

**MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO
CERRO BRAVO SEGUNDA VERSIÓN (2022)
MEMORIA**

Manizales, junio de 2022

Servicio Geológico Colombiano

Oscar Paredes Zapata
Director general

Marta Lucia Calvache
Directora técnica de Geoamenazas

María Luisa Monsalve
Coordinadora Grupo de amenaza volcánica SGC

Cristian Mauricio López
Coordinador Evaluación y Monitoreo de la Actividad Volcánica

Autores

Gerónimo Valencia Ramírez
Lilly Maritza Martínez
María Luisa Monsalve
Jhon Jainer Galarza

Citación: Valencia G., Martínez L. M., Monsalve M. L. Galarza J. J. (2022). Mapa de amenaza volcánica del complejo volcánico Cerro Bravo segunda versión memoria– junio de 2022. Manizales.

© Servicio Geológico Colombiano. (2022). Esta obra es distribuida bajo licencia internacional Creative Commons Atribución/Reconocimiento 4.0

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	6
1.1	Localización y vías de acceso.....	7
1.2	Sistema de drenajes	8
1.3	Estudios previos	9
1.4	Metodología	10
2.	REGISTRO GEOLOGICO	11
3.	AMENAZA VOLCÁNICA	17
3.1	Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas)	17
3.2	Amenaza por flujos de lava	19
3.3	Amenaza por lahares.....	20
3.4	Amenaza por caídas piroclásticas	22
3.4.1.	Amenaza por caída de piroclastos transportados por el viento	23
3.4.2	Amenaza por caída de piroclastos de proyección balística.....	27
3.5	Otras amenazas.....	28
3.5.1	Gases volcánicos.....	28
3.5.2	Onda de choque	29
3.5.3	Sismos.....	29
4.	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA	30
4.1	Zona de amenaza volcánica alta	30
4.2	Zona de amenaza volcánica media	32
4.3	Zona de amenaza volcánica media	33
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

RESUMEN

Cerro Bravo, localizado en el municipio de Herveo, es un complejo volcánico activo en estado de reposo, conformado por remanente de domos y dos edificios volcánicos: sur y norte donde se localizan los domos y cráteres más recientes. Su actividad eruptiva, desde finales del Pleistoceno y Holoceno, ha sido explosiva de tipo pliniano a subpliniano, acompañada por ascenso y destrucción de domos. El registro geológico muestra al menos 22 erupciones, donde las más explosivas han alcanzado VEI entre 4 y 5, que han generado depósitos de corrientes de densidad piroclástica tanto concentradas (flujos de bloques y flujos de pómez) como diluidas (oleadas), caídas piroclásticas y lahares. Estudios geológicos detallados, permitieron re-evaluar su dinámica eruptiva y la amenaza volcánica, teniendo en cuenta el registro geológico de su actividad en los últimos 14.000 años. Los focos de emisión de las erupciones estarían localizados en los edificios sur y norte y adicionalmente, se considera un tercer foco intermedio entre estos dos. Para la segunda versión del mapa de amenaza del Complejo volcánico Cerro Bravo (CVCB), se realizaron simulaciones computacionales de fenómenos volcánicos, basados en los estudios geológicos, que posteriormente llevaron a la zonificación de las amenazas en alta, media y baja, según su potencialidad de daño. La zona de amenaza alta puede ser afectada por uno o varios fenómenos volcánicos simultáneamente (corrientes de densidad piroclástica, lahares, flujos de lava y caída de piroclastos) durante un evento eruptivo. En esta área se puede dar pérdida de vidas, daños e impactos a los bienes, la infraestructura y los medios de sustento, entre otros. Los fenómenos de caídas piroclásticas por transporte eólico o proyección balística, presentan zonificación de la amenaza de acuerdo al espesor y tamaño del material que puede ser depositado durante una erupción, teniendo en cuenta el escenario máximo. El área que puede ser afectada por caída de piroclastos incluye importantes poblaciones como las ciudades de Manizales, Pereira, Armenia, Cali, Quibdó, Ibagué, Bogotá, entre otras. El monitoreo volcánico junto al mapa de amenaza constituyen una herramienta fundamental para la toma de decisiones en el manejo de crisis volcánicas y el ordenamiento del territorio, contribuyendo con ello, a la gestión integral del riesgo volcánico de desastres y a la apropiación social del Conocimiento Geocientífico.

ABSTRACT

Cerro Bravo, located in the municipality of Herveo, is an active volcanic complex in a state of rest, made up of remnants of domes and two volcanic edifices: south and north, where the most recent domes and craters are located. Its eruptive activity, since the end of the Pleistocene and Holocene, has been Plinian to Subplinian type explosive, accompanied by ascent and destruction of domes. The geological record shows at least 22 eruptions, where the most explosive have reached VEI between 4 and 5, which have generated deposits of pyroclastic density currents both concentrated (block flows and pumice flows) and diluted (surges), pyroclastic falls and lahars. Detailed geological studies allowed to re-evaluate its eruptive dynamics and volcanic threat, taking into account the geological record of its activity in the last 14,000 years. This record shows explosive-type activity, which could occur in future eruptions. The emission sources of the eruptions would be located in the south and north buildings and additionally, a third intermediate source between these two is considered. Based on parameters obtained in the geological studies, computational simulations of volcanic phenomena were carried out, which led to the zoning of hazards into high, medium and low, according to their damage potential, for the second version of the CVCB hazard map. The high hazard zone can be affected by one or several volcanic phenomena simultaneously (pyroclastic density currents, lahars, lava flows and pyroclastic falls) during an eruptive event. Loss of life, damage and impacts to property, infrastructure and livelihoods, among others, can occur in this area. Phenomena of pyroclastic falls due to wind transport or ballistic projection present hazard zoning according to the thickness and size of the material that can be deposited during an eruption, taking into account the maximum scenario. The area that can be affected by pyroclastic falls includes important towns such as the cities of Manizales, Pereira, Armenia, Cali, Quibdó, Ibagué, Bogotá, among others. Volcanic monitoring together with the hazard map constitute a fundamental tool for decision-making in the management of volcanic crises and land use planning, thus contributing to the comprehensive management of volcanic disaster risk and the social appropriation of Geoscientific Knowledge.

1. INTRODUCCIÓN

Los mapas de amenaza volcánica representan gráficamente las zonas que pueden ser afectadas por uno o varios fenómenos que ocurren durante una erupción para un volcán determinado, según los resultados obtenidos de la evaluación de su amenaza. Es uno de los principales insumos en la planificación de un territorio y la gestión del riesgo de desastres.

En el territorio nacional, existen alrededor cincuenta (50) volcanes catalogados como activos (ya sean volcanes aislados, o haciendo parte de complejos o de cadenas volcánicas.). Para muchas de las comunidades que habitan en las zonas de influencia de estos volcanes, la percepción sobre la amenaza que representa su reactivación es escasa o nula y tienden a la trivialización de la misma. Por ejemplo, volcanes con largos periodos de reposo como es el caso del Complejo Volcánico Cerro Bravo (CVCB) el cual debido a su carácter explosivo abarca una amplia zona de influencia, con alrededor de 4.000.000 millones de habitantes, que podrían tener diferente grado de afectación por los fenómenos volcánicos en caso de una erupción. Lugares donde actualmente se encuentran importantes poblaciones, como Manizales, Chinchiná, Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal y Pereira se encuentran en amenaza alta por caída de piroclastos. Mientras que las cabeceras municipales de San Sebastián de Mariquita, Honda y La Dorada, se verían afectadas por *lahares* en las cuencas de los ríos Gualí, Guarinó y Magdalena. En los departamentos de Caldas, Risaralda y Tolima se vería afectada infraestructura importantes para la economía regional, nacional en sectores como el transporte terrestre y aéreo, el energético, además de extensas zonas agropecuarias.

El CVCB es activo, en estado de reposo, su registro geológico muestra al menos 22 erupciones en los últimos 14.000 años, tiene asociadas fuentes termales y en el interior de su edificio ocurren algunos sismos asociados principalmente a fracturas. Esta estructura es monitoreada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OV SMA).

Actualmente se cuenta con nuevas metodologías para realizar la evaluación de la amenaza volcánica, tanto para la toma de datos en campo y su procesamiento, como en la utilización de herramientas computacionales con las que se simulan los procesos volcánicos basados en el registro geológico.

En este documento se dan a conocer los resultados de los trabajos geológicos (Martínez et al., 2022), de evaluación de la amenaza volcánica o (Monsalve et al., 2022) y de simulaciones computacionales de fenómenos volcánicos (Galarza et al., 2022) para el CVCB, los cuales fueron el insumo para realizar la segunda versión de Mapa de amenaza del este Complejo.

1.1 Localización y vías de acceso

El complejo volcánico Cerro Bravo (CVCB, figura 1) se localiza a $5^{\circ} 05' 24''$ de latitud N y a $75^{\circ} 17' 24''$ de longitud W, con una altitud de 4050 msnm, en la cordillera Central de Colombia, en el municipio de Herveo (Tolima). Se encuentra a 72 km al noroeste de la ciudad de Ibagué, 25 km al este de la ciudad de Manizales (Caldas) y 150 km al noroeste de la ciudad de Bogotá D. C. Poblaciones como las veredas Letras y Brasil se localizan a menos de 6 km de distancia del complejo volcánico. El acceso al complejo se realiza por la vía Manizales - Bogotá D.C. (ruta 50); en el sector El Doce se toma el camino hacia la parte alta del complejo y hacia el sector norte se llega por un carreteable (en muy mal estado) desde el sector de La Libia a la vereda Brasil, bordeando el complejo en su parte oriental y, por su costado occidental, desde El Doce hasta el sector de la Pradera (Figura 2).

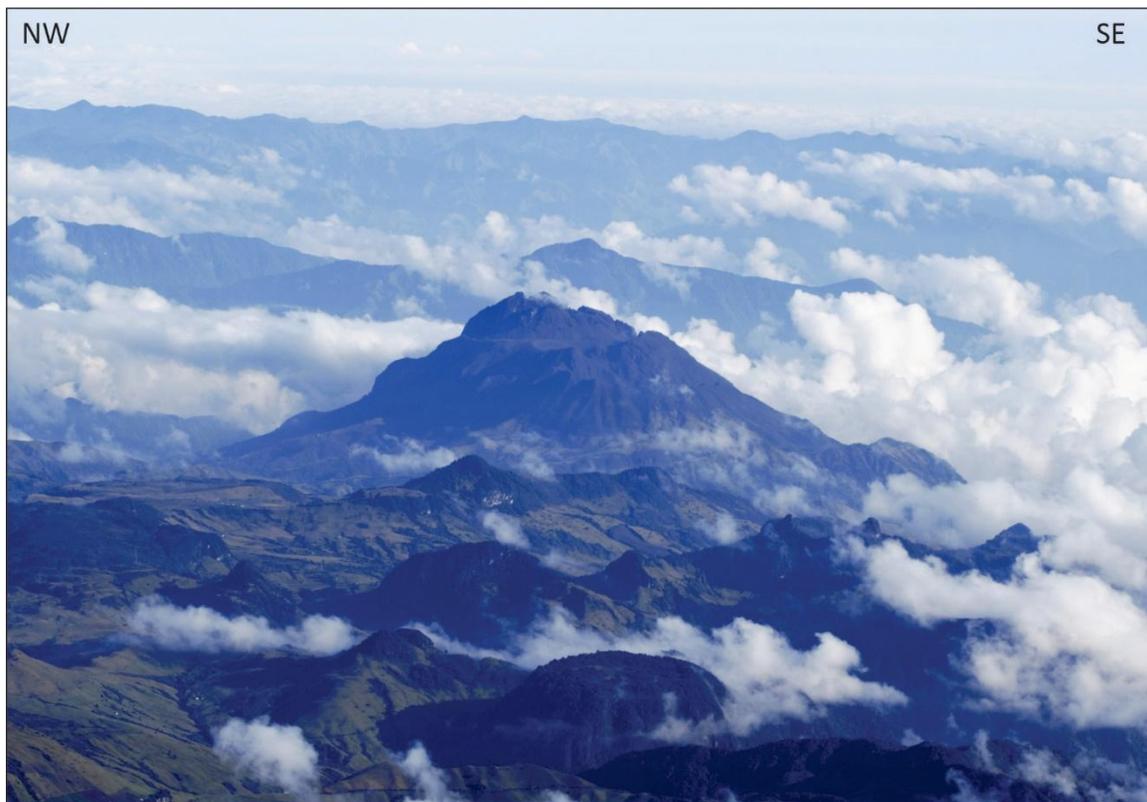


Figura 1. Complejo volcánico Cerro Bravo, fotografía tomada en sobrevuelo realizado por el SGC y la Fuerza Aérea Colombiana en enero de 2021.

En el área de influencia del CVCB, se encuentran, entre otros, poblaciones pertenecientes a los municipios de Herveo, Casabianca, Villahermosa, Fresno, Falan, Palocabildo, Mariquita y Honda en el departamento del Tolima; y Manizales, Villamaría, Chinchiná, Palestina, Neira, Marulanda, Aranzazu, Salamina, Filadelfia, Manzanares, Marquetalia, Victoria y La Dorada en el departamento de Caldas, Puerto Bogotá y Puerto Salgar en el departamento de Cundinamarca (Figura 2), además de otras poblaciones más lejanas que podrían ser afectadas por caída de piroclastos.

