

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y MORFOMETRÍA DEL VOLCÁN
CERRO BRAVO, TOLIMA-COLOMBIA**

**Eliana Arango Palacio
Pablo Andrés Chica Martínez
Carlos Felipe Robayo Jara**



**UNIVERSIDAD DE
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2017**

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y MORFOMETRÍA DEL VOLCÁN
CERRO BRAVO, TOLIMA-COLOMBIA**

**Eliana Arango Palacio
Pablo Andrés Chica Martínez
Carlos Felipe Robayo Jara**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar
al título de Especialista en Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MANIZALES
2017**

AGRADECIMIENTOS

A Dios, mi fuerza y protección.

A mis queridos padres y hermano, por ser mi motivación constante, el apoyo y el amor más maravilloso que he podido conocer.

A los geólogos Daniel Piedrahita y Camila Aguilar quienes cultivaron en mí el verdadero sentido de la amistad y la enseñanza, por su paciencia y aportes que determinaron objetivos importantes para la realización de este estudio.

Al Ph.D Hugo Murcia por impulsar esta investigación, por sus consejos y su amistad.

Al MSc. Raúl Trejos, por su apoyo y colaboración incondicional.

A Carlos y Pablo por su apoyo y amistad.

A todas las personas que hacen parte de la Universidad de Manizales, Universidad de Caldas, el Instituto de investigaciones en Estratigrafía IIES, y el Grupo de Investigaciones en Estratigrafía y Vulcanología GIEV-Cumanday por brindarnos su apoyo e instalaciones para el óptimo desarrollo de esta investigación.

Eliana

A mi familia por apoyarme en mi desarrollo académico a pesar de las adversidades.

A Pablo y Eliana por ser excelentes compañeros y amigos.

Carlos

A mis padres y a Francia Milena Marín por creer en mis metas propuestas.

A Carlos y Eliana por hacer parte de mi once ideal.

Pablo.

CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA	13
2. OBJETIVOS	14
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. MARCO TEÓRICO	16
4.1 ANTECEDENTES	16
4.2 MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	16
5. METODOLOGÍA	19
5.1 MORFOLOGÍA	19
5.2 PROCEDIMIENTO	19
5.2.1 Fase 1. Fotointerpretación.	19
5.2.2 Fase 2. Creación del mapa geomorfológico	20
5.2.3 Fase 3. Descripción de unidades geomorfológicas.	21
5.2.4 Fase 4. Código MORVOLC.	21
5.2.5 Fase 5 Análisis geomorfológicos y morfométricos.	21
6. RESULTADOS	23
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	23
6.1.1 GEOMORFOLOGÍA	23
6.1.1.1 Cerros y Sierras (CSr)	24
6.1.1.2 Edificio Uno (E1)	24
6.1.1.3 Edificio Dos (E2)	24
6.1.1.4 Edificio Tres (E3)	24
6.1.1.5 Edificio Cuatro (E4)	24
6.1.1.6 Domo Actual Uno (Da1)	25
6.1.1.7 Domo Actual Dos (Da2)	25

6.1.1.8	Flujo de Escombros (FLEs).....	25
6.1.1.9	Flujo Piroclástico antiguo (Fpa1 y Fpa2)	25
6.1.1.10	Flujo de Lava (FL).....	25
6.1.1.11	Depósitos Cratéricos Recientes (Dcr y Dcr2).....	26
6.1.1.12	Depósitos Recientes (Dr)	26
6.1.1.13	Ladera erosiva (Le).....	26
6.1.1.14	Laguna (Lg).....	26
6.1.1.15	Depósitos Lacustres (DLc).....	26
6.1.2	MORFOMETRÍA	26
6.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	28
6.2.1	Geomorfología	28
6.2.2	Morfometría	29
7.	CONCLUSIONES	33
8.	RECOMENDACIONES	34
	BIBLIOGRAFÍA	35

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación del Volcán Cerro Bravo, Tolima-Colombia.	13
Figura 2. Delimitación de unidades geomorfológicas a partir de fotointerpretación.....	20
Figura 3. Procedimiento para la extracción de parámetros morfométricos de	21
Figura 4. Mapa de pendiente en porcentaje del VCB.	22
Figura 5. Mapa de sombras con contornos del VCB cada 50 m.	22
Figura 6. Mapa geomorfológico del Volcán Cerro Bravo.	23
Figura 7. Modelo 3D con contornos del VCB. Mapa de pendientes del VCB.....	27
Figura 8 Parámetros morfométricos para volcanes monogenéticos con base en Porter (1972).	27
Figura 9. Relación altura/ancho basal (H_{co}/W_{co}) y ancho de la cumbre/ancho basal (W_s/W_b) del VCB.	31
Figura 10. Relación entre índice de elipticidad vs índice de irregularidad del VCB.....	32

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros Morfométricos del VCB.	28
Tabla 2. Tabla comparativa de parámetros morfométricos entre el VCB y Volcán Cerro Machín, Volcán Puracé y Volcán Nevado del Tolima.	30

GLOSARIO

Volcanes monogénéticos: formados durante un único ciclo eruptivo, los episodios pueden ser de corta duración (entre semanas o meses) y pueden continuar por periodos sucesivos manifestados durante algunos años o décadas. Pueden ser domos y flujos de lava, conos piroclásticos (también llamados de ceniza o escoria), conos de toba, anillos de toba y maares (De Silva & Lindsay, 2015).

Volcanes poligenéticos: estos volcanes se caracterizan por haber presentado varios ciclos eruptivos a través de la historia; por esta razón son relativamente grandes estructuras construidas a lo largo de decenas o cientos de miles de años. Dentro de este grupo se identifican los volcanes compuestos, volcanes en escudo y calderas (De Silva & Lindsay, 2015)

Volcán compuesto: todos los edificios volcánicos poligenéticos cónicos o cercanamente cónicos, relativamente grandes. Se caracterizan por su larga vida de construcción, por estar formados por lavas y productos volcanoclásticos emitidos desde uno o más centros de emisión (De Silva & Lindsay, 2015)

Morfología: en geología, es la disciplina que se encarga de estudiar la forma y origen de las diferentes estructuras geológicas.

Morfogénesis: conjunto de todos los procesos, exógenos y endógenos, que conducen a la elaboración e identificación de las geoformas enmarcadas en un proceso imaginario (Lugo-Hubp, 1989). La morfogénesis se representa por medio de unidades geomorfológicas y símbolos lineales, los cuales son la expresión de las formas de la superficie terrestre en un mapa geomorfológico (Verstappen & van Zuidam, 1991).

Morfometría: aspectos cuantitativos. Valores de pendientes, alturas, desarrollo de formas, ángulos y elementos lineales, energía del relieve, etc (Peña-Monné, 1997). Es la información cuantitativa del terreno expresada en valores de altitud e índices relacionados a la forma en planta y perfil de las geoformas (Verstappen & van Zuidam, 1991). Estos aspectos, debido a que están vinculados a la morfología de un terreno, se reflejan en mapas geomorfológicos realizables a escalas variables; de esta manera, se distinguen cuatro niveles de unidades de terreno (Provincias geomorfológicas, sistemas de terreno, unidades de terreno, componentes de terreno), con base en la escala y tipo de levantamiento (Verstappen & van Zuidam, 1991).

Geomorfología: ciencia que estudia la forma de la superficie terrestre y los procesos que la crean (Summerfield, 2014).

Productos volcánicos: depósitos de origen asociado a procesos volcánicos.

Unidades geomorfológicas: hace referencia a toda parte cartografiable de la superficie sólida del Planeta, de kilómetros cuadrados de extensión, caracterizada por sus rocas, estructura y por una secuencia de eventos tal que integra una historia evolutiva singular diferente a la de las áreas adyacentes, de las cuales está separada por límites estratigráficos y/o tectónicos (Ortega-Gutiérrez et al., 1991).

Domos de lava: edificios volcánicos monogenéticos comúnmente cónicos. Son cuerpos gruesos de extensión limitada que representan flujos lentos debido a las altas viscosidades de la composición de lava dacítica a riolítica (De Silva & Lindsay, 2015).

Flujos de lava: los flujos de lava tienen su origen en una erupción volcánica de explosividad baja o intermedia; los flujos de lava con alto porcentaje en sílice alcanzan temperaturas entre 800 y 1200°C, para flujos con alto porcentaje de sulfuros es de 150°C y para carbonatados es de 600°C (Kilburn, 2000). El riesgo asociado a esta manifestación volcánica está directamente ligado a la temperatura, a la pendiente del terreno y a la distribución de la población (De Silva & Lindsay, 2015).

Caídas piroclásticas: son lluvias de fragmentos piroclásticos que tienen su origen en una erupción volcánica (Murcia et al., 2013). Los fragmentos se acumulan por gravedad desde la nube o pluma de cenizas desarrollada al tope de una columna eruptiva (Murcia et al., 2013). Cuando los fragmentos son lanzados siguiendo una trayectoria parabólica desde el volcán, sin ser incorporados en la zona convectiva de la columna eruptiva, se denominan proyectiles balísticos (Murcia et al., 2013).

Corrientes de densidad piroclástica (CDP): son flujos de fragmentos, gases y vapor en fase de condensación o agua líquida. Es un flujo con densidad mayor que la del aire, que se mueve sobre un terreno bajo la influencia de la gravedad y que tiene su origen en una erupción volcánica (Fisher, 1966; Druitt, 1998; Branney & Kokelaar, 2002). Las CDPs se dividen en:

Corrientes de densidad piroclástica concentrada: son flujos turbulentos con alta concentración de partículas (40-50% en volumen) y baja proporción de gas con respecto a sólidos (Branney & Kokelaar, 2002). También llamado flujo piroclástico (Murcia et al., 2013).

Corrientes de densidad piroclástica diluida: Son flujos turbulentos con baja concentración de partículas (1-10% en volumen; Wilson & Houghton, 2000; Valentine & Fisher, 2000; Branney & Kokelaar, 2002) y alta proporción de gas con respecto a sólidos (Branney & Kokelaar, 2002). También llamado oleada piroclástica (Murcia et al., 2013).

RESUMEN

El Volcán Cerro Bravo (VCB) pertenece a la Provincia Tectónica Volcánica San Diego-Cerro Machín en los Andes Centrales de Colombia y está ubicada a 150 km al noroeste de Bogotá, la capital de Colombia, y a 25 km de la ciudad de Manizales (~ 350,00 habitantes). La actividad volcánica de VCB comenzó hace 50.000 años y se ha caracterizado por producir erupciones efusivas y explosivas (subpliniano a pliniano) con productos dacíticos y andesíticos. La actividad efusiva se evidencia por los flujos de lava y los domos de lava, mientras que la actividad explosiva se evidencia por depósitos de corriente de densidad piroclástica y depósitos de caída piroclástica, también se han reconocido algunos depósitos secundarios como avalanchas de escombros y lahares. Actualmente, el VCB es considerado como una amenaza para la ciudad de Manizales. Con el fin de caracterizar el edificio volcánico, se creó un mapa geomorfológico a partir de las interpretaciones de modelos de elevaciones digitales (DEM) con una resolución de 12,5 m, así como fotografías aéreas. Así, fue posible asociar los relieves con la evolución del volcán. Con base en este análisis, fue posible identificar la base y la parte superior del edificio del VCB como ~ 2600 y ~ 4030 m.s.n.m., respectivamente, con un diámetro en su eje mayor de ~ 5,8 km. El edificio volcánico tiene cuatro cráteres principales que se abren al norte. Los cráteres están separados unos de otros por alturas y distancias entre ~ 120 m.s.n.m. y ~ 1 km. Los análisis morfométricos partir de la relación altura/ancho basal $H_{co}/W_{co}=0.20$ y ancho de la cumbre/ancho basal $W_s/W_b=0.0$, representa una forma cónica del edificio volcánico, mientras que los valores entre índice de elipticidad ($ie=1.61$) vs índice de irregularidad ($ii=1.45$), representan una forma semicircular e irregular del edificio volcánico. Esta geomorfología es una evidencia de diferentes etapas eruptivas de la construcción del volcán y se ha demostrado que algunos cráteres fueron creados a partir de erupciones explosivas, sin embargo las diferentes alturas entre cada cráter sugieren la creación de domos de lava y su colapso como una respuesta de la actividad efusiva final.

