

**PROPUESTA DE ESCALA DE MEDICIÓN DEL POTENCIAL DESTRUCTIVO DE
LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN EL TERRITORIO.**

**LINA MARÍA MERA URIBE
ROBERTO JULIÁN SANDOVAL REYES**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
PROGRAMA DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI
2019**

**PROPUESTA DE ESCALA DE MEDICIÓN DEL POTENCIAL DESTRUCTIVO DE
LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA EN EL TERRITORIO.**

**LINA MARÍA MERA URIBE
ROBERTO JULIÁN SANDOVAL REYES**

Trabajo de Grado para obtener el título de Geógrafo

Director MSc. JHONATTAN FERNÁNDEZ CÓRDOBA

**UNIVERSIDAD DE VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DEL GEOGRAFÍA
PROGRAMA DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI
2019**

AGRADECIMIENTOS

Principalmente, le agradezco a Dios por mostrarme el camino que me llevo a conocer la Geografía y enamorarme de esta carrera. A mis padres, Sandra y José Luis por ser el motivo de este trabajo y cada paso en mi vida, al igual que mis dos hermanas, Daniela y Nataly.

No podría pasar por alto, el no agradecerle a nuestro director, compañero y amigo Jhonattan Fernández, quien, con su paciencia y entrega, hizo parte fundamental de la culminación de este proceso académico, no pudimos tener un mejor guía para sacar adelante esta investigación; a Roberto por su paciencia en los momentos de crisis académica y también personales.

Durante los últimos años de carrera universitaria, caer en crisis emocional fue inevitable, sin embargo, Elkin de Jesús Salcedo y su OSSO, llego a mostrarme una línea de investigación que podría darme un espacio de tranquilidad y a partir de esto, se conformó un grupo del cual solo tengo recuerdos y anécdotas bonitas, Nathalie, Lizeth, Danny, Omar, Daniela, Yeli, Nisley, Mario, Sebas, Diana y Luisa R gracias por ser un apoyo constante en el trabajo, en el trabajo de grado y en la vida.

No siendo menos, tuve los mejores compañeros de clase a los que les debo agradecer el hecho de haber construido una amistad tan linda y ser quienes nos aplaudíamos cuando nadie más lo hacía. Por los días de río como excusa de trabajos, por las discusiones y reconciliaciones, por el amor tan grande que siempre habrá entre estos 5 geógrafos, a ti gracias, Erika, Fabian, Juan Felipe O y como faltar, mi amigo, quien siempre fue y es el 24/7 en mi vida, Kevin ORLANDO Reyes. Gracias a mis compañeros de conversaciones profundas sobre la Universidad, sobre Geografía y sobre la vida. A Carlos y Katty por ser quienes siempre estuvieron dispuestos a darme su mano en cuanto a sugerencias académicas y de vida se trataba. A Lu, Óscar, Stiven, Iván, Víctor, Harry, Paulis, Nata, Cindy, Johan y demás compañeros, al igual que maestros que estuvieron en el proceso académico, en especial Ramón Serna y Cecilia Orozco, muchas gracias.

Por último, quiero agradecerle a Lilia María y Mauricio, por apoyarme e impulsarme a creer en mí y hacerme ver que no se necesita de mucho para ser grande, solo ganas.

Lina María Mera.

Quiero empezar agradeciendo a la gran institución educativa que me acogió, me enseñó, me brindó amigos y me encaminó en una ruta académica llena de buenas experiencias. Gracias Univalle por ser hogar de pensamientos críticos, inconformismo, conocimiento y lucha por el progreso. Agradecer a mi padre, el gran Roberto Sandoval, por servirme de guía, por brindarme siempre los mejores consejos, por ser un gran ejemplo y ser esa persona que siempre me ha impulsado a no detener mi ruta académica. A mi madre, la bella Ruby Reyes, por su apoyo, energía y respaldo incondicional en mi camino universitario y en mi diario vivir. También debo mencionar a mi tía Julieta, por ser uno de los ejemplos de esfuerzo, perseverancia y ganas de salir adelante por medio de un mundo académico, además de haber sido la persona que me brindó ese primer empujón para empezar mi carrera universitaria. Le agradezco a Yauri Hernández porque a pesar de que no estuvo presente en todo mi proceso académico, ha sido parte crucial para cerrar este ciclo. A ella por ser mi compañera del día a día y estar conmigo en cada caída y levantada. Gracias a mi abuela Aracely, que también podría mencionarla como mi madre, siendo un apoyo y respaldo desde el inicio de mis días hasta la actualidad. Gracias a mi hermana Carolina, por las charlas, intercambio de ideas, tiempo compartido y las ayudas brindadas a lo largo de todo este proceso. A mi familia en general gracias, por estar siempre con los brazos abiertos, y aprovecho para agradecer a la vida por permitirme ser parte de la gran familia de los Sandoval. Gracias Jairo, Luz y Ron, por estar muy pendientes de mi proceso, por preocuparse por mi bienestar y por compartir conmigo varios momentos geniales de mi vida. Ahora enfoco mis agradecimientos a los grandes seres que Univalle le entregó a mi vida. Gracias Lina Mera por la paciencia y los regaños, por la dedicación y esfuerzo, por permitirme hacer parte de este gran trabajo. Agradezco a Jhonattan Fernández por lo profesional y gran persona que es, por ser paciente (a veces no tanto), pero siempre muy dedicado y entregado a nuestro trabajo. Ahora, cómo no mencionar a mi gente. Gracias muchachos, gracias Óscar Silva, Victor Caicedo, Stiven Lemus, Kevin Reyes y Rodrigo Ortiz por ser la mejor compañía y mejores amistades que pude tener en mi vida universitaria y fuera de ella. Y por último, gracias Geografía, por ser una ciencia hermosa llena de caminos por recorrer y por ser la carrera que me disfruté de principio a fin en este primer paso para mi formación profesional.

Roberto J. Sandoval R.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
1.1 Introducción	10
1.2 Antecedentes.....	12
1.3 Planteamiento del Problema de investigación.....	17
1.4 Justificación	18
1.5 Objetivos	20
Objetivo General:.....	20
Objetivos Específicos:	20
CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL	21
2.1 Marco Teórico	21
2.2 Marco Conceptual	22
<i>Escala de Medición.....</i>	<i>22</i>
<i>Potencial y Probabilidad</i>	<i>23</i>
<i>Vulcanismo.....</i>	<i>24</i>
<i>Volcán, Edificio Volcánico y Sistema Volcánico</i>	<i>25</i>
<i>Peligro Volcánico y Riesgo Volcánico.....</i>	<i>27</i>
<i>Actividad Eruptiva</i>	<i>28</i>
<i>Productos y Material Volcánico</i>	<i>33</i>
<i>Destruktividad Volcánica, Magnitud de Masa, Intensidad, Poder Dispersivo Y</i> <i>Potencial Destructivo</i>	<i>43</i>
CAPITULO 3: METODOLÓGIA	46
3.1 Identificación de Parámetros	46
3.2 Establecimiento de criterios y estructura para la escala de PDV	54
3.3 Aplicación de la Escala de Potencial Destructivo Volcánico para Actividad Eruptiva Volcánica	68
CAPITULO 4: RESULTADOS.....	69
4.1 Identificación de Parámetros	69
4.2 Modelo y Propuesta de Escala de Potencial Destructivo Volcánico para Actividad Eruptiva Volcánica.....	70
4.3 Aplicación de la Escala de Potencial Destructivo Volcánico: Estudio de caso volcán Galeras.	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

ANEXO 1: PLANILLAS JUICIO DE EXPERTOS 88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de intensidad de la actividad volcánica, clasificada según el volumen de eyección sólida modificada.	13
Tabla 2: Peligros volcánicos.....	42
Tabla 3: Índice de Explosividad Volcánica (IEV por sus siglas en ingles)..	47
Tabla 4: Categoría Unidades Territoriales... ..	53
Tabla 5: Experiencia Jueces Expertos.....	58
Tabla 6: Categoría Unidades Territoriales Modificada..	70
Tabla 7: Variables de la Escala de PDV..	70
Tabla 8: Resultados del cruce de Variables según el modelo matemático de PDV..	71
Tabla 9: Escala de Potencial Destructivo Volcánico..	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:. Sistema Volcánico, Edificio Volcánico y Volcán	26
Figura 2: Tipos de actividad eruptiva.	30
Figura 3: Actividad Puntual	31
Figura 4: Actividad fisural.....	31
Figura 5: Actividad Hidromagmática	31
Figura 6: Actividad Magmática.....	32
Figura 7: Partes principales de las corrientes de densidad.	35
Figura 8: Imagen en secuencia de formación de corrientes densas de piroclastos en el Volcán Etna de Italia el día 11 de febrero del 2014	36
Figura 9: Clasificación granulométrica de los materiales piroclásticos y comparación con su equivalente en materiales sedimentarios.	37
Figura 10: Columna eruptiva (Emisión de gases y ceniza) del Volcán Merapi en Indonesia	38
Figura 11: Flujos de lava.....	40
Figura 12: Lahar..	41
Figura 13: Mapa localización Volcán Galeras.	74
Figura 14: Mapa de Amenaza Volcán Galeras.....	75
Figura 15: Área de influencia de Volcán Galeras Nariño, Colombia.	77

LISTA DE ABREVIATURAS

- **IEV:** Siglas en inglés correspondientes al índice de explosividad volcánica.
- **PCD:** Siglas en inglés correspondientes a las corrientes de densidad de piroclastos.
- **USGS:** U.S. Geological Survey. Servicio Geológico de EE. UU.
- **AVE:** Actividad volcánica eruptiva.
- **OVS:** Observatorio Vulcanológico del Sur.
- **SGC:** Servicio Geológico Colombiano.
- **PDV:** Potencial Destructivo Volcánico.
- **AE:** Actividad Eruptiva.
- **TAE:** Tipo de Actividad Eruptiva
- **TAE1:** Tipo de Actividad Eruptiva Pliniana.
- **TAE2:** Tipo de Actividad Eruptiva Vulcaniana.
- **TAE3:** Tipo de Actividad Eruptiva Estromboliana.
- **TAE4:** Tipo de Actividad Eruptiva Hidromagmatica.
- **TAE5:** Tipo de Actividad Eruptiva Efusiva.
- **UT:** Unidad Territorial.
- **NUTS:** Siglas en ingles de nomenclatura común de unidades territoriales estadísticas
- **LAU:** Siglas en ingles de Unidades Administrativas Locales.
- **CVG:** Complejo Volcánico Galeras

CAPITULO 1: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

Los volcanes son evidencia convincente de que la Tierra es un planeta dinámico caracterizado por cambios y renovaciones sin fin. El estudio de los volcanes es, por lo tanto, fundamental para comprender la evolución de la Tierra y los entornos de la superficie. En un planeta cada vez más poblado, la exposición a los peligros naturales está aumentando. Un estimado de 800 millones de personas viven a menos de 100 km de un volcán activo en 86 países en todo el mundo¹.

Los volcanes proporcionan entornos favorables para la vida y aportan muchos beneficios a la sociedad: las erupciones fertilizan los suelos, la topografía elevada proporciona buenos sitios para la infraestructura (por ejemplo, telecomunicaciones en terreno elevado), los recursos hídricos son generalmente abundantes, el turismo del volcán puede ser lucrativo y los volcanes pueden adquirir significado espiritual, estético o religioso. Algunos volcanes también están asociados con recursos geotérmicos, por lo que son un objetivo para la exploración y un recurso energético potencial.

Comprender el impacto y los peligros que plantea la actividad volcánica requiere información sobre la frecuencia, la duración, la magnitud y las tasas de vulcanismo en el espacio y el tiempo.

La actividad volcánica ha sido uno de los fenómenos naturales más llamativos y destructivos históricamente. La humanidad se ha encargado de estudiarla y analizarla con el fin de entender su estructura, dinámica y funcionamiento, para esto ha sido necesario involucrar distintas disciplinas y perspectivas, González Cárdenas, *et al*, explica que:

¹ SIGURDSSON, Haraldur; HOUGHTON, Bruce; RYMER, Hazel; STIX, John & MCNUTT, Steve. The Encyclopedia of Volcanoes. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press, 2015. Ed. 2. p. 1393.

“Una multitud de disciplinas científicas, desde las estrictamente geológicas como la petrología o la estratigrafía hasta otras más aplicadas como la geofísica o la estadística, componen hoy el núcleo de la volcanología, lo que implica que esta ciencia deba ser abordada por equipos integrados por multitud de especialistas procedentes de disciplinas muy diversas²”. *

Las Ciencias de la Tierra o Geociencias, son conocidas como el conjunto de disciplinas que tratan de explicar los distintos sucesos físicos que ocurren en el planeta. La Dirección General de Promoción Minera de México expone como objetivo para las Ciencias de la Tierra lo siguiente:

Sus objetos de estudio son el origen, evolución, composición del Planeta Tierra, así como los usos y aplicaciones de los minerales en la vida. Los expertos reúnen e interpretan datos acerca de la Tierra y en ocasiones, de otros planetas. Utilizan su conocimiento para incrementar el entendimiento de los procesos y fenómenos naturales que ocurren en la Tierra y de esta forma, mejorar la calidad de vida del hombre³.

La vulcanología es una rama de estudio derivada de la Geología, la cual a su vez es una disciplina perteneciente a las Geociencias. Esta rama, es nueva en comparación con otras que hacen parte de las Ciencias de la Tierra. El ejemplo más cercano y que cuenta con estudios de mayor orden es la sismología, la cual ha servido de base para muchos aspectos con los que cuenta hoy en día la vulcanología.

² GONZÁLEZ CÁRDENAS, Elena. *et al.* La investigación Volcanológica a nivel internacional. EN: Aportes recientes en la Volcanología 2005-2008. Ciudad Real – España: Centro de Estudios Calatravos, 2010. p. 30.

* Vulcanología es el término empleado a lo largo de esta investigación, sin embargo, algunos autores se refieren a 'Volcanología' lo cual no se modifica por ser citas textuales.

³ MÉXICO. DIRECCIÓN GENERAL DE PROMOCIÓN MINERA, Ciencias de la Tierra ¿En qué consisten? EN: Ciencias de la Tierra. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Dirección de Fomento y Organización, [(s.f)]. p. 4.

1.2 Antecedentes

En el campo de la vulcanología se presentan algunos estudios referentes a mediciones relacionadas con la actividad volcánica sin embargo, pocos, han intentado hacerlo involucrando elementos cualitativos. Algunos autores (e.g., Tsuya, 1955; Walker, 1973; Newhall y Self, 1982; Carey Steven y Sigurdsson, 1989) adelantaron investigaciones referentes a cómo se podría medir el fenómeno eruptivo, teniendo una perspectiva en mayor medida cuantitativa, es decir, a partir de parámetros físicos.

Este esfuerzo por crear mecanismos de medición de la actividad volcánica no ha sido un proceso fácil, debido a que no todos los volcanes tienen la misma estructura física ni las mismas características en los materiales expulsados. A pesar de ello, esto no ha sido un impedimento para que se estudie e intente describir y categorizar los eventos dados a partir del fenómeno volcánico.

Uno de los primeros en interesarse por establecer una medida relacionada con la actividad volcánica es Tsuya⁴ quien estableció una medida a partir del volumen de los materiales expulsados, sin embargo, después de 8 años, esta medida fue modificada (Ver tabla 1).

Tsuya y Morimoto⁵ aseguran que la intensidad de una erupción volcánica se puede expresar de forma cuantitativa calculando la energía cinética evidenciada en el evento eruptivo. También mencionan la estimación del total de la energía calórica disipada como otra manera de cuantificar una erupción. Aunque los autores utilizan el volumen de los sólidos expulsados por una erupción como forma de medición de la intensidad eruptiva, asumiendo que esta es proporcional al potencial de expulsión de los gases volcánicos.

⁴ TSUYA, H. Geological and petrological studies of volcano Fuji, 5. On the 1707 eruption of volcano Fuji. Bull. Earthqu. Res. Inst., 33, 841--888, Tokyo 1955.

⁵ TSUYA, Hiromich y MORIMOTO Ryohei. Intensity (or magnitude) of volcanic eruptions. Types of volcanic eruptions in Japan. Bulletin of Volcanology. Volume 26, Issue 1, 1963.

Tabla 1:

Tabla de intensidad de la actividad volcánica, clasificada según el volumen de eyección sólida modificada de Tsuya, Hiromich y Morimoto Ryohei.