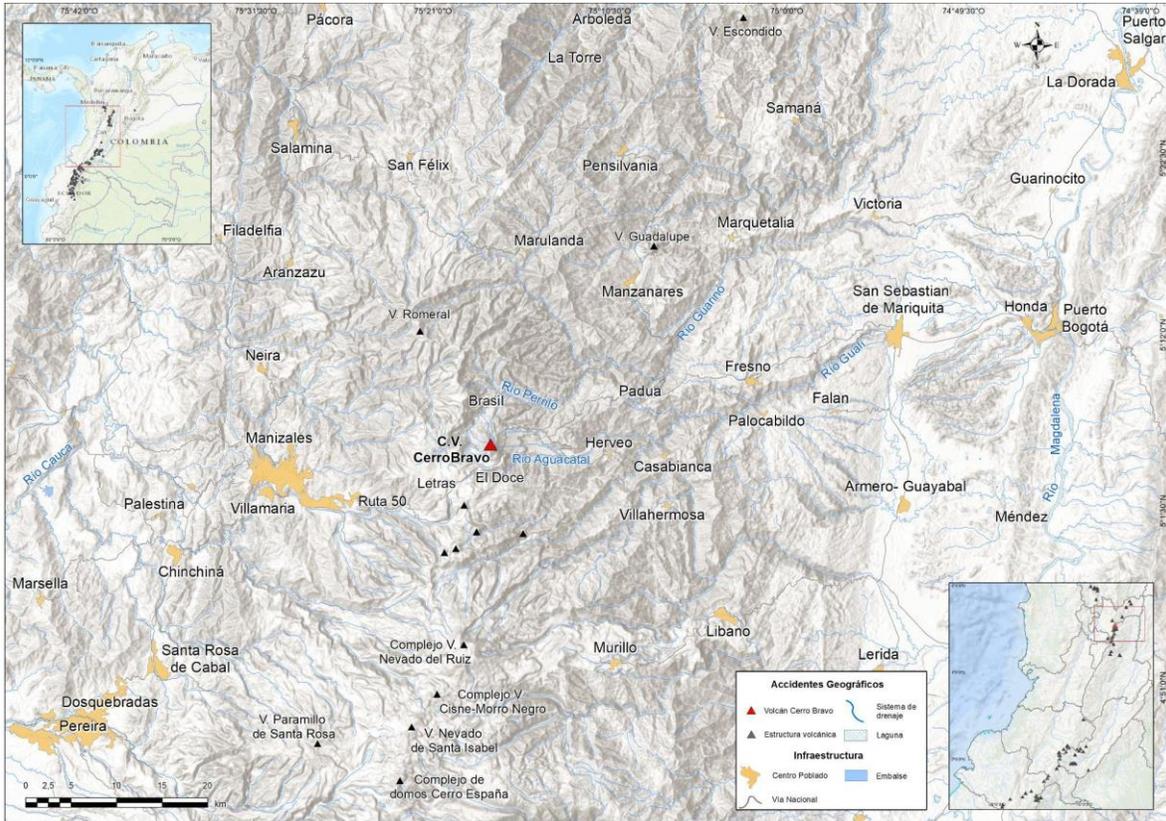


Figura 2. Localización del complejo volcánico Cerro Bravo y algunas poblaciones en su área de influencia.

1.2 Sistema de drenajes

En el CVCB, nacen las quebradas que forman las cuencas de los ríos Perrillo (afluente del río Guarín) y Aguacatal (afluente del río Gualí), los cuales atraviesan áreas rurales de poblaciones importantes como Manzanares, Marquetalia, Victoria y Dorada en el departamento de Caldas, y las cabeceras municipales de Mariquita y Honda en el Tolima. Estos ríos desembocan en el río Magdalena, al oriente del complejo.

La subcuenca del río Perrillo presenta un área aproximada de 160 km², drena las microcuencas que nacen sobre los flancos sur, suroeste, oeste, noroeste y norte del edificio volcánico, las cuales presentan un fuerte control estructural, siendo encausadas primero hacia el norte y luego toman una dirección general NE. Las microcuencas que nacen directamente en VCB, entre otras, son las quebradas: Seca, San Fernando, Peñas, Cerro Bravo y Farallones (Figura 3).

La cuenca del río Aguacatal cuenta con un área aproximada de 98 km² y recoge las aguas de las quebradas El Doce, Cerro Bravo, Los Micos, Los Balcones, El Rodeo y El Jordán, las cuales nacen directamente en la parte alta del complejo, drenando sus aguas principalmente hacia el E del edificio volcánico (Figura 3).

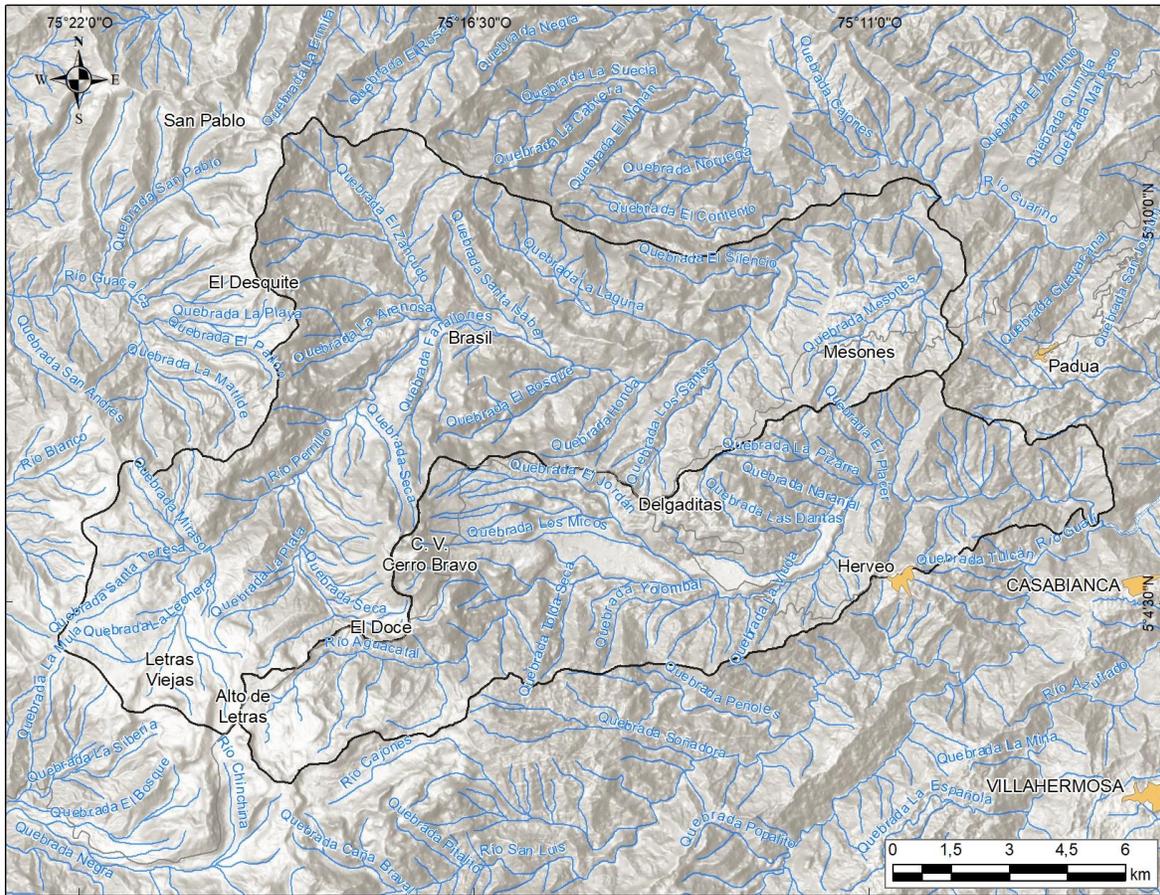


Figura 3. Ubicación de las subcuencas de los ríos Perrillo y Aguacatal, con origen en el CVCB.

1.3 Estudios previos

Lescinsky (1990) llevó a cabo un estudio geológico, vulcanológico y petrológico del volcán Cerro Bravo y adicionalmente realizó un análisis de la amenaza, de acuerdo a las conclusiones de su trabajo. Monsalve (1991) realizó trabajos geológicos encaminados a la evaluación de la amenaza volcánica, los cuales fueron la base para la primera versión del mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Cerro Bravo (Monsalve & Núñez, 1992), redefinido en los trabajos para la actualización del mapa de amenaza volcánica como Complejo Volcánico Cerro Bravo (CVCB). Otros trabajos puntuales, sobre la geología, que se han desarrollado en el complejo son: Herd, 1974 en Ingeominas, (1982); Thouret et al., (1985); Calvache *et al.*, (1987); Borrero (2009); Barrantes (2011); Facio Lince (2012); Pinzón y Echeverri (2017); Alarcón, *et al.*, (2020).

1.4 Metodología

La actualización del mapa de amenaza volcánica del CVCB, realizada por el grupo de amenaza volcánica de la dirección de Geoamenazas del SGC, se basó en la evaluación de la amenaza volcánica, la cual tuvo en cuenta la información reportada en trabajos previos Herd, 1974 en Ingeominas, (1982); Thouret et al., (1985); Calvache et al.(1987); Lescinsky, (1990); Monsalve, (1991); Borrero, (2009), y complementada con trabajos de campo desarrollados durante el proyecto para la actualización del mapa, en el cual se llevaron a cabo estudios detallados sobre la geología del complejo (Martínez et al., 2022). Los datos obtenidos en campo se tomaron teniendo en cuenta nuevas metodologías para la determinación de los parámetros a ser utilizados en el cálculo de la dinámica eruptiva. Igualmente, para la evaluación de la amenaza (Monsalve, *et al* (2022), se tuvo en cuenta la configuración actual del complejo y los datos suministrados por el monitoreo volcánico, que se lleva a cabo desde el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (OV SMA).

Con base en la información obtenida, se realizaron simulaciones computacionales que dieron como resultado la distribución de los diferentes fenómenos volcánicos que podrían generarse en una erupción futura. La simulación de los fenómenos volcánicos se llevaron a cabo utilizando las herramientas informáticas de *Tephra2* (Bonadonna et al., 2005, 2012; Connor and Connor, 2006; Volentiket al., 2009) para caídas piroclásticas, *Titan2D* (Patra *et al.*, 2005) para CDP concentradas; cono de energía *VHASS* (Takarada, 2020) para CDP diluidas; *LavaC* (Richardson and Connor et al., 2014) para flujos de lava y *LaharZ* (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998, 2014) para *lahares*. Estas herramientas computacionales se encuentran disponibles en vHub (<http://www.vhub.org>) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés), empleando como insumo modelos digitales de terreno (DEM). Los procedimientos y resultados de estas simulaciones se encuentran en Galarza *et al.* (2022).

La zonificación de la amenaza en alta, media y baja, se obtuvo de la superposición de las áreas afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos, teniendo en cuenta el grado de afectación sobre las mismas.

2. REGISTRO GEOLOGICO

El CVCB se localiza en el segmento volcánico norte de Colombia (Hall & Wood, 1985; Monsalve-Bustamante, 2020), está construido en la intersección de fallas del Sistema Palestina (NE-SW) con otro sistema transversal de tendencia NW-SE (Lescinsky, 1990; Monsalve, 1991; Martínez et al., 2022). El CVCB está conformado por dos edificios y remanentes de domos, el edificio norte, aloja domos recientes, y el edificio sur corresponde a un cono piroclástico. El CVCB presenta una forma alargada en sentido sur-norte (Figura 4) y se encuentra desplazado alrededor de 6 km del eje de la cordillera. Tiene un fuerte control estructural lo que hace que sus cuencas hídricas dirijan sus aguas hacia el flanco oriental de la cordillera con un patrón de drenaje sub-radial.

El basamento del CVCB corresponde a granodioritas que varían a cuarzodioritas y cuarzomonzonitas (Gómez y Montes, 2020). Depósitos de flujo de lava porfiríticos de composición andesítica, se encuentran alrededor del Complejo (Gómez y Montes, 2020). Estos depósitos no cuentan con estudios detallados sobre su origen o fuente.

Según comunicación oral de Thouret a D. T. Lescinsky (Lescinsky, 1990) la actividad eruptiva del CVCB comenzó hace aproximadamente 50.000 años con la formación de una caldera ubicada al sur del actual CVCB (Caldera de Quebrada Seca). Sin embargo, en este trabajo no se evidenció la existencia de esta caldera.

El registro geológico muestra que la actividad eruptiva del CVCB ha sido predominantemente explosiva, con ascenso y destrucción de domos, en la cual se han generado depósitos de corrientes de densidad piroclástica tanto concentradas (flujos piroclásticos de bloques y de pómez) como diluidas, caídas piroclásticas y generación de lahares. Los flujos de lava son restringidos en el registro geológico.