PALABRAS CLAVES: Volcán Cerro Bravo, morfometría, geomorfología.

ABSTRACT

Keywords: Cerro Bravo Volcano, Volcanic landforms, Craters.

Cerro Bravo Volcano (CBV) belongs to the San Diego–Cerro Machín Volcano - Tectonic Province in the Central Andes of Colombia. CVB is located 150 km NW from Bogotá, the capital of Colombia, and 25 km E from Manizales city (~350,00 inhabitants). The volcanic activity of CBV began at 50,000 years ago and has been characterized by produce effusive and explosive (subplinian to plinian) eruptions with dacitic and andesitic products. The effusive activity is evidenced by lava flows and lava domes, while the explosive activity is evidenced by pyroclastic density current deposits and pyroclastic fall deposits; some secondary deposits such as debris avalanches and lahars has been also recognised. Currently, the CBV is considered as a hazard for the Manizales city. In order to characterise the volcanic edifice, a geomorphological map was created from the interpretations of digital elevations models (DEMs) with 12.5 m resolution as well as aerial photographs. Thus, it was possible to associate the landforms with the evolution of the volcano. Based on this analysis, it was possible to identify the base and top of the CBV edifice as ~2600 and ~4030 m.a.s.l., respectively, with a diameter in its major axis of ~5.8 km. The volcanic edifice has four main craters opening to the north. The craters are apart from each other by heights and distances between ~120 m.a.s.l. and ~1 km; this geomorphology is an evidence of different eruptive stages of the volcano construction. Morphological analysis has shown that some craters were created from explosive eruptions, however the different heights between each crater suggest the creation of lava domes and their collapse as a response of the final effusive activity.

INTRODUCCIÓN

Gutiérrez. (2008), describe la geomorfología como el estudio del relieve de la superficie terrestre, siendo este el resultado de procesos endógenos (que actúan como creadores de relieves) y procesos exógenos (erosión, meteorización, transporte, y sedimentación). El resultado se manifiesta en la creación de un conjunto de modelos erosivos y deposicionales, que suelen presentar rasgos específicos, en relación con los procesos actuantes en los diferentes ambientes morfogenéticos (Gutiérrez, 1990, 2005).

La geomorfología volcánica en Colombia es un campo poco desarrollado en el ámbito científico, por lo que este trabajo se enfoca en el análisis morfológico del Volcán Cerro Bravo (VCB) perteneciente a la Provincia volcan-tectónica San Diego-Cerro Machín. Este estudio del VCB se enfoca en conocer el comportamiento y evolución de los edificios volcánicos, con el objetivo de complementar análisis evolutivos de volcanes alrededor del mundo, es decir, determinar parámetros cuantificables como el volumen del edificio volcánico, delimitación y/o extensión de unidades geomorfológicas, entre otros. Los resultados permiten hacer análisis de volumen de pérdida del edificio volcánico, área afectada, cambios geomorfológicos, y material que pueda ser originado en caso de una erupción.

Los estudios morfométricos y morfológicos permiten contribuir al entendimiento del comportamiento y evolución de los diferentes episodios eruptivos y reconstrucción del edificio volcánico del VCB. Los análisis consistieron en la identificación y caracterización a través de algoritmos matemáticos que son arrojados por el código *MORVOLC* o el software ArcGis, de las diferentes unidades geomorfológicas previamente identificadas a partir de imágenes aéreas y modelos de elevación digital. Posteriormente los resultados de dicha investigación permitieron determinar valores cuantitativos como volumen, área, pendientes, altura, entre otros.

1. ÁREA PROBLEMÁTICA

El objeto de estudio, el VCB se encuentra localizado en las coordenadas 5,09°N y 75,29°W, en el páramo de Letras; con una altura de 4050 msnm (Figura 1). El VCB está desplazado 5 km al Oriente de la cima de la Cordillera Central de Colombia en el Departamento del Tolima, muy cerca al límite con el Departamento de Caldas (Monsalve, 1991)

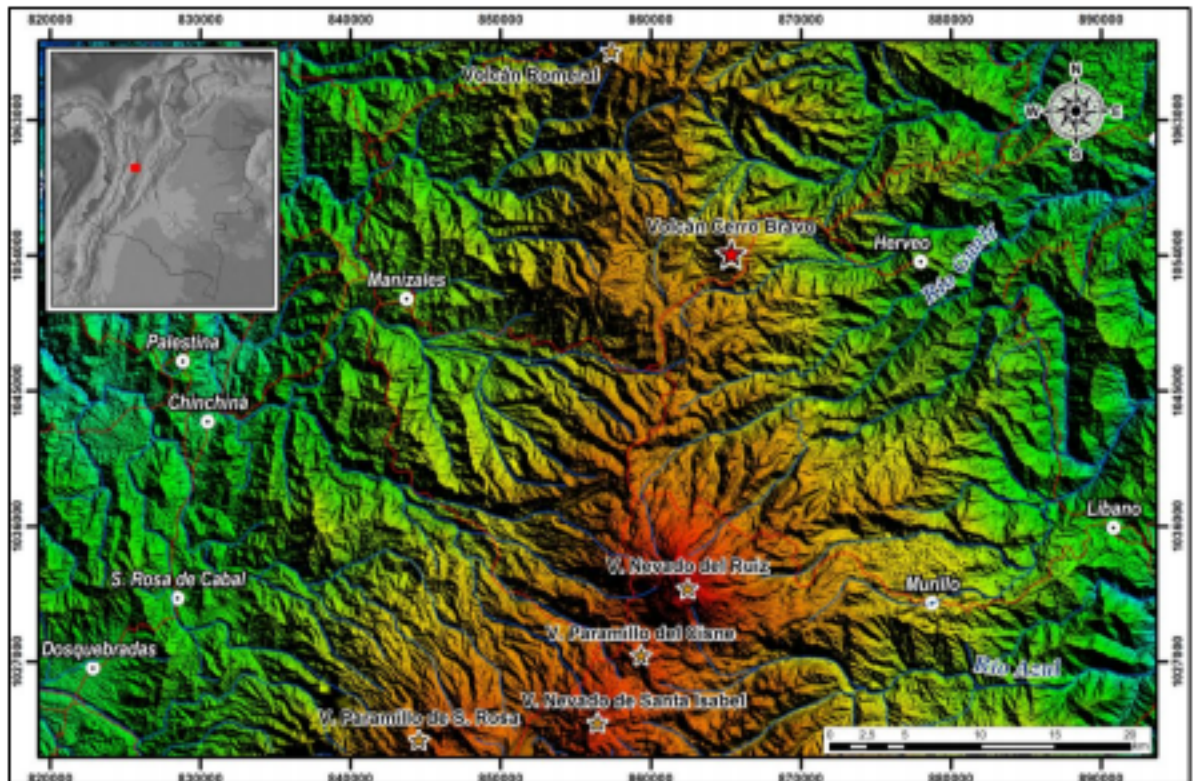


Figura 1. Ubicación del Volcán Cerro Bravo, Tolima-Colombia.

A partir de 1) el análisis de Modelos de Elevación Digital, o DEM por su siglas en inglés (*Digital Elevation Model*), e imágenes satelitales, 2) la aplicación del concepto de las diferentes unidades geomorfológicas presentes en el VCB, y 3) los rasgos geomorfológicos característicos del volcán, se reconocen los diferentes cráteres, depósitos y domos que forman la estructura volcánica. La actividad de tipo efusiva (domos, flujos de lava, etc.) y explosiva (CDPs, depósitos de caída, etc.), son resultados de la evolución que ha experimentado el VCB en términos de emplazamiento y erosión de sus productos durante el Cuaternario (aproximadamente en los últimos 50.000 años). Estos análisis permitirán realizar nuevas interpretaciones composicionales y de reconstrucción de un modelo de historia eruptiva.

2. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización geomorfológica y morfométrica del Volcán Cerro Bravo ubicado en el Departamento de Tolima

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar metodologías cuantitativas para la obtención de parámetros morfométricos y geomorfológicos que permitan caracterizar el Volcán Cerro Bravo a partir de Modelos Digitales de Elevación.
- Realizar un mapa geomorfológico, a partir de los análisis fotogeológicos.
- Describir, a partir de los parámetros geomorfológicos obtenidos y que definen el ambiente volcánico, las distintas geoformas existentes: cráter, laderas, domos, flujos de lava y flujos piroclásticos.
- Cuantificar parámetros morfométricos como: volumen del edificio volcánico, grado de pendientes del edificio, índice de esfericidad (ie), índice de irregularidad (ii), entre otros.

3. JUSTIFICACIÓN

Los modelos digitales de elevación en las últimas décadas se han convertido en una herramienta invaluable para los análisis geomorfológicos, teniendo en cuenta el aumento de precisión, resolución espacial y disponibilidad de imágenes satelitales que han permitido realizar estudios más detallados en cualquier área del conocimiento. Su uso tradicional en vulcanología ha sido enfocado a modelado de análisis de riesgos de flujo volcánico, análisis volcánico – tectónico y en algunos estudios morfométricos (e.g., Stevens et al., 2002; Huggel et al., 2008).

Si bien se han realizado trabajos sobre riesgo y amenazas en el VCB y zonas aledañas, el edificio volcánico carece hasta el momento de estudios de detalle enfocados a reconstruir la historia eruptiva y evolutiva a partir de análisis geomorfológicos o morfométricos. Este aspecto es de significativa importancia debido a que es un volcán activo (Monsalve, 1991). Se destaca que las poblaciones que se ubican dentro de la zona de influencia del volcán y que podrían ser afectadas en caso de una erupción, son: la ciudad de Manizales y el municipio de Herveo, que tienen poblaciones de aproximadamente 400.000 y 8100 habitantes, respectivamente (DANE, 2009). Es importante destacar que dentro del área de influencia en caso de una erupción volcánica, se encuentra una de las vías más importantes que comunican la zona centro con la capital (Bogotá) y las zonas al NE y SO de Colombia, lo que afectaría también las actividades comerciales del país. Cabe destacar que análisis geomorfológicos enfocados a la definición de unidades geomorfológicas no ha sido realizado en el área y no se han realizado estudios morfométricos tendientes a caracterizar el tipo de edificio volcánico.

El potencial de la investigación morfométrica no ha sido explotado para estudios aplicados de caracterización sistemática de geomorfología volcánica en el país. Es por esto que las mediciones realizadas a través de Modelos de Elevación Digitales del terreno en el VCB permitirán un primer acercamiento a la comprensión, caracterización y clasificación morfométrica del mismo y a su vez brindarán parámetros para el mejor entendimiento de las dinámicas geomorfológicas de otros volcanes presentes en Colombia, convirtiéndose dicha información en un insumo preciso para el análisis a futuro de riesgo y amenazas volcánicas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ANTECEDENTES

Antes de la facilidad de adquisición de modelos digitales de elevación, los estudios en morfometría volcánica estaban basados en mapas topográficos, interpretación de imágenes aéreas y medidas de campo (Grosse, 2012). Sin embargo en los últimos años la disponibilidad de información satelital ha permitido realizar investigaciones asociadas a análisis morfológicos de cualquier zona en el mundo.