Escala de intensidad		Volcán ejemplo	Año de erupción	Eyección	
Grado	Límite de volumen de eyección (km ³)			Volumen (km ³)	Tipo
XI	>100	Tambora, Soembawa	1815	150	B, D
VIII	100 - 10	Katmai, Alaska	1912	21	B
		Krakatau, Sunda Str	1883	18	B, D
VII	10-1	St. Maria, Guatemala	1902	5.45	B
		Sakurajima	1914	2.2	A, B
		Bandaisan	1888	1.7	D
		Fujiyama	1707	0.8	B
VI	1-0.1	Komagatake, Hokkaido	1929	0.5	B
		Marina Loa, Hawaii	1950	0.46	A
		Asamayama	1783	0.2	A, B
		Tarumaisan	1909	0.2	A, B
		Sakurajima	1946	0.1	A, B
		Puna, Kilauea, Hawaii	1955	0.16	A
		Torishima, Izu	1939	0.09	A, B
		Mi_harayama, Oshima	1912-14	0.03	A, B
			1950-51	0.03	A, B
		Miyakejima	1940	0.02	A, B
V	0.1 – 0.01	Halemaumau, Kilauea	1954	0.012	A
IV	0.01 – 0.001	Tokachidake	1926	0.005	B, D
		Adatarasan	1900	0.004	D
		Etna, Sicily Showa-	1954	0.004	A
		Shinzan, Usu	1944	0.003	A, B
III	0.001 – 0.0001	Aztmtasan	1893	0.0005	D
		Nakadake, Aso	1958	0.00025	D
II	0.0001 – 0.00001	Meakandake	1955	0.00003	D
		Kusatsu-Shiranesan	1937-38	0.000025	D
			1939	0.000025	D
I	0.00001>	Akita-Yakeyama	1949, 51	Very small	D
		Echigo-Yakeyama	1949	Very small	D
0	0	Volcanoes showing fumarolic activity only		0	0

A: Flujos de Lava B: Flujo de Piroclastos C: Viejos depósitos de ceniza

Martí Joan y Araña Vicente explican que Tsuya categorizó las erupciones volcánicas del “0 a IX que dependen del volumen del total de productos emitidos”⁶, es decir, que se debe tener en cuenta el volumen total de material sólido expulsado clasificándose en tres tipos (A, B y C), en este sentido. para poder analizar la erupción volcánica a partir de Tsuya solo es posible si se conoce el volumen de expulsión.

El geólogo George Walker⁷ expone que existe la necesidad de una clasificación y terminología modernas dentro de la rama de la vulcanología, que, si bien se basa principalmente en mediciones de los depósitos, también está estrechamente vinculado con los fenómenos eruptivos. Walker explica que la clasificación de dichos fenómenos es necesaria, por ejemplo, como base para agrupar depósitos similares a fin de discernir otras características que tienen en común. También aclara que es necesario redefinir terminología para su clasificación e incorporar nuevos términos según sea la necesidad a medida que se realice una investigación.

Para esto, Walker⁸ propone utilizar cinco parámetros comprendidos entre: magnitud (determinada a partir del volumen de expulsión), intensidad (volumen de expulsión por unidad de tiempo, determinada a partir de la altura de la columna y las velocidades calculadas), poder de dispersión (determinado por la altura de la columna), violencia (liberación de energía cinética, intensidad análoga, pero para rupturas instantáneas más que sostenidas), y potencial destructivo (el grado de devastación, causado por una erupción).

⁶ MARTÍ, Joan y ARAÑA, Vicente. Magnitud de las erupciones. La vulcanología actual. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1993. p. 447.

⁷ WALKER L., George, P. Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme. July 1973, Vole 62, No. 2. p 431-446.

⁸ Ibid. p 431-446.

En el año 1980, Walker⁹ realiza una revisión de cada parámetro que propuso en el estudio de 1973, aplicándolo al volcán Taupo, Nueva Zelanda. En este documento, es donde Walker¹⁰ propone el termino Potencial Destructivo, el cual plantea haciendo referencia a la destrucción de propiedades, tierras cultivadas y vidas humanas.

A pesar que Walker hace una descripción detallada de cada parámetro anteriormente mencionado, no logra proponer contundentemente la estructura y los elementos necesarios para una escala relacionada con el potencial destructivo.

Otros autores como Newhall y Self¹¹ proponen un esquema que permite estimar la magnitud de una erupción volcánica; para esto plantean el índice de Explosividad Volcánica (**IEV**) el cual corresponde a un indicador general del carácter explosivo de una erupción. Este es un complemento a la estimación de la magnitud y/o intensidad de Walker a partir de sus 5 parámetros propuestos. A las erupciones se les puede asignar un IEV en una escala de 0 a 8; los rangos superpuestos entre alturas de columna, términos descriptivos y duraciones de explosión de sucesivos valores IEV reflejan la interacción entre la intensidad, magnitud y tasa de liberación de energía durante una erupción.

Carey y Sigurdsson¹² se centraron en establecer la variación entre los factores de intensidad en 45 erupciones plinianas que se encontraban muy bien descritas mediante modelos de dispersión, utilizando los parámetros propuestos por Walker¹³, buscando hallar las distintas intensidades y diferencias de parámetros

⁹ WALKER L., George, P. The Taupo pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?. August 1980. Volume 8, Issue 1. p. 69-94.

¹⁰ Ibid. p. 69-94.

¹¹ NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. The Volcanic Explosivity Index (VEI) An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. 1982. Vol 87, No. C2. p. 1231-1238.

¹² CAREY, Steven y SIGURDSSON, Haraldur. The intensity of plinian eruptions. January 1989, Vol. 51, Issue 1. p 28-40

¹³ WALKER L., George, P. Op. Cit. p 431-446.

en las erupciones utilizando herramientas alternativas, entre ellas, mapas de isopletras.

Actualmente, hay diferentes formas de medir el tamaño de una erupción y cuantificarlo. Para esto, Pyle¹⁴ en la 1ª edición de la Enciclopedia Volcánica expone que, entre las distintas maneras posibles de definir una escala para las erupciones, se encuentran dos que se utilizan con mayor frecuencia, estas son la magnitud y la intensidad. Entre estos acercamientos de escalas, el más utilizado es el IEV propuesto por Newhall y Self, ya que se logra definir a partir de la magnitud de la erupción y la intensidad.

Pyle¹⁵ también expone otro parámetro que puede medir el tamaño de una erupción volcánica, como es el potencial destructivo, refiriéndose al daño ocasionado en un área específica dentro del cual se encuentran estructuras y otros elementos expuestos que pueden ser destruidos como resultado de la actividad volcánica. Para esto establece cantidades determinadas de un producto que puede causar daños en el área que impacta.

A pesar de la propuesta de Pyle¹⁶ realizada en la primera versión de la Enciclopedia Volcánica sobre cómo se podría medir la destructividad, en la segunda expone que hasta el momento no existen medidas o índices que se utilicen para categorizar las consecuencias, destructividad o potencial destructivo de erupciones pasadas o futuras.

No obstante, tanto Pyle como Walker, se convierten en los autores con mayor peso en cuanto a antecedentes de importancia dentro de esta investigación, debido a que son quienes se acercan más a lo que se pretende realizar en este trabajo.

¹⁴ PYLE, David. Sizes of Volcanic Eruptions. EN: The Encyclopedia of Volcanoes. 1st edition. Haraldur Sigurdsson. ACADEMIC PRESS. 23 octubre 1999. p. 263.

¹⁵ Ibid. p. 269.

¹⁶ PYLE, David. Sizes of Volcanic Eruptions. EN: The Encyclopedia of Volcanoes. 2 edición. Haraldur Sigurdsson. ACADEMIC PRESS, 2015. p. 263.

1.3 Planteamiento del Problema de investigación

De acuerdo al objeto de estudio de las Ciencias de la Tierra, el cual es explicar los distintos fenómenos físicos que suceden en el planeta, el intentar definir las distintas situaciones que se presentan a partir de la actividad volcánica, se limita netamente a la parte cuantitativa. Es por esto que, a pesar del intento de George Walker por plantear la necesidad de medir los daños efectuados por erupciones volcánicas, no pudo ir más allá de la estimación de lo físico, sin embargo, dejó algunas definiciones claves para dar paso hacia un planteamiento de escala de potencial destructivo por actividad eruptiva volcánica.

Las erupciones volcánicas a lo largo de la historia, han sido una amenaza latente para la población, no solo en el aspecto de pérdidas de vida, sino también en la repercusión que tiene la actividad volcánica en los aspectos, socioeconómicos, de infraestructura y ambientales, siendo estos, elementos importantes para medir la destructividad que este fenómeno puede ocasionar.

Teniendo en cuenta que no existe una escala que permita categorizar el impacto de la actividad volcánica en relación a los elementos humanos expuestos y además, que los procesos metodológicos que se tienen para la medición del impacto de los productos volcánicos son pocos, surge la necesidad de proponer una escala que permita categorizar, con el fin de aportar insumos importantes en la evaluación del riesgo volcánico a partir del conocimiento del potencial destructivo de cada volcán.

En este sentido, surge como pregunta de investigación:

❖ ***¿Cómo medir el potencial destructivo de la actividad volcánica en el territorio?.***

1.4 Justificación

A partir de González Cárdenas, *et al*, se puede apreciar que:

El objetivo principal de la vulcanología actual a nivel internacional es la reducción del riesgo, e incluye cualquier aspecto relacionado con el estudio de los volcanes y/o de sus productos que esté directa o indirectamente enfocado al análisis de la peligrosidad, a la reducción del riesgo o al impacto de los volcanes en el medio ambiente¹⁷.

La actividad volcánica implica la generación de distintos procesos, los cuales finalmente modifican el paisaje y causan daños materiales y sociales debido a su impacto y destructividad. Estos daños y afectaciones aún no cuentan con una técnica que permita medirlos, categorizarlos y caracterizarlos profundamente, es decir, que involucre variables no solamente físicas propias del fenómeno, sino también los elementos expuestos en el espacio alrededor de las zonas volcánicas.

Este trabajo se desarrolla a partir de la propuesta de una escala de medición volcánica, que pretende poder ser empleada posteriormente a cualquier volcán. Para esto se adiciona lo planteado por Avery Gómez, *et al*¹⁸, quienes afirman que las escalas que se usan después de un evento natural sirven para clasificarlo. Sin embargo, esta escala pretende la aplicación de la misma a cualquier volcán teniendo en cuenta la historicidad, pero sin ser estrictamente necesaria la ocurrencia de un evento volcánico nuevo, es decir, que el enfoque se realizará en una escala con características de potencial que permita estimar el impacto de un evento eruptivo sobre algún territorio y así mismo contribuya a los estudios de riesgo que puedan efectuarse sobre cualquier volcán.

¹⁷ GONZÁLES CÁRDENAS, Elena. *et al*. Op. Cit., p. 30.

¹⁸ AVERY GOMEZ, Elizabeth, *et al*. Towards a Unified Public Safety Scale. 40th Hawaii International Conference on Systems Science. January 2007, Waikoloa, Big Island, HI, USA. p. 3.

Avery Gómez, et al¹⁹, afirman que el uso de escalas y dimensiones depende de definiciones con criterios precisos para determinar intensidad y condiciones para cada nivel de escala, así estas ayudan a analizar, atender y comprender de mejor manera el fenómeno que ahí ocurrió.

Las poblaciones que habitan en zonas de influencia volcánica son las principales afectadas en caso de presentar actividad algún volcán cercano. Por ende, serían las más beneficiadas en los avances y aportes que puedan realizarse a los estudios de riesgo volcánico.

En la vulcanología, existen distintas maneras de medir la actividad volcánica, sin embargo, aún no se ha logrado establecer una escala que permita medir el potencial destructivo de un volcán a partir de la actividad eruptiva que se dé cerca de un territorio y este se vea directamente afectado. En ese sentido, esta propuesta de escala, pretende constituirse en un elemento que ayudaría significativamente en la evaluación del riesgo volcánico. Al tener conocimiento de esto, también se vería beneficiado el sector encargado de la planeación y el ordenamiento territorial, y esto conllevaría al desarrollo de los distintos asentamientos humanos acorde a las condiciones que se tengan en un territorio en relación a un volcán.

¹⁹ Ibid. p. 3.

1.5 Objetivos

Objetivo General:

- Proponer una escala de medición que permita categorizar el potencial destructivo de la actividad eruptiva volcánica (AEV) sobre los elementos humanos expuestos.

Objetivos Específicos:

- Identificar los parámetros apropiados para la construcción de una escala de medición de potencial destructivo por actividad eruptiva volcánica (AEV).
- Establecer los criterios y la estructura de los niveles de medición para una escala de potencial destructivo por AEV.
- Comprobar la aplicabilidad de la escala de medición propuesta a un estudio de caso.

CAPITULO 2: MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco Teórico

Partiendo de Kitchi y Tate ²⁰, los cuales plantean que los estudios de tipo exploratorio se basan en la investigación de elementos poco indagados o que no han sido abordados; por las características de esta investigación, se puede enmarcar en este tipo de estudio. Por tanto, estas investigaciones “por lo general determinan tendencias, identifican relaciones potenciales entre variables y establecen el ‘tono’ de investigaciones posteriores más rigurosas”²¹.

Con esto, se busca proponer una escala que categorice el potencial destructivo de un volcán por actividad eruptiva, la cual hasta la actualidad no ha sido elaborada. Sin embargo, en distintos documentos, tales como la Enciclopedia de Volcanes se propone la creación de una.

Para esto es claro afirmar que esta propuesta está sujeta a modificaciones y se presta para realizar futuras investigaciones, logrando su perfección y mayor exactitud, lo cual acerca aún más al tipo de estudio que guía y ancla a un norte la elaboración de dicha escala. Siendo esta investigación de índole exploratorio, es importante abordar también un tipo de ciencia según los intereses cognoscitivos del conocimiento y epistemologías.

A partir de Kitchi y Tate²² la epistemología acorde con esta investigación es la Positivista, debido a que se intenta determinar leyes para predecir y explicar el comportamiento humano en términos de causa y efecto. Esto sería posible adaptarlo a causas como la ocurrencia de una erupción volcánica y las

²⁰ KITCHI, Rob y TATE, Nicolas J. Conducting Research in Human Geography: Theory, Methodology and Practice. Essex: Pearson, 2000. 330 p.

²¹ DANKHE, 1986, 42, citado por HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 59

²² KITCHI y TATE. Op. Cit., p 330.

consecuencias sobre la población, estructura y demás elementos expuestos que pueden ser afectados.

2.2 Marco Conceptual

En este espacio se definirán cada uno de los conceptos que marcan relevancia a lo largo de esta investigación, brindando claridad conceptual de los términos que van a ser tenidos en cuenta en el desarrollo de este documento.

Escala de Medición

Para tener claro este concepto, es necesario primero introducir sobre la medición, la cual a partir de Coronado Padilla²³ se entiende como “estimar la magnitud de cierta propiedad de uno o más objetos con ayuda de un sistema métrico específico (instrumento de medición, escala de medición y unidades de medición)”. Sin embargo, a pesar de que medir resulta un poco determinista al clasificar en un número, no excluye que se pueda realizar medidas de variables no cuantificables, es decir, de carácter social entre otras.

Coronado Padilla expone que:

Una escala de medición es el conjunto de los posibles valores que una cierta variable puede tomar. Es un continuo de valores ordenados correlativamente, que admite un punto inicial y otro final. El nivel en que una variable puede ser medida determina las propiedades de medición de una variable, el tipo de operaciones matemáticas que puede usarse apropiadamente con dicho nivel, las fórmulas y procedimientos estadísticos que se utilizan para el análisis de datos y la prueba de hipótesis teóricas²⁴.

Las escalas distinguen en nominal, ordinal, intervalos y escalas de proporción. Las escalas nominal y ordinal, generalmente se usan para establecer medidas de

²³ CORONADO PADILLA, Jorge. Escalas de Medición. Bogotá, D. C: Paradigmas, Vol 2, (2), julio-diciembre de 2007. p. 104. ISSN 1909-4302.

²⁴ Ibid. p. 106.

carácter cualitativo. Por el contrario, las escalas de intervalos o de proporción, son utilizadas para generar mediciones de tipo cuantitativo.

Coronado Padilla en cuanto a Escala Ordinal expone que:

Una escala de medición ordinal se logra cuando las observaciones pueden colocarse en un orden relativo con respecto a la característica que se evalúa, es decir, las categorías de datos están clasificadas u ordenadas de acuerdo con la característica especial que poseen. Aquí, las etiquetas o símbolos de las categorías sí indican jerarquía. Si utilizamos números, la magnitud de estos no es arbitraria, sino que representa el orden del rango del atributo observado²⁵.