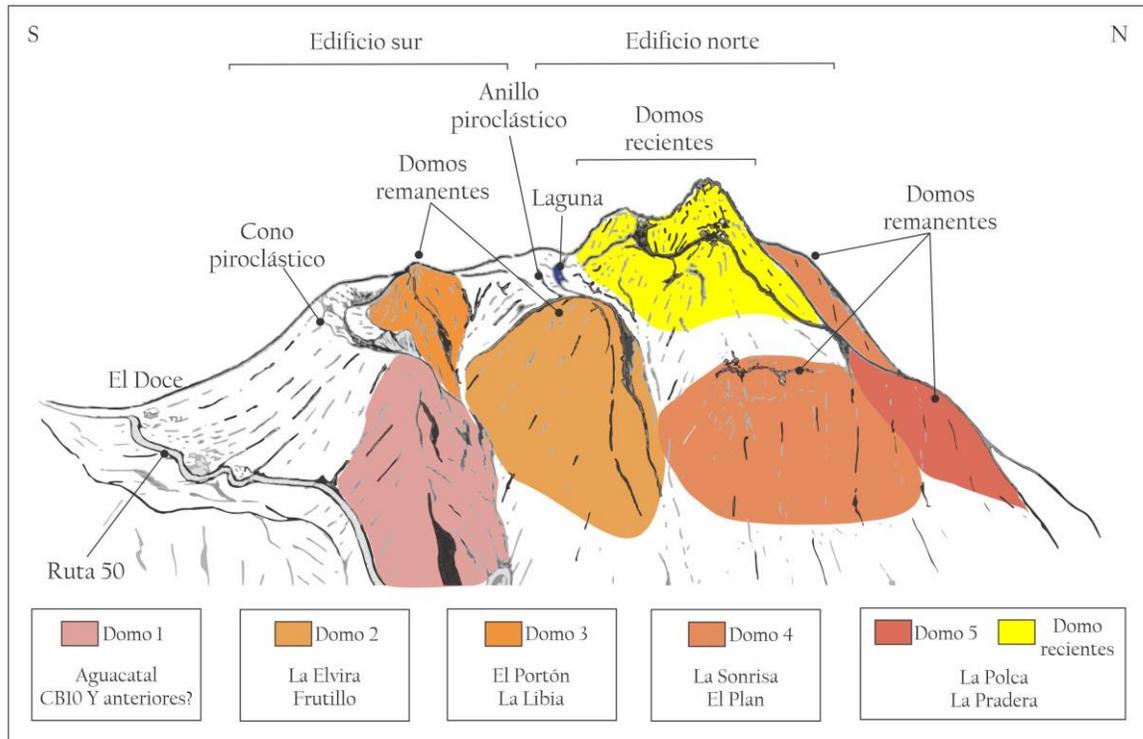


Figura 4. Esquema donde se aprecia la geomorfología del complejo volcánico Cerro Bravo, los domos y las unidades eruptivas asociadas a cada uno de ellos.

Herd (1974, en Ingeominas, 1982) designó a las unidades estratigráficas del VCB con el denominador de CB asociado principalmente a las unidades de caída piroclástica (figura 5), nomenclatura que fue retomada por autores como Lescinsky, (1990) y Monsalve, (1991). En este trabajo, se designó una nueva nomenclatura según, la localidad representativa de cada unidad eruptiva, y se incorporaron las nuevas unidades encontradas (Tabla 1).

Para el CVCB se evidencia un registro geológico de por lo menos 22 erupciones generadas durante los últimos 14.000 años (Tabla 1 y Figura 5) en las cuales se generaron columnas eruptivas, que según cálculos realizados, alcanzaron hasta 24 km de altura y un Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) entre 3 y 5. Por sus características eruptivas, la actividad de este complejo ha sido catalogada de tipo Pliniano a subpliniano y los productos generados son de composición andesítica a dacítica (Lescinsky, 1990; Monsalve, 1991; Martínez et al., 2022).

Tabla 1. Historia eruptiva del complejo volcánico Cerro Bravo en los últimos 14.000 años según el registro geológico y su edad según dataciones radiométricas realizadas en este trabajo y por otros autores. **C:** carbón, **M:** madera, **P:** paleosuelo, *: unidad definida en este trabajo.

UNIDAD ERUPTIVA (Propuesta este trabajo)	UNIDAD ERUPTIVA HERD, 1972	ACTIVIDAD ERUPTIVA	EDAD (Años A.P.)
La Pradera	CB1	CDP, caída piroclástica	C: 116±25; <200 (Lescinsky, 1990)
La Polca	*	Caída piroclástica	M: 323±23. P: 131±76
El Plan	CB2	CDP concentrada, colapso de domo. Caída piroclástica.	C: Entre 640 y 720
El Zancudo	*	CDP concentrada (pómez principalmente). Caída piroclástica.	C: Entre 750 y 830; P: 837±79
La Sonrisa	CB3	CDP concentrada y diluida. Caída piroclástica.	C: ~900; P: 567±78
La Libia	CB4	CDP concentrada. CDP diluida. Caída piroclástica.	C: ~1000; P: 916±81
El Eden	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Guarinó.	P: 1420±82
El Portón	*	CDP concentrada y diluida.	C: Entre 1700 y 1723; M: 1608±23
El Llano	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Guarinó.	P: 1608±82
Llano Grande	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Guarinó.	P: 1773±25
San Fernando	*	CDP concentrada y diluida.	
Guarinosito Lahar	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Guarinó.	P: 2264±23
Frutillo	CB5	CDP concentrada (soldada con estructura columnar). CDP diluida. Caída piroclástica	C: Entre 2400 y 2150
Batallón	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Gualí.	P: 3245±135
Las Bodegas	*	Caída piroclástica	
Guarino	*	Flujos hiperconcentrados en la cuenca del río Guarinó.	P: 4042±24
La Elvira	CB6	CDP concentrada y diluida. Caída piroclástica.	C: Entre 4497 y 4697
	CB7	Caída piroclástica.	C: 4732±34
La Unión	CB8	Caída piroclástica	P: 5269±109
Aguacatal	CB9	CDP concentrada (soldada con estructura columnar). Caída piroclástica.	C: Entre 6300 y 6620; P: 5153±108; ~6200 (Herd, 1982; Thouret et al., 1985)

UNIDAD ERUPTIVA (Propuesta este trabajo)	UNIDAD ERUPTIVA HERD, 1972	ACTIVIDAD ERUPTIVA	EDAD (Años A.P.)
CB10	CB10	Caída piroclástica	
CB11	CB11	Caída piroclástica	P: 8833±40; P: 8917±151
CB12	CB12	Caída piroclástica	
CB13	CB13	Caída piroclástica	
CB14	CB14	Caída piroclástica	
CB15	CB15	Caída piroclástica	
CB16	CB16	Caída piroclástica	P: 12634±58; P: 12733±59
CB17	CB17	Caída piroclástica	13,760±150 (Herd, 1982)

Con base en la estratigrafía de las unidades y sus dataciones, se interpretó que la actividad más frecuente en la historia eruptiva del CVCB es el crecimiento y posterior explosión o colapso de domos, generando CDP concentradas en las cuales predomina material denso y vesiculado, y cuyos depósitos se observaron hasta 12 km del complejo, en la cuenca del río Aguacatal.

También es común encontrar depósitos asociados a columnas eruptivas, en la que los piroclastos son dispersados por el viento depositándolos en una amplia zona alrededor del complejo volcánico: por ejemplo, en la ciudad de Manizales a 20 km del complejo, se han encontrado espesores de 40 cm que fueron depositados durante una de las fase eruptiva de la unidad erupción La Elvira (CB6). Las columnas eruptivas, colapsan por su propio peso generando CDP concentradas y diluidas ricas en fragmentos pumíticos, que fueron depositadas principalmente en las cuencas de los ríos Perrillo, Aguacatal y la quebrada El Jordán.

Los productos efusivos corresponden a lavas que se identificaron en la parte alta de la quebrada el Jordán, con poca extensión, espesores que no superan los 30 m y alcanzan distancias hasta de 5.4 km. También se presentan remanentes de domos y domos de lava recientes que se caracterizan por presentar estructuras en espina (Figura 6). Según el registro geológico se puede tener el crecimiento de nuevos domos de lava al final de una erupción.

Es probable la generación de *lahares*, los cuales pueden ocurrir simultáneamente con la erupción o posteriormente, depositándose principalmente en las partes bajas de las cuencas de los ríos Gualí y Guarínó, y en el río Magdalena.

Estos fenómenos volcánicos podrían generarse en una erupción compuesta por varias fases que pueden durar de días a semanas.

Memoria del mapa de amenaza volcánica del complejo volcánico Cerro Bravo

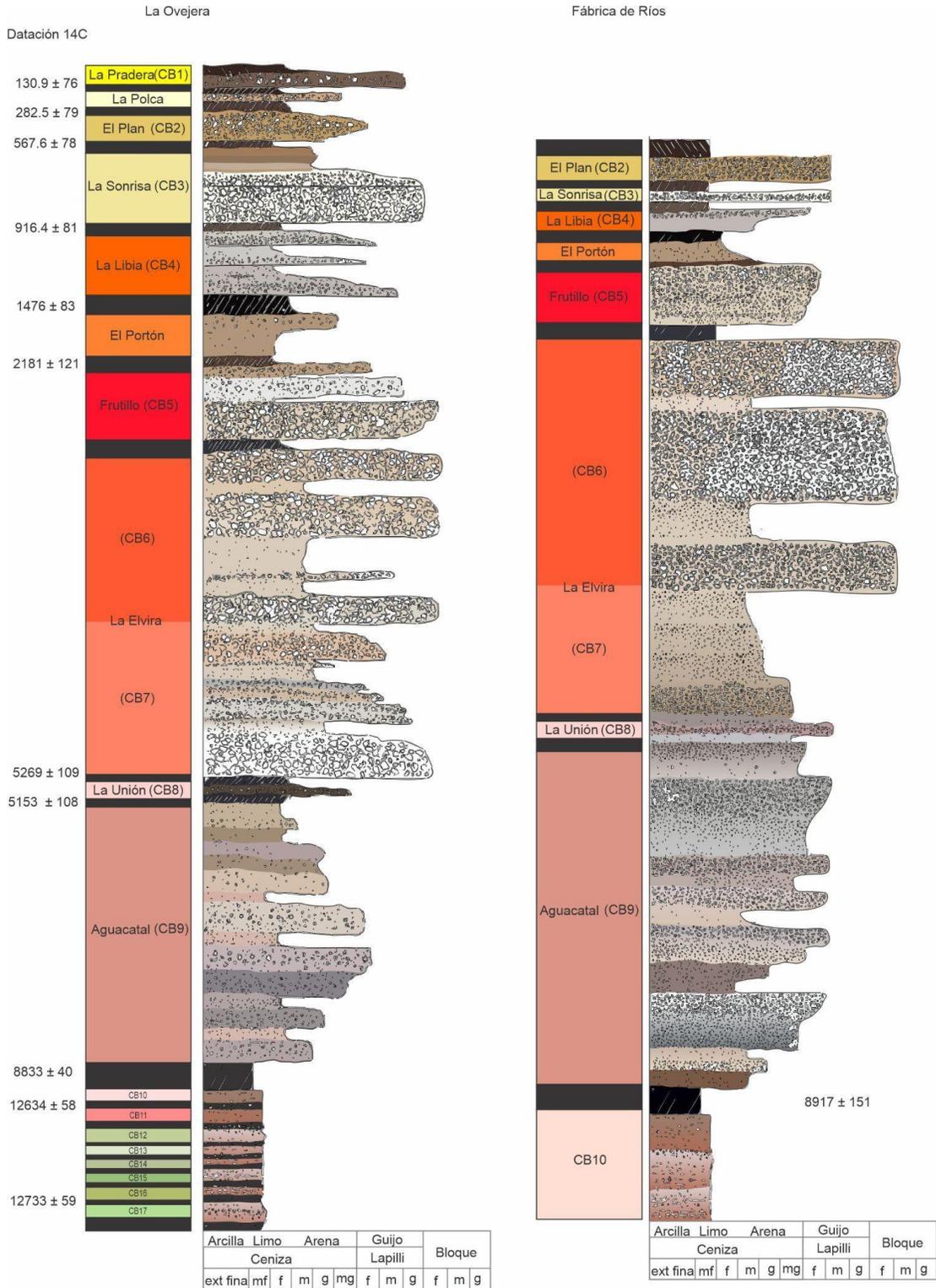


Figura 5. Columnas estratigráficas tipo en los sectores de La Ovejera y Fábrica de Ríos donde se encuentran los depósitos de caída piroclástica que muestran el registro geológico de erupciones plinianas y subplinianas en los últimos 14.000 años.

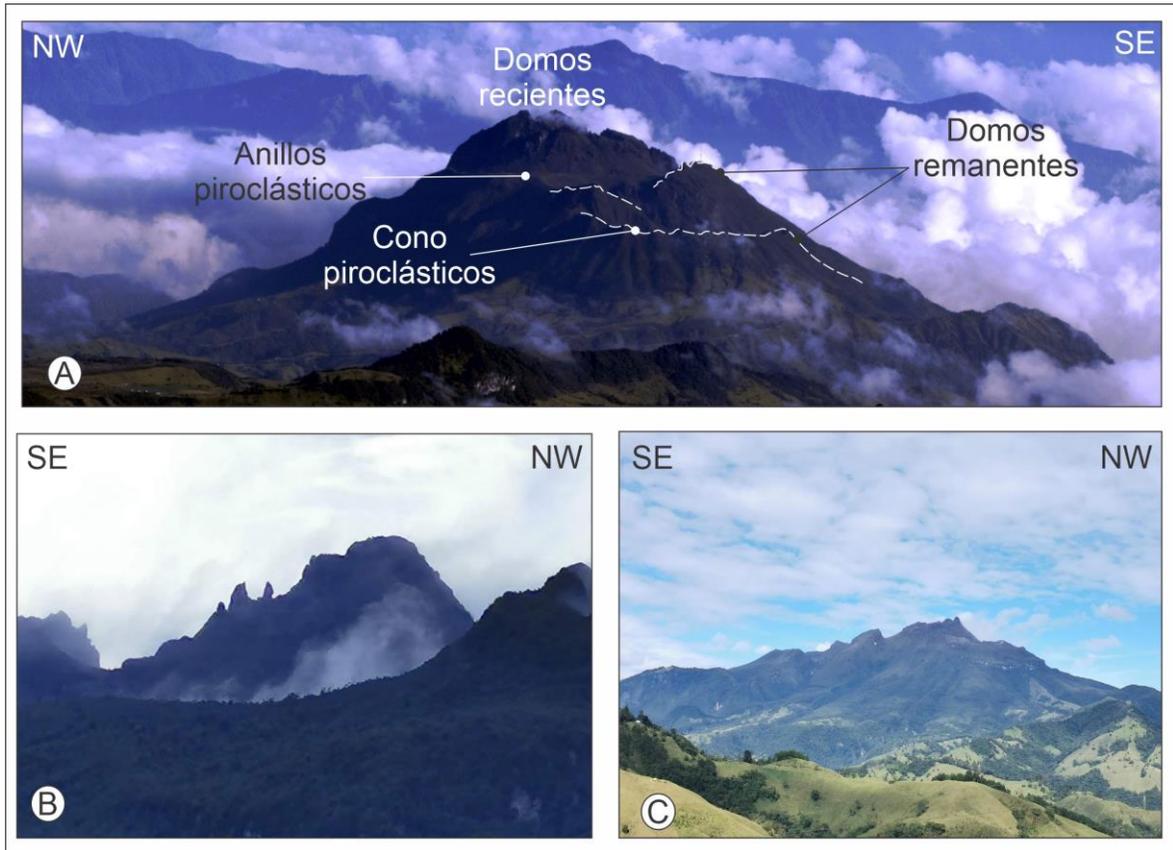


Figura 6. Geoformas típicas del CVCB, A. Vista panorámica, B. Domos con estructura en espina al norte del complejo, C. Flanco oriental, donde se observa las cuencas de las quebradas el Jordán, los Micos.