Porter (1972) fue una de las primeras personas en incursionar en estudios morfométricos aplicados a volcanes monogenéticos, donde exponía alturas, diámetros crátericos y basales, estableciendo parámetros como W_{cr} : diámetro del cráter, H_{co} : altura del cono y D_{cr} : profundidad del cráter. Estos criterios, han servido como base para estudios morfométricos realizados a nivel mundial en volcanes monogenéticos, a lo que se ha ido adicionando parámetros como pendientes, radios, configuración tectónica, etc. La morfometría aplicada a volcanes poligenéticos (como lo es el VCB) ha sido menos estudiada. Grosse, (2012), expone que los edificios volcánicos de origen poligenético son más complejos de analizar morfométricamente porque su origen, marco tectónico regional, depósitos asociados etc, evidencian características únicas para cada volcán, lo que dificulta interpretar cuantitativamente el edificio volcánico.

La metodología expuesta por Grosse, (2012), permite analizar a partir del código *MORVOLC* tanto volcanes poligenéticos como monogenéticos para obtener parámetros cuantitativos extraídos de un modelo de elevación digital del terreno. Estos parámetros son: tamaño, forma, pendiente, orientación, altura máxima, medidas del cráter (altura, profundidad, diámetro), y delimitación de la base del edificio volcánico.

En este trabajo se aplica la metodología implementada por Grosse, (2012), en el código *MORVOLC* para obtener parámetros morfométricos que permitan clasificar el VCB morfológicamente.

4.2 MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

La Provincia Volcano Tectónica San Diego - Cerro Machín (PVTSC) (Martínez et al., 2014) se localiza en el eje de la Cordillera Central de Colombia. Su origen está asociado a la subducción de la Placa Nazca por debajo de la margen NO de Suramérica (Placa Suramericana) donde la tasa de subducción varía, de acuerdo a varios autores, entre 6,5 y 9 cm/año (Pennington, 1981). El arco volcánico generado es muy estrecho y se localiza arriba de la zona sismogénica de Benioff que claramente define una placa que subduce con un ángulo de 45° y corre paralelamente a la trinchera colombo-ecuatorial a unos 300 km al E del arco (Bourdon et al., 2003). El segmento donde se ubica la PVTSC marca la actividad

magmática en el Plio-Cuaternario, y representa el vulcanismo más septentrional de la Zona Volcánica Norte (ZVN; 2° S a 5° N en los Andes ecuatorianos y colombianos; Bourdon et al., 2003). La PVTSC consta de al menos nueve estructuras volcánicas poligenéticas que de sur a norte, comprenden los volcanes: Cerro Machín, Nevado del Tolima, Paramillo del Quindío, Paramillo de Santa Rosa, Nevado de Santa Isabel, Paramillo del Cisne, Nevado del Ruiz, Cerro Bravo y Romeral; además de una serie de campos volcánicos de menor escala definidos por estructuras monogenéticas poco estudiadas (Méndez & Patiño, 1994; Toro et al., 2010; Borrero et al., 2016). El basamento de la PVTSC en las inmediaciones del VCB, está compuesto por rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca de edad Paleozoica (Maya & Gonzales, 1995), que están en contacto fallado con las Anfibolitas de Padua de edad Triásica (Barrero & Vesga, 1976). El Complejo Cajamarca es intruído por varios plutones, destacándose, en las partes más cercanas al VCB, el Stock de Manizales de edad Paleoceno y el Batolito de El Bosque de edad Eoceno (Barrero & Vesga, 1976). También existen depósitos de material piroclástico que cubren el basamento y que se ha nombrado como Formación Casabianca (Borrero y Naranjo, 1990).

El objeto de estudio de este trabajo se enfoca en el Volcán Cerro Bravo, el cual se caracteriza por su comportamiento de tipo explosivo, que ha predominado, al menos, en los últimos 14.000 años y que ha dejado como productos principales flujos piroclásticos, depósitos de caída (ceniza y lapilli), oleadas y emplazamientos de domos (Monsalve, 1991). En la actualidad, las características anteriormente mencionadas hacen que el VCB sea considerado como el volcán que mayor amenaza presenta para la ciudad de Manizales (Monsalve, 1991; Díaz, 1991). Según el mapa de amenaza para el VCB elaborado por Monsalve (1991), otras poblaciones que se verían afectadas por los productos y subproductos (lahares, flujos de lava, flujos piroclásticos, y piroclastos de caída) de una erupción son los municipios de Herveo, Casabianca, Brasil, Letras, Mesones, Mariquita, y Honda. Cabe destacar que entre todas las poblaciones mencionadas, suman aproximadamente 500.000 habitantes. El VCB se clasifica como un volcán compuesto, de composición dacítica, con una historia eruptiva de 50.000 años (edad más antigua reportada: 50 ± 50 ka en K/Ar; Lescinsky, 1990). Se caracteriza por variaciones de estilos eruptivos, desde emisiones efusivas hasta erupciones plinianas (Lescinsky, 1990). El volcán ha sido subdividido en "Cerro Bravo antiguo" (50,000 – 14,000 años) y "Cerro Bravo moderno" (<14,000 años) con base en su historia eruptiva (Lescinsky, 1990). En la actualidad, su cráter está ocupado por un domo, el cual corresponde a la última fase eruptiva de la actividad más reciente (~600? años; Lescinsky, 1990).

Las evidencias del comportamiento eruptivo del VCB indican que su evolución ha cesado durante la época contemporánea (Thouret et al., 1985). La morfología del edificio volcánico presenta tres calderas parcialmente conservadas y un domo de composición traquiandesítica, evidencia del último episodio eruptivo de tipo efusivo. Se puede diferenciar un VCB Moderno (Holoceno y Cuaternario muy reciente) con

una caldera aproximadamente de 10 km de diámetro constituido por depósitos piroclásticos los cuales están descansando sobre el VCB más antiguo (Pleistoceno Inferior) compuesto por flujos de lavas, depósitos piroclásticos y de caída. (Thouret et al., 1985)

Hasta el momento no se han realizado análisis detallados de tipo geomorfológicos y/o morfométricos en el VCB.

5. METODOLOGÍA

5.1 MORFOLOGÍA

La metodología propuesta por Grosse en 2009 y 2011, consiste en la preparación sistemática de un modelo de elevación digital del terreno, con sus respectivas correcciones. En el presente trabajo se hará uso del DEM de 12.5 m, extraído del servidor *Alaska Satellite Facility*, del cual se determinará dos principales factores: la pendiente y el perfil de curvatura (el cual es paralelo a la pendiente e indica la dirección de la máxima pendiente) para eventualmente delimitar el edificio volcánico.

Seguido a esto se computa dicha información con el código MORVOLOC que es la unión de los parámetros descritos anteriormente, a través de una serie de rutinas sistematizadas, las cuales permitirán la creación de un TIN (*Triangular irregular Network*) que facilitará la obtención de medidas específicas como la altura, índice de elipticidad, parámetros de pendientes, parámetros de caldera y cima, entre otros.

Finalmente la caracterización geomorfológica y clasificación de geformas se realizará a través de la metodología implementada por el Servicio Geológico Colombiano en el 2015.

5.2 PROCEDIMIENTO

5.2.1 Fase 1. Fotointerpretación. La fotointerpretación realizada para este trabajo pretende ubicar y clasificar unidades geomorfológicas a partir del análisis de fotografías aéreas.

- **Actividad 1.** Se utilizaron las fotografías 098 a 106, específicamente las 100-101-102 pertenecientes al vuelo C-1555 que enmarcan la totalidad del edificio volcánico del Volcán Cerro Bravo.
- **Actividad 2.** El análisis de las fotografías aéreas se realizó a través de un estereoscopio de espejos, en el Laboratorio de Fotointerpretación en las instalaciones de la Universidad de Caldas
- **Actividad 3** Se delimitaron las unidades geomorfológicas asociadas al edificio volcánico del VCB, siguiendo la metodología propuesta por el SGC (2015), en la que se permite limitar dichas unidades siguiendo cambios en la pendiente, dirección de drenajes, cambios en la densidad del drenaje, etc.(Figura 2).

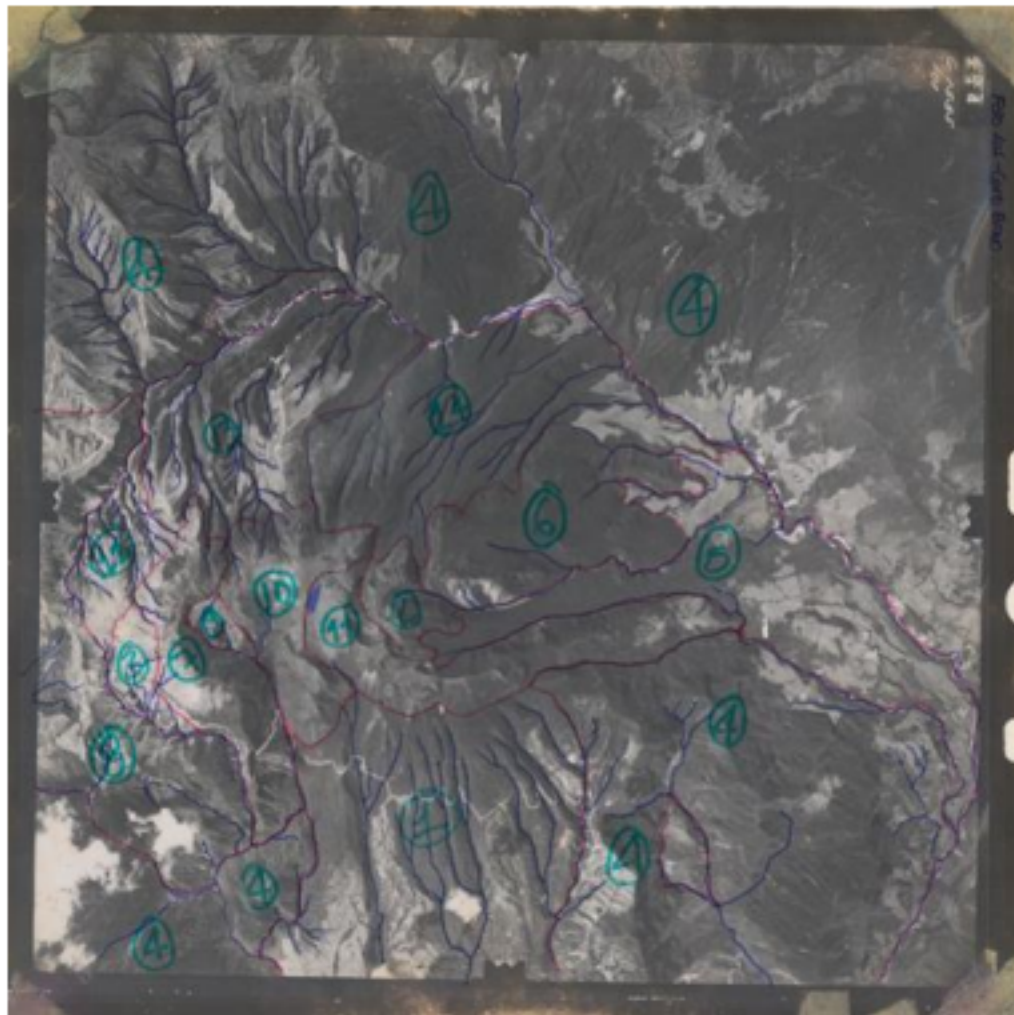


Figura 2. Delimitación de unidades geomorfológicas a partir de fotointerpretación. Foto aérea N°101, vuelo C-1555.