De acuerdo al concepto que ofrece Coronado sobre la escala ordinal, en esta investigación se desarrollará una escala de este tipo, debido a que esta permite clasificar las variables de manera ordenada y dando jerarquía a partir de las variables involucradas.

Potencial y Probabilidad

La realización de la escala de potencial destructivo volcánico para la actividad eruptiva volcánica propuesta en esta investigación, consta de categorizar la posibilidad de que pueda ocurrir un evento a partir del proceso eruptivo de un volcán en relación con los elementos expuestos alrededor de este o con influencia directa. La palabra Potencial, de acuerdo a la Real Academia Española (RAE)²⁶ significa “Que puede suceder o existir, en contraposición de lo que existe” lo cual nos hace referenciar también como parte de esta investigación el concepto de probabilidad, que según Evans y Rosennthal ²⁷ “la probabilidad es la ciencia de la incertidumbre”. Estos dos conceptos, por su similitud, hacen que se vea la necesidad de plantear el potencial destructivo de un volcán como la probabilidad

²⁵ Ibid. p. 111.

²⁶ ESPAÑA. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la Lengua Española. Madrid – España. 2019.

²⁷ EVANS, Michael J. y ROSENTHAL Jeffrey S. Probabilidad: Una medida de la incertidumbre. EN: Probabilidad y estadística. 2005. Barcelona. p. 19.

de que este haga erupción o no, asociado al TAE y relacionado con los elementos humanos expuestos en el territorio de influencia del volcán en estudio.

Según lo planteado por Vladimirovna Panteleeva “la probabilidad de un resultado cualquiera de un suceso aleatorio se representa con un número entre 0 y 1, ambos inclusive. La probabilidad 0 indica que el resultado no ocurrirá nunca; la probabilidad 1, que el resultado ocurrirá siempre”²⁸

Vulcanismo

Durante un largo periodo, la ciencia ha tenido grandes avances en cuanto a la descripción volcánica y su comportamiento, sin embargo, han tenido que presentarse algunos sucesos trágicos significativos alrededor del mundo para que una vez más se vea reflejada la imponente y naturaleza de los procesos dinámicos que la Tierra lleva a cabo en un determinado lapso.

Para Sigurdsson²⁹ el **vulcanismo** es la manifestación superficial de los procesos que se dan en la profundidad de la Tierra, el cual forma parte de un sistema que es esencial para mantener un ambiente equilibrado para la vida en el planeta. Sin embargo, estos procesos a su vez, generan un gran impacto cuando se ven materializados en erupciones volcánicas, acabando a su paso con una serie de elementos que se encuentran dispuestos en el territorio.

²⁸ VLADIMIROVNA, Olga. Probabilidad. EN: Fundamentos de Probabilidad y Estadística. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2005. p. 25.

²⁹ SIGURDSSON, Haraldur. Introduction. EN: The Encyclopedia of Volcanoes. 1st edición. Haraldur Sigurdsson. ACADEMIC PRESS. 23 octubre 1999. p. 2

Volcán, Edificio Volcánico y Sistema Volcánico

A pesar de la complejidad y lo que implica el término volcán, es necesario realizar algunas aclaraciones. Pujadas, Brusi y Pedrinaci³⁰ los cuales exponen que volcán es solo una parte que estudia la vulcanología, debido a que existe un conjunto de elementos llamados volcán, edificio volcánico y sistema volcánico, que, si bien hacen parte de un sistema, su significado no es el mismo. Estos autores hacen un concepto generalizado acerca de los volcanes, el cual es el que se trabajará en esta investigación, para lo que afirman que: “Un **volcán** es la evidencia geológica de la llegada de material magmático a un lugar de la superficie terrestre” (Ver Figura 1).

Encima de este volcán (Ver figura 1), se puede apreciar una depresión, esta es llamada **cráter**, los cuales “son rasgos estructurales que se fueron construyendo paulatinamente a medida que los fragmentos expulsados se acumulaban alrededor de la chimenea formando una estructura en forma de donut”³¹.

Para el concepto de **edificio volcánico**, Pujadas, Brusi y Pedrinaci³² plantean que es un “cono (relieve positivo formado por el material expulsado) y un cráter (relieve negativo en la parte superior del cono por donde sale el magma, en algunos casos este puede estar cubierto o erosionado)” (Ver Figura 1).

Finalizando estos conceptos claves, los autores, plantean que “el concepto de **Sistema Volcánico** engloba diferentes procesos que van desde el origen del magma hasta su salida a la superficie terrestre” a su vez un “**sistema volcánico** activo debe ser considerado como un conjunto complejo en el que es posible

³⁰ PUJADAS, Albert, BRUSI, David y PEDRINACI, Emilio. Volcán, Edificio Volcánico y Sistema Volcánico. EN: ¡Los volcanes han cambiado! Nuevos enfoques de terminología volcánica. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 1999. p. 201.

³¹ TARBUCK, Edward J. y LUTGENS Frederick. Ciencias de la tierra una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S. A, 2005. p. 143.

³² PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 201.

diferenciar: a) la zona de fusión de rocas, fundamentalmente localizada en el manto superior o en la base de la corteza terrestre; b) la zona de ascenso a partir de plumas diapíricas o a través de conductos volcánicos (en algunos casos durante este ascenso se puede acumular magma en la corteza formando cámaras magmáticas); y, finalmente, c) la zona de emisión donde se forma el volcán” (Ver Figura 1).

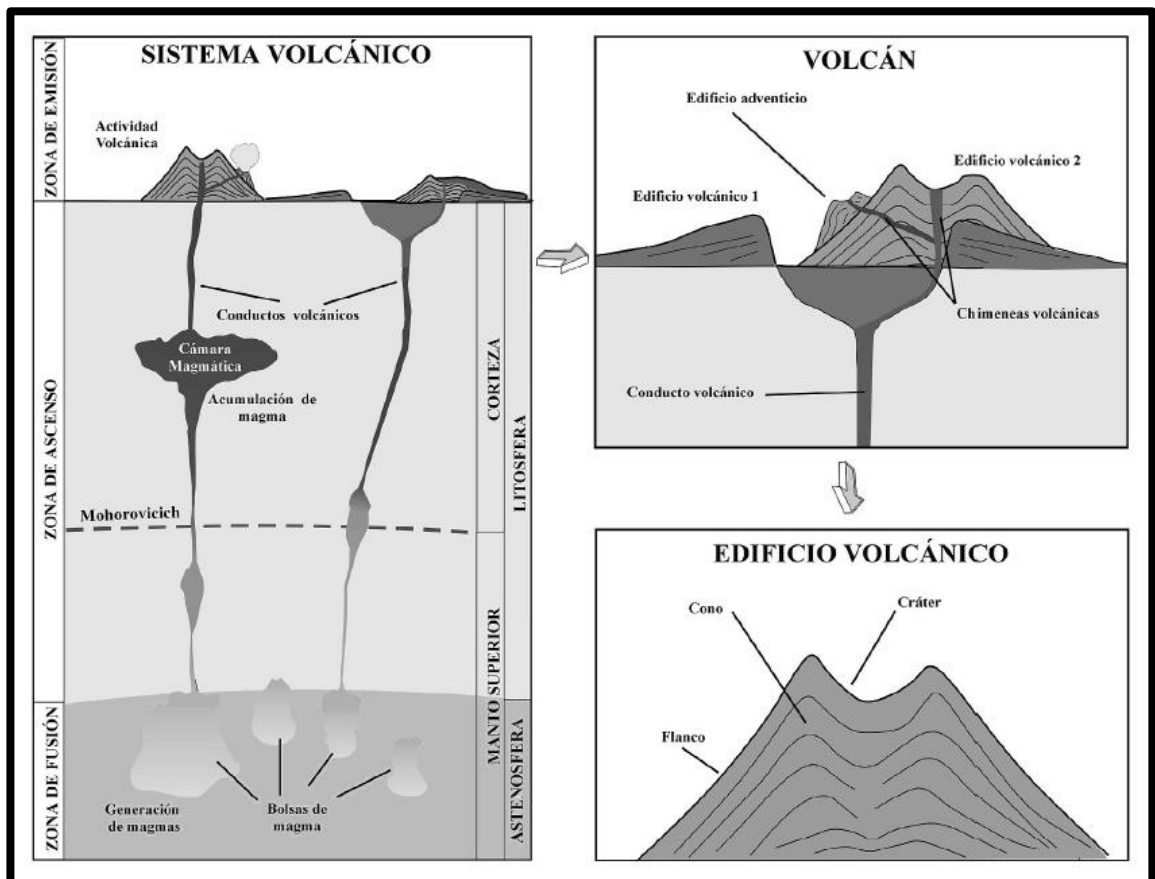


Figura 1. Sistema Volcánico, Edificio Volcánico y Volcán, tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

Peligro Volcánico y Riesgo Volcánico

La actividad volcánica alrededor del mundo, ha generado siempre distintas alertas y temor en la población, para esto Fournier d'Albe³³ “define el peligro volcánico como la probabilidad de que un área determinada sea afectada por procesos o productos volcánicos potencialmente destructivos en un intervalo de tiempo dado”, también Gemma Gómez-Castillo *et al* manifiestan que:

La amenaza o peligro volcánico se refiere a la probabilidad de que ocurra un tipo específico de evento volcánico que pueda afectar cierta área, con una intensidad particular, en un tiempo determinado y cause la muerte, lesiones, daños a la propiedad, la infraestructura, pérdida de medios de sustento, disrupción del funcionamiento social y económico, o daños ambientales³⁴.

Una definición del Riesgo dada por el Servicio Geológico Colombiano³⁵ manifiesta que el riesgo “Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad”. En consecuencia, a lo que es el riesgo y asociarlo con la AEV se adopta para riesgo volcánico la definición dada por Crandell, D.R *et al*³⁶. los cuales definen al riesgo volcánico como “las

³³ FOURNIER D'ALBE, E. M. Objectives of volcanic monitoring and prediction: Journal of the Geological Society of London, 136, 312-326. Citado por QUESADA, Fernando, BLANCO, Jorge y MARTIN, Ana. Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 2006, p. 114.

³⁴ GÓMEZ CASTILLO, Gemma *et al*. Conceptos principales del riesgo volcánico Peligro volcánico. Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo. Revista Geográfica, 2017. p. 72.

³⁵ COLOMBIA. SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Riesgo. Conversatorio de Gestión del Riesgo Volcánico. Manizales: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO República de Colombia, 2013. p. 4.

³⁶ CRANDELL, D.R.; BOOTH, B.; KUSUMADINATA, K.; SHIMOZURU, D.D.; WALKER, G.P.L. y WESTERCAMP, D. “Source-book for volcanic zonation”, UNESCO, New York, 1984. Citado por GÓMEZ

consecuencias predecibles de un evento volcánico en términos de daños y pérdida de vidas, destrucción de algunos tipos específicos de propiedad y otras pérdidas económicas”

Actividad Eruptiva

Para entender los procesos que se dan en los volcanes, hay que tener en cuenta qué es la actividad eruptiva, la cual, según Pujadas, Brusi y Pedrinaci, es un “conjunto de procesos relacionados exclusivamente con la salida de materiales desde un centro emisor”³⁷. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la emisión de materiales se precede la mayoría de veces “de sismicidad asociada al movimiento del magma, las fumarolas, la expulsión de piroclastos o la emisión de lavas”³⁸. Así mismo, una erupción volcánica se entiende como “emisiones de mezclas de magma (roca fundida rica en materiales volátiles), gases volcánicos que se separan de este (vapor de agua, bióxido de carbono, bióxido de azufre y otros) y fragmentos de rocas de la corteza arrastrados por los anteriores”³⁹.

“El estilo de la actividad eruptiva puede ser muy variable en función de las características de los magmas que la generan y de las condiciones de contorno (presencia de agua en el subsuelo, estructura y geomorfología) de la zona donde se produce”⁴⁰

CASTILLO, Gemma et al. Conceptos principales del riesgo volcánico Peligro volcánico. Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo. Revista Geográfica, 2017. p. 78.

³⁷ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 202.

³⁸ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

³⁹ CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN. Op Cit; p. 8.

⁴⁰ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

Según Pujadas Brusi y Pedrinaci ⁴¹ la actividad eruptiva, principalmente es de dos tipos: efusiva y explosiva. La actividad efusiva hace referencia a una emisión pausada de lava, sus magmas son de tipo básicos permitiendo que la formación de coladas o mantos de lava sean más fluidos, “también se puede producir, de forma más excepcional, actividad efusiva en la emisión de magmas de composición ácida generando en este caso domos y pitones”⁴³. Por otra parte, está la actividad explosiva, la cual se asocia con el ascenso de material piroclástico de manera más violenta, particularmente, se identifica más por la composición de su magma, los gases que contiene y la temperatura en el momento que sale a la superficie. A su vez, estos dos tipos de actividades se subdividen en otras actividades con características específicas (Ver figura 2).

⁴¹ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁴³ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

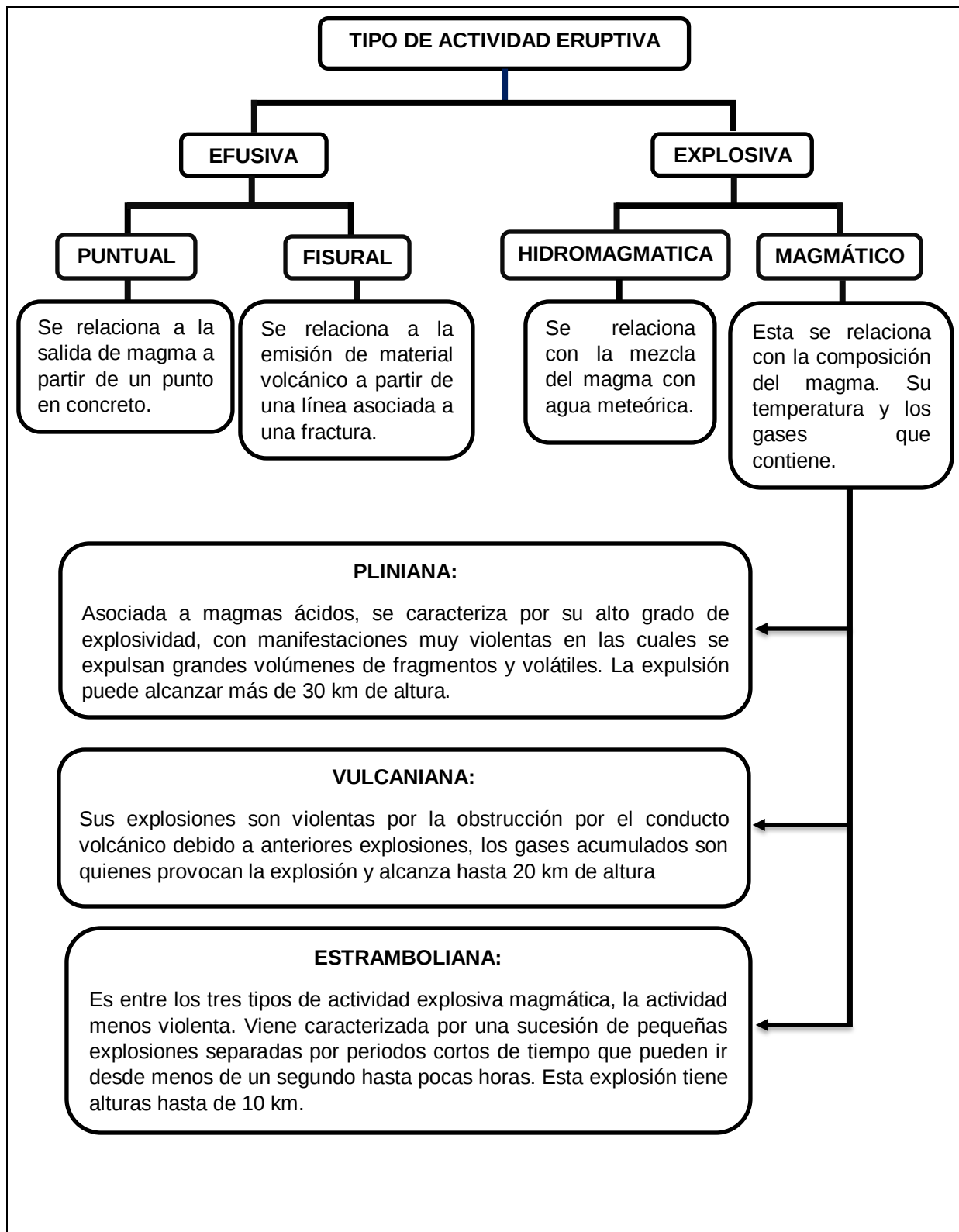


Figura 2. Tipos de actividad eruptiva. Elaboración propia a partir de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