3. AMENAZA VOLCÁNICA

La Amenaza volcánica es definida como: “Peligro latente de que un evento 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” (Adaptado de la Ley 1523 de 2012).

Los fenómenos volcánicos que pueden ocurrir durante una erupción asociados a la actividad volcánica y que se ilustran en la Figura 7, corresponden a corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas), *lahares* (flujos de lodo volcánico), caídas piroclásticas, flujos de lava, avalanchas de escombros, onda de choque, gases volcánicos y sismos volcánicos.

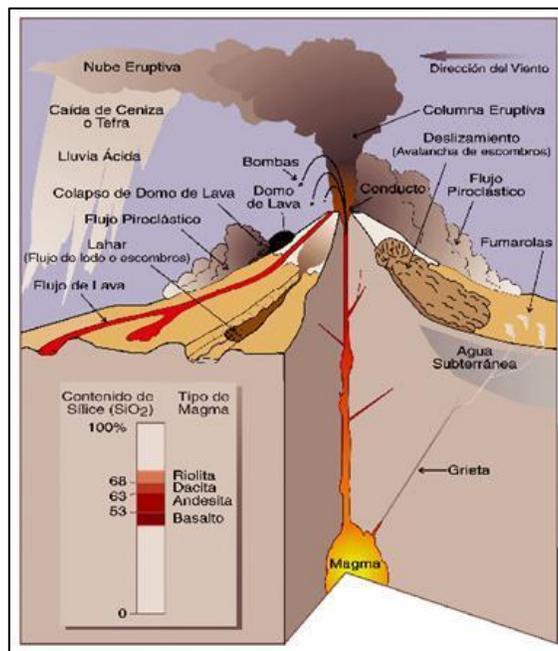


Figura 7. Esquema de un volcán con los diferentes fenómenos volcánicos que pueden ocurrir durante una erupción volcánica. (Tomado de USGS: <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/index.php>)

Los fenómenos que según el registro geológico se podrían generar en una erupción del CVCB y que representan una posible amenaza se describen a continuación:

3.1 Amenaza por corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas)

Las CDS son nubes de material incandescente compuestas por fragmentos densos y/o vesiculados (pómez o escoria), cenizas y gases calientes, con temperaturas entre 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, arrasando y sepultando todo lo que encuentra en su trayectoria. Estos fenómenos se pueden originar a partir del colapso gravitacional de columnas eruptivas y por la destrucción gravitacional y/o explosiva de domos y flujos de lava. La mayoría de las CDP tienen dos partes: las concentradas, que corresponden a un flujo basal de fragmentos gruesos que se mueven a lo largo de la superficie del suelo y una nube turbulenta de ceniza que se expande por encima, frontal y lateralmente del flujo basal. La ceniza puede caer desde esta nube en un área más amplia. Las CDP diluidas (oleadas piroclásticas) son corrientes turbulentas de baja densidad, que fluyen a grandes velocidades y no están controladas topográficamente.

Los efectos que podrían causar estos fenómenos incluyen: (<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>; <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/pyroclasticflow>; <http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>):

- Muerte de seres vivos. Destrucción de infraestructuras.
- Arrasamiento e incendio de los elementos expuestos en su trayectoria.
- Cubrimiento y enterramiento del área expuesta, incluidos obstrucción de cauces, relleno de depresiones topográficas e interrupción de vías.
- Oscurecimiento y dificultades respiratorias por partículas finas suspendidas en el aire, lo que también afectaría el transporte aéreo.

Para el CVCB, la amenaza por CDP es alta y corresponde a uno de los eventos más significativos y de mayor distribución en la historia eruptiva del complejo durante los últimos 14.000 años. Tomando como referencia los datos obtenidos en campo, se definieron los parámetros necesarios para llevar a cabo las simulaciones de este fenómeno, utilizando el código Titan2D para CDP concentradas (Patra *et al.*, 2005) (tanto flujos piroclásticos de bloques y ceniza, como de ceniza y pómez.) y cono de energía VHASS para las CDP diluidas (Takarada, 2020) (oleadas piroclásticas,).

A partir de la integración de los resultados obtenidos con las simulaciones de CDP se obtuvo el área que podría ser afectada por estos fenómenos (Figura 8). Las CDP concentradas afectarían las partes altas del complejo y se canalizarían por los principales drenajes que nacen en él, como son las quebradas Seca, El Jordán, Los Micos, y los ríos Aguacatal y Perrillo, podrían alcanzar distancias de hasta 25 km a partir del foco de emisión. Las CDP diluidas podrían afectar todas las laderas del complejo y sobrepasar altos topográficos; pueden originarse como fenómenos aislados o acompañando CDP concentradas, alcanzando distancias iguales o mayores que las recorridas por éstas.

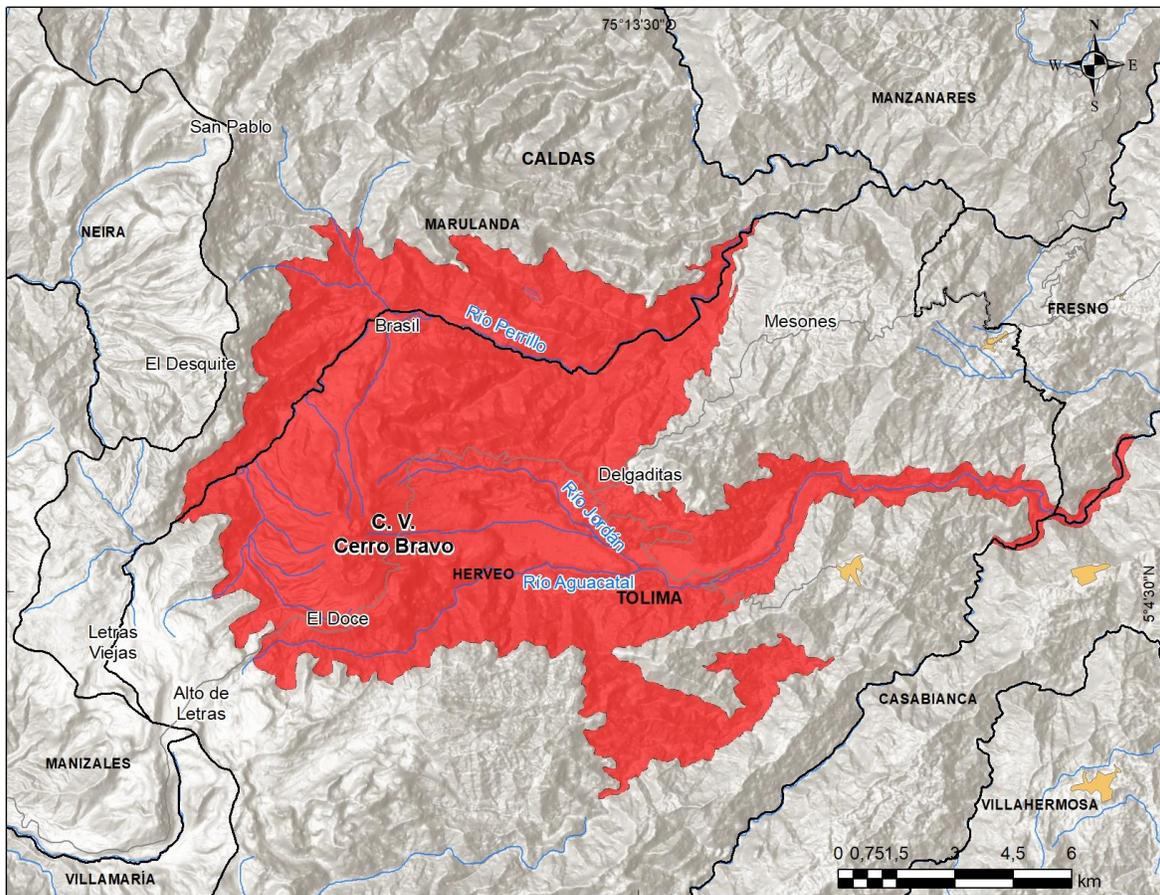


Figura 8. Área que podría ser afectada por corrientes de densidad piroclásticas. El color rojo representa amenaza alta por este tipo de fenómenos (CDPs tanto concentradas como diluidas) originadas en el CVCB. Resultados de la integración de las simulaciones computacionales realizadas con los códigos Titan 2D y cono de energía.

3.2 Amenaza por flujos de lava

Los flujos de lava son corrientes de roca fundida, relativamente fluidas, emitidas por el cráter o por grietas en los flancos del volcán y pueden canalizarse por los valles; su temperatura varía entre 800° y 1200 °C, su velocidad y alcance dependen de la composición, la morfología del terreno, la pendiente y las barreras topográficas que encuentren a su paso. Las lavas más fluidas pueden extenderse decenas de kilómetros desde el foco de emisión, mientras que las lavas viscosas alcanzan unos pocos kilómetros y raras veces se extienden a más de 10 km. En ocasiones las lavas muy viscosas se acumulan en forma de cúpulas o domos de lava, que al enfriarse pueden taponar el conducto volcánico. Estos domos pueden explotar o colapsar, generando flujos piroclásticos y posteriormente *lahares* o flujos de lodo volcánico (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/lava/index.php>).

Los efectos (<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>) por flujos de lava pueden incluir:

- Arrasamiento y enterramiento de cultivos y vegetación e infraestructura a lo largo de su trayectoria. Incendios forestales por las altas temperaturas.
- Relleno de cauces.

Las áreas que podrían ser afectadas por este tipo de fenómeno son catalogadas de amenaza alta. Basados en datos tomados del registro geológico, se realizaron simulaciones computacionales con el código LavaC (Richardson and Connor et al., 2014), cuyo resultado se muestra en la figura 9 donde se aprecian las áreas que podrían verse afectadas en una erupción por este fenómeno. Los flujos de lava se desplazarían en las partes cercanas al edificio volcánico, desde su foco de emisión por las laderas del complejo canalizados por los principales drenajes que nacen en él y con un alcance de hasta 6 km.

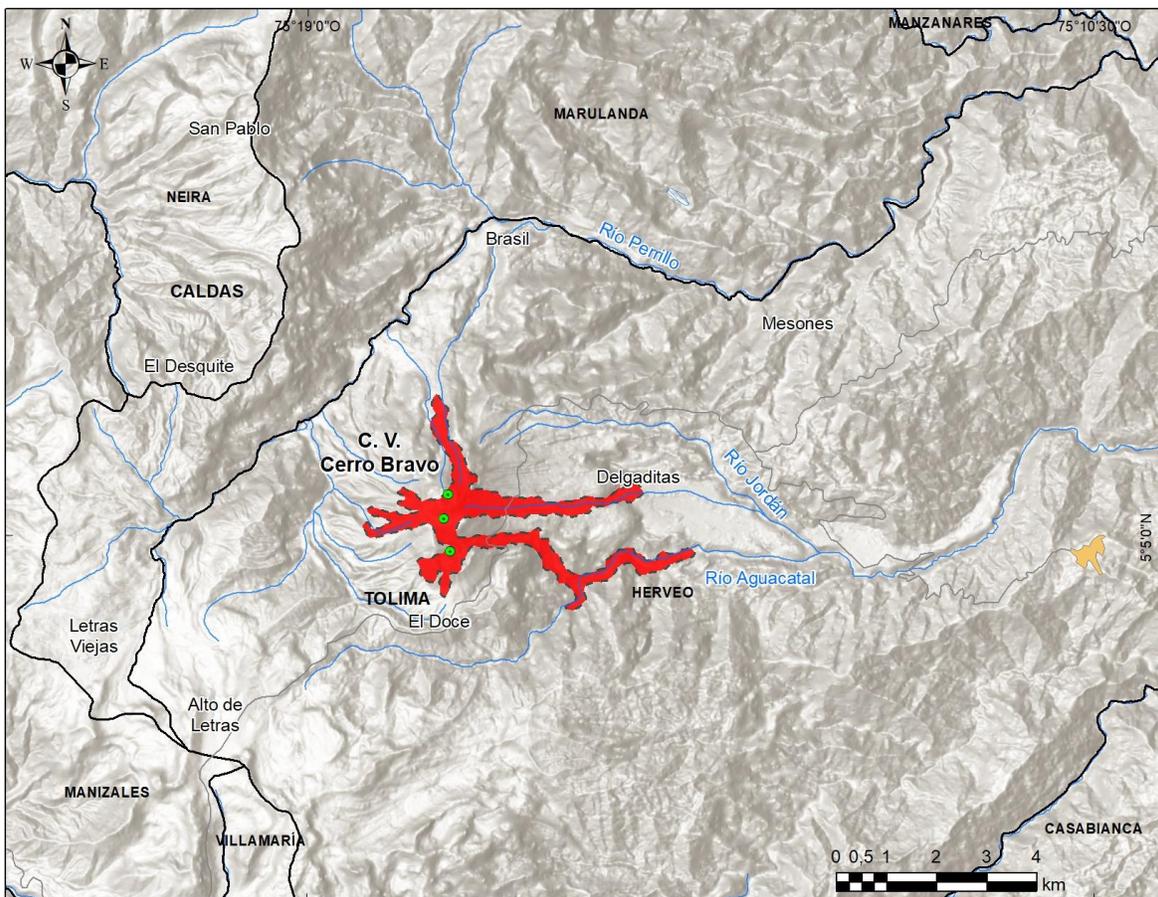


Figura 9. Área de amenaza alta en color rojo para flujos de lava del CVCB. Resultado de las simulaciones computacionales realizadas con el código LavaC.