5.2.2 Fase 2. Creación del mapa geomorfológico.

- **Actividad 1.** Se crearon diferentes insumos (mapa de pendientes, curvas de nivel, mapa de sombras, etc.) con base en el tratamiento del DEM de 12.5 m, descargado del servidor *Alaska Satellite Facility Vertex* (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>) Para facilitar la delimitación final de las unidades geomorfológicas (Figura 4).
- **Actividad 2.** A partir de las unidades geomorfológicas previamente identificadas con fotointerpretación se realizó la delimitación final de dichas unidades, basados en los parámetros cualitativos de los insumos creados anteriormente (Figura 6).

5.2.3 Fase 3. Descripción de unidades geomorfológicas. Se realizó la descripción de las 17 unidades geomorfológicas encontradas en la zona.

5.2.4 Fase 4. Código MORVOLC. Para utilizar el código MORVOLC, se debe cargar el DEM corregido. A partir de una serie de rutinas (algoritmos matemáticos) el programa computa los siguientes parámetros tamaño, forma, pendiente, orientación, altura máxima, medidas del cráter (altura, profundidad, diámetro), y delimitación de la base del edificio volcánico (Grosse, 2012; Figura 3).

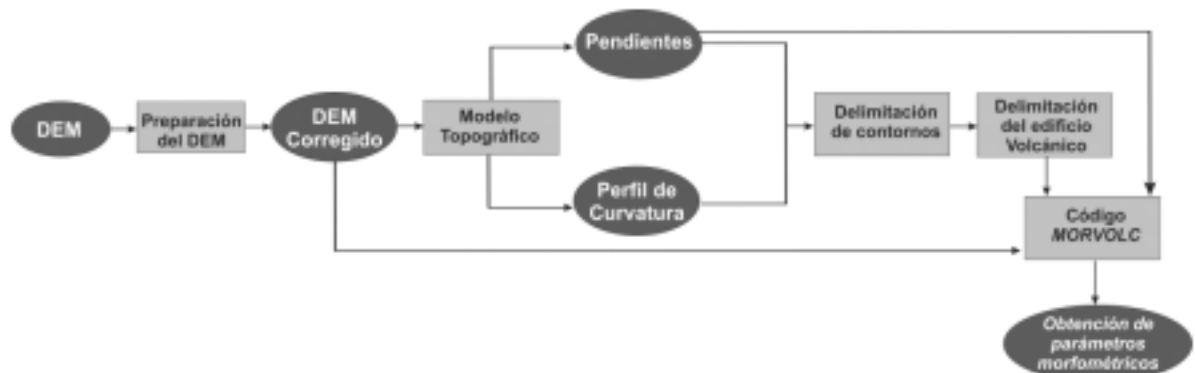


Figura 3. Procedimiento para la extracción de parámetros morfométricos de edificios volcánicos a partir de DEM. Tomado y modificado de Grosse, (2012).

- **Actividad 1.** Se crearon los contornos manuales en el software ArcGis, desde la delimitación de la base del edificio volcánico del VCB (2600 msnm) hasta su tope (4030 msnm), cada 50 m (Figura 5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).
- **Actividad 2.** En el código Morvolc se incluyeron los contornos del VCB, y el DEM de 12.5m, para la obtención de los parámetros morfométricos.

5.2.5 Fase 5 Análisis geomorfológicos y morfométricos.

- **Actividad 1.** Con los resultados obtenidos se procede a realizar una interpretación morfológica del estado evolutivo del VCB.

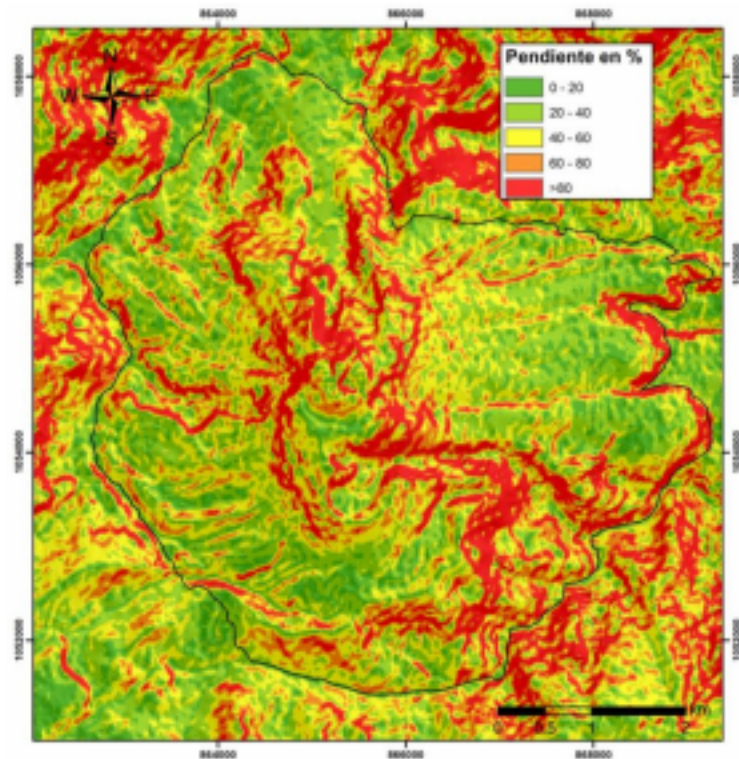


Figura 4. Mapa de pendiente en porcentaje del VCB. La línea muestra la delimitación de la base del VCB.

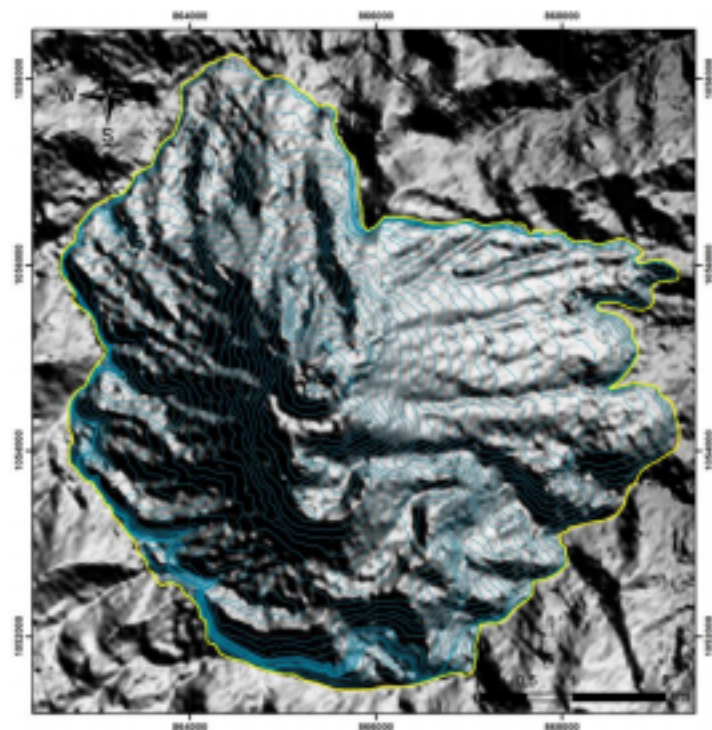


Figura 5. Mapa de sombras con contornos del VCB cada 50 m. La línea amarilla muestra la delimitación de la base del VCB.

6. RESULTADOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

6.1.1 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología hace referencia al análisis cualitativo de formas del relieve, que permiten ser delimitadas a partir de cambios en la topografía tales como pendiente, altura, textura, tono, tipo de drenaje y correlaciones entre las mismas.

El edificio volcánico del VCB se caracteriza principalmente por sus pendientes altas (30%-45%), drenaje de tipo radial centrífugo y subparalelos en la parte basal; las geoformas evidenciadas en escarpes y laderas empinadas, representan alta tasa erosiva (por acción fluvial) de materiales inconsolidados tales como depósitos de corrientes de densidad piroclástica, depósitos de caída, avalanchas de escombros, etc. Mientras que materiales consolidados, como los flujos de lava presentan menor erosión. Los análisis fotogeológicos y de los insumos generados a partir del DEM (pendientes, contornos, etc.), permitieron clasificar 17 unidades geomorfológicas que representan diferentes eventos eruptivos en la evolución del edificio volcánico del VCB (Figura 6).

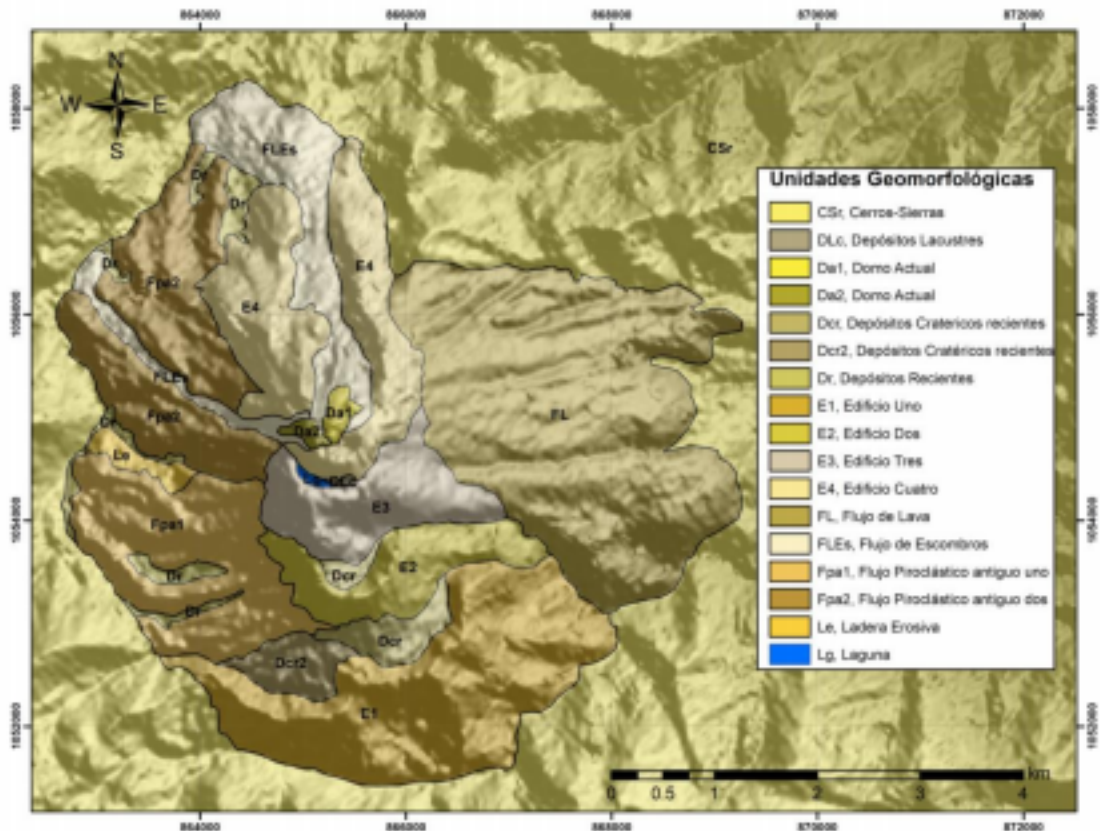


Figura 6. Mapa geomorfológico del Volcán Cerro Bravo. (Ver anexo A)

6.1.1.1 Cerros y Sierras (CSr)

Prominencia topográfica de morfología montañosa, laderas largas a extremadamente largas, cóncavas a convexas, con pendientes de 20 % a 80 % muy inclinadas a abruptas, donde prevalecen procesos de erosión o de movimientos en masa acentuados. Su origen es relacionado a procesos de erosión acentuada en sustratos rocosos ígneos como flujos de lava provenientes del Ruiz ancestral, así como el batolito de El Bosque, a unidades metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca, y a la Formación Casabianca; que hacen parte del basamento del VCB.