Según esto, las representaciones gráficas de estas actividades son:

Actividad Puntual

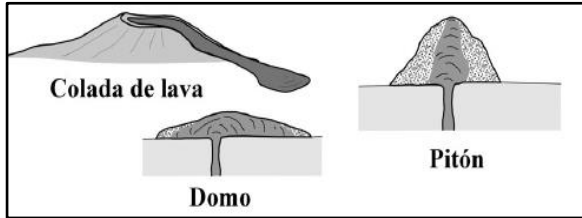


Figura 3. Actividad Puntual. Tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

Actividad Fisural

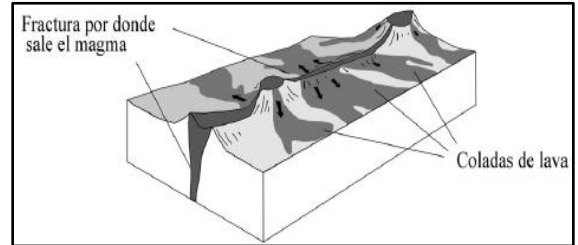


Figura 4. Actividad fisural. Tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

“En los volcanes de las islas Hawai (Kilauea, Mauna Loa o Mauna Kea) se encuentran buenos ejemplos de actividad puntual, mientras que en Islandia la actividad fisural es común”⁴⁴

Actividad Hidromagmática

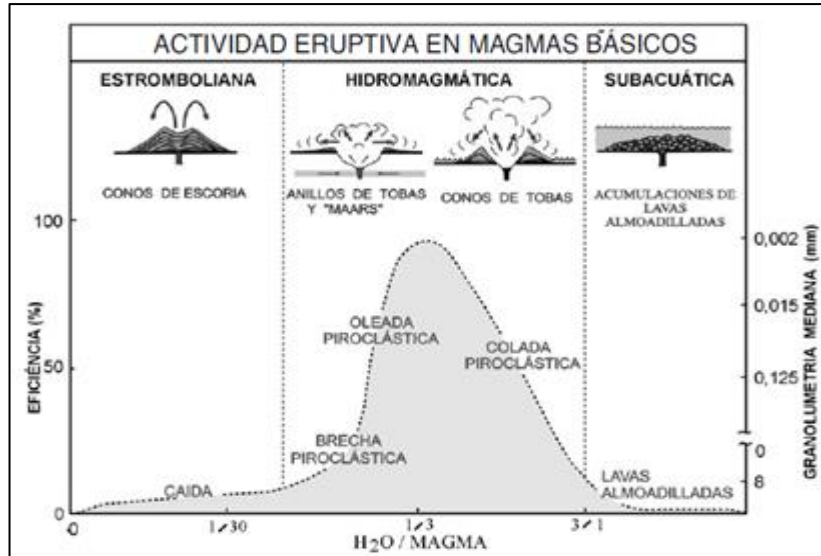


Figura 5. Actividad Hidromagmática, Tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

⁴⁴ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

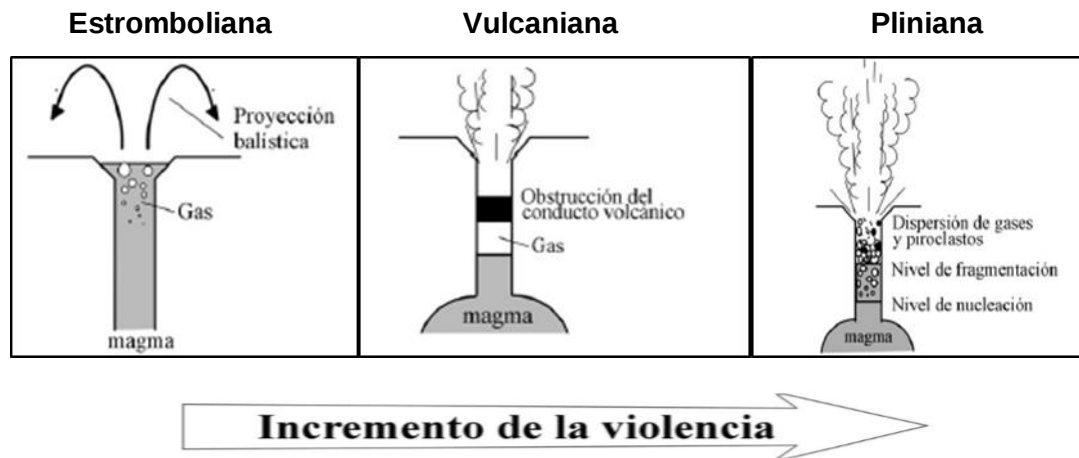


Figura 6. Actividad Magmática, Tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

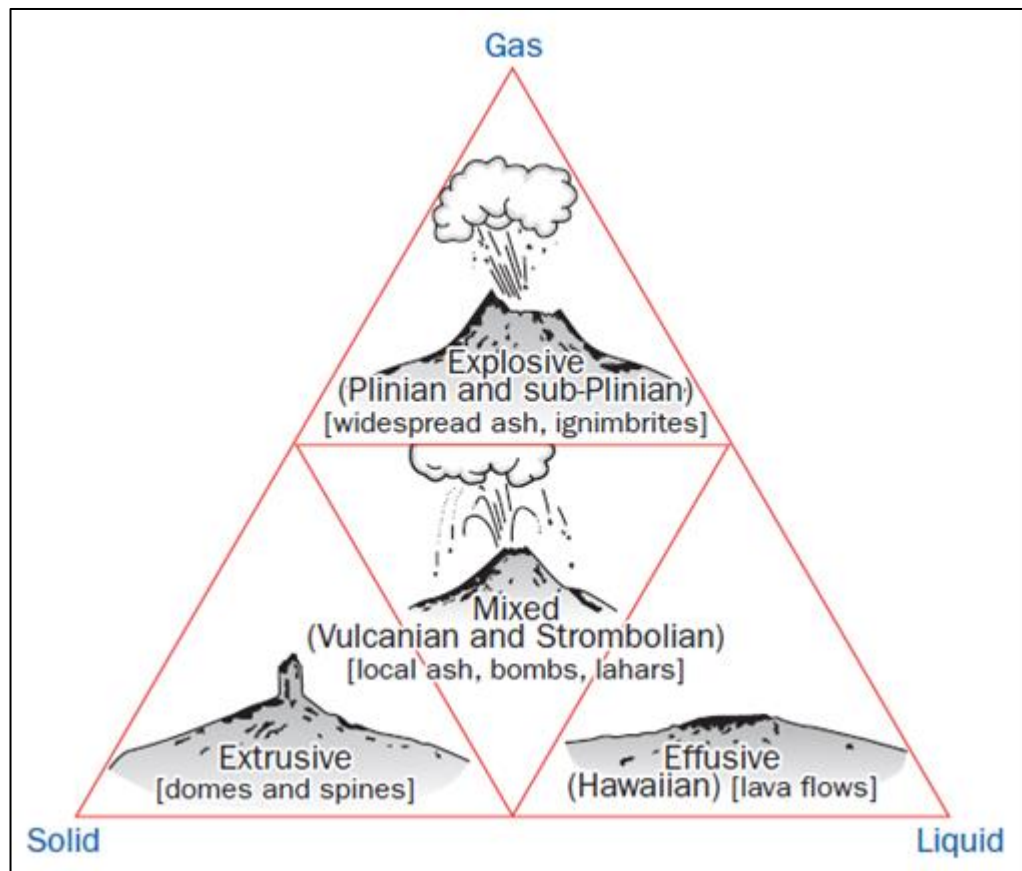


Figura 6a. Clasificación de los principales tipos de erupción, basada en la proporción de gases, sólidos y líquidos. Tomada de Lockwood John P. & Hazlett Richard W (2010).

Productos y Material Volcánico

La violencia con la que es expulsado el material volcánico, depende de “la composición del magma, su *temperatura* y la cantidad de *gases disueltos* que contiene”⁴⁵. Los autores Pujadas, Brusi y Pedrinaci hacen una aclaración muy importante de dos términos que pueden ser confundidos dentro de esta rama, siendo productos volcánicos y materiales volcánicos. Estos autores afirman que “La clasificación por productos, se basa fundamentalmente, en el estado físico original del material expelido o emitido durante la erupción”⁴⁶ y el término de materiales volcánicos se usa “para enfoques más descriptivos del registro geológico de los episodios volcánicos”⁴⁷.

Los materiales volcánicos se distinguen en masivos y fragmentados, sin embargo, también hay gases disueltos en estos materiales. Generalmente, estos materiales volcánicos masivos son originarios de la actividad efusiva y los fragmentados de la actividad explosiva, para esto, la Guía de campo de la Zona Volcánica de La Garrotxa afirma que los materiales volcánicos masivos “son cuerpos compactos de roca de composición homogénea, resultado del enfriamiento de flujos de lava que se originan a raíz de una actividad eruptiva efusiva”⁴⁸ y los materiales volcánicos fragmentados son:

Acumulaciones de clastos generados principalmente por la actividad eruptiva de tipo explosivo. Las burbujas de gas individualizan porciones de magma, que son expulsadas al exterior de forma más o menos violenta. En algunos casos, las explosiones volcánicas pueden romper parte de las paredes del conducto o de la chimenea y, entonces, los fragmentos resultantes salen mezclados con los clastos

⁴⁵ TARBUCK y LUTGENS. Op Cit; p. 137.

⁴⁶ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit;p. 206.

⁴⁷ Ibíd. p. 206.

⁴⁸ ESPAÑA. PARQUE NATURAL DE LA ZONA VOLCÁNICA DE LA GARROTXA. Materiales Masivos. El vulcanismo: Guía de campo de la Zona Volcánica de La Garrotxa. Catalunya: Olot, 2012. p. 31.

de magma. Finalmente, la deposición de todos estos materiales da lugar a los depósitos fragmentarios, también denominados piroclásticos⁴⁹.

A partir de lo mencionado, estos materiales expulsados tanto masivos como fragmentados corresponden a “**lava**, grandes volúmenes de **gases** y **rocas piroclásticas** (rocas rotas, «bombas» de lava, ceniza fina y polvo)”⁵⁰.

Piroclastos

El material piroclasto hace referencia a la fragmentación de lava y gases disueltos a partir de una erupción volcánica. Por las características de esta investigación se dividirán en las modalidades de Tefra y Corrientes de Densidad de Piroclastos.

Corrientes de Densidad de Piroclastos

Las corrientes de densidad de piroclastos, son mezclas no homogéneas de partículas volcánicas. Andronico *et al.*⁵¹ exponen que consisten en flujos calientes de ceniza, gas y escombros volcánicos gruesos que pueden tener velocidades de aproximadamente 100 m/s, teniendo un recorrido de 10 a 30 km desde el cráter y destruyendo todo a su paso (Ver figura 7). Según Branner & Kojelaar⁵² el flujo piroclástico puede transportar rápidamente gran cantidad de material volcánico con temperaturas elevadas por varios kilómetros cubriendo hasta 45.000 km².

⁴⁹ *Ibíd.* p. 34

⁵⁰ TARBUCK y LUTGENS. *Op Cit*; p. 140.

⁵¹ ANDRONICO *et al.* Introducción. EN: Pyroclastic density currents at Etna volcano, Italy: The 11 February 2014 case study. 2018. Vol 357. p. 92.

⁵² BRANNEY, M.J., KOKELAAR, Peter. Introduction and key concepts. EN: Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. Geological Society, London. 2002. p. 1.

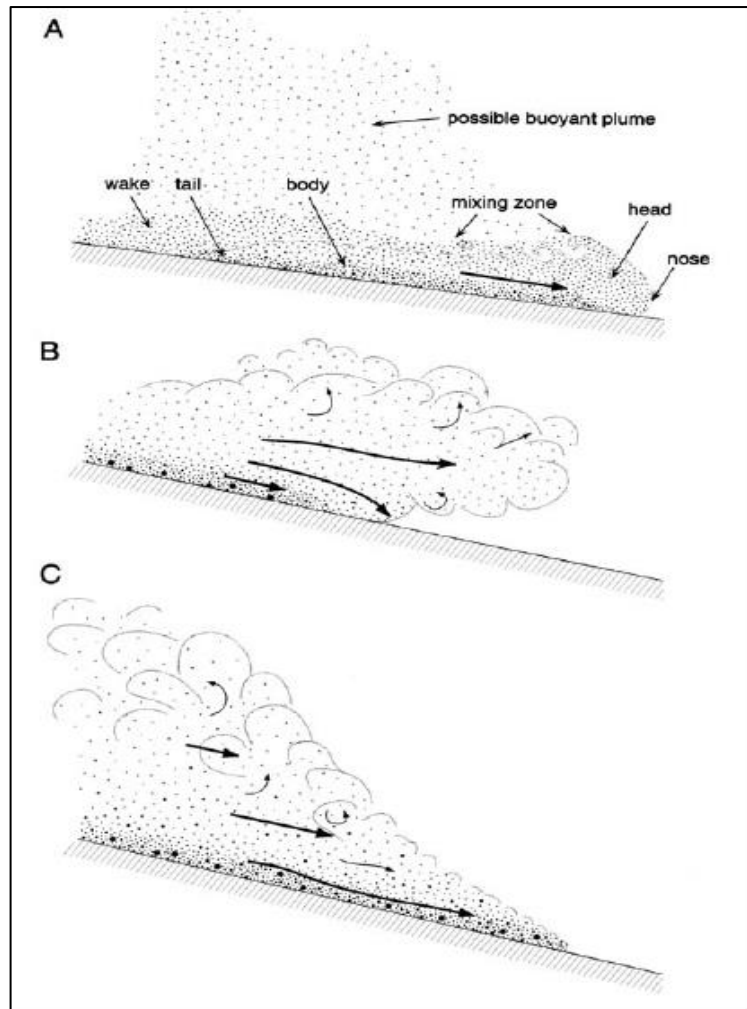


Figura 7: Partes principales de las corrientes de densidad. A) Estructura generalizada de una corriente de densidad turbulenta. B) Cabeza sobresaliente resultante de un flujo granular lento. C) Avance de una corriente estratificada por densidad donde predomina el movimiento rápido. B y C pueden avanzar a una velocidad similar en algunas ocasiones. Tomada de Branney & Kokelaar (2002).

Las corrientes de densidad de piroclastos, suelen originarse por un colapso de una columna de erupción después de la desintegración explosiva de magma y roca en un conducto volcánico o de avalanchas calientes derivadas de cúpulas de lava. Estos materiales por su naturaleza, alta temperatura y el elemento pendiente del edificio volcánico, tienden a destruir todo lo que encuentren a su paso.

La figura 9, muestra la actividad presentada por el Volcán Etna de Italia el día 11 de febrero del 2014 en uno de los respiraderos del mismo y en los que se evidenció un flujo de corrientes densas de piroclastos.



Figura 8: Imagen en secuencia de formación de corrientes densas de piroclastos en el Volcán Etna de Italia el día 11 de febrero del 2014. Tomada y modificada de Andronico et al. (2018)

Los depósitos de estas corrientes, generalmente son categorizados de acuerdo con la litología y la estructura sedimentaria, como ignimbritas, depósitos piroclásticos y depósitos de flujo de bloques y ceniza.

Tefra

El término tefra según Lockwood & Hazlett⁵³ se encarga de describir los elementos que son expulsados por el aire en algún suceso volcánico. Dentro de esta denominación se encuentran diferentes tipos de material, los cuales se clasifican principalmente por el tamaño.

- **Ceniza⁵⁴:** la ceniza volcánica no es producto de algo quemado, como es generalmente conocida. Es simplemente material magmático fragmentado muy fino o pulverizado, con partículas individuales de menos de 2 mm de diámetro. La ceniza puede ser emitida ya sea sólida o líquida, y por su pequeño tamaño, las líquidas se enfrían y solidifican muy rápido.

⁵³ LOCKWOOD, John P. & HAZLETT, Richard W. Volcanoes Global Perspectives. 1 ed. Wiley-Blackwell, 2010. p. 551.