3.3 Amenaza por lahares

Los *lahares* o flujos de lodo volcánico son una mezcla de fragmentos de roca, arena, limo, arcilla y agua que se desplazan por los cauces y valles de las quebradas y ríos. Estos eventos varían en tamaño

y velocidad. Un *lahar* en movimiento se comporta como una masa de concreto húmedo que carga fragmentos que varían desde arcilla hasta bloques de más de 10 metros en diámetro; los *lahares* grandes, son de cientos de metros de ancho y decenas de metros de profundidad y pueden fluir a varias decenas de metros por segundo. Los *lahares* pequeños, con pocos metros de ancho y varios centímetros de profundidad, pueden fluir a pocos metros por segundo. Estos tipos de flujos pueden ser primarios, generados durante la erupción volcánica, o secundarios, producidos por diferentes mecanismos que permiten la interacción del agua con materiales volcánicos y no volcánicos. Las fuentes de agua para formar *lahares* pueden provenir de nieve, hielo, lagos cratéricos, lluvias o de corrientes fluviales o reservorios de agua en el interior del volcán. Los principales mecanismos de origen pueden estar asociados con la transición de flujos piroclásticos a *lahares*, erosión - transporte de material piroclástico suelto en laderas por agua lluvia y corrientes fluviales y rotura de presas.

(<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>;
<http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>).

Entre los principales efectos por *lahares* se encuentran:

- Arrasamiento y destrucción de vegetación, cultivos e infraestructura existentes a lo largo de su trayectoria (puentes, caseríos en las orillas de los ríos, carreteras).
- Enterramiento y aislamiento pasivo y tardío de grandes extensiones de terreno (cerca los cauces y por fuera de ellos) incluida la infraestructura ubicada sobre las mismas.
- Relleno de cauces naturales y artificiales.
- Inundación de las regiones planas donde se abren los cañones de los ríos.
- Inundación de áreas alledañas en el caso de presentarse represamiento de los ríos.

Las áreas que podrían ser afectadas por este tipo de fenómeno asociadas a la actividad eruptiva del CVCB, se categorizan en amenaza alta (figura 10) y se delimitaron teniendo en cuenta la información obtenida del registro geológico. Se realizaron simulaciones con la herramienta informática *LaharZ* (Iverson et al., 1998; Schilling, 1998, 2014) obteniendo como resultado los polígonos que se muestran en la figura 10. Cabe resaltar que las simulaciones con *LaharZ* no tiene en cuenta parámetros físicos como son velocidad y altura de inundación, para lo cual deben utilizarse herramientas de simulación más complejas. Los *lahares* que se originan en el CVCB se movilizarían por los principales cauces que nacen en la parte alta del CVCB, fluyendo por la quebrada Seca (que bordea el flanco occidental del complejo) afluente del río Perrillo y este a su vez del Guarinó, el cual desemboca en el río Magdalena, estos flujos pueden moverse alcanzando una distancia de más de 125 km desde su punto de origen, afectando a su paso los valles de estos ríos y poblaciones ribereñas en los municipios de Marulanda, Manzanares, Marquetalia, Victoria y La Dorada (dpto. de Caldas); Herveo, Fresno, Mariquita y Honda (dpto. del Tolima) y Puerto Salgar en el departamento de Cundinamarca. Hacia el oriente, los *lahares* podrían descender por las quebradas Los Micos y El Jordán hacia el río Aguacatal, tributario del río Gualí, el cual desemboca en el río Magdalena, los flujos alcanzarían en su recorrido más de 120 km de distancia desde su punto de origen, afectando a su paso los valles de estos ríos y poblaciones ribereñas, en los municipios de Herveo, Fresno, Casabianca, Palocabildo, Falan, Mariquita y Honda en el departamento del Tolima y Guaduas en el departamento de Cundinamarca.

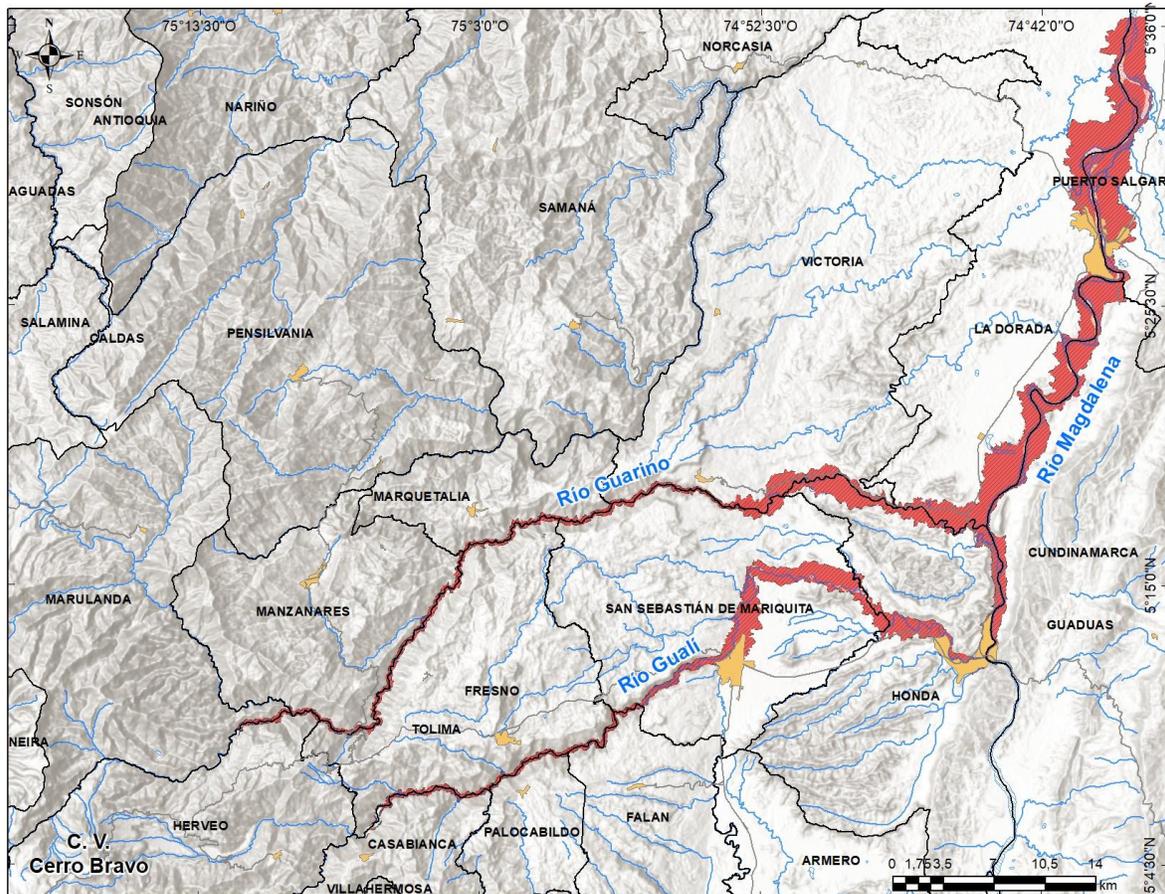


Figura 10. Área de amenaza alta en color rojo para *lahares* en la parte oriental del CVCB, para las cuencas de los ríos Guarínó, Gualí y parte del río Magdalena en los sectores rurales de los municipios de Herveo, Casabianca, Palocabildo, Fresno, Falan, San Sebastián de Mariquita, Honda, Marulanda, Manzanares, Marquetalia, Victoria, Dorada, Puerto Salgar y Guaduas.

3.4 Amenaza por caídas piroclásticas

Como consecuencia de erupciones explosivas los volcanes lanzan a la atmósfera fragmentos de roca (piroclastos) que al caer a la superficie se denominan caídas piroclásticas. De acuerdo a su tamaño, se clasifican: ceniza (menor de 2 mm); lapilli (2 a 64 mm); bloques y bombas volcánicas (mayor de 64 mm). Los fragmentos mayores son transportados por proyección balística y depositados en las partes cercanas del volcán a distancias menores a 10 km desde el punto de emisión. Los piroclastos menores (ceniza y lapilli) son transportados por el viento y llevados hasta zonas alejadas del volcán (cientos o miles de kilómetros) y depositados por efecto de la gravedad, formando capas que siguen la topografía preexistente, cubriendo en general áreas muy extensas. El espesor de piroclastos 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 de los vientos y la altura de la columna eruptiva al momento de la erupción. (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/tephra/index.php>).

Los principales efectos causados por caídas piroclásticas incluyen (Blong, 1984; Tilling, 1993; <http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>; <http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/VolcanicAsh>) :

- Oscurecimiento del ambiente y dificultades respiratorias por la presencia de partículas finas suspendidas en el aire. Intoxicaciones.
- Pérdida parcial o total de cultivos y ganado. Cubrimiento y enterramiento de la superficie.
- Incendios forestales o de viviendas.
- Obstrucción de drenajes. Contaminación de fuentes de agua por sólidos y químicos.
- Daños por sobrecarga en estructuras livianas y líneas de conducción eléctrica. Corrosión a elementos metálicos.
- Afectación al transporte aéreo y terrestre.

Los efectos por caída de proyectiles balísticos son:

- Muerte de seres vivos por impacto de fragmentos. Destrucción de infraestructuras.
- Daños en cultivos.
- Obstrucción de drenajes. Contaminación de fuentes de agua.
- Incendios forestales o de viviendas.

3.4.1. Amenaza por caída de piroclastos transportados por el viento

Para el CVCB se tiene el registro geológico de por lo menos 17 erupciones con registro de caídas piroclásticas que cubren una amplia zona alrededor del complejo. Para realizar las simulaciones computacionales con la herramienta *Tephra2* (Bonadonna et al., 2005, 2012; Connor and Connor, 2006; Volentiket al., 2009) se tomó como referencia el depósito de caída piroclástica de la unidad eruptiva La Sonrisa (CB3), para la cual se obtuvo una altura de columna de 24 km sobre el centro de emisión. Con base en la acumulación del material piroclástico, que podría depositarse según la tendencia principal de los vientos, se zonificó la amenaza por este fenómeno (figura 11).

La zona de amenaza alta, en color rojo, corresponde al área donde el espesor del depósito sería mayor a 10 cm; el área naranja es la zona de amenaza media, donde el espesor del depósito varía entre 1 – 10 cm; el área amarilla es la zona de amenaza baja con espesores menores a 0,5 mm. Como parte de la metodología para la zonificación por caídas piroclásticas dispersadas por el viento, adicionalmente, se consideró el trazado de tres círculos concéntricos con líneas discontinuas, cuyos radios son los ejes máximos en cada una de las zonas de amenaza por este tipo de evento volcánico. Cada uno de estos círculos definen las áreas de amenazas que pueden ser afectadas por las caídas piroclásticas, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (Si hay cambios en la dirección preferencial de los vientos en el momento de la erupción). Estas zonas también se categorizan, respectivamente, en amenaza alta, media y baja y sus trazos llevan los colores correspondientes a ellas (figura 11).

La zona de amenaza alta por caída de piroclastos transportados por el viento, se extiende hasta 50 km en la dirección predominante de los vientos al oeste; la infraestructura podría tener una carga sobrepuesta $> 170 \text{ kg/m}^2$ por acumulación ceniza y *lapilli* secos (Figura 11). Esta zona incluye las

cabeceras y/o zonas rurales de los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná, Palestina, Neira, Marulanda, Manzanares, Aranzazu, Risaralda y Anserma (Caldas, 615.924 habitantes); Herveo, Casabianca, Villahermosa y Fresno (Tolima, 49.314 habitantes).



Figura 11. Zonificación de la amenaza por caídas de piroclastos (ceniza y lapilli) del CVCB. En color rojo amenaza alta para espesores mayores a 10 cm. En color naranja amenaza media para espesores entre 10 y 1 cm. En color amarillo amenaza baja para espesores entre 1 cm y 0.5 mm. Los círculos cubren las direcciones alrededor de la cima del complejo no contempladas en la tendencia principal de los vientos.

Para esta misma zona de amenaza alta, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento alrededor del volcán además de las contempladas en la tendencia principal de los vientos (círculo en color rojo a trazos en el mapa; Figura 11). Podría afectar casi la totalidad del departamento de Caldas, 811.590 habitantes (exceptuando los municipios de La Dorada, Norcasia, Marmato, Viterbo, San José y Belalcázar) y las cabeceras y/o zonas rurales de municipios de: Fresno, Casabianca, Villahermosa, Murillo, Santa Isabel, Anzoátegui, Ibagué, Venadillo, Lérida, Palocabildo, Falan, Armero Guayabal, Mariquita y Honda (Tolima, 674.411 habitantes); Sonsón, Nariño (Antioquia habitantes); Quinchía, Santa Rosa de Cabal, Dosquebradas, Marsella, Pereira (Risaralda, 716.402 habitantes) y Salento (Quindío, 7578 habitantes).