6.1.1.2 Edificio Uno (E1)

Ladera casi vertical de longitud variada, forma cóncava y convexa; alturas y pendientes máximas de aproximadamente 3550 msnm y hasta 75 % respectivamente. Su génesis está asociada a los productos volcánicos más antiguos del VCB que forman parte del edificio, en el que se observa una forma craterica parcial con longitud aproximada de 3.8 km y abertura en dirección NW. Además se encuentra afectada por la acción de procesos erosivos fluviales por drenajes de tipo centrífugo y paralelos.

6.1.1.3 Edificio Dos (E2)

Ladera en forma semicircular de menos de 1 km de diámetro con abertura hacia el N y alturas máximas de aproximadamente 3800 msnm, limitada por escarpes con pendientes mayores a 80 % y laderas disectadas por drenajes de tipo centrífugo y paralelos. Representa una morfología suavemente ondulada e irregular hacia las partes basales. Su génesis responde al colapso de un edificio volcánico, a una erupción, o a la acumulación gradual de material piroclástico

6.1.1.4 Edificio Tres (E3)

Ladera en forma semicircular de menos de 1 km de diámetro, con abertura hacia el N y alturas máximas de aproximadamente 3900 msnm, limitada por escarpes con pendientes mayores a 80 % y laderas disectadas por drenajes de tipo centrífugo y paralelos. Representa una morfología suavemente ondulada e irregular hacia las partes basales. Su génesis responde al colapso de un edificio volcánico, a una erupción, o a la acumulación gradual de material piroclástico

6.1.1.5 Edificio Cuatro (E4)

Laderas empinadas, en forma de herradura alargada con abertura hacia el N y alturas máximas de aproximadamente 4020 msnm, limitada por escarpes con pendientes mayores a 80 % y laderas disectadas por drenajes de tipo centrífugo y paralelos, pertenecientes a rocas competentes. Su génesis responde al colapso del edificio volcánico por una erupción.

6.1.1.6 Domo Actual Uno (Da1)

Estructura en forma cónica redondeada y elongada en dirección NE con altura máxima de 4020 msnm y altura total a 320 m, de superficie irregular, con pendientes abruptas a suaves. En el edificio volcánico se puede localizar dentro del cráter o en una de sus laderas. Su génesis se asocia a la extrusión de lava muy viscosa, que en ocasiones puede alcanzar a fluir un poco, conformando lo que se denomina domo colada.

6.1.1.7 Domo Actual Dos (Da2)

Estructura en forma de cónica redondeada y elongada en dirección NW con altura máxima de 4000 msnm y altura total a 280 m, de superficie irregular, con pendientes abruptas a suaves. En el edificio volcánico se puede localizar dentro del cráter o en una de sus laderas. Su génesis se asocia a la extrusión de lava muy viscosa, que en ocasiones puede alcanzar a fluir un poco, conformando lo que se denomina domo colada.

6.1.1.8 Flujo de Escombros (FLEs)

Lóbulo alomado de aspecto tabular plano y suavemente inclinado (2° - 3°). Localmente se localiza en dirección NE y NW y paralelo a los ríos a los cuales limita. Su génesis se encuentra asociada al colapso de los domos del VCB y como producto del reabajamiento de los materiales volcánicos presentes en el área, gracias a la acción de cuerpos de agua superficiales y la gravedad

6.1.1.9 Flujo Piroclástico antiguo (Fpa1 y Fpa2)

Su génesis está asociada a la acumulación de productos volcánicos generados durante la erupción o previamente depositados, que han sido mezclados o removidos por cuerpos de aguas superficiales. Estos depósitos así acumulados van quedando elevados conforme la corriente hídrica va erosionando y recobrando su cauce. La unidad Fpa2, se encuentra limitada al Norte por el río Perrillo.

6.1.1.10 Flujo de Lava (FL)

Superficie lobulada en dirección E, limitado por escarpes de alturas que van desde 2600 msnm hasta 3440 msnm, con pendientes entre 20 % - 60 % y formas de laderas variadas dependiendo de la composición, viscosidad, cantidad de gases, volumen del magma emitido y la topografía preexistente sobre la que se depositó. Su génesis está asociada a la extrusión y posterior enfriamiento de flujos de lava.

6.1.1.11 Depósitos Cratéricos Recientes (Dcr y Dcr2)

Depósito con morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. Su origen es relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas blandas o friables y en sedimentos no consolidados pertenecientes al edificio volcánico.

6.1.1.12 Depósitos Recientes (Dr)

Superficies de acumulación en declive de morfología alomada o colinada, pendiente inclinada a escarpada, la longitud varía entre corta y muy larga, dependiendo de la topografía de la zona de depositación. El patrón de drenaje es subdendrítico a subparelo. Se puede formar como productos erosivos residuales de depósitos coluviales, aluviales o retrabajamiento de material volcánico.

6.1.1.13 Ladera erosiva (Le)

Corresponde a superficies del terreno de pendientes muy inclinadas a escarpadas, de longitudes moderadas, de formas planas, cóncavas y convexas, patrón de drenaje típico dendrítico a subparalelo. Presenta procesos erosivos intensos como cárcavas, surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo o roca.

6.1.1.14 Laguna (Lg)

Depósito natural de agua de dimensiones inferiores, en relación a los lagos tanto en área como en profundidad. Dicha profundidad varía de acuerdo a las condiciones ambientales. Las lagunas de origen fluvial, se relacionan con la inundación de antiguas depresiones durante la época de alta pluviosidad, estas pueden permanecer incluso en épocas secas ya que son pobremente drenadas.

6.1.1.15 Depósitos Lacustres (DLc)

Depósito de origen lacustre que se encuentra colmatado por la alta acumulación de sedimentos y por el grado de confinamiento que presenta la laguna.

6.1.2 MORFOMETRÍA.

Los estudios morfométricos en estructuras volcánicas tienen como objeto establecer y diferenciar el estado de evolución y degradación del paisaje volcánico y así, poder determinar un modelo evolutivo a partir de la relación cuantitativa existente entre diferentes parámetros medidos (Aguilar & Piedrahita, 2017).

Con base en la metodología implementada por Grosse et al. (2011), se cuantificaron 17 parámetros morfométricos (*Tabla 1*), y se crearon contornos del edificio volcánico

(cada 50 m, *Figura 7*), mapa de pendientes y mapa de sombras, extraídos del DEM de resolución espacial de 12.5m, (*Figura 8*).

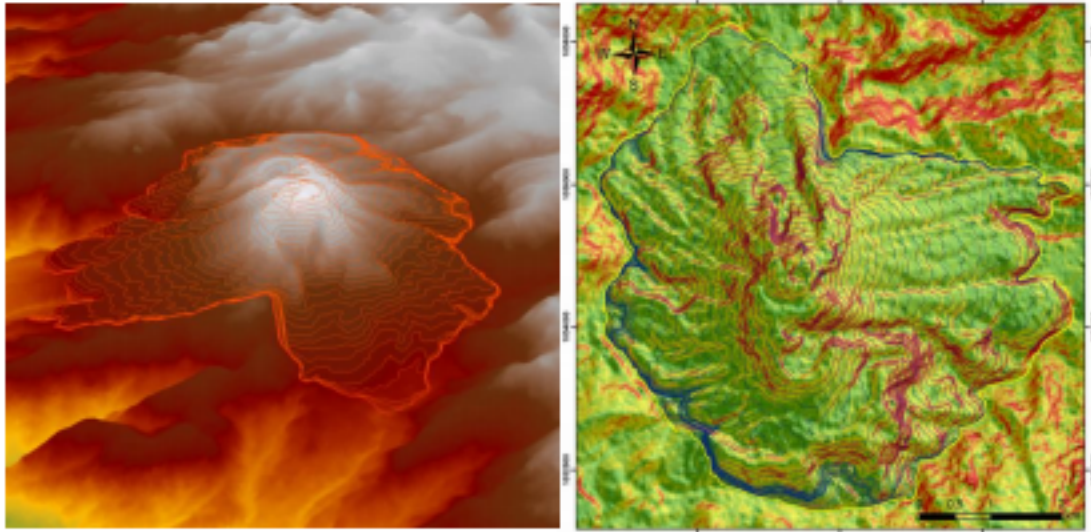


Figura 7. Izquierda: Modelo 3D con contornos del VCB. Derecha: Mapa de pendientes con los contornos cada 50 m del VCB (Ver Anexo B, C, D).

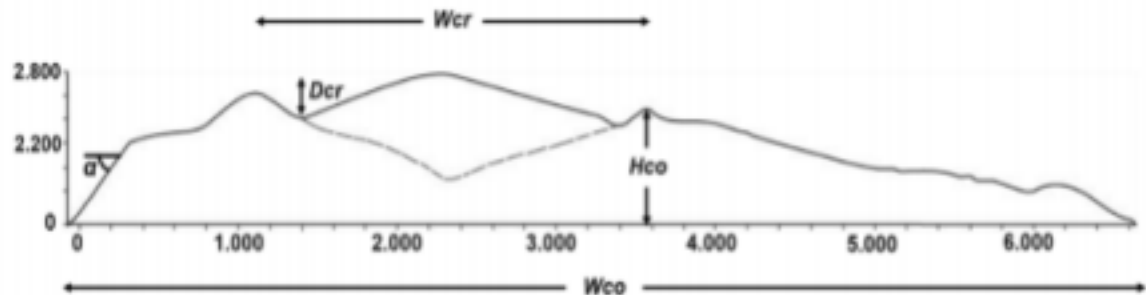


Figura 8 Parámetros morfométricos para volcanes monogenéticos con base en Porter (1972). W_{cr} : diámetro del cráter, H_{co} : altura del cono. D_{cr} : profundidad del cráter. Imagen tomada de Aguilar & Piedrahita, 2017.

La delimitación del edificio volcánico se realizó en el Software ArcGis, siguiendo los cambios en las pendientes, textura y geomorfología de la zona sin tener en cuenta los depósitos volcanoclasticos distales (Grosse et al., 2009). La base del edificio volcánico se trazó en la cota de 2600 msnm, con un área $\sim 29.26 \text{ km}^2$ y un diámetro 7140 m. La altura máxima del edificio se sitúa en la cota de 4030 msnm y el volumen calculado de toda la estructura volcánica es de $\sim 22.31 \text{ km}^3$. Con base en los parámetros morfométricos extraídos tanto del algoritmo Morvolc como de ArcGis, se pudo calcular los índices de elipticidad (ei), irregularidad (ii), H_{co}/W_{co} y W_s/W_B , propuestos por Grosse et al. (2009), que permiten cuantificar y caracterizar de forma directa al VCB (*Tabla 1*).