⁵⁴ Ibíd. p. 180.

- **Lapilli**⁵⁵: es el nombre que se le da a los piroclastos que se encuentran en el rango de 2 a 64 mm. Así como la ceniza, el lapilli puede ser expulsado en condición sólida o líquida.
- **Bombas**⁵⁶: son masas viscosas de lava expulsada en estado líquido o plástico. Las bombas comúnmente presentan formas redondeadas o aerodinámicas, lo cual les permiten viajar a través del aire. El tamaño de las bombas puede variar desde menos de un centímetro hasta alcanzar un metro de longitud.
- **Bloques**⁵⁷: cuando se habla de bloques volcánicos se hace referencia a fragmentos sólidos de rocas más viejas, expulsados por una erupción. Pueden ser fragmentos de roca volcánica o no volcánica que provienen de las profundidades del volcán. Este material es el más grande dentro de las clasificaciones de la tefra.

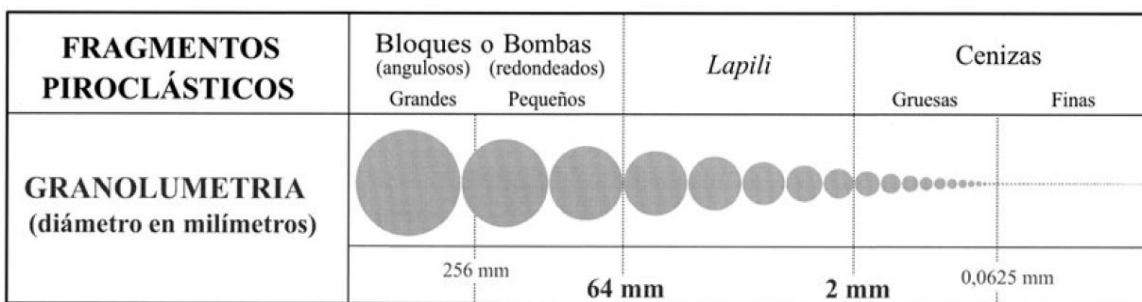


Figura 9: Clasificación granulométrica de los materiales piroclásticos y comparación con su equivalente en materiales sedimentarios. Tomada de Albert Pujadas, David Brusi y Emilio Pedrinaci (1999).

Gases

El gas volcánico, es uno de los materiales que afloran en una erupción volcánica y en ocasiones, antes de la materialización de esta. “La porción gaseosa de la mayoría de los magmas constituye del 1 al 6 por ciento del peso total, y la mayor

⁵⁵ Ibíd. p. 182.

⁵⁶ Ibíd. p. 176.

⁵⁷ Ibíd. p. 178.

parte es vapor de agua. Aunque el porcentaje puede ser pequeño, la cantidad real de gases emitidos puede superar varios miles de toneladas por día”⁵⁸.



Figura 10: Columna eruptiva (Emisión de gases y ceniza) del Volcán Merapi en Indonesia. Tomada de Documental Hacia el Infierno (2016).

El USGS⁵⁹ manifiesta que el gas liberado de un volcán se relaciona directamente con el tipo, la cantidad y la profundidad del magma que se encuentra debajo de la superficie. La medición de cantidad y tipo de gas que emite un volcán, es de gran interés para los vulcanólogos debido a que el aumento de su producción y un cambio en la composición química de los gases pueden ser algunos de los primeros signos que se pueden evidenciar sobre la superficie, de un aumento en la actividad volcánica.

Según Tarbuck y Lutgens, la composición de los gases emitidos de un volcán, son muy representativos en la configuración de los gases que forman la atmósfera.

⁵⁸ TARBUCK y LUTGENS. Op Cit; p. 142.

⁵⁹ USGS. Volcanic Gas Monitoring at Mount St. Helens EN: Volcanoes USGS. 2018.

Los análisis de muestras tomadas durante erupciones hawaiianas indican que los gases son: alrededor del 70 por ciento vapores de agua, un 15 por ciento dióxidos de carbono, un 5 por ciento nitrógenos, un 5 por ciento dióxidos de azufre y cantidades menores de cloro, hidrógeno y argón. Los compuestos de azufre se reconocen fácilmente por su olor. Los volcanes son una fuente natural de contaminación del aire, que incluye el dióxido de azufre, el cual se combina fácilmente con el agua para formar ácido sulfúrico⁶⁰.

El almacenamiento de estos gases en la atmosfera del planeta, pueden mantenerse durante años, trayendo consigo cambios significativos en el clima. “En la historia de la vulcanología, los gases provenientes de las fumarolas han sido cuantificados por métodos químicos en laboratorios especializados, previa absorción de éstos en trampas altamente alcalinas, dispuestas al interior de los cráteres, o directamente muestreados en las fumarolas”⁶¹. Actualmente, se adhieren elementos tecnológicos que facilitan este trabajo para los vulcanólogos tales como sensores remotos entre otros.

Lava

Uno de los conceptos más confundidos en esta rama es el de magma y lava, para esto, Jain⁶² expone que el **Magma** es un líquido que se encuentra en el interior de los volcanes, el cual se presenta compuesto en su 99% de 10 elementos, incluyendo Silicio (Si), Titanio (Ti), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Magnesio (Mg), Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Hidrógeno (H) y Oxígeno (O), también se puede presentar fragmentos de roca fundida, algunos cristales, gases disueltos y otros fragmentos. Cuando este elemento es expulsado por medio de una erupción volcánica y alcanza la superficie, se le asigna el nombre de **lava**.

⁶⁰ TARBUCK y LUTGENS. Op Cit; p. 142.

⁶¹ GARZÓN, Gustavo et al. Introducción. Estrategias De Medición De Gases Volcánicos En Colombia Utilizando Sensores Ópticos Remotos. Pamplona: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, 2008. p. 2.

⁶² JAIN Sreepat. Fundamentals of Physical Geology. Volcanic Features. EN: Fundamentals of Physical Geology. New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London: Springer Geology, 2014. p. 373, 375.

La lava finalmente es un material volcánico que puede presentarse de manera fluida o en forma de nubes ardientes de cenizas y fragmentos. La capacidad de flujo de la lava depende directamente de la viscosidad que posee el magma.



Figura 11: Flujos de lava. Tomada de Lockwood, John P. & Hazlett, Richard W (2010).

Lahares

Uno de los elementos con capacidad destructiva que tiene relación con el vulcanismo son los lahares, los cuales pueden originarse de diversas formas. Primero, se puede decir que un lahar es una mezcla fluida de restos de roca y agua que se origina en las pendientes de los volcanes. Según Waitt Richard B.⁶³ este material fluido está compuesto de agua y arena lubricada, o lodo, aunque puede poseer más del 50 % de su contenido de bloques y cantos rodados.

Los lahares⁶⁴ pueden originarse por la caída de materiales volcánicos expulsados a altas temperaturas sobre nieve o hielo. Esta masa derretida después se desplaza rápidamente pendiente abajo, incorporando cenizas y rocas que se

⁶³ RICHARD B., W., Lahar. En: BOBROWSKY P. T. Encyclopedia of Natural Hazards: Springer, 2013. p. 415.

⁶⁴ *Ibíd.* p. 415.

encuentran en la cuesta del volcán. Los lahares también pueden crearse a partir de avalanchas por residuos volcánicos. Estas avalanchas tienden a ser arcillosas o rocosas. Los lahares pueden también iniciar por erupción o alguna fuga de un cráter. Otra manera de originarse puede ser la caída torrencial de grandes volúmenes de ceniza.



Figura 12: Lahar. Tomada de Lockwood, John P. & Hazlett, Richard W (2010).

Los lahares pueden abarcar un valle y rápidamente arremeter sobre una población, destruyendo o removiendo casi todas las estructuras.

El Observatorio Vulcanológico del Sur⁶⁵, explica también, cuáles son los elementos con mayor impacto en el territorio y sus consecuencias (Ver Tabla 1) al

⁶⁵ PERU. INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU. Peligros Volcánicos. En: Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS). Lima – Perú. [s.f].

igual que G. Wilson et al.⁶⁶ en su investigación manifiestan que los cuatro materiales más destructores producto de una actividad volcánica son la lava, lahares, flujo denso de piroclastos y la tefra. Estos autores toman la infraestructura crítica planteada por The Commission on Critical Infrastructure Protection⁶⁷ para explicar qué infraestructura crítica entre la infraestructura de transporte, infraestructura de producción y almacenamiento de petróleo y gas, infraestructura de suministro de agua, infraestructura de servicios de emergencia, infraestructura de servicios del gobierno, infraestructura bancaria y financiera, infraestructura de energía eléctrica e infraestructura de telecomunicaciones, se ve afectada por el afloramiento de cada material volcánico.

Tabla 2:

Peligros volcánicos. Tomado de Observatorio Vulcanológico del Sur.

Elementos	Afectación o consecuencia
Proyección de bombas y escorias	Daños por impacto, incendios.
Caída de piroclastos	Recubrimiento por cenizas, colapso de estructuras, daños a la agricultura e instalaciones industriales.
Dispersión de cenizas	Problemas en tráfico aéreo, falta de visibilidad.
Coladas y oleadas piroclásticas	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por cenizas.
Lavas y domos	Daños a estructuras, incendios, recubrimiento por lavas.
Lahares	Daños a estructuras, arrastres de materiales, recubrimiento por barro.
Colapso total o parcial del edificio volcánico	Daños a estructuras, recubrimiento por derrubios, avalanchas, tsunami inducido.

⁶⁶ WILSON, G, et al. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. New Zeland: Journal of Volcanology and Geothermal Research 286, 2014. p.148–182.

⁶⁷ ESTADOS UNIDOS. The President's Commission on Critical Infrastructure Protection (Robert T. March, Chairman. Critical Foundations Protecting America's Infrastructures. The Report of the President' Commission on Critical Infrastructure Protection. Washington, DC: octubre 1997. p. 3.

Destructividad Volcánica, Magnitud de Masa, Intensidad, Poder Dispersivo Y Potencial Destructivo

El término destructividad, poco ha sido trabajado, aunque hay una rama de las Ciencias de la Tierra que sí lo ha tratado; esta rama es la Sismología, la cual se ha encargado de dar definición a la destructividad con relación a eventos sísmicos. En este caso se trabajará con este término asociado principalmente a dicha rama, pero enfocado en la vulcanología.

Para esto, se tomará como referencia a Benioff⁶⁸ quien indica que la destructividad real de un terremoto dado puede ser definida como la sumatoria de todos los daños materiales causados por los movimientos sísmicos.

Entendiendo esto, para la presente investigación se trabajará con base a este término dado por Benioff aplicado a nuestro ámbito de interés. Por esto, se da una definición propia, entendiendo así que: la destructividad volcánica hace referencia a la sumatoria de todos los daños estructurales, socioeconómicos y ambientales asociados a la actividad eruptiva volcánica.

Como se presentó en el apartado de antecedentes, distintos autores han intentado crear metodologías para medir o categorizar las erupciones volcánicas, sin embargo, a continuación, se presentarán los términos más usados en la vulcanología para realizar dichas mediciones.

Para CENAPRED⁶⁹ “**Magnitud de masa** es la masa total del material; **Intensidad** es la razón a la que el magma es expulsado (masa/tiempo); **Poder dispersivo** es el área sobre la cual se distribuyen los productos volcánicos y está relacionada con la altura de la columna eruptiva; **Violencia** es una medida de la energía cinética liberada durante las explosiones, relacionada con el alcance de los

⁶⁸ BENIOFF, Hugo. The physical evaluation of seismic destructiveness. EN: Bulletin of the Seismological Society of America. 1934. p. 398-403.

⁶⁹ MÉXICO. CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN. Op Cit; p. 8.

fragmentos lanzados y **Potencial destructivo** es una medida de la extensión de la destrucción de edificaciones, tierras cultivables y vegetación, producida por una erupción”.

En la primera edición de la Enciclopedia de Volcanes⁷⁰, Pyle, enfocándose en el tamaño de las erupciones, plantea una opción para la medición del potencial destructivo definido como el área en el cual las estructuras humanas puedan resultar completamente destruidas por causa de una erupción volcánica. En el mismo documento expone la definición para el índice de destructividad de una erupción como el logaritmo del área total afectada por lava, lahares, flujo de piroclastos y caída de tefra.

Pyle⁷¹, en la segunda edición de la Enciclopedia de volcanes, como en esta investigación, también menciona a Tsuya y a Newhall como contribuyentes de la búsqueda de una escala que permita categorizar la actividad volcánica. Por otra parte, expresa la necesidad de las escalas logarítmicas de categorizar las erupciones volcánicas de forma similar a como lo hacen las escalas de magnitud de Gutenberg y Richter en la sismología.

A pesar que se menciona potencial destructivo como una medida, ésta aún no ha sido lo suficientemente trabajada y estudiada, sin embargo, se intenta hacer un acercamiento a lo que se puede pretender con la creación de una medida como esta.

Es necesario aclarar que los datos que se refieren a la actividad eruptiva volcánica solo son abarcados desde la parte física y cuantitativa. A pesar de que se ha planteado una medida para el potencial destructivo de las erupciones volcánicas, esta no es clara al explicar por qué, para qué y cómo se mide exactamente, no obstante, CENAPRED en el mismo documento mencionado anteriormente, explica que:

⁷⁰ SIGURDSSON, Haraldur. 1ed. Op Cit; p. 268-269.

⁷¹ SIGURDSSON, Haraldur. 2ed. Op Cit; p. 257.

Actualmente, una de las formas más aceptadas de cuantificar las erupciones explosivas (no es válida para las erupciones efusivas) es la escala del índice de explosividad volcánica (IEV). Esta escala (Ver tabla 2) fue definida por Newhall y Self en 1982, la cual tiene en cuenta diversas características de una erupción mencionadas anteriormente como: el volumen de magma emitido, la energía térmica liberada, el alcance de los productos fragmentados, el grado de destrucción causada, la altura de la columna eruptiva, la duración de la erupción, etc.⁷².

Índice de Explosividad Volcánica

Esta escala permite medir la erupción volcánica de manera jerárquica, siendo 0 bajo y 8 muy alto. En el IEV “no se tiene en cuenta el volumen de lava, las víctimas mortales ni los daños materiales”⁷³

Los parámetros establecidos en el IEV, se presentan en orden decreciente de confiabilidad y poder de discriminación. Los rangos establecidos, entre la altura de la columna eruptiva, descripción y duración de la erupción, muestran la relación entre la intensidad, magnitud y tasa de liberación energética en el transcurso de una erupción.

Según Lario Gómez y Bardají Azcárate⁷⁴ en esta escala se han registrado muy pocas erupciones catastróficas y muchas en medida baja, siendo arma de doble filo debido a que el interés en estudios conforme a esta disciplina puede ser pocos.

⁷² Ibíd. p. 8.

⁷³ MONROE, James; WICANDER, Reed & POZO, Manuel. Riesgos Volcánicos. Geología. Dinámica y Evolución de la Tierra. 4 ed. Madrid – España: Editorial Paraninfo, 2008. p. 140.

⁷⁴ LARIO GÓMEZ, Javier & BAJARDÍ AZCÁRATE, Teresa. Introducción a los Riesgos Geológicos. Madrid – España: Editorial UNED, 2007. p.302.

CAPITULO 3: METODOLÓGIA

3.1 Identificación de Parámetros

Para llevar a cabo la realización de la escala de PDV, se tuvo en cuenta en primera medida, que esta sería una aproximación a la destructividad que probablemente puede tener un territorio por causa de la actividad eruptiva.

Los dos conjuntos de parámetros que se tuvieron en cuenta para realizar esta escala fueron: actividad eruptiva y la población.

A continuación, se explica el proceso que se llevó a cabo para determinar los parámetros centrales que definieron la escala de PDV.

Parámetro 1:

El primer parámetro que se tomó en cuenta para la realización de la escala de PDV, fue la actividad volcánica⁷⁵, puesto que este es el aspecto que se encarga de la clasificación de la violencia y el tipo de material expulsado en una erupción volcánica. Este parámetro se tomó a partir de la descripción que se le da en el IEV propuesto por Newhall y Self⁷⁶, ya que en esta se jerarquizan los tipos de actividad, teniendo en cuenta las características particulares que posee cada uno de estos.

⁷⁵ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 202.

⁷⁶ NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. Op. Cit., p. 1234.

Tabla 3:

Índice de Explosividad Volcánica (IEV). Modificada de Newhall y Self (1982).