La zona de amenaza media por caída de piroclastos transportados por el viento, se extiende entre 50 y 164 km en la dirección predominante de los vientos al oeste-suroeste; la infraestructura podría ser potencialmente afectada con una carga sobrepuesta entre 17 y 170 kg/m² por acumulación de ceniza y *lapilli* secos, (Figura 11).

Los piroclastos de caída en esta zona podrían afectar todo el departamento de Risaralda (839.597 habitantes) y casi la totalidad de Caldas (846.721 habitantes, exceptuando los municipios de Norcasia y La Dorada); además de las cabeceras y/o zonas rurales de municipios de Nariño (8.603 habitantes, Antioquia); Bagadó, Condoto, Istmina, Medio San Juan, Nóvita, Río Iró, San José del Palmar, Sipí, Tadó y Unión Panamericana (103.762 habitantes, Chocó); Chaguaní y Guaduas (30.894 habitantes, Cundinamarca); Salento, Circasia, Filandia y Quimbaya (75.175 habitantes, Quindío); Ibagué, Ambalema, Anzoátegui, Armero, Casabianca, Falan, Fresno, Herveo, Lérída, Líbano, San Sebastián de Mariquita, Murillo, Palocabildo, Santa Isabel, Venadillo, Villahermosa y Honda (720.565 habitantes, Tolima); Ansermanuevo, Argelia, Cartago, El Águila, El Cairo, Alcalá, Obando, Toro y Ulloa (193.142 habitantes, Valle del Cauca).

Para esta misma zona de amenaza media, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento alrededor del volcán además de las contempladas en la tendencia principal de los vientos (círculos en color naranja a trazos en el mapa; Figura 11). Podría afectar la totalidad de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda; además de las cabeceras y/o zonas rurales de municipios de: Medellín, Abejorral, Alejandria, Amagá, Andes, Angelópolis, Anzá, Argelia, Armenia, Barbosa, Belmira, Bello, Betania, Betulia, Caicedo, Caldas, Caracolí, Caramanta, Ciudad Bolívar, Cisneros, Cocorná, Concepción, Concordia, Copacabana, Donmatías, Ebéjico, El Carmen de Viboral, El Santuario, Entreríos, Envigado, Fredonia, Girardota, Gómez Plata, Granada, Guarne, Guatapé, Heliconia, Hispania, Itagüí, Jardín, Jericó, La Ceja, La Estrella, La Pintada, La Unión, Maceo, Marinilla, Montebello, Nariño, Peñol, Pueblorrico, Puerto Berrio, Puerto Nare, Puerto Triunfo, Retiro, Ríonegro, Sabaneta, Salgar, San Carlos, San Francisco, San Jerónimo, San Luis, San Pedro de los Milagros, San Rafael, San Roque, San Vicente Ferrer, Santa Bárbara, Santa Fe de Antioquia, Santo Domingo, Santa Rosa de Osos, Sonsón, Sopetrán, Támesis, Tarso, Titiribí, Urao, Valparaíso, Venecia y Yolombó (4.890.505 habitantes, Antioquia); Bogotá D.C; Briceño, Buenavista, Caldas, Coper, La Victoria, Puerto Boyaca, Quípama, Maripí, Muzo, Otanche, Pauna, San Pablo de Borbur y Tunungua (Boyacá); Quibdó, Atrato, Bagadó, El cantón del San Pablo, Cértegui, Condoto, El Carmen de Atrato, El Litoral del San Juan, Istmina, Lloró, Medio Atrato, Medio San Juan, Nóvita, Río Iró, Río Quito, San José del Palmar, Sipí, Tadó y Unión Panamericana (Chocó); Agua de Dios, Albán, Anapoima, Anolaima, Apulo, Arbeláez, Beltrán, Bituima, Bojacá, Cabrera, Cachipay, Cajicá, Caparrapí, Cáqueza, Carmen de Carupa, Chaguaní, Chía, Chipaque, Choachí, Cogua, Cota, 20 Cucunubá, El Colegio, El Peñón, El Rosal, Facatativá, Fosca, Funza, Fusagasugá, Gachancipá, Girardot, Granada, Guaduas, Guasca, Guataquí, Guatavita, Guayabal de Siquima, Gutiérrez, Jerusalén, La Calera, La Mesa, La Palma, La Peña, La Vega, Madrid, Mosquera, Nariño, Nemocón, Nilo, Nimaima, 49 Nocaima, Pacho, Paima, Pandi, Pasca, Puerto Salgar, Pulí, Quebradanegra, Quipile, Ricaurte, San Antonio del Tequendama, San Bernardo, San Cayetano, San Francisco, San Juan de Rioseco, Sasaima, Sesquilé, Sibaté, Sylvania, Simijaca, Soacha, Sopó, Subachoque, Suesca, Supatá, Susa, Sutatausa, Tabio, Tausa, Tena, Tenjo, Tibacuy, Tocaima, Tocancipá, Topaipí, Ubaque, Une, Útica, Vergara, Villa de San Diego de Ubaté, Venecia, Vianí, Villagómez, Villeta, Viotá, Yacopí, Zipacón y Zipaquirá (Cundinamarca);

Colombia (Huila); Albania, Cimitarra, Sucre, La Belleza, Florián y Bolívar (Santander); Ibagué, Alvarado, Ambalema, Anzoátegui, Armero, Ataco, Cajamarca, Carmen de Apicalá, Chaparral, Coello, Coyaima, Cunday, Dolores, Espinal, Flandes, Guamo, Honda, Icononzo, Lérida, San Sebastián de Mariquita, Melgar, Natagaima, Ortega, Piedras, Prado, Purificación, Rióblanco, Roncesvalles, Rovira, Saldaña, San Antonio, San Luis, Santa Isabel, Suárez, Valle de San Juan, Venadillo y Villarica (Tolima); Alcalá, Andalucía, Ansermanuevo, Argelia, Bolívar, Bugalagrande, Caicedonia, Cartago, El Águila, El Cairo, El Dovio, Guadalajara de Buga, La Victoria, La Unión, Obando, Riofrío, Roldanillo, San Pedro, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Ulloa, Versalles, Yotoco y Zarzal (Valle del Cauca).

La zona de amenaza baja por caída de piroclastos de tamaño ceniza, transportados en la dirección predominante del viento, tiene un alcance para el eje principal de depositación entre los 164 y 355 km respecto al foco de emisión, en la dirección de la tendencia principal de los vientos al oeste; la infraestructura podría verse afectada por una carga sobreimpuesta entre 0,5 y 10 kg/m², (Figura 11). Podría afectar todo el departamento Quindío; y casi la totalidad de los departamentos de Chocó (a excepción de los municipios de Bahía Solano, Bojayá, Carmen del Darién, Juradó, Medio Atrato, Riosucio, la parte norte de Quibdó), Cundinamarca (exceptuando los municipios de: parte de Agua de Dios, la mayoría del municipio de Bogotá, Cáqueza, Chipaque, Fómeque, Fosca, de el oriente de Gachalá, Gachetá, Gama, Granada, Guacheta, Guasca, Guatavita, Guayebetal, Gutierrez, Juním, La Calera, Lenguaquai, Machetá, Manta, Medina, Paratebueno, Quetame, Sesquilé, Sibaté, Sylvania, la mayor parte de Soacha, Suesca, Tibirita, Ubalá, Ubaté, Une, Villapinzón, el sector sur oriental de Viotá, Ricaute, Nilo, Tibacuy, Fusagasugá, Pasca, Arbeláez, Andi, San Bernardo, Venecia, La Cabrera). Además de las cabeceras y/o zonas rurales de municipios de Abejorral, Amagá, Andes, Argelia, Betania, Caldas, Caramanta, Ciudad Bolívar, Cocorná, Concordia, El Carmen de Viboral, Fredonia, Granada, Hispania, Jardín, Jericó, La Ceja, La Pintada, La Unión, Montebello, Nariño, Pueblo Rico, Puerto Nare, Puerto Triunfo, Retiro, Salgar, San Francisco, San Luis, Santa Bárbara, Sonsón, Támesis, Tarso, Titiribí, Valparaíso, Venecia (Antioquia); Andalucía, Argelia, Bugalagrande, Caicedonia, Cartago, El Cairo, El Dovio, Alcalá, Obando, Riofrío, Roldanillo, Sevilla, Toro, Trujillo, Tuluá, Versalles, Zarzal, La Victoria, La Unión y Bolívar (Valle del Cauca); el noroccidente de Bogotá D.C.; Briceño, Buenavista, Caldas, Chiquinquirá, Coper, La Victoria, Puerto Boyacá, Quípama, Maripí, Muzo, Otanche, Pauna, Ráquira, Saboyá, San Miguel de Sema, San Pablo de Borbur y Tununguá (Boyacá); Aguadas, Marmato, La Merced, La Dorada, Norcasia, Victoria, Supía, Samaná, Salamina, Pensilvania, Pácora y Riosucio (Caldas); Pereira, Mistrató y Pueblo Rico (Risaralda); Albania, Florián y Bolívar (Santander); Ibagué, Alvarado, Ambalema, Anzoátegui, Armero, Cajamarca, Coello, Lérida, Líbano, Murillo, Piedras, Roncesvalles, Rovira, San Luis, Santa Isabel, Valle de San Juan, Venadillo y Honda (Tolima)

Para esta misma zona de amenaza baja, considerando el área que incluye todas las direcciones del viento alrededor del volcán además de las contempladas en la tendencia principal de los vientos (círculos en color amarillo a trazos en el mapa; Figura 11). Lo cual podría afectar casi la totalidad de los departamentos de Santander, (exceptuando los municipios de Suratá y California), Boyacá (exceptuando Buenavista, Coper, Cubará, La Victoria, Maripí, Muzo, Otanche, Pauna, Puerto Boyacá, San Luis y San Pablo de Borbur), Casanare (con excepción de Orocué, San Luis de Palenque y Paz de Ariporo), Meta (a excepción de Mapiripán, Puerto Concordia y Puerto Gaitán), Huila (a excepción del municipio de de Acevedo), Cauca (exceptuando Alpujarra, Argelia, Balboa, Bolívar, Guapí, La

Vega, Mercaderes, Patía, Piamonte, San Sebastián, Santa Rosa, Sucre), Antioquia (a excepción de los municipios de Necloquí, Medellín, Abejorral, Alejandria, Amagá, Andes, Angelópolis, Anzá, Argelia, Armenia, Barbosa, Bello, Betania, Betulia, Caldas, Caracolí, Caramanta, Ciudad Bolívar, Cocorná, Concepción, Concordia, Copacabana, Donmatías, Ebéjico, El Carmen de Viboral, El Santuario, Envigado, Fredonia, Girardota, Gómez Plata, Granada, Guarne, Guatapé, Heliconia, Hispania, Itagüí, Jardín, Jericó, La Ceja, La Estrella, La Pintada, La Unión, Marinilla, Montebello, Nariño, Peñol, Pueblorrico, Puerto Nare, Puerto Triunfo, Retiro, Ríonegro, Sabaneta, Salgar, San Carlos, San Francisco, San Jerónimo, San Luis, San Pedro de los Milagros, San Rafael, San Roque, San Vicente Ferrer, Santa Bárbara, Santo Domingo, Sonsón, Támesis, Tarso, Titiribí, Valparaíso y Venecia), Córdoba (exceptuando el municipio de Montería). De igual forma se podrían ver afectadas las cabeceras y/o zonas rurales de los municipios de: El Doncello, El Paujil, Florencia, Puerto Rico y San Vicente del Caguán (Caqueta); Almaguer, Alpujarra, Ataco, Chaparral, Coyaima, Dolores, Natagaima, Planadas, Prado, Rióblanco y Villarrica (Tolima); Riosucio, Quibdó, Alto Baudó, Atrato, Bahía Solano, Bajo Baudó, Bojayá, El Cantón de San Pablo, Carmen del Darién, El Litoral del San Juan, Itsmina, Juradó, Medio Atrato, Medio Baudó, Medio San Juan, Nóvita, Nuquí, Río Quito y Sipí (Chocó); Cantagallo, Montecristo, Morales, San Jacinto del Cauca, San Pablo, Santa Rosa del Sur y Simití (Bolívar); Ansermanuevo, Buenaventura, Cali, Calima, Candelaria, El Águila, El Cerrito, Florida, Ginebra, Guacarí, Guadalajara de Buga, Jamundí, La Cumbre, Palmira, Pradera, Restrepo, Ríofrío, San Pedro, Trujillo, Vijes, Yocoto y Yumbo (Valle del Cauca).

3.4.2 Amenaza por caída de piroclastos de proyección balística

En el CVCB la zona de amenaza alta para este fenómeno se delimitó teniendo en cuenta el registro geológico, en el que se encuentran fragmentos de roca expulsados con trayectoria balística (Figura 12) de tamaños submétricos (hasta 30 cm), que afectarían el área en un radio aproximado de 3 km alrededor de los domos actuales.