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DEL VCB	VALORES
Altura basal (m.s.n.m)	2600
Altura del cráter (m.s.n.m)	4030
Altura del cono (Hco) (m)	1430
Diámetro basal (Wco) (km)	7.14
Diámetro del cráter (km)	0.15
Profundidad máxima del E4 (m)	105
Radio basal Rb (km)	3.57
Radio del cráter (km)	0.075
Volumen (km ³)	22.32
Índice Hco/Wco	0.20
Pendiente máxima (°)	78.53
Pendiente mínima(°)	0
Área edificio (km ²)	29.26
Área cráter (km ²)	0.0135
Perímetro edificio(km)	25.59
Perímetro cráter(km)	0.43
Índice W _s /W _a	0.021
Índice de elipticidad	1.61
Índice de irregularidad	1.45

Tabla 1. Parámetros Morfométricos del VCB.

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.2.1 Geomorfología

La morfología del edificio volcánico presenta cuatro cráteres parcialmente conservados, con abertura en dirección N y dos domos (Unidad Da1, Da2) que evidencian el último episodio eruptivo de tipo efusivo. Los cráteres se encuentran encajonados o concatenados (Flórez, 2003) y representan la migración del conducto hacia el NW.

Según Thouret et al. (1985), se puede diferenciar un VCB moderno (Holoceno y Cuaternario muy reciente) con una caldera aproximadamente de 10 km de diámetro constituido por depósitos piroclásticos (Unidad E4), los cuales están descansando sobre el VCB más antiguo (Unidad E3, Pleistoceno Inferior) compuesto por flujos de lavas, depósitos piroclásticos y de caída.

Por otro lado los depósitos representados en las unidades Fpa1 y Fpa2 son resultado de las corrientes de densidad piroclástica concentrada, especialmente depósitos de ignimbrita. Estos depósitos son de una consolidación y densidad muy bajas, por lo que los flujos de agua pueden disectar muy fácilmente estos materiales y crear valles pequeños pero profundos, transportando gran cantidad de material (Flórez, 2003). El VCB además, presenta dos depósitos de las mismas

características, que van en dirección norte y este que alcanzaron distancias notorias, sin embargo, dichos depósitos no son objeto de estudio de este trabajo.

El VCB, registra en los últimos 14 ka, tres eventos de crecimiento de domos (Monsalve, 1991), como respuesta a las fases finales de las erupciones plinianas del volcán (Lescinsky, 1990; Ingeominas, 1991; Monsalve & Nuñez, 1992). Los depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza (al E del VCB) son las evidencias de la destrucción de estos domos (Lescinsky, 1990; Monsalve, 1991; Díaz, 1991), que se asocian a erupciones de tipo vulcanianas o peleanas (Freundt et al., 2000; Branney & Kokelaar, 2002).

En el análisis geomorfológico realizado al VCB, se han logrado identificar y corroborar 4 edificios volcánicos, siendo el Edificio 1 (extremo sur) el más antiguo, y sobre el cual se encuentran escalonados los domos y cráteres más recientes, ordenados por antigüedad en un sentido Sur-Norte, hasta el E4, el cual se encuentra parcialmente destruido con un flujo de escombros en dirección S-N (Monsalve, 1991) probablemente como producto del colapso de los domos intracráticos.

Este escalonamiento se debe a la característica explosiva del volcán, el cual va construyendo, destruyendo y depositando material volcánico (lavas-unidad FL, depósitos de flujos piroclásticos-unidad Fpa, etc.) con cada episodio de actividad; lo que se relaciona claramente con un volcán poligenético de tipo compuesto. El surgimiento y destrucción de los domos dan origen a los flujos de escombros (unidad FLes) encontrados a lo largo del volcán, así como depósitos producto del colapso de los cráteres antiguos en sus etapas más activas.

Dentro de la unidad E3 se observa una laguna, parcialmente colmatada, producto de la alta pluviosidad de la zona y el confinamiento del mismo.

6.2.2 Morfometría

La forma y el tamaño de los volcanes son el resultado de complejas evoluciones, involucrando las interacciones de procesos agradacionales (efusión, depositación) y degradacionales (erosión, deformación); asimismo, estudios morfológicos del volcán pueden dar perspectivas sobre estos procesos y sus causas, como por ejemplo ajustes tectónicos, composición magmática, estilo eruptivo y climatología. (Aguilar & Piedrahita, 2017)

Los parámetros morfométricos utilizan relaciones matemáticas y algoritmos (código *MORVOLC*), que permiten representar con datos cuantitativos valores tales como alturas, pendientes, volumen, diámetro, etc. El VCB es un volcán compuesto, es decir, un volcán poligenético que se forma por diferentes eventos eruptivos provenientes de un mismo sistema magmático a través de un vent (De Silva & Lindsay, 2015); se caracteriza por tener una altura máxima correspondiente a 4030 msnm y posee un volumen $\sim 22.31 \text{ km}^3$.

Grosse et al., (2013) realiza un análisis morfológico de diferentes volcanes alrededor del mundo, en dicha investigación crea una base de datos con parámetros morfométricos de algunos volcanes de Colombia. Cabe destacar, que algunos datos arrojados en dicha investigación carecen de precisión, ya que no toman en cuenta características típicas de cada volcán. Sin embargo, existen datos que pueden ser utilizados para establecer bases comparativas. En Colombia se han realizado dos trabajos morfométricos: Samacá, (2016) realiza un estudio morfométrico y geomorfológico de la caldera del Paletará en el Cauca; y Aguilar & Piedrahita, (2017) un análisis estratigráfico y morfológico del Volcán Cerro Machín (VCM).

De acuerdo con las investigaciones previamente descritas se realiza un análisis comparativo entre el VCB, el VCM, el volcán Nevado de Tolima y el volcán Puracé pertenecientes al territorio Colombiano. Por ejemplo el VCB, triplica el volumen del VCM (7 km³). Por otro lado, si se compara con el volcán Puracé la diferencia en volumen es mucho mayor (Tabla 2).

Parámetros morfométricos	Volcán Cerro Bravo	Volcán Cerro Machín (Aguilar & Piedrahita, 2017)	Volcán Puracé (Samacá, 2016)	Volcán Nevado del Tolima (Grosse et al., 2013)
Altura máxima	4030msnm	2750msnm	4650msnm	5210msnm
Pendiente media	39.26	33.72	26.09	20.4
Volumen	22.31 km ³	7km ³	0.17km ³	21km ³
Índice de elipticidad (ei)	1.61	1.40	1.26	ND
Índice de irregularidad(ii)	1.45	1.30	1.13	ND

Tabla 2. Tabla comparativa de parámetros morfométricos entre el VCB y Volcán Cerro Machín, Volcán Puracé y Volcán Nevado del Tolima.

Aguilar & Piedrahita (2017), describen la cuantificación de la forma del perfil de los volcanes utilizando los parámetros de tamaño. Dos relaciones resumen la forma del perfil de un edificio volcánico: En la Figura 1Figura 9 se muestra la relación altura/ancho basal (H_{co}/W_{co}) y ancho de la cumbre/ancho basal (W_s/W_b) del VCB, que evidencia una tendencia clara a una forma cónica y amplia en su zona basal (la relación H_{co}/W_{co} es una estimación de la pendiente total del edificio, mientras que la relación W_s/W_b calcula el punto de referencia del edificio); otras proporciones considerables hacen referencia a la cima y/o dimensiones del edificio; por lo que la relación W_s/W_b evalúa la importancia relativa de la región de la cumbre y, generalmente se correlaciona con el tamaño del cráter. Los valores i_i y i_e más cercanos a 1 definen una forma circular en planta de los volcanes (Grosse et al., 2013).

Finalmente el VCB presenta valores en relación altura/ancho basal $H_{co}/W_{co}=0.20$ y ancho de la cumbre/ancho basal $W_s/W_B=0.0$, lo que representa una forma cónica del edificio volcánico (Figura 9), por otro lado los valores entre índice de elipticidad ($ie=1.61$) vs índice de irregularidad ($ii=1.45$, Figura 10) representan una forma semicircular e irregular del edificio volcánico.

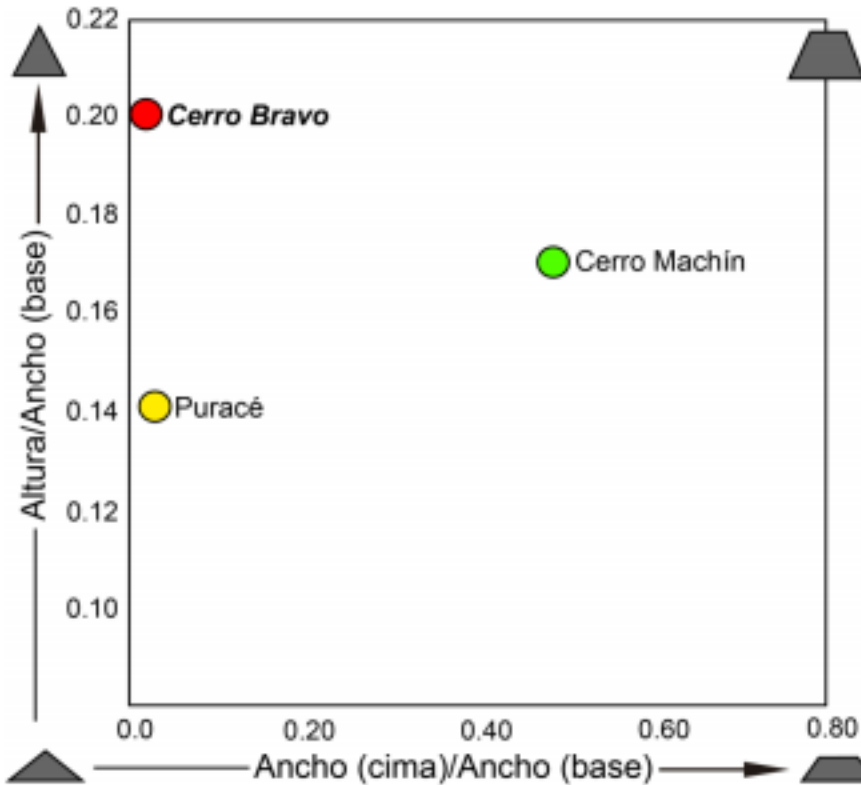


Figura 9. Relación altura/ancho basal (H_{co}/W_{co}) y ancho de la cumbre/ancho basal (W_s/W_B) del VCB. Imagen adaptada de Aguilar & Piedrahita (2017)

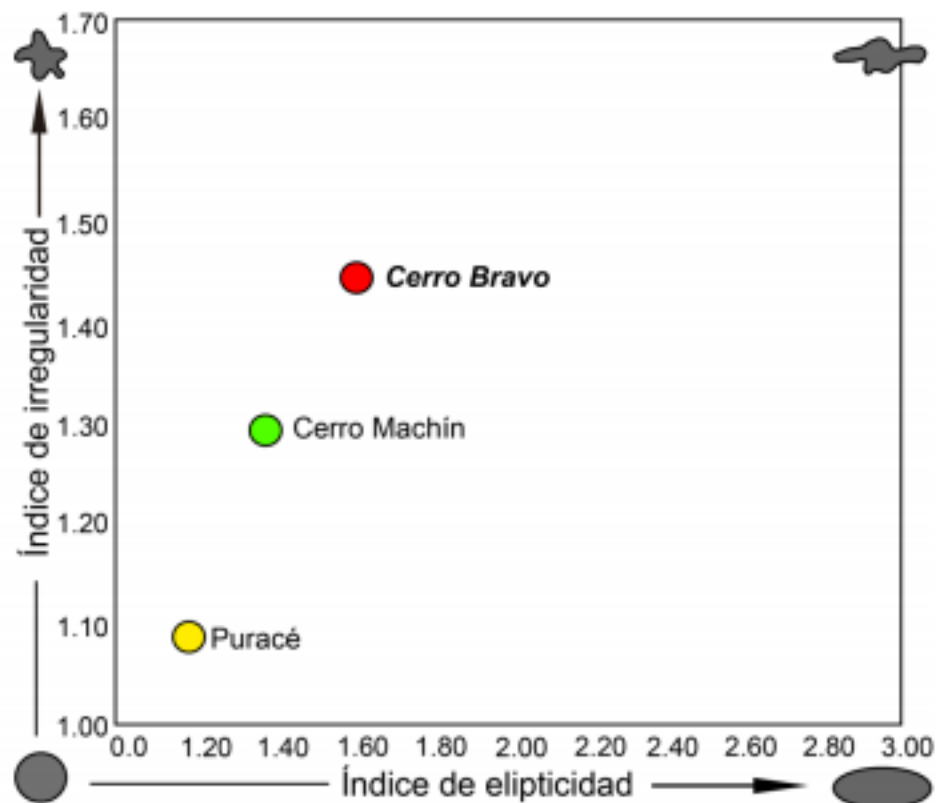


Figura 10. Relación entre índice de elipticidad vs índice de irregularidad del VCB. Imagen adaptada de Aguilar & Piedrahita (2017).