ÍNDICE DE EXPLOSIVIDAD VOLCÁNICA (IEV)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción general	No explosiva	Baja	Moderada	Moderada a grande	Grande	Muy grande			
Descripción cualitativa	Efusiva		Explosiva		Cataclísmica Paroxísmica				
Tipo de erupción	Hawaiana		Vulcaniana			Ultrapliniana			
		Estromboliana		Pliniana					
Duración (horas de erupción continua)	<1				12				
		1 - 6							
			6 - 12						
Volumen de tefra (m3)	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹²
Altura de la columna eruptiva (km)	< 0,1	0,1 - 1	1 - 5	3 - 15	10 - 25	> 25			
Inyección en la troposfera	Nula	Escasa	Moderada	Importante					
Inyección en la estratosfera	No	No	No	Posible	Segura	Significativa			

Newhall y Self⁷⁷ exponen que para definir los parámetros utilizados en esta escala (Ver tabla 3), la Sociedad Vulcanológica de Japón sugirió tener en cuenta datos de erupciones modernas, sin embargo, hay muy pocos datos de grandes erupciones teniendo en cuenta la fecha de 1500 hasta la fecha de realización de 1982.

El registro histórico del vulcanismo, contiene muy poca información para consolidar una estimación cuantitativa en una escala. Newhall y Self⁷⁸ exponen que el IEV no es más que un indicador del carácter explosivo de una erupción, en el cual se tuvo en cuenta la estimación de intensidad y magnitud de Walker en el año 1973.

⁷⁷ NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. Op. Cit., p. 1234.

⁷⁸ NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. Op. Cit., p. 1234.

Inicialmente, en el desarrollo de esta investigación se pensó utilizar de manera individual, cada uno de los materiales expulsados en una erupción volcánica, sin embargo, se decidió trabajar con actividad eruptiva volcánica, la cual se categoriza en tipos de actividad eruptiva tomado las definiciones de Pujadas, Brusi y Pedrinaci⁷⁹ y el IEV, debido a que este, encierra mayor información tales como los elementos y la cantidad de material que en una actividad eruptiva puede expulsar por el posible periodo de recurrencia de este, y así mismo el nivel de peligrosidad, el cual está expresado de 1 al 8, donde 1 representa menor peligrosidad y 8 es su máxima expresión. En la escala de Newhall y Self⁸⁰ no se tiene en cuenta el volumen de lava, ni los tipos de actividad eruptiva que presentan este fenómeno en mayor medida al igual que las víctimas mortales, ni los daños materiales.

Finalmente, se optó por trabajar con cinco tipos de actividad eruptiva, basados teóricamente en los planteamientos de Pujadas, Brusi y Pedrinaci⁸¹ los cuales realizan una selección de los TAE que se presentan con mayor frecuencia, sin embargo, al ver la similitud en los materiales expulsados y comportamiento de los dos tipos que convergen en la actividad efusiva, se decidió trabajar la puntual y fisural como efusiva.

Por un lado, se habla de actividad explosiva, categoría en la cual se encuentra la actividad hidromagmática, vulcaniana, estromboliana y pliniana. Por otra parte, estos autores tienen en cuenta la actividad puntual y fisural entendidas como efusivas.

Según Pujadas, Brusi y Pedrinaci⁸² la actividad efusiva, suele presentar magmas básicos que originan una emisión pausada de lava y en algunas erupciones no muy comunes, se presentan magmas más ácidos “la actividad se puede clasificar

⁷⁹ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁸⁰ NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. Op. Cit., p. 1234.

⁸¹ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁸² PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

como **puntual**, cuando el magma sale desde un punto concreto, o **fisural**, en el caso que la difusión de ésta se produzca a lo largo de una línea correspondiente a la fractura por la que asciende el magma”⁸³ Por otra parte, la actividad de tipo **explosiva** suele ser más violenta que la actividad de tipo efusiva “caracterizada por la expulsión más o menos violenta de material piroclástico”⁸⁴. En este grupo se encuentran la actividad hidromagmática, vulcaniana, estromboliana y pliniana.

Las erupciones **hidromagmáticas** “se caracterizan por columnas piroclásticas en forma de “ciprés” que marcan cada uno de los pulsos eruptivos de la interacción. Asimismo, sus depósitos piroclásticos presentan granulometrías muy finas, lapillis acrecionales y alto contenido en líticos”⁸⁵.

...ocurren cuando el magma en ascenso interacciona de forma efectiva con agua externa (sea superficial o subterránea), dando lugar a erupciones explosivas. Esta interacción se visualiza como de tipo combustible (magma)-refrigerante (agua), utilizándose modelos analógicos con aceite caliente-agua. Las principales condiciones que esta interacción debe cumplir son una determinada relación de masas entre el agua y el magma, y una gran superficie de contacto, lo que requiere que el magma esté previamente vesiculado por sus propios volátiles⁸⁶

Según Pujadas, Brusi y Pedrinaci⁸⁷, la actividad **estromboliana** es la menos violenta del grupo de las explosivas, la cual se caracteriza por pequeñas explosiones distanciadas en periodos cortos entre 1 segundo hasta pocas horas. “La llegada de las burbujas de gas a la superficie rompe y/o individualiza fragmentos de magma que son expulsados siguiendo trayectorias balísticas. Esta actividad está relacionada con magmas básicos que, debido a su baja viscosidad,

⁸³ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁸⁴ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁸⁵ PEREZ, Francisco José y RODRIGUEZ, Alejandro. Erupciones Hidromagmáticas (Surtseyanas y Freatoplinianas. ¿Cómo se miden las erupciones volcánicas? El índice de explosividad volcánica. España: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2015. p. 29.

⁸⁶ Ibíd. p. 30

⁸⁷ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

permiten que las burbujas de gas circulen hacia la superficie con relativa facilidad”⁸⁸

Cuando se habla de actividad de eruptiva **vulcaniana** se dice que “son erupciones muy explosivas típicas de magmas ácidos e intermedios. La diferencia estriba en que en las erupciones vulcanianas se considera que el magma en su ascenso se encuentra con un tapón de roca que cierra el conducto de salida”⁸⁹.

las erupciones vulcanianas son erupciones explosivas a conducto cerrado típicas de magmas ácidos e intermedios, donde los productos volcánicos principales son los depósitos piroclásticos. La posibilidad de interaccionar con aguas subterráneas hace que estas erupciones participen tanto de características propias magmáticas como de las hidromagmáticas⁹⁰

Por último, se encuentra el tipo de actividad eruptiva **pliniana** “se caracteriza por su alto grado de explosividad, con manifestaciones muy violentas en las cuales se expulsan grandes volúmenes de fragmentos y volátiles. La expulsión, a gran velocidad, de estos materiales y su rápida ascensión forma columnas eruptivas que pueden superar los 30 kilómetros de altura”⁹¹

La enorme expansión que sufre entonces el magma, unido al brusco descenso de presión litostática cuando se alcanza la superficie, desencadenan un chorro eruptivo de alta velocidad (hasta 600 m/s) constituido por gases y piroclastos que generan columnas piroclásticas en forma de champiñón que suelen denominarse columnas plinianas. Estas columnas pueden alcanzar alturas de hasta 50 km (en las erupciones ultraplinianas), transportando aerosoles y partículas piroclásticas tanto a la troposfera como a la estratosfera. A partir de estas columnas, los piroclastos van cayendo a modo de lluvia, formando extensos mantos piroclásticos que recubren la topografía previa o, en determinadas condiciones, estas columnas pueden colapsar

⁸⁸ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

⁸⁹ Ibíd. p. 29

⁹⁰ Ibíd. p. 29

⁹¹ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit; p. 204.

formando flujos piroclásticos dirigidos que viajan a ras del suelo a altas velocidades (incluso superiores a 100 km/h)⁹²

Parámetro 2:

El IEV como base de los aspectos físicos tenidos en cuenta en esta investigación está en capacidad de medir la peligrosidad o violencia de una erupción volcánica en cualquier espacio, sin importar si este se encuentra habitado.

Teniendo en cuenta que en la búsqueda de esta escala de PDV se tiene como objetivo medir el posible impacto de una erupción volcánica sobre el territorio, se vio la necesidad de involucrar un indicador que represente los aspectos poblacionales de este estudio, razón por la cual, la cantidad de población fue el parámetro que se escogió como primera aproximación a la escala de PDV.

Una razón por la cual se adoptó este parámetro es el respaldo que posee en cuestión de acceso a datos y estadísticas.

La población juega un papel crucial en el desarrollo de esta escala de PDV y a partir de esta se pueden hacer relaciones en lo que refiere a oferta y demanda de bienes y servicios, y también en la parte demográfica del análisis, es decir, se puede concluir que las infraestructuras de bienes y servicios están relacionadas y son directamente proporcionales a la cantidad poblacional de cualquier asentamiento humano. Factores que marcan suma relevancia al momento de la realización de cualquier análisis de impacto territorial.

Para abordar el parámetro “Población”, se seleccionó la metodología establecida por la Comisión Europea de Estadística (EUROSTAT)⁹³. Esta se encarga de dividir el territorio económico de la Unión Europea basándose en la cantidad de población asentada en cada una de las unidades territoriales correspondientes a las regiones geográficas establecidas a partir de parámetros administrativos,

⁹² PEREZ, Francisco José y RODRIGUEZ, Alejandro. Op Cit; p. 28.

⁹³ EUROPA. EUROSTAT. Basic principles. EN: Regions in the European Union Nomenclature of territorial units for statistics. Italy. 2015. p. 4 – 5.

institucionales y políticos. Estas divisiones reciben el nombre de NUTS (siglas dadas del inglés de The Nomenclature of Territorial Units for Statistics). Según el Diario Oficial de la Unión Europea ⁹⁴El propósito de esta clasificación es brindar un desglose único y uniforme en lo relacionado al territorio económico de la Unión Europea.

La clasificación NUTS normalmente puede modificarse solo después de que hayan transcurrido al menos tres años después de la última versión. Las primeras dos enmiendas se establecieron en 2006 y 2010. La última publicación⁹⁵ cubre la tercera revisión regular de las regiones NUTS, llamada "NUTS 2013". La cual entró en vigor el 1 de enero de 2015 y sustituye a la NUTS 2010. Los principales objetivos de las NUTS en Europa son⁹⁶:

- Asegurar estándares armonizados en la recopilación y transmisión de datos regionales.
- Garantiza que las estadísticas regionales publicadas se basen en datos comparables.
- Permite el análisis y la comparación de la situación socioeconómica de las regiones a partir de datos armonizados.
- Las intervenciones políticas, como los Fondos Estructurales Europeos, pueden dirigirse específicamente a apoyar a las regiones desfavorecidas y menos competitivas.

Las NUTS se categorizan de la siguiente manera:

⁹⁴ EUROPA. DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. Territorio Regional. EN: REGLAMENTO (UE) No 549/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2013 relativo al Sistema Europeo de Cuentas Nacionales y Regionales de la Unión Europea (Texto pertinente a efectos del EEE). Edición en lengua española. 2013. p. 362.

⁹⁵ EUROPA. EUROSTAT. Op. Cit., p. 4

⁹⁶ EUROPA. EUROSTAT. Op. Cit., p. 4

Tabla 4:

Categoría Unidades Territoriales. Tomada de EUROSTAT (2015).

NIVEL (Unidad territorial)	POBLACIÓN MÍNIMA	POBLACIÓN MÁXIMA
NUTS 1	3'000.000	7'000.000
NUTS 2	800.000	3'000.000
NUTS 3	150.000	800.000

A pesar de que las Unidades territoriales se categoricen en 3 niveles inicialmente, Eurostat indica que puede haber una variación en el NUT 3. Para satisfacer la demanda de estadísticas a nivel local, Eurostat⁹⁷ mantiene un sistema de Unidades Administrativas Locales (LAU) compatible con NUTS. Estas LAU son los bloques de construcción de la NUTS y comprenden los municipios con menor población de la Unión Europea. A partir de esto, para esta investigación, se adiciona una categoría (LAU), considerando la cantidad de población inferior a 150.000 habitantes (Ver tabla 6).

Esta variable, se tomó debido a que la cantidad de población que representa cada NUTS, se le fue asignado a partir del estudio que realizó Eurostat⁹⁸ en el que tuvieron en cuenta las distintas características sociales, culturales y económicas en diferentes Unidades Territoriales para así determinar la jerarquía de cada una de ellas.

En esta investigación, la población se verá representada como Unidad territorial y cada categoría de estas unidades territoriales serán NUT (Nomenclatura de Unidad Territorial).

⁹⁷ EUROPA. EUROSTAT. Local Administrative Units (LAU). [s.f]

⁹⁸ EUROPA. EUROSTAT. Op. Cit., p. 1-140.

3.2 Establecimiento de criterios y estructura para la escala de PDV

Teniendo en cuenta que en este trabajo se habla de crear una escala que involucra parámetros cuantitativos (TAE) y cualitativos (Población), se vio la necesidad de encontrar un método estadístico que incluya ambos aspectos. Es por ello que se decidió trabajar con una metodología orientada hacia la toma de decisiones, como lo son las técnicas de decisión multicriterio, que según Carlos Romero⁹⁹, es donde se busca obtener los mejores resultados dentro de un grupo infinito o finito de posibilidades. La decisión de utilizar esta metodología también tiene que ver con la importancia de esta investigación, puesto que la toma de decisiones dentro de cualquier proceso científico cuenta con el peso suficiente para modificar y guiar el rumbo de este.

El método de decisión multicriterio¹⁰⁰ se encarga de subdividir en varias partes algo complejo, brindando al encargado de la actividad, la posibilidad de analizar de manera individual los diferentes criterios que hacen parte de la temática trabajada.

Como se mencionó anteriormente, este método¹⁰¹ incluye factores de tipo cuantitativo y cualitativo, que permite involucrar un número importante de datos, variables y criterios que terminan enriqueciendo y contribuyendo al desarrollo del trabajo en cuestión.

Por medio del proceso de jerarquía analítica¹⁰² se realizó la jerarquización de los parámetros para la escala de PDV.

⁹⁹ ROMERO, Carlos. Introducción: Estructura de un proceso de decisión. EN: Análisis de las decisiones Multicriterio. Madrid, 1996. Primera Edición. p. 14

¹⁰⁰ Ibid. p.14

¹⁰¹ GRAJALES QUINTERO, Alberto; SERRANO MOYA, Edgar y HAHN VON-H, Christine. El proceso de decisión. EN: Los Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación. Caldas, 2013. N° 36. p. 295.

¹⁰² SAATY, Thomas y VARGAS, Luis. Chapter 1 How to Make a Decision. EN: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. New York, 2012. Second Edition. p. 1.

El proceso de jerarquía analítica es una aproximación hacia la toma de decisiones. Está diseñado para trabajar con la razón y la intuición con el fin de seleccionar la mejor opción dentro de un número de posibilidades evaluadas con anterioridad. Según Thomas L. Saaty y Luis G. Vargas¹⁰³ en este proceso, el encargado de tomar las decisiones realiza juicios de comparación los cuales son utilizados posteriormente para identificar las prioridades y clasificar las alternativas.

La descomposición jerárquica de sistemas complejos ¹⁰⁴, surge como un mecanismo básico utilizado para brindar soluciones en casos diversos. El primer paso es organizar los factores que afectan la decisión a tomar gradualmente desde el más general, ubicado en los niveles más altos de la jerarquía, hasta lo particular en los niveles bajos. El propósito de esta estructura es hacer posible el análisis de la importancia de los elementos en sus niveles asignados con respecto a algunos o todos los elementos ubicados en otros niveles.

En este caso, se hizo uso del proceso de jerarquía analítica con el objetivo de asignar un orden jerárquico a los grupos de parámetros con los cuales se decidió trabajar en esta investigación.

Dentro del trabajo con el proceso de jerarquía analítica se encuentra el término “vector de prioridades”, el cual es definido por Thomas L. Saaty y Luis G. Vargas¹⁰⁵ como una clasificación numérica de las alternativas que indica un orden de preferencia entre ellas. Estos expresan que el orden dentro del vector de prioridades también debe reflejar la intensidad evidenciada en la relación existente entre los valores numéricos.

A continuación, se explicará el procedimiento que fue utilizado para la estimación de los valores asignados a cada parámetro.

¹⁰³ Ibid. p. 1.

¹⁰⁴ Ibid. p. 2-3.

¹⁰⁵ Ibid. p. 64.