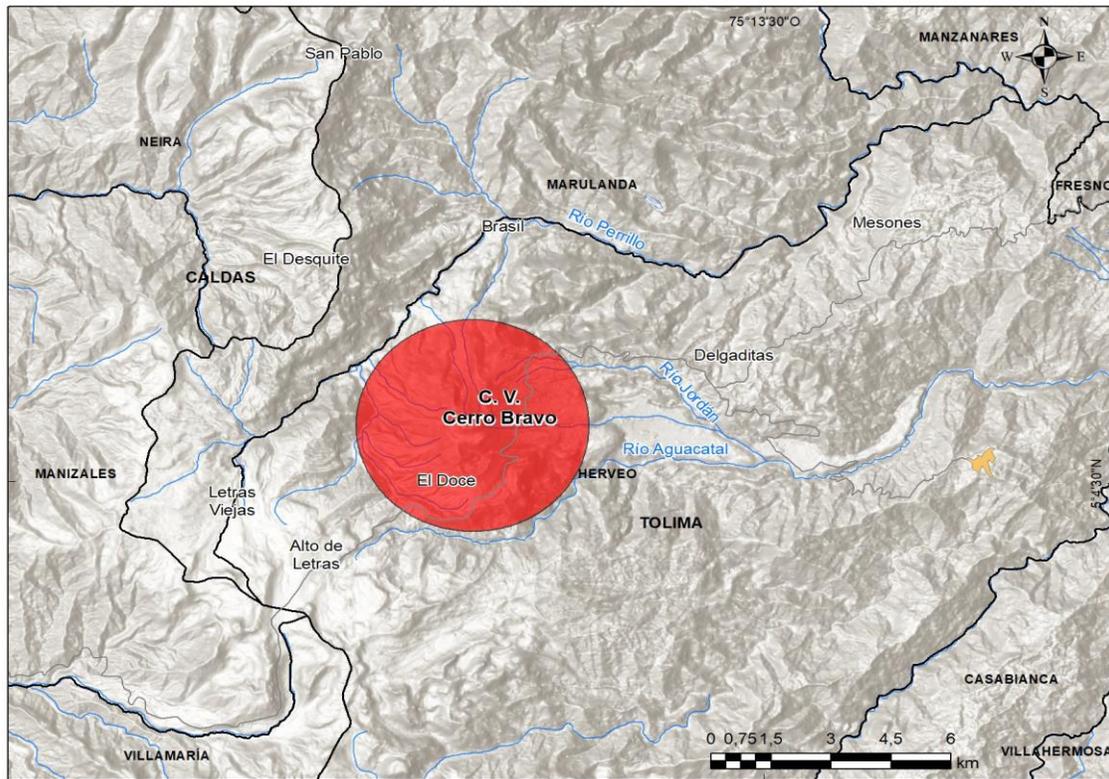


Figura 12. Zona de amenaza para proyectiles balísticos del VCB. El polígono rojo representa la amenaza alta para fragmentos de tamaño métrico con alcance hasta de 3 km.

3.5 Otras amenazas

Antes, durante y después de una erupción se pueden presentar otros fenómenos que no están representados en el mapa, principalmente en las partes más cercanas del complejo, y pueden representar una amenaza:

3.5.1 Gases volcánicos

Son gases disueltos en el magma que se liberan antes, durante y después de una erupción volcánica. En general están constituidos por H_2O , CO_2 y SO_2 ; según William & McBirney, (1979, en Tilling, 1993). Sus efectos incluyen:

- Irritaciones de las vías respiratorias. Intoxicaciones por inhalación.
- Lluvias ácidas cuando se mezclan con las cenizas en la atmósfera, que pueden ser nocivas para las personas, la vegetación y la infraestructura.
- Envenenamiento. Contaminación del aire y agua.

3.5.2 Onda de choque

En una onda de choque ocasionada por una erupción volcánica, el frente de choque corresponde a discontinuidades en la velocidad, densidad, presión y temperatura. Las ondas de choque se pueden presentar en diferentes tipos de erupciones incluyendo las plinianas (Dragoni y Santoro 2020).

Una explosión volcánica puede producir ondas de presión, entre sus efectos están:

- Ruptura de cristales, paneles, daños a estructuras.
- Afectación auditiva y lesiones por cortaduras a personas expuestas.

3.5.3 Sismos

Los sismos volcánicos ocurren antes de una erupción debido al movimiento ascendente del magma, pero también durante las erupciones debido a explosiones de gas poco profundas, fracturas del suelo y colapso de caldera o domo (Schick, 1981). Su origen poco profundo (típicamente < 5 km) da como resultado un sismo fuerte y dañino del suelo a unos pocos kilómetros de la fuente volcánica, pero con una atenuación rápida al aumentar la distancia (Jenkins et al., 2014)

Sus efectos pueden incluir:

- Colapso del edificio volcánico
- Deslizamientos y daños a estructuras.

4. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

La zonificación de la amenaza volcánica para el CVCB, es el resultado de integrar los resultados de simulaciones computacionales de los fenómenos volcánicos que pueden ocurrir en erupciones futuras del complejo teniendo en cuenta el tipo de fenómeno y el grado de afectación de las áreas expuestas a estos fenómenos. Los resultados obtenidos de las simulaciones han sido analizados de acuerdo con el conocimiento que se tienen sobre la historia eruptiva y el registro geológico de los depósitos asociados al complejo volcánico.

Para la elaboración del mapa y la delimitación de las zonas de amenaza, se han considerado 3 focos de emisión: uno en el edificio sur, otro en los domos actuales y el tercero, intermedio entre estos dos. El mapa incluye las zonas que podrían ser afectadas en una erupción volcánica con un VEI entre 3 y 5; sin embargo, se pueden presentar escenarios eruptivos menores.

El mapa anexo presenta una zonificación de amenaza volcánica categorizada en alta, media y baja. La delimitación de las zonas de amenaza se basa en la potencialidad de los daños que pueden ocasionar los distintos fenómenos volcánicos y considera la posibilidad de afectación en áreas por uno o varios de estos fenómenos simultáneamente. La zonificación se llevo a cabo mediante la superposición de las áreas de amenaza, representada por cada tipo de fenómeno volcánico considerado en la evaluación de la amenaza, simulado y contrastado con la información de campo y el conocimiento del registro geológico.

El mapa comprende tres marcos de representación con la zonificación. Un marco principal a escala de impresión 1: 150 000 donde se representa la integración de las zonas de amenaza y dos marcos complementarios, el segundo representa la zonificación de la amenaza por caída de piroclastos transportados por acción de los vientos (escala de impresión 1: 4.000.000) y el tercero muestra un detalle del área de amenaza proximal del CVCB (escala de impresión 1: 70.000).

A continuación, se describen las zonas de amenaza alta, media y baja del mapa de amenaza para el complejo volcánico Cerro Bravo (CVCB).

4.1 Zona de amenaza volcánica alta

Corresponde a la zona que podría ser afectada por uno o varios fenómenos volcánicos simultáneamente, como corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas), caídas piroclásticas, proyectiles balísticos, *lahares*, flujos de lava, onda de choque y gases volcánicos (Figura 13).

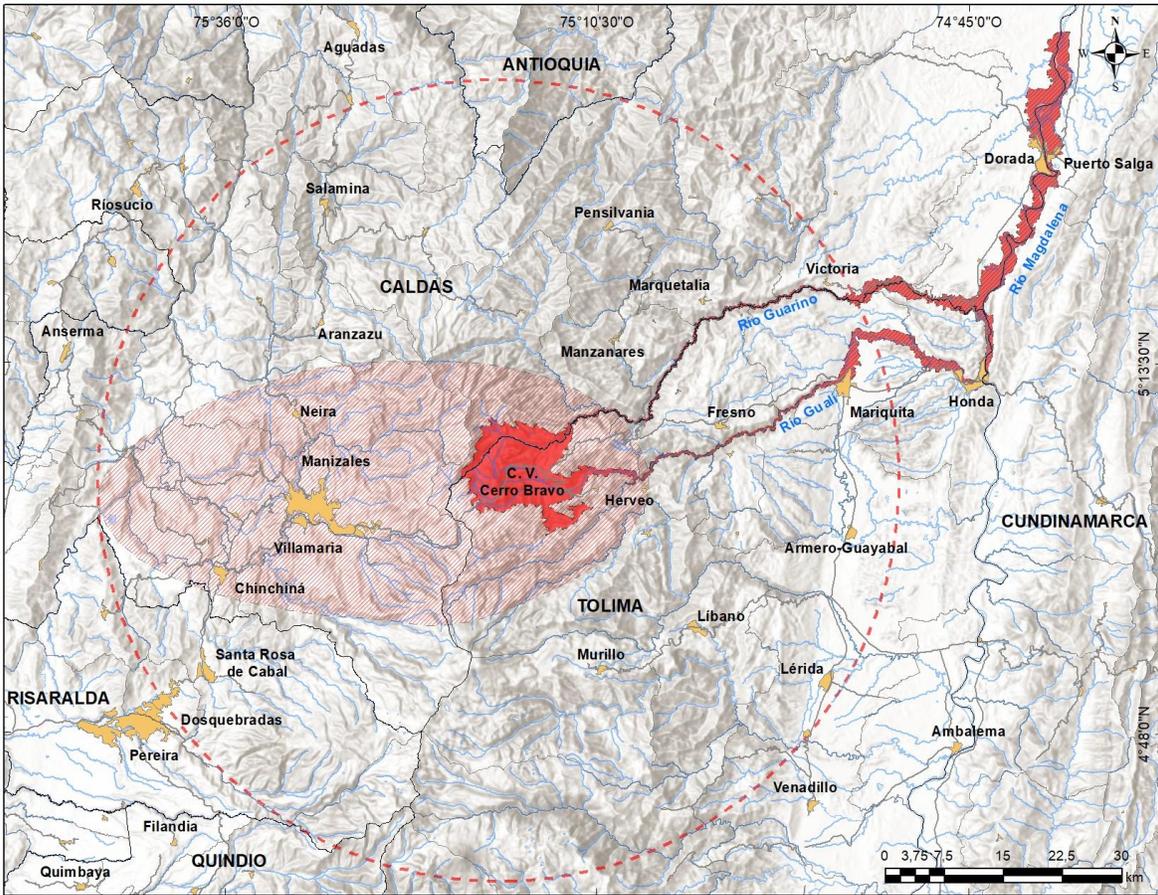


Figura 13. Zona que podría ser afectada por uno o varios fenómenos volcánicos clasificados como amenaza alta (marco principal)



Corresponde a la zona que podría ser afectada por corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas piroclásticas), caídas piroclásticas, proyectiles balísticos, *lahares*, flujos de lava, onda de choque y gases volcánicos. Las CDPs concentradas (tanto flujos piroclásticos de bloques y ceniza, como de ceniza y pómez) afectarían las partes altas del complejo y se canalizarían por los principales drenajes que nacen en él, como son las quebradas Seca, El Jordán, Los Micos, y los ríos Aguacatal y Perrillo, alcanzando distancias de hasta 25 km a partir del foco de emisión. CDPs diluidas (oleadas piroclásticas) podrían afectar todas las laderas del complejo y sobrepasar altos topográficos; pueden originarse como fenómenos aislados o acompañando CDPs concentradas, alcanzando distancias iguales o mayores que las recorridas por éstas. Flujos de lava (de composición andecítica dacítica) que se desplazarían, desde su foco de emisión, por las laderas del complejo fluyendo por los principales drenajes que nacen en él y con un alcance de hasta 7 km. Proyectiles balísticos de tamaños submétricos, que afectarían el área en un radio aproximado de 3 km alrededor de los domos actuales. Otros fenómenos que se podrían presentar son: Emisión y acumulación de gases volcánicos, como CO₂, SO₂, H₂S, HCl, HF, entre otros, emitidos antes, durante y después de las erupciones. Sismos de origen volcánico que podrían producir afectaciones de acuerdo a la distancia al foco sísmico, dependiendo de la profundidad y magnitud del sismo.



Corresponde a la zona que podría ser afectada por *lahares* que se movilizarían por los principales cauces que nacen en la parte alta del CVCB. Los *lahares* se canalizarían por la quebrada Seca (que bordea el flanco occidental del complejo) afluente del río Perrillo y este a su vez del Guarinó, el cual desemboca en el río Magdalena, estos flujos podrían mobilizarse alcanzando una distancia de más de 125 km desde su punto de origen, afectando a su paso los valles de estos ríos y poblaciones ribereñas en los municipios de Marulanda, Manzanares, Marquetalia, Victoria y La Dorada (Dpto. de Caldas); Herveo, Fresno, Mariquita y Honda (Dpto. del Tolima) y Puerto Salgar en el departamento de Cundinamarca. Hacia el oriente, los lahares descenderían por las quebradas Los Micos y El Jordán hacia el río Aguacatal, tributario del río Gualí, el cual desemboca en el río Magdalena, los flujos alcanzarían en su recorrido más de 120 km de distancia desde su punto de origen, afectando a su paso los valles de estos ríos y poblaciones ribereñas, en los municipios de Herveo, Fresno, Casabianca, Palocabildo, Falan, Mariquita y Honda en el departamento del Tolima y Guaduas en el departamento de Cundinamarca.



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por caída de piroclastos transportados por el viento (ceniza y *lapilli*) con acumulaciones mayores a 10 cm (carga sobreimpuesta sobre estructuras $> 170 \text{ kg/m}^2$, para ceniza y *lapilli* secos), para una columna eruptiva de aproximadamente 24 km de altura sobre la cima del centro de emisión, extendiéndose hasta 50 km en la dirección predominante de los vientos al oeste. Podría afectar cabeceras y/o zonas rurales de los municipios de Manizales, Villamaría, Chinchiná, Palestina, Neira, Marulanda, Manzanares, Aranzazu, Risaralda y Anserma (Caldas); Herveo, Casabianca, Villahermosa y Fresno (Tolima).



Amenaza Alta proyectada: Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones mayores a 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluyendo la contemplada en la tendencia principal de los vientos) en un radio aproximado de 50 km. Podría afectar casi la totalidad del departamento de Caldas, el noroccidente del Tolima, el sureste y noreste de Risaralda, una pequeña parte del sur de Antioquia y el municipio de Salento en el Quindío.

4.2 Zona de amenaza volcánica media



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por: - Caída de piroclastos transportados por el viento (ceniza y *lapilli*) con acumulaciones entre 1 y 10 cm (carga sobreimpuesta sobre estructuras entre 17 y 170 kg/m^2 , para ceniza y *lapilli* secos), para una columna eruptiva de aproximadamente 24 km de altura sobre la cima del centro de emisión, extendiéndose entre 50 y 164 km en la dirección predominante de los vientos al oeste-suroeste. Podría afectar todo el departamento de Risaralda; casi la totalidad de Caldas; el norte de los departamentos de Quindío, Valle del Cauca y Tolima; la parte centro occidental del Chocó; el municipio de Nariño en Antioquia y los municipios de Chaguan y Guaduas en Cundinamarca.