7. CONCLUSIONES

- Se delimitaron diecisiete unidades geomorfológicas, que permitieron identificar las diferentes etapas de construcción y destrucción del edificio volcánico del VCB.
- Se identificaron cuatro etapas eruptivas importantes, con una migración hacia el NW del conducto volcánico, reflejadas en el edificio del VCB y evidenciadas en las unidades geomorfológicas E1, E2, E3, E4.
- Posterior al emplazamiento de los domos Da1 y Da2 (representantes de la última fase efusiva de la última erupción), existió un colapso gradual de los mismos, evidenciados en la unidad geomorfológica FLEs.
- Las altas pendientes ($\sim 78.53^\circ$) que caracterizan el edificio del VCB indican que los materiales que componen las diferentes unidades geomorfológicas y geológicas son inconsolidados y altamente erosionables.
- El índice de elipticidad (1.61) e irregularidad (1.45) indican que el edificio del VCB es ligeramente circular y medianamente irregular.
- La relación altura/ancho basal (H_{co}/W_{co})=0.2 y ancho de la cumbre/ancho basal (W_s/W_B)=0.021, indica una forma principalmente cónica.
- El volumen del edificio volcánico correspondiente a 22.31 km^3 y la extensión de las unidades geomorfológicas ratifican el carácter explosivo del VCB y la importancia de realizar estudios más detallados.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda apoyar los análisis geomorfológicos con estudios a partir de tratamiento de imágenes satelitales, para la generación de modelos de elevación digital de mayor resolución y así poder complementar la morfología del VCB.

Análisis cartográficos y evolutivos, apoyados en geocronología, petrografía, geoquímica, y campo son recomendados para una mejor interpretación del comportamiento volcánico del VCB.

La información complementaria a este trabajo permitirá realizar estudios futuros de riesgo y amenaza volcánica.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, C., Piedrahita, D. A., 2017. Estratigrafía del cráter y morfología del Volcán Cerro Machín, Colombia. Tesis pregrado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, pp. 131.
- Alarcón E., 2017. Características y condiciones de formación del depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza soldado Herveo (DFPH), volcán Cerro Bravo, Colombia Tesis pregrado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, pp. 91.
- Barrero, D., Vesga, C.J., 1976. Mapa geológico del Cuadrángulo K-9 Armero y mitad sur del Cuadrángulo J-9 La Dorada. Escala 1:100000. INGEOMINAS, Bogotá, pp.133.
- Borrero, C.A., Naranjo, J.L., 1990. Casabianca Formation: A Colombian example of volcanism-induced aggradation in a fluvial basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 253-267.
- Borrero, C., Murcia, H., Agustín-Flores, J., Arboleda, M. T., Giraldo, A. M., 2016. Pyroclastic deposits of San Diego maar, central Colombia: an example of a silicic magma-related monogenetic eruption in a hard substrate. In: Németh, K., Carrasco-Núñez, G., Aranda-Gómez, J. J. & Smith, I. E. M. (Eds) *Monogenetic Volcanism*. Geological Society, London, Special Publications, 446, 1-14.
- Bourdon, E., Eissen, J. P., Gutscher, M. A., Monzier, M., Hall, M. L., Cotten, J., 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth and Planetary Science Letters*, 205, 123-138.
- Branney, M.J., Kokelaar, B.P., 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geological Society of London*, 27, 152 p.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE 2009. Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020. Estudios postcensales no.7 ISBN 978-958-624-078-9 Bogotá, pp. 300.
- Díaz, J., 1991. Estudios geológicos y vulcanológicos para la elaboración del mapa preliminar de amenaza volcánica potencial de Cerro Bravo. Trabajo de grado, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia, pp. 145.
- De Silva, S., & Lindsay, J. M. (2015). Primary volcanic landforms. En: Sigurdson, H. (Eds): *The Encyclopedia of Volcanoes* -Academic Press: 273-297.
- Druitt, T.H., 1998. Pyroclastic density currents. *Geological Society, London, Special Publications*, 145, 145-182.

- Flórez, A. (2003). Colombia: Evolución de sus relieves y modelados. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. Red de Estudios de Espacio y Territorio. 67-76.
- Fisher, R.V., 1966. Mechanism of deposition from pyroclastic flows. *American Journal Science*, 264, 350-363.
- Freundt, A., Wilson, C. J. N., Carey, S. N., 2000. Ignimbrites and block-and-ash flows. – En: Sigurdson, H. (Eds): *The Encyclopedia of Volcanoes* -Academic Press: 581-600.
- Gutiérrez, M. (1990) Historia de la Geomorfología. En: Historia de la geología. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, 115-131.
- Gutiérrez, M (2005). *Climatic Geomorphology*. Elsevier. Amsterdam, 760 p.
- Gutierrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid: Pearson Prentice Hall, 340 p.
- Grosse, P., van Wyks de Vries, B., Petrinovic, I. A., Euillades, P. A., Alvarado, G., 2009. Morphometry and evolution of arc volcanoes. *Geology* 37, 651-654.
- Grosse, P., van Vyk de Vries, B., Euillades, P. A., Kervyn, M., Petrinovic, I. A., 2012. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology* 136, 114-131.
- Grosse, P., Euillades, P. A., Euillades, L. D., De Vries, B. V. W., 2013. A global database of composite volcano morphometry. *Bulletin of Volcanology*, 76, 784.
- Ingeominas, 1991. Mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Cerro Bravo. Instituto de Investigación en Geociencias Minera y Química Regional Alto Magdalena-Ibague. 147 p.
- Kilburn, C. R., 2000. Lava flows and flow fields. En: Sigurdson, H. (Eds): *The Encyclopedia of Volcanoes* -Academic Press: 291-305.
- Lescinsky, D.T., 1990. Geology, volcanology, and petrology of Cerro Bravo, a young, dactic, stratovolcano in west-central Columbia. MSc Thesis. Louisiana State University, EE.UU. 244 p.
- Lugo-Hubp, J., 1989. *Diccionario geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 337.
- Martínez T., Valencia R., Ceballos H., Narváez M., Pulgarín A., Correa T., Navarro A., Murcia A., Zuluaga M., Rueda G., Pardo V., 2014. Geología y estratigrafía del

Complejo Volcánico Nevado del Ruiz. Informe final, Bogotá – Manizales – Popayán. Servicio Geológico Colombiano, pp. 853.

Maya, M., González, H., 1995. Unidades litodémicas en la Cordillera Central de Colombia. Boletín Geológico, Ingeominas 35, 43-57.

Méndez, R. & Patiño, J., 1994. Estudio tefroestratigráfico de los volcanes del Complejo Machín-Cerro Bravo. Proyecto P93F02. INGEOMINAS, Informe interno, Manizales, pp. 19.

Monsalve, M.L., 1991. Mapa preliminar de amenaza volcánica del Volcán Cerro Bravo, INGEOMINAS, Informe interno, Manizales, pp. 147.

Murcia, H.F., Borrero, C. A., Pardo, N., Alvarado, G., Amosio, M. Scolamacchia, T., 2013. Depósitos volcánoclasticos: Términos y conceptos para una clasificación en español. Revista Geológica de América Central, 48, 15-39.

Norini, G., Gropelli, G., Capra, L., De Beni, E., 2004. Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): new insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano. *Geomorphology*, 62, 47-61.

Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Alaníz-Álvarez, S. A., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Morán-Zenteno, D. J., 1991. Geologic provinces of Mexico: a new proposal and bases for their definition. En Convención sobre la evolución geológica de México y Primer Congreso Mexicano de Mineralogía. Sociedad Mexicana de Mineralogía y Secretaría de Educación Pública, Hgo. Memorias, 143-144.

Pennington, W., 1981. Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86, 10753-10770.

Peña-Monné, J. L., 1997. Cartografía geomorfológica básica y aplicada. *Geofoma*, pp. 227.

Samacá Torres, W., 2016. Análisis morfométrico y Geomorfológico de la Caldera de Paletará (Cauca), Colombia Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia–Sede Bogotá, pp. 132.

Servicio Geológico Colombiano. 2017. Mapa de amenaza Volcán Cerro Bravo. <http://www2.sgc.gov.co/Manizales/Volcanes/Volcan-Cerro-Bravo/Mapa-de-Amenaza.aspx>.

Summerfield, M. (2014). *Global geomorphology*. Prentice Hall. 6 p

Székely, B., & Karátson, D., 2004. DEM-based morphometry as a tool for reconstructing primary volcanic landforms: examples from the Börzsöny Mountains, Hungary. *Geomorphology*, 63, 25-37.

Thouret, J. C., Murcia, A., Salinas, R., Vatin-Perignon, N., 1985. Aspectos volcano estructurales y dinamismo eruptivo reciente de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima, Cordillera Central de Colombia. In *Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Geología*. Bogotá, 1, 269-288.

Toro Toro, L. M., Borrero-Peña, C. A. & Ayala Carmona, L.F., 2010. Petrografía y geoquímica de las Rocas ancestrales del volcán Nevado del Ruiz. *Boletín de Geología*, 32, 95-105.

