del valle superior del Magdalena. *I+D Vol. 8*, No. 1, p. 35-41.
- MONSALVE, M. L., CORREA, A. M. & ARCILA, M. 2009. Firma adakítica en los productos recientes de los volcanes, Nevado del Huila y Puracé, Colombia. *Memorias XII Congreso Colombiano de Geología, Paipa*.
- MONSALVE, M. L., Pulgarín, B. A., Narváez, B. L., Agirre, L.P., Laverde, C.A., 2012. *Geología y estratigrafía del volcán Puracé Actual, Colombia*. SGC. Bogotá.

- MONSALVE, M. L. 2014. Evaluación de la amenaza volcánica del volcán Puracé Actual, (Colombia), para la actualización del mapa de amenaza volcánica.
- NEW YORK TIMES, 1869. Volcanic eruption of the Puracé – Rising of the Cauca. Published: November 7. 1869.
- PATIÑO, D. 2013. Arqueología y erupciones volcánicas en épocas prehistórica e histórica en la región del volcán Puracé (cauca). Servicio Geológico Colombiano - . Universidad del Cauca. Contrato 004. Bogotá.
- PATRA, A., A. Bauer, C. Nichita, E. Pitman, M. F. Sheridan, M. Bursik, B. Rupp, A. Webber, L. Namikawa, and C. Renschler. Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:1–21, 2005.
- PÉREZ, F., (1862). *Geografía Física i Política de los Estados Unidos de Colombia*, Tomo Primero. Bogotá.
- PERIÓDICO EL LIBERAL: <http://elnuevoliberal.com/>
- PONCE LEIVA, P, Ed., 1991. *Relaciones Histórico-Geográficas de la audiencia de Quito S. XVI-XIX. Tomo I (S. XVI)*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- PUERTA, G. 1991. *Historias y leyendas del volcán Puracé*. 1a edición. Impresión Canal Ramírez & Antares Ltda. 103 p. Popayán.
- PULGARÍN, B., MONSALVE, M. L., ARCILA, M. M. & CEPEDA, H. 1994. Actividad histórica y actual del volcán Puracé. *Boletín geológico INGEOMINAS*, vol. 34, No. 2-3, pp. 39-53. Bogotá.
- RAMÍREZ, J. E. 1975. *Historia de los terremotos en Colombia*, 2 ed. IGAC. 250 p. Bogotá.
- RECLUS, E. 1893. *Colombia*. Traducida y anotada por F. J Vergara y Velasco. Papelería de Samper Matiz, 531 p. Bogotá.
- 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>.

SELF, S., 2006. The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A364*: 2073-2097

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán:  
<http://www.sgc.gov.co/Popayan/Publicaciones.aspx>.

STÜBEL, A. 1906. Die Vulkanberge von Colombia. 154 Seiten, 3 Tafeln Karten, 53 Bildern. Verlag von Wilhelm Baensch. 154 p. Dresden.

TILLING, R., & PUNONGBAYAN, R., 1989. Los peligros volcánicos. Organización Mundial de Observatorios Vulcanológicos.

USGS: <http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/> Volcanic Ash): Effects & Mitigation Strategies).

<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/tephra/index.php>

<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lava/index.php>

<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/pyroclasticflow>

VHUB: Collaborative volcano research and risk mitigation: <https://vhub.org/>

<https://vhub.org/resources/titan2d>

<https://vhub.org/resources/offlinetools>

<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>

<http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>