El primer paso fue organizar los criterios¹⁰⁶ en orden de importancia. Para esta investigación, fueron ordenados desde el parámetro con mayor peligrosidad, en el caso del Actividad Eruptiva Volcánica, según el IEV, y la población, medida en unidad territorial con mayor densidad poblacional, en el caso de la población, hasta la menos peligrosa y la menos densa respectivamente.

Es decir, teniendo n criterios, se debe asignar el número 1 al criterio que se considere más importante, el número 2 al criterio siguiente en importancia, hasta asignar el número n al criterio que considere menos importante.

La expresión con la que se obtuvieron los valores correspondientes a cada criterio fue:

$$w_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}} \quad (1)$$

Donde w_j es el peso asignado a cada parámetro dependiendo de la posición que ocupe este dentro de la totalidad tenida en cuenta, y r_j es el lugar o posición que ocupa el parámetro j -ésimo en la clasificación establecida anteriormente.

De esta manera se asignó un valor a cada parámetro escogido y también a cada alternativa que compone cada parámetro. Para elegir cuál alternativa de cada parámetro era más relevante que el otro, se acudió a la bibliografía; esta explica cuál de los Tipo de Actividad Eruptiva (TAE) son más violentos y en cuanto a la población, la clasificación territorial UT muestra cuál tiene mayor población, por ende, mayor concentración de bienes y servicios, siendo estos los criterios para asignar los valores de relevancia. Sin embargo, para los dos parámetros centrales (TAE y población 'UT'), no hay bibliografía que nos indique cual debe tener relevancia sobre la otra, para lo cual, se acudió al método de juicio de experto,

¹⁰⁶ ROMERO, Carlos. Op. Cit ., p. 28.

donde Escobar y Cuervo lo definen “como una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones. La identificación de las personas que formarán parte del juicio de expertos es una parte crítica en este proceso”¹⁰⁷

Skjong, R. y Wentworth, B¹⁰⁸, manifiestan que los criterios que pueden ser utilizados para la selección de los expertos son: (a) experiencia en la realización de juicios y decisiones. Basado en la evidencia, en la experiencia, por ej. titulaciones, investigación, Publicaciones, cargos y experiencia, premios, etc. (b) Reputación en la comunidad. (c) Disponibilidad y adaptabilidad para participar. (d) Imparcialidad y cualidades inherentes como la confianza en sí mismo.

Teniendo en cuenta los criterios para escoger los juicios de experto, se decidió seleccionar 3 expertos (Ver tabla 5) para obtener la relevancia de cada parámetro y también se tomó un criterio propio, adquirido durante el transcurso del pregrado, tomando elementos expuestos en distintas asignaturas, principalmente en Ordenamiento territorial, Vulcanología y Seminario de Gestión del Riesgo.

El principal rasgo de los expertos es la experiencia académica y manejo de conceptos relacionados en esta investigación, cada uno de ellos, ha tenido basto recorrido en temas relacionados al riesgo geológico y actualmente se encuentran vinculados a proyectos investigativos alrededor de dichos riesgos (Ver Anexo).

Después de hacer una contextualización a cerca de lo que se está realizando en esta investigación, se les pregunto a los expertos: Entre el parámetro TAE y población (UT) ¿Cuál debe tener mayor peso o ponderación para el fin de la escala de potencial destructivo y por qué?

¹⁰⁷ ESCOBAR PÉREZ, Jazmine y CUERVO MARTÍNEZ, Ángela. Juicio de expertos. Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. Bogotá: Avances en Medición, 2008. p. 29.

¹⁰⁸ SKJONG, Rolf y WENTWORTH, Benedikte. Juice of expert. Expert Judgement and risk perception. EN: The International Society of Offshore and Polar Engineers.2001. Vol IV. p. 540.

Tabla 5:

Experiencia Jueces expertos. Elaboración propia.

Experto 1	Elkin de Jesús Salcedo
Experiencia Experto 1	Profesor Titular y Director del Observatorio sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) adscrito a la Universidad del Valle – Departamento de Geografía, Doctor (Ph. D.) en Ciencias de la Tierra de la Universidad Estatal de Moscú, Rusia. “Su línea de trabajo e investigación se enmarca en los campos de sismicidad regional y sismotectónica, sismicidad histórica y estudio del campo macrosísmico, evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico, evaluación de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos naturales”¹⁰⁹ Actualmente, dirige el grupo de investigación Georriesgos y lidera los principales proyectos de Riesgo a cargo del OSSO.
Experto 2	Sandra Jackeline Bedoya
Experiencia Experto 2	Profesional en el área de la Geofísica específicamente con experiencia en la Interventoría y procesamiento de datos sísmicos (terrestres y marinos) PSTM, PSDM, Onda Convertida, en las diferentes cuencas Colombianas (Datos sísmicos superficiales y estructuralmente complejos como los del valle medio del Magdalena, Datos sísmicos con fines estratigráficos como los del Llano y datos sísmicos en zonas de piedemonte, además de procesamiento en zonas complejas como la cuenca del Putumayo y Sinú, entre otras, y por lo tanto conocimiento de la geología de estas, experiencia en el procesamiento de datos sísmicos en algunas cuencas de Perú, Ecuador, Venezuela, Brasil y Bolivia. Geología y Geomorfología de los municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles. Valle del Cauca. Para el Convenio interadministrativo N°0205 CVC – Univalle municipios de Bolívar, Roldanillo y Versalles (áreas de adición).
Experto 3	Jhonattan Fernández Córdoba
Experiencia Experto 3	Profesor hora catedra de la Universidad ICESI en el curso Riesgo Sísmico y de la Universidad del Valle en los cursos Vulcanología e Introducción a la Dinámica y evolución Marino Costera. Geógrafo de base, Magister de Geofísica de la Universidad de Guadalajara en México con énfasis en Vulcanología. Actual

¹⁰⁹ COLOMBIA. OBSERVATORIO SISMOLOGICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO – UNIVERSIDAD DEL VALLE. Elkin de Jesús Salcedo Hurtado En: Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano. Cali – Colombia. [s.f].

coordinador del proyecto de investigación y desarrollo de Fortalecimiento de la Red de Acelerógrafos en el municipio de Santiago de Cali y Director de la investigación en desarrollo.

Las respuestas de cada experto fueron

Experto 1: comparando la dinámica de la población y la de los volcanes, es posible observar que la población tiene mayor flujo, es decir, su cantidad puede aumentar o disminuir en un periodo de tiempo menor en comparación con la actividad volcánica, la cual se presenta con menor frecuencia. También, la actividad de los volcanes no tiende a cambiar en tiempos cortos y no tiene movimiento en el espacio geográfico, más la cantidad de población si, lo cual hace que sea más estable estudiar la dinámica volcánica que el flujo poblacional, por esta razón, se le daría mayor relevancia al TAE y después a la población.

Para el experto número 1, el parámetro TAE tendría el valor $\frac{1}{1}$ y el parámetro Población $\frac{1}{2}$.

Experto 2: si tenemos un volcán x, localizado en un espacio donde tiene influencia directa con cualquier cantidad de población, su destrucción podría ser total en cuestiones de infraestructura, ecosistemas, vidas humanas, etc. Pero si tenemos otro volcán localizado en un espacio y, donde su influencia directa no esté relacionada con flujos de población o actividades humanas, su destructividad va a ser poca, es decir, afectaría ecosistemas, áreas protegidas, entre otras, mas no tendría un impacto de atención de emergencia inmediata conforme a la población. Es por esta razón que la población y su ubicación cerca o no de un complejo volcánico, es crucial en la evaluación del riesgo, teniendo esta, el mayor peso por orden de importancia.

Para el experto 2, el parámetro Población tendría el valor $\frac{1}{1}$ y el parámetro TAE, el valor $\frac{1}{2}$.

Experto 3: teniendo en cuenta que la cantidad de población ubicada en un territorio determinado, puede variar en tiempos cortos, así como también sus prácticas y relaciones económicas, la mayor relevancia hay que dársela al parámetro población. El TAE se convierte menos relevante, debido a que las erupciones volcánicas más desastrosas suelen suceder en tiempos geológicos (es decir, en periodos significativamente grandes) sin embargo, cuando sucede una erupción volcánica, no importa su índice de explosividad, si hay una cantidad de población importante con actividades económicas y demás con impacto en la región o en algunos casos el país, esta actividad volcánica puede llegar a ser desastrosa.

Para el experto 3, el parámetro Población tendría el valor $\frac{1}{1}$ y el parámetro TAE, el valor $\frac{1}{2}$.

Decisión final: a partir de los criterios brindados por los expertos y en relación con los conocimientos que se han adquirido en el proceso académico, se decidió dar mayor relevancia al parámetro población, asignándole a este el valor $\frac{1}{1}$ y al parámetro TAE, el valor $\frac{1}{2}$. Esta decisión se tomó debido a que, con los distintos argumentos ofrecidos por los expertos, se concluyó que la actividad eruptiva en cualquier volcán puede variar en tiempos muy largos y no son muy frecuentes, por el contrario, la dinámica poblacional varía en tiempos relativamente cortos al igual que sus respectivas relaciones sociales, culturales, económicas y modificaciones antrópicas en el territorio.

Un ejemplo de esto, es una población cercana al Volcán Poas, la cual se encuentra en la Provincia Alajuela en el Cantón Poas. Este Cantón, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos¹¹⁰ en el año 2011, contenía una

¹¹⁰ COSTA RICA. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSO. Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia y cantón. En: Estimación y Proyecciones de Población. San José - Costa Rica. 2016.

población de 29.693 habitantes, y la proyección realizada para el año 2019, fue de 33.541 habitantes, aumentando 3.848 habitantes en 8 años.

La población del Cantón Poas se puede afectar por su cercanía al Volcán Poas el cual según Gustavo Barrantes Castillo y Eduardo Malavassi Rojas¹¹¹ el registro histórico del Poas, presenta actividad moderada de forma casi continua, con algunas emisiones de gases y ocasionales erupciones freáticas; además se han producido explosiones vulcanianas y estrombolianas sin mucha importancia y leves. La erupción volcánica con mayor importancia ocurrió en el periodo eruptivo 1953-1955 con una columna eruptiva de poco menos de 5.000 m, a la cual se le otorgo un valor de 3 en el Índice de Explosividad volcánica (IEV).

Este ejemplo nos muestra que la cantidad de población de un espacio geográfico aumentó su número de habitantes en 8 años, siendo un periodo relativamente pequeño comparado con los 64 años que han pasado desde la mayor erupción del Volcán Poas; siendo esta una de las razones para que se le asignara el valor $\frac{1}{1}$ al parámetro población y $\frac{1}{2}$ al TAE.

Posterior a esto, se realizó la aplicación de la ecuación de la jerarquía analítica para darle ponderación a cada una y a sus alternativas respectivamente.

PARAMETROS:

1. Población (w1)
2. AE (w2)

$$w_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$

¹¹¹ BARRANTES CASTILLO, GUSTAVO. y MALAVASSI ROJAS, EDUARDO. El volcán Poás y sus peligros. En: Mapa de peligros del volcán Poás. Bogotá, Colombia. 2015. Vol. 24, No. 2. p. 159.

$$w1 = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = \frac{1}{1.5} = 0.67$$

El valor que se le asignó al parámetro población (NUT) es 0.67

$$w2 = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2}} = \frac{0.5}{1.5} = 0.33$$

El valor que se le asignó al parámetro TAE es 0.33

Las ponderaciones para cada una de las alternativas de los parámetros principales fueron clasificadas de la siguiente manera:

Para la AEV abordada a partir de los tipos de actividad eruptiva, se le asignó el 1 al TAE más peligroso y el 5 al menos peligroso.

TAE

1. Pliniana (w1)
2. Vulcaniana (w2)
3. Estromboliana (w3)
4. Hidromagmática (w4)
5. Efusiva (w5)

$$wj = \frac{\frac{1}{rj}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{ri}}$$

$$w1 = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{1}{2.283} = 0.438$$

El valor que se le da al TAE Pliniana es 0,438.

$$w2 = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{0.5}{2.283} = 0.219$$

El valor que se le da al TAE Vulcaniana es 0,219.

$$w3 = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{0.3}{2.283} = 0.146$$

El valor que se le da al TAE Estromboliana es 0,146.

$$w4 = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{0.25}{2.283} = 0.109$$

El valor que se le da al TAE Hidromagmatica es 0,109.

$$w5 = \frac{\frac{1}{5}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5}} = \frac{0.2}{2.283} = 0.088$$

El valor que se le da a TAE Efusiva es 0,088.

Para el parámetro población abordado a partir de las NUTS, se le asignó el número 1 a la NUTS con mayor población y 4 a la menos poblada.

UT

1. NUTS 1 ($w1$)
2. NUTS 2 ($w2$)
3. NUTS 3 ($w3$)
4. LAU ($w4$)

$$w_j = \frac{\frac{1}{r_j}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}$$

$$w_1 = \frac{\frac{1}{1}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = \frac{1}{2.083} = 0.48$$

El valor que se le da a la Unidad Territorial, NUTS 1 es 0,48.

$$w_2 = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = \frac{0.5}{2.083} = 0.24$$

El valor que se le da a la Unidad Territorial, NUTS 2 es 0,24.

$$w_3 = \frac{\frac{1}{3}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = \frac{0.3}{2.083} = 0.16$$

El valor que se le da a la Unidad Territorial, NUTS 3 es 0,16.

$$w_4 = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4}} = \frac{0.25}{2.083} = 0.12$$

El valor que se le da a la Unidad Territorial, LAU es 0,12.

Después de asignarle el valor a los parámetros (AE y Población) y a cada una de sus alternativas se realizó una suma ponderada la cual “permite ponderar una serie de alternativas en función de un grupo de criterios”¹¹². La ecuación que se utilizó para este proceso fue la siguiente:

$$Wi = \sum_{j=1}^n (Wj * Xij) \quad (2)$$

Siendo:

Wi: Ponderación final obtenida de cada alternativa.

Wj: Peso de cada variable obtenido por uno de los métodos de ponderación.

Xij: Valor de cada variable para cada alternativa.

Para la categorización de la escala de PDV, se aplicó un modelo probabilístico, entendiendo que estos “son los modelos matemáticos que se realizan para fenómenos caracterizados por factores que no se pueden controlar y cuyos resultados no se pueden predecir”¹¹³

El modelo de suma ponderada propuesto en esta investigación, cambiando la simbología de la suma ponderada es:

$$PDV = (UT \times NUT) + (AE \times TAE) \quad (3)$$

$$PDV = (0.67 \times NUT) + (0.33 \times xTAE) \quad (4)$$

¹¹² GUIJARRO MARTÍNEZ, Francisco y AZNAR BELLVER, Jerónimo. Suma ponderada. Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio. Valencia: Universitat Politècnica, 2012. p. 50.

¹¹³ Ibíd. p. 38

Siendo:

PDV: Ponderación del Potencial Destructivo volcánico.

UT: Ponderación del parámetro Población.

NUT: Ponderación de las NUT.

AE: Ponderación de la actividad eruptiva.

TAE: Ponderación de los tipos de actividad eruptiva.

A los productos obtenidos de esta suma ponderada se les aplicó una multiplicación por 100, para convertir a los mismos en porcentajes y así tener la capacidad de adaptarlos a la escala.

De esta manera, se obtuvieron los datos de la unión entre cada TAE y cada NUT, dando como resultado un valor máximo de 46,614% y un mínimo de 10,944%.