Amenaza Media proyectada: Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 1 y 10 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluyendo la contemplada en la tendencia principal de los vientos) en un radio aproximado de 164 km. Podría afectar la totalidad de los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, el sur de Antioquia, el extremo sur occidental de Santander, el occidente de Boyacá, el occidente de Cundinamarca, Bogotá, casi todo el departamento del Tolima (a excepción de la parte sur), el nororiente del Valle del Cauca y el occidente del Chocó.

4.3 Zona de amenaza volcánica baja



Corresponde a la zona que sería potencialmente afectada por: - Caída de piroclastos de tamaño ceniza, transportados en la dirección predominante del viento con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm (carga sobrepuesta sobre estructuras entre 0,5 y 10 kg/m², para ceniza), para una columna eruptiva de aproximadamente 24 km de altura sobre la cima del centro de emisión, extendiéndose entre 164 y 355 km en la dirección predominante de los vientos al oeste. Podría afectar todo el departamento Quindío, y casi la totalidad de los departamentos de Chocó, norte y centro occidente de Cundinamarca, el sur de Antioquia, el nororiente del Valle del Cauca, el noroccidente de Bogotá, el occidente de Boyacá, el norte de Caldas, la parte más norte de Risaralda, suroccidente de Santander y norte del Tolima.



Amenaza Baja proyectada: Zona expuesta a caída de piroclastos con acumulaciones entre 0,5 mm y 1 cm, cubriendo todas las direcciones alrededor del foco de emisión (incluyendo la contemplada en la tendencia principal de los vientos) en un radio aproximado de 355 km. Podría afectar casi la totalidad de los departamentos de Santander, Boyacá, Huila, Chocó, el occidente de Casanare y Meta, norte de Caquetá, norte y noroccidente del Cauca, suroccidente del Valle del Cauca, norte de Antioquia, el sur de Córdoba, Bolívar y Tolima, el sureste de Bogotá y Tame en Arauca.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El registro geológico del CVCB muestra actividad eruptiva principalmente explosiva, con ascenso y destrucción de domos, en la cual se han generado depósitos de corrientes de densidad piroclástica tanto concentradas como diluidas, caídas piroclásticas y generación de lahares. Los flujos de lava son restringidos en el registro geológico.

Se tiene el registro geológico de por lo menos 22 erupciones generadas durante los últimos 14.000 años con columnas eruptivas que han alcanzado hasta 24 km de altura y un VEI entre 3 y 5. La actividad de este complejo ha sido catalogada como de tipo pliniano a subpliniano.

La zonificación de la amenaza volcánica es resultado de la superposición de las áreas que pueden ser afectadas por los diferentes fenómenos volcánicos y la potencialidad de los daños que estos pueden ocasionar; delimitando tres zonas de amenaza: alta, media y baja, cuyos límites punteados son claramente transicionales y no absolutos. Además, se considera la posibilidad de afectación en áreas por uno o varios de estos fenómenos al mismo tiempo.

Los mapas de amenaza volcánica son una herramienta fundamental para el ordenamiento territorial del área de influencia de un volcán y el manejo de una crisis volcánica y sirve como punto de partida para la implementación de estrategias mitigadoras del riesgo (planes de evacuación y contingencia, entre otros) y demás actividades que permitan la toma de decisiones en un momento de emergencia.

Los mapas de amenaza volcánica son dinámicos, cambiantes tanto con el avance en el conocimiento del volcán y su dinámica eruptiva, como en el desarrollo de nuevas metodologías para la toma de datos geológicos e implementación de herramientas computacionales y tratamientos estadísticos, de tal manera que pueden ser actualizados.

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.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, E., Murcia, H., Borrero, C. y Arnoso, M. 2020. Evidence for welding of a block and ash pyroclastic flow deposit: the case of Cerro Bravo Volcano, Colombia. *Bulletin of Volcanology*. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1334-5>
- Barrantes, L.C., 2011. Estudio de vesicularidad en pómez y dispersión de erupciones de los volcanes Romeral y Cerro Bravo en la vereda San Pablo y el sector Las Nieves, municipio de Neira (Caldas). Trabajo de Grado. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Bogotá. 20 p.
- Blong, 1984. *Volcanic Hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions*, 424 pp. Academic Press Australia.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. & Hincks, T. 2005. Probabilistic modeling of tephra dispersion: hazard assessment of a multi-phase eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110. 65 p.
- Bonadonna, C. y Costa A. 2012. Estimating the volume of tephra deposits: A new simple strategy. *Geology*.
- Borrero, C., 2009. Geología y amenazas naturales para el plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Guarinó. Informe final. Contrato CORPOCALDAS 137 – 2008. Manizales. 377p.
- Calvache, M.L., Williams, S.N., & Young, R.H., 1987. Distribution and volumes of deposits and dynamics of eruptions of Nevado del Ruiz and Cerro Bravo volcanoes, Colombia within the past 2,100 years. *EOS*, 68 (16): 455.
- Connor, C. B., & Connor, L. J. (2006). Inversion Is the Key to Dispersion: Understanding Eruption Dynamics by Inverting Tephra Fallout. H.M. Mader, S.G. Cole, C.B. Connor, L.J. Connor (Eds.), *Statistics in Volcanology*. Special Publications of IAVCEI, Geological Society, London (2006), pp. 231-242. Doi: <https://doi.org/10.1144/IAVCEI001.19>.
- Facio Lince, I., 2012. Tefraestratigrafía y petrografía de los depósitos de los volcanes Romeral y Cerro Bravo, en la vereda San Pablo y sector Las Nieves, municipio de Neira, Caldas. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia; Departamento de Geociencias, Bogotá, D.C. 20 p.
- Galarza J.J., Valencia L.G., Monsalve M. L., Martínez L.M. 2022. Informe de simulaciones computacionales para el Complejo Volcánico Cerro Bravo. Informe técnico, Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Manizales.
- Gómez, J. & Montes, N.E., compiladores. 2020. Mapa Geológico de Colombia 2020. Escala 1:1.000.000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá.

- Hall, M.L. & Wood, C.A. 1985. Volcano–tectonic segmentation of the northern Andes. *Geology*, 13(3): 203–207. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1985\)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1985)13<203:VSOTNA>2.0.CO;2)
- Herd, D.G., 1974. Glacial and volcanic geology of the Ruiz–Tolima complex cordillera Central, Colombia. En: *Publicaciones esp. del INGEOMINAS*, 1982. Bogotá. 48 p.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P. & Vallance, J.W., 1998. Objective delineation of lahar inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin* 110(8), 972-984.
- Jenkins S.F., Spence R.J.S., Fonseca J.F.B.D., Solidumd R.U., Wilson T.M. 2014. Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Lesinscky, D., 1990. Geology, volcanology and petrology of Cerro Bravo, a Young dacitic stratovolcano in west- Central Colombia. Thesis of Master of Science. Louisiana State University. 242 p.
- Martínez L.M., Monsalve M. L., Valencia L.G., Galarza J.J. 2022. Geología y dinámica eruptiva del Complejo Volcánico Cerro Bravo. Informe técnico, Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Manizales.
- Monsalve, M.L., 1991., Mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Cerro Bravo. 1986. INGEOMINAS regional Alto Magdalena. Ibagué. 142 p.
- Monsalve–Bustamante, M.L. 2020. The volcanic front in Colombia: Segmentation and recent and historical activity. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, *Publicaciones Geológicas Especiales* 38, p. 97–159. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.03>
- Monsalve, M.L. & Núñez, A., 1992. El volcán cerro Bravo: Geología y Amenaza volcánica. *Boletín geológico INGEOMINAS*. VOL 1. No 1.
- Monsalve M. L., Martínez L.M., Valencia L.G., Galarza J.J. 2022. Evaluación de la amenaza volcánica del Complejo Volcánico Cerro Bravo. Informe técnico, Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Manizales.
- Patra, A., Bauer A., Nichita, C., Pitman, E.B., Sheridan, M. F. Bursik, M., Rupp, B., Webber, A., Namikawa, L. and Renschler, C. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches overnatural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139:1–21.

Pinzón, C. y Echeverri, J.F. 2017. Petrogénesis y condiciones de cristalización del domo intracratérico del volcán Cerro Bravo, Colombia. Tesis de grado, Programa de Geología. Facultad de Ciencias exactas y Naturales. Universidad de Caldas.

Richardson J. and Connor L. (2014). Lava C Version 0.1. Available online at <https://thegithub.org/resources/3597>

Schick, R. 1981. Source mechanism of volcanic earthquakes. *Bull Volcanol* 44, 491–497. <https://doi.org/10.1007/BF02600579>

Schilling, S.P. (1998). *Laharz; GIS programs for automated mapping of lahar inundation hazard zones*. U.S. Geological Survey Open-File Report 98-638, 80p. Disponible en <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.

Siebert, L. (1984). Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22: 163-197.

Takarada, S. (2017). The Volcanic Hazards Assessment Support System for the Online Hazard Assessment and Risk Mitigation of Quaternary Volcanoes in the World. *Front. Earth Sci.* 5:102. doi: 10.3389/feart.2017.00102

Thouret, J.C., Murcia, A., Salinas, R., & Vatin-Perignon, N., 1985. Aspectos estructurales y dinamismo eruptivo de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, cordillera Central de Colombia. INGEOMINAS, Medellín. 20 p.

Tilling, R. I., 1993. Apuntes para un curso breve sobre Los Peligros Volcánicos. WOVO, UNESCO, USAID y USGS.

Volentik, A., Connor, C. B., Connor, L. J., and Bonadonna, C. (2009) Aspects of volcanic hazard assessment for the Bataan nuclear power plant, Luzon peninsula, Philippines, in: *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, edited by: Connor, C. B., Chapman, N., and Connor, L. J., Cambridge University Press, Cambridge, 229–256. doi.org/10.1017/CBO9780511635380.010

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

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

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

USGS: Volcano Hazards. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/pyroclasticflow>

Memoria del mapa de amenaza volcánica del complejo volcánico Cerro Bravo

USGS: Volcano Hazards. <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/index.php>)

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

VHUB: Collaborative volcano research and risk mitigation: <https://vhub.org/resources/titan2d>

VHUB: Collaborative volcano research and risk mitigation:
<http://volcanology.geol.ucsb.edu/hazards.htm>

VHUB: Collaborative volcano research and risk mitigation:
<http://www.sveurop.org/gb/articles/articles/volchazards2.htm>).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Complejo volcánico Cerro Bravo, fotografía tomada en sobrevuelo realizado por el SGC y la Fuerza Aérea Colombiana en enero de 2021.	7
Figura 2. Localización y algunas poblaciones en el área de influencia del complejo volcánico Cerro Bravo.	8
Figura 3. Ubicación de las subcuencas de los ríos Perrillo y Aguacatal, con origen en el CVCB.	9
Figura 4. Esquema donde se aprecia la geomorfología del complejo volcánico Cerro Bravo, los domos y las unidades eruptivas asociadas a cada uno de ellos.	12
Figura 5. Columnas estratigráficas tipo en los sectores de La Ovejera y Fábrica de Ríos donde se encuentran los depósitos de caída piroclástica que muestran el registro geológico de erupciones plinianas y subplinianas en los últimos 14.000 años.	15
Figura 6. Geoformas típicas del CVCB, A. Vista panorámica, B. Domos con estructura en espina al norte del complejo, C. Flanco oriental, donde se observa las cuencas de las quebradas el Jordán, los Micos.	16
Figura 7. Esquema de un volcán con los diferentes fenómenos volcánicos que pueden ocurrir durante una erupción volcánica. (Tomado de USGS: http://volcanoes.usgs.gov/hazards/index.php)	17
Figura 8. Área de amenaza alta (color rojo) para corrientes de densidad piroclásticas tanto concentradas como diluidas del CVCB. Resultados de la integración de las simulaciones computacionales realizadas con los códigos Titan 2D y cono de energía.	19
Figura 9. Área de amenaza alta en color rojo para flujos de lava del CVCB. Resultado de las simulaciones computacionales realizadas con el código LavaC.	20
Figura 10. Área de amenaza alta en color rojo para <i>lahares</i> en la parte oriental del CVCB, para las cuencas de los ríos Guarinó, Gualí y parte del río Magdalena en los sectores rurales de los municipios de Herveo, Casabianca, Palocabildo, Fresno, Falan, San Sebastián de Mariquita, Honda, Marulanda, Manzanares, Marquetalia, Victoria, Dorada, Puerto Salgar y Guaduas.	22
Figura 11. Zonificación de la amenaza por caídas de piroclastos (ceniza y lapilli) del CVCB. En color rojo amenaza alta para espesores mayores a 10 cm. En color naranja amenaza media para espesores entre 10 y 1 cm. En color amarillo amenaza baja para espesores entre 1 cm y 0.5 mm. Los círculos cubren las direcciones alrededor de la cima del complejo no contempladas en la tendencia principal de los vientos.	24
Figura 12. Zona de amenaza para proyectiles balísticos del VCB. El polígono rojo representa la amenaza alta para fragmentos de tamaño métrico con alcance hasta de 3 km.	28
Figura 13. Zona que podría ser afectada por uno o varios fenómenos volcánicos clasificada como amenaza alta (mapa principal)	31

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Historia eruptiva del complejo volcánico Cerro Bravo en los últimos 14.000 años según el registro geológico y su edad según dataciones radiométricas. C: carbón, M: madera, P: paleosuelo.....13