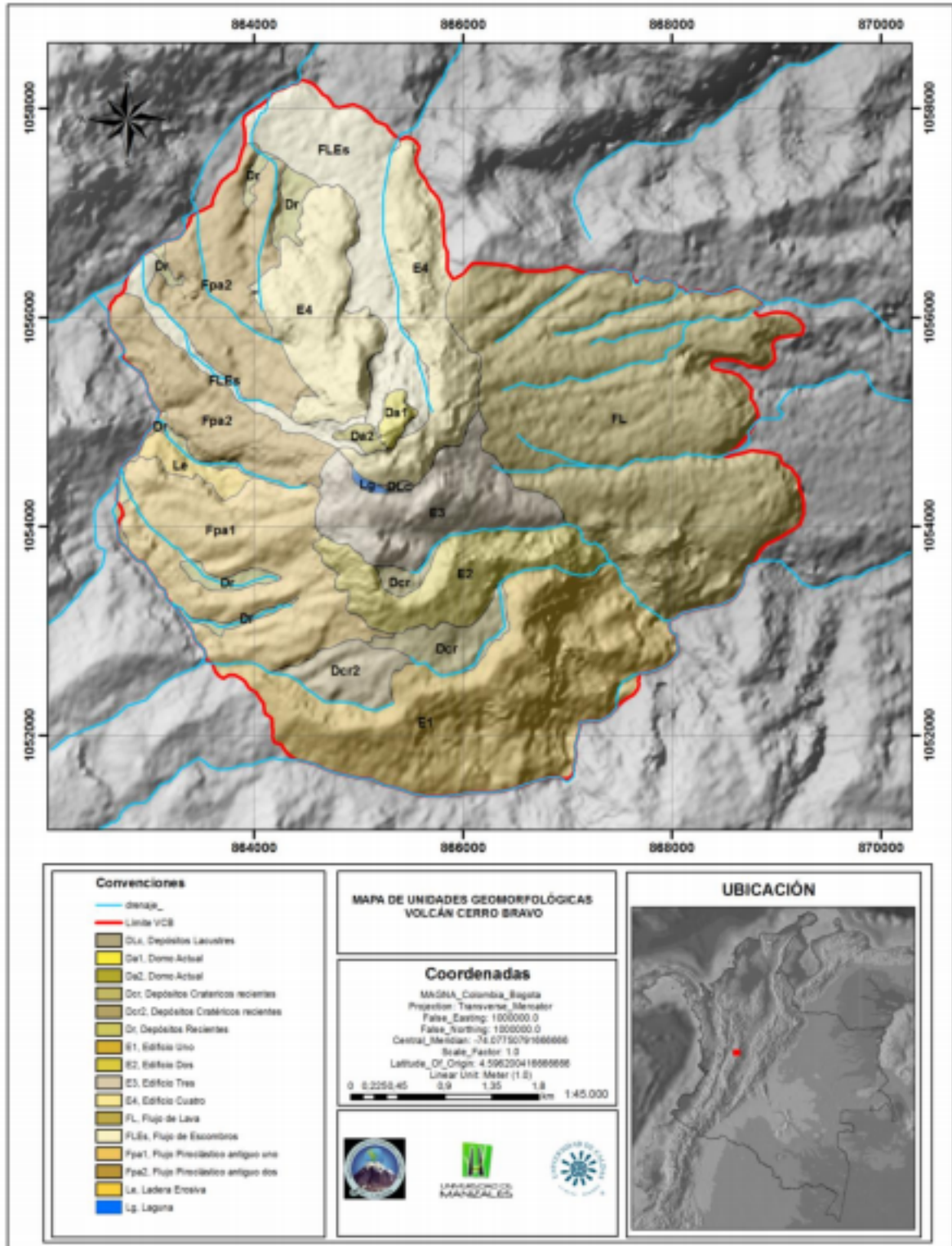
Valentine, G. A., & Fisher, R. V., 2000. Pyroclastic surges and blasts. En: Sigurdson, H. (Eds): *The Encyclopedia of Volcanoes* -Academic Press:, 571-580.

Ventura, G., & Vilaro, G., 2006. Tomomorphometry of the Somma-Vesuvius volcano (Italy). *Geophysical research letters*, 33 p.

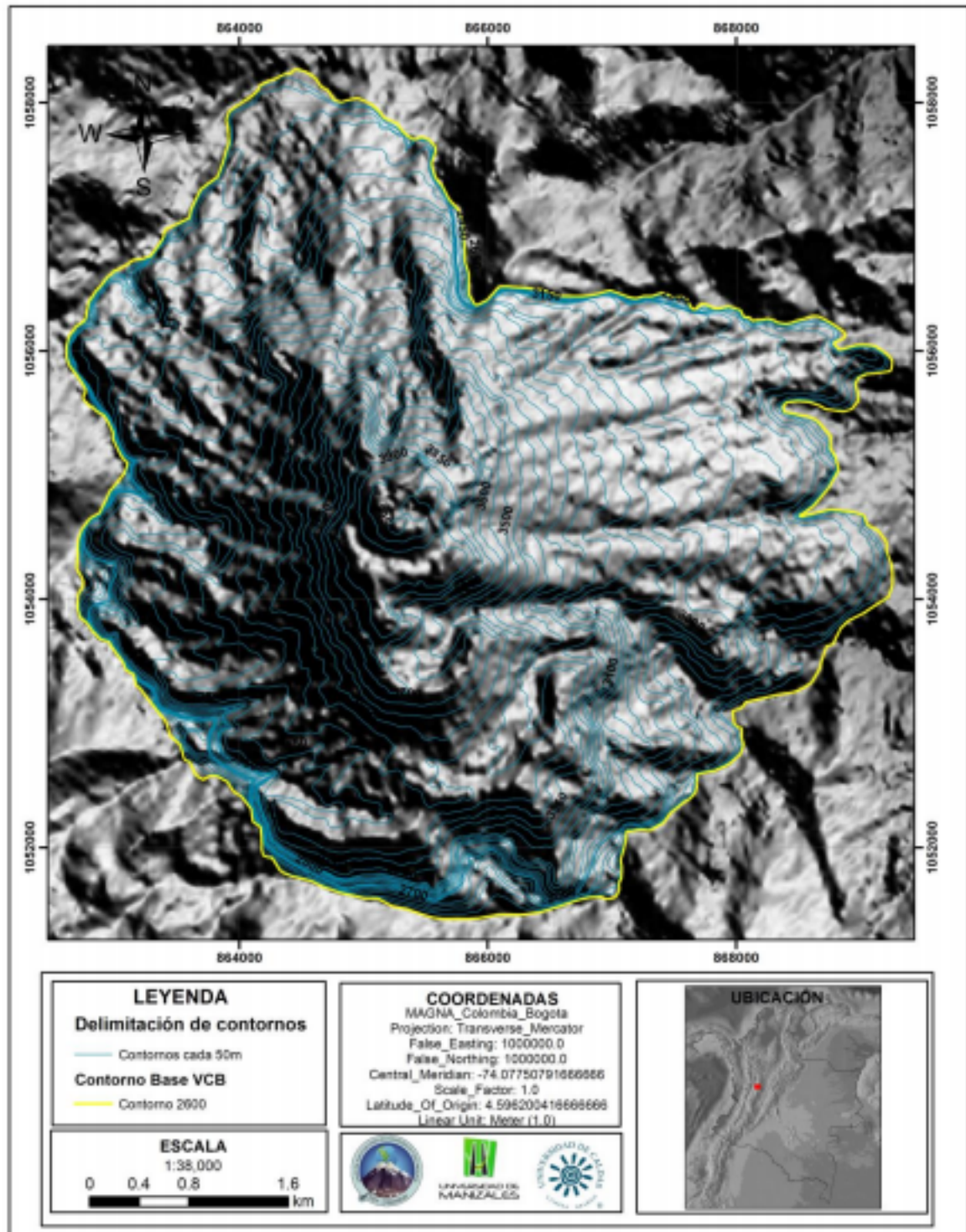
Verstappen, H., Van Zuidam, R., 1991. El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos: Una base para la evaluación de recursos y riesgos naturales. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, ITC Publication 10, pp. 89.

Wilson, C.J.N., Houghton, B.F., 2000. Pyroclastic transport and deposition. En: Sigurdson, H. (Eds): *The Encyclopedia of Volcanoes* -Academic Press:. 554p.

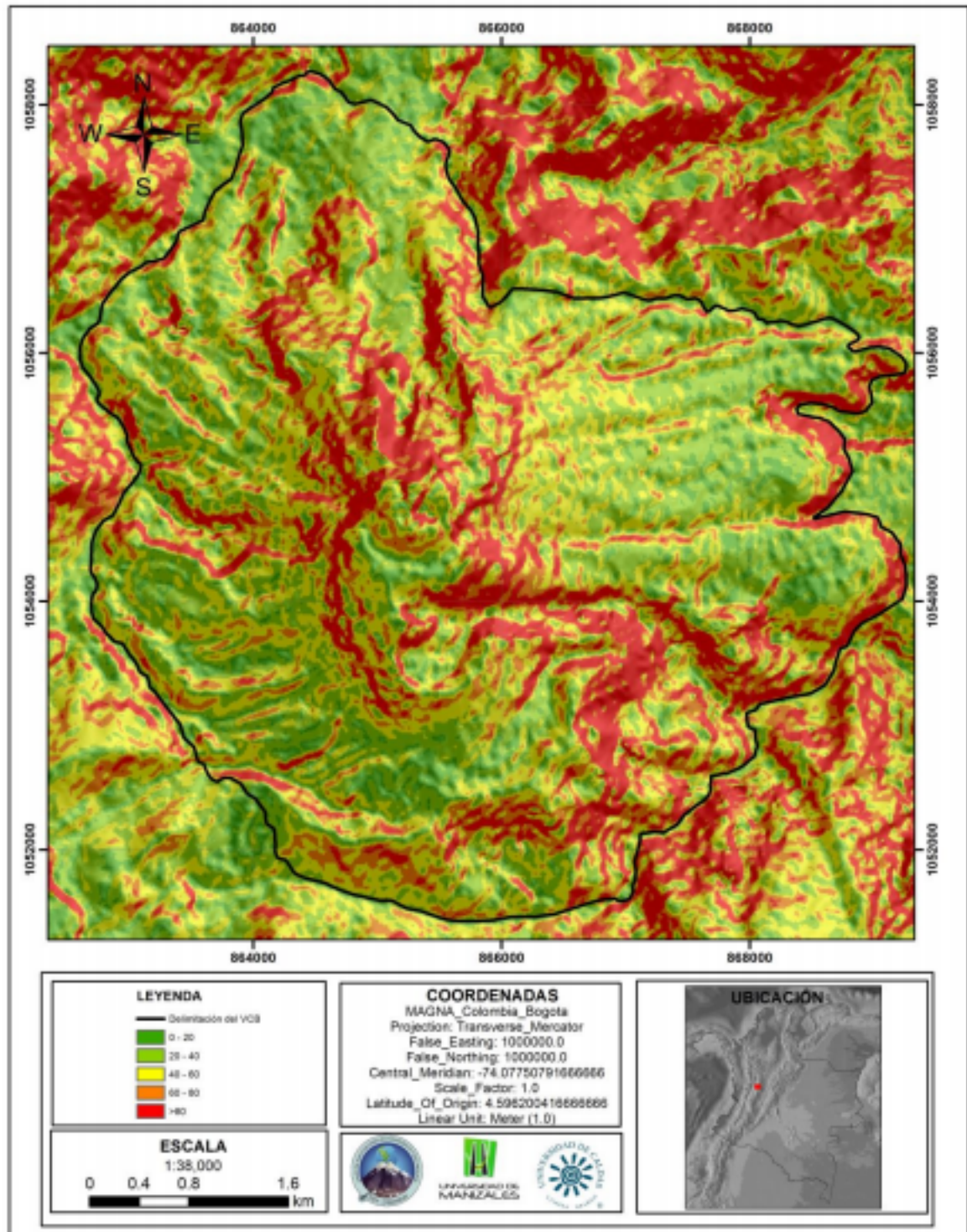
ANEXO A Mapa geomorfológico del Volcán Cerro Bravo



ANEXO B Mapa de contornos del Volcán Cerro Bravo



ANEXO C Mapa de pendiente en porcentaje del Volcán Cerro Bravo



ANEXO D Mapa de pendiente en grados del Volcán Cerro Bravo