Se decidió dividir la escala en 8 niveles debido a las similitudes entre los valores resultantes relacionados a los tipos de actividad eruptiva y las unidades territoriales. Esta escala parte del grado 8, teniendo en cuenta los porcentajes superiores a 40%, este nivel representa la posible afectación de una erupción pliniana sobre una unidad territorial que supere los 3.000.000 de habitantes. El grado 7 involucra los porcentajes entre 35% y 39,9%, enfocándose en los eventos eruptivos de tipo efusivo, hidromagmático, estramboliano o vulcaniano con una posible repercusión en poblaciones mayores a 3.000.000 de habitantes. El grado 6 representa los porcentajes desde 30% a 34,9% y dentro de este se encuentran las actividades plinianas que puedan afectar unidades territoriales entre 800.000 y 3.000.000 de habitantes. El siguiente grado comprende los porcentajes entre 25% y 29,9%, este quinto grado está representado por los eventos eruptivos de tipo pliniano que afecten asentamientos humanos entre 150.000 y 800.000 habitantes. El grado 4, que se encuentra en el rango de 20% a 24,9% se expresa a partir de las erupciones de tipo vulcaniano o estramboliano cuya área de afectación abarque unidades territoriales con poblaciones entre 800.000 y 3.000.000. Este

mismo grado acoge las erupciones plinianas que puedan llegar a afectar poblaciones de hasta 150.000 habitantes. El tercer grado de la escala de PDV, comprendido entre 15% y 19,9%, lo componen los eventos eruptivos de tipo hidromagmático o efusivo que en su área de influencia pueda afectar unidades territoriales con poblaciones entre 800.000 y 3.000.000 de habitantes. Este grado también representa las erupciones estrambolianas con afectación en asentamientos humanos de 150.000 a 800.000 habitantes. Además, dentro de este mismo rango se encuentran los eventos eruptivos de tipo vulcaniano cuya afectación llegue a poblaciones de hasta 800.000 habitantes. En el grado 2, se tienen en cuenta los porcentajes entre 10% y 14,9%, es decir, eventos eruptivos de tipo hidromagmático o efusivo cuyo alcance pueda llegar a afectar poblaciones de hasta 800.000 habitantes. Esta categoría también acoge las erupciones estrambolianas con posibles repercusiones en unidades territoriales de hasta 150.000 habitantes. Por último, se encuentra el grado 1, el cual se refiere a cualquier evento eruptivo volcánico que no presente incidencia directa sobre alguna unidad territorial.

3.3 Aplicación de la Escala de Potencial Destructivo Volcánico para Actividad Eruptiva Volcánica

Para llevar a cabo la aplicación de la Escala de PDV propuesta en esta investigación, el volcán escogido fue el Galeras, ubicado en el departamento de Nariño, Colombia. Fue elegido por presentar actividad constante, accesibilidad a los datos (censo y estudios del SGC¹¹⁴) y contar con asentamientos humanos dentro del área de influencia. A este volcán se le realizó la respectiva búsqueda de información y datos relacionados a historicidad y estudios geológicos que evidenciaran el tipo de actividad eruptiva que se presenta con mayor frecuencia en el volcán escogido. Además, se obtuvo los datos de la cantidad poblacional ubicada dentro del área de influencia del volcán.

A partir de la información suministrada se realizó la aplicación del modelo propuesto y por medio del resultado obtenido le fue asignado un grado dentro de la escala de PDV.

¹¹⁴ COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA INGEOMINAS. Generalidades Volcán Galeras. Actividad Histórica [En línea]. [Bogotá, Colombia] [.s.f]

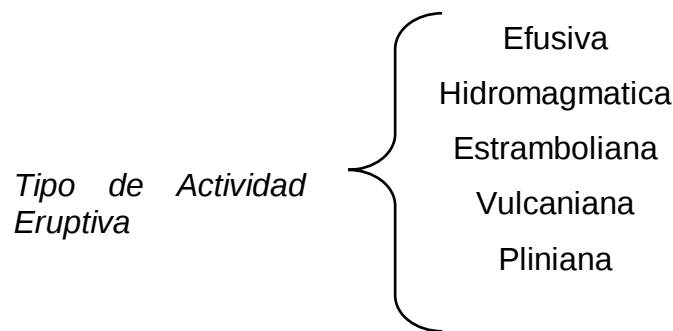
CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 Identificación de Parámetros

Los parámetros que fueron tenidos en cuenta para la realización de la escala de PDV fueron clasificados en:

Parámetros 1: Actividad Eruptiva

Este parámetro fue asociado al proceso eruptivo que se lleva a cabo en un volcán, siendo cinco las actividades más representativas en la vulcanología, debido a su peligrosidad y por ser las que se presentan con mayor frecuencia, según Pujadas, Brusi y Pedrinaci¹¹⁵ y José F. Perez y Alejandro Rodriguez¹¹⁶



Parámetros 2: Población (UT)

Este parámetro está relacionado con la población, debido a la importancia que esta representa y los factores que son tenidos en cuenta, abordada desde la metodología de Eurostat¹¹⁷ la cual divide las Unidades Territoriales (NUTS) en 3, sin embargo, por lo mismo que ellos permiten subdividir la NUTS 3 en más categorías (LAU), para fines de esta investigación, se anexó esta variable después

¹¹⁵ PUJADAS, BRUSI y PEDRINACI. Op Cit;p. 206.

¹¹⁶ PEREZ, Francisco José y RODRIGUEZ, Alejandro. Erupciones Hidromagmáticas (Surtseyanas y Freatoplinianas. ¿Cómo se miden las erupciones volcánicas? El índice de explosividad volcánica. España: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 2015. p. 29.

¹¹⁷ EUROPA. EUROSTAT. Op. Cit., p. 4

de la NUTS3 y se le asignará el nombre LAU con el fin de dejar en claro el significado y la cantidad de población que alberga esta variable.

Tabla 6:

Categoría Unidades Territoriales modificada. Tomada y modificada de EUROSTAT (2015).

NIVEL (Unidad territorial)	POBLACIÓN MÍNIMA	POBLACIÓN MÁXIMA
NUTS 1	Población mayor a 3'000.000 de habitantes	
NUTS 2	800.000	3'000.000
NUTS 3	150.000	800.000
LAU	Población menor a 150.000 de habitantes	

4.2 Modelo y Propuesta de Escala de Potencial Destructivo Volcánico para Actividad Eruptiva Volcánica.

Según la metodología planteada para la ponderación de los parámetros escogidos, la tabla que muestra su respectivo valor asignado es la siguiente:

Tabla 7:

Variables de la Escala de PDV. Elaboración propia.

ACTIVIDAD ERUPTIVA 0,33	Pliniana	0,438	TAE: Tipo de Actividad Eruptiva. UT: Unidad Territorial.
	Vulcaniana	0,219	
	Estromboliana	0,146	
	Hidromagmatica	0,109	
	Efusiva	0,088	
POBLACIÓN (UT) 0,67	NUTS1	0,48	
	NUTS2	0,24	
	NUTS3	0,16	
	LAU	0,12	

A partir de esta tabla y teniendo en cuenta que la Escala de PDV que se propone en esta investigación está basada en la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico que involucre los dos parámetros (TAE y Población), se aplica el siguiente modelo matemático, el cual se propuso para la realización de la escala de PDV a partir de la suma ponderada:

$$PDV = (Población \times NUT) + (AE \times xTAE) \quad (3)$$

Siendo:

PDV: Ponderación del Potencial Destructivo volcánico.

UT: Ponderación del parámetro Población.

NUT: Ponderación de las NUT.

AE: Ponderación de la actividad eruptiva.

TAE: Ponderación de los tipos de actividad eruptiva.

Teniendo en cuenta este modelo, se obtiene la siguiente tabla (ver tabla 6) la cual proporciona un resultado para el cruce de las variables en caso de que ocurriera cualquier Tipo de Actividad Eruptiva con cualquier tipo de Unidad Territorial.

Tabla 8:

Resultados del cruce de Variables según el modelo matemático de PDV. Elaboración propia.

		TIPO DE ACTIVIDAD ERUPTIVA				
		Pliniana	Vulcaniana	Estramboliana	Hidromagmatica	Efusiva
UNIDAD TERRITORIAL	NUT1	0,46614	0,39387	0,36978	0,35757	0,35064
	NUT2	0,30534	0,23307	0,20898	0,19677	0,18984
	NUT3	0,25174	0,17947	0,15538	0,14317	0,13624
	LAU	0,22494	0,15267	0,12858	0,11637	0,10944

Una vez realizado el análisis relacionado al tipo de actividad eruptiva y a las unidades territoriales asociadas a un volcán determinado, se procedió a la asignación de un grado dentro de la escala de Potencial Destructivo Volcánico.

Tabla 9:

Escala de Potencial Destructivo Volcánico. Elaboración propia.

GRADO	VALOR EN LA MATRIZ	DESCRIPCIÓN
8	> 40%	Evento eruptivo de tipo pliniano en el que se puedan ver involucradas de manera directa unidades territoriales con una cantidad de habitantes superior a los 3.000.000.
7	Entre 35% y 39,9%	Evento eruptivo de tipo efusivo, hidromagmático, estramboliano o vulcaniano que pueda llegar a afectar unidades territoriales con una población mayor a 3.000.000.
6	Entre 30% y 34,9%	Evento eruptivo de tipo pliniano cuya área de influencia afecte poblaciones entre los 800.000 y 3.000.000 de habitantes.
5	Entre 25% y 29,9%	Evento eruptivo de tipo pliniano que pueda afectar unidades territoriales que cuenten con una cantidad de habitantes entre 150.000 y 800.000.
4	Entre 20% y 24,9%	Evento eruptivo de tipo vulcaniano o estramboliano cuya área afectación abarque unidades territoriales con poblaciones entre 800.000 y 3.000.000 de habitantes. En esta categoría también se encuentran las erupciones plinianas que puedan llegar a afectar asentamientos humanos de hasta 150.000 habitantes.
3	Entre 15% y 19,9%	Evento eruptivo de tipo hidromagmático o efusivo que en su área de influencia pueda afectar unidades territoriales con poblaciones entre 800.000 y 3.000.000 de habitantes. Este grado en la escala de PDV también representa las erupciones estrambolianas con afectación en asentamientos humanos de 150.000 a 800.000 habitantes. Además, dentro de este mismo nivel se encuentran los eventos eruptivos de tipo vulcaniano cuya afectación llegue a poblaciones de hasta 800.000 habitantes.
2	Entre 10% y 14,9%	Evento eruptivo de tipo hidromagmático o efusivo cuyo alcance pueda llegar a afectar poblaciones de hasta 800.000 habitantes. Esta categoría también acoge las erupciones de tipo estramboliana con posibles repercusiones en unidades territoriales de hasta 150.000 habitantes.
1	Entre 0% y 9,9%	Cualquier evento eruptivo volcánico que no tenga incidencia directa sobre alguna unidad territorial.

4.3 Aplicación de la Escala de Potencial Destructivo Volcánico: Estudio de caso volcán Galeras.

A partir de la información tomada del Servicio Geológico Colombiano (SGC)¹¹⁸ El volcán Galeras, hace parte del Complejo Volcánico Galeras (CVG) y se encuentra ubicado en el Departamento de Nariño.

Según Torres Corredor et al¹¹⁹ “El volcán Galeras es un estrato-volcán que alcanza una altura máxima de 4276 msnm y se localiza en el límite oriental de la depresión interandina Cauca Patía en el Departamento de Nariño a 1°13,26' N y 77°21,54' W. Su cráter activo se ubica a 9 km al W de San Juan de Pasto, capital del Departamento de Nariño que cuenta con 445500 habitantes según proyección DANE para 2016” (ver figura 13).

La zona de amenaza alta corresponde a un sector afectado con una probabilidad mayor al 20% de que ocurran eventos volcánicos con la máxima severidad (cinco) asociados con flujos piroclásticos donde se esperaría que no haya sobrevivientes y las propiedades sean destruidas a lo largo de su trayectoria; adicionalmente, esta zona sería afectada por flujos de lava, caídas piroclásticas, flujos de lodo, proyectiles balísticos, ondas de presión acústica (ondas de choque) y altas concentraciones de gases en inmediaciones del cono activo¹²⁰.

En cuanto a la forma del Volcán Galeras, Vargas et al¹²¹ afirma que su cono de tiene un diámetro de 320 metros y se encuentra dentro de una caldera que se abre hacia el oeste y que el complejo volcánico de Galeras, se caracteriza históricamente por explosiones de tipo vulcaniano.

¹¹⁸ COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA INGEOMINAS. Op Cit. p. 8.

¹¹⁹ TORRES CORREDOR et al. Generalidades. Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. Colombia: Boletín de Geología, 2017. p. 68.

¹²⁰ Ibid. p. 68.

¹²¹ VARGAS, Carlos A et al. Introduction. Attenuation Structure of the Galeras Volcano, Colombia. Colombia: Boletín de Geología. p. 150.

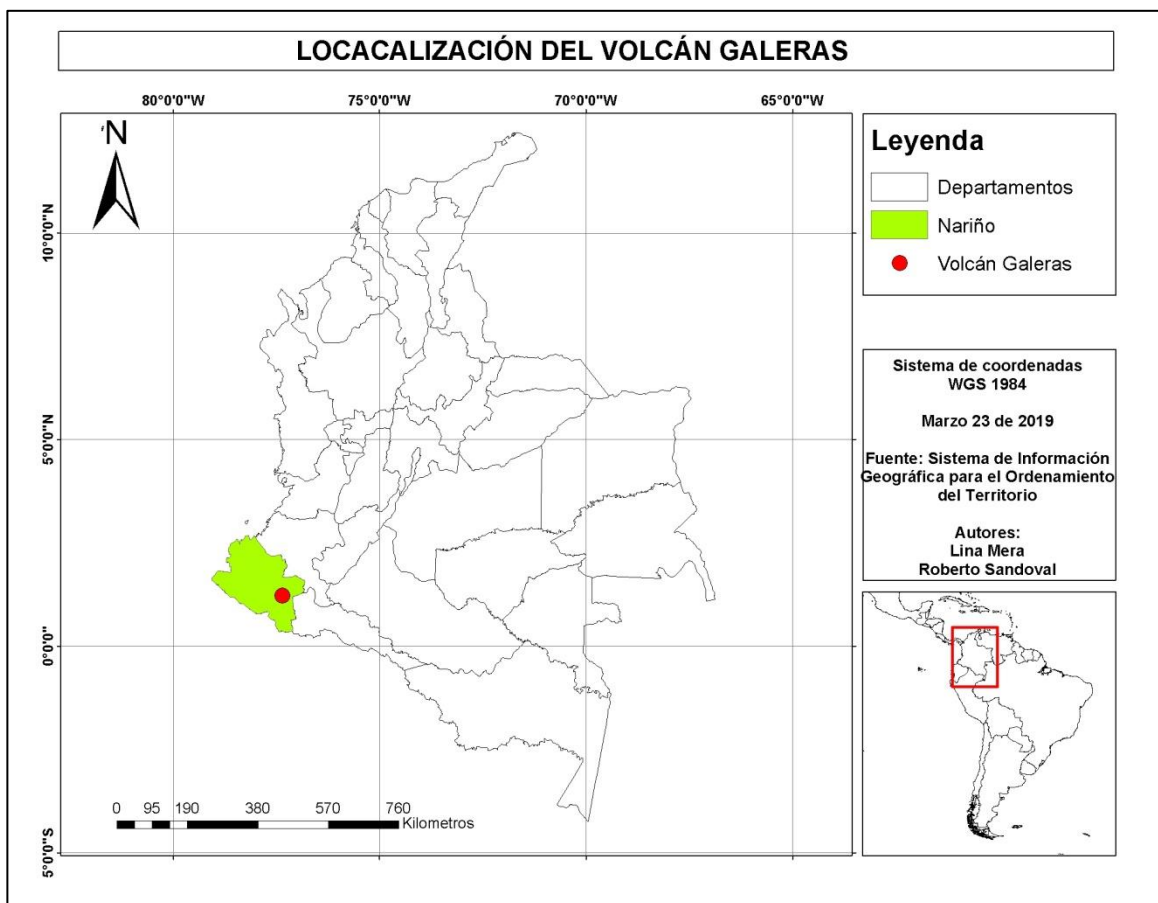


Figura 13: Mapa de localización del Volcán Galeras.

A partir de lo planteado por El Galeras no pertenece a los volcanes más destructivos, pero es importante dada su actividad recurrente. Además, que en su zona de influencia se encuentran asentados siete municipios. En varias ocasiones tanto habitantes como actividad económica se han visto afectados por las manifestaciones del volcán. El problema fundamental del Galeras se relaciona con el asentamiento de poblaciones en zonas de alta peligrosidad, específicamente con la probable afectación por flujos piroclásticos

En la zona de influencia proximal del volcán se encuentran asentados los municipios de Pasto, con 440.000 habitantes (cabecera municipal a 9 km al este del cráter), Nariño con 4900 habitantes (cabecera municipal a 7,3 km al norte del cráter), La Florida con 9600 habitantes (cabecera municipal a 10 km al noroeste del cráter), Sandoná con 25.700 habitantes (cabecera municipal a 14 km al noroeste del cráter),

Consacá con 9400 habitantes (cabecera municipal a 11,4 km al oeste del cráter), Yacuanquer con 11.000 habitantes (cabecera municipal a 12,3 km al sur del cráter) y Tanguá con 9700 habitantes (cabecera municipal a 14,5 km al sur del cráter). Esta zona proximal al Galeras en total alberga alrededor de 500.000 habitantes¹²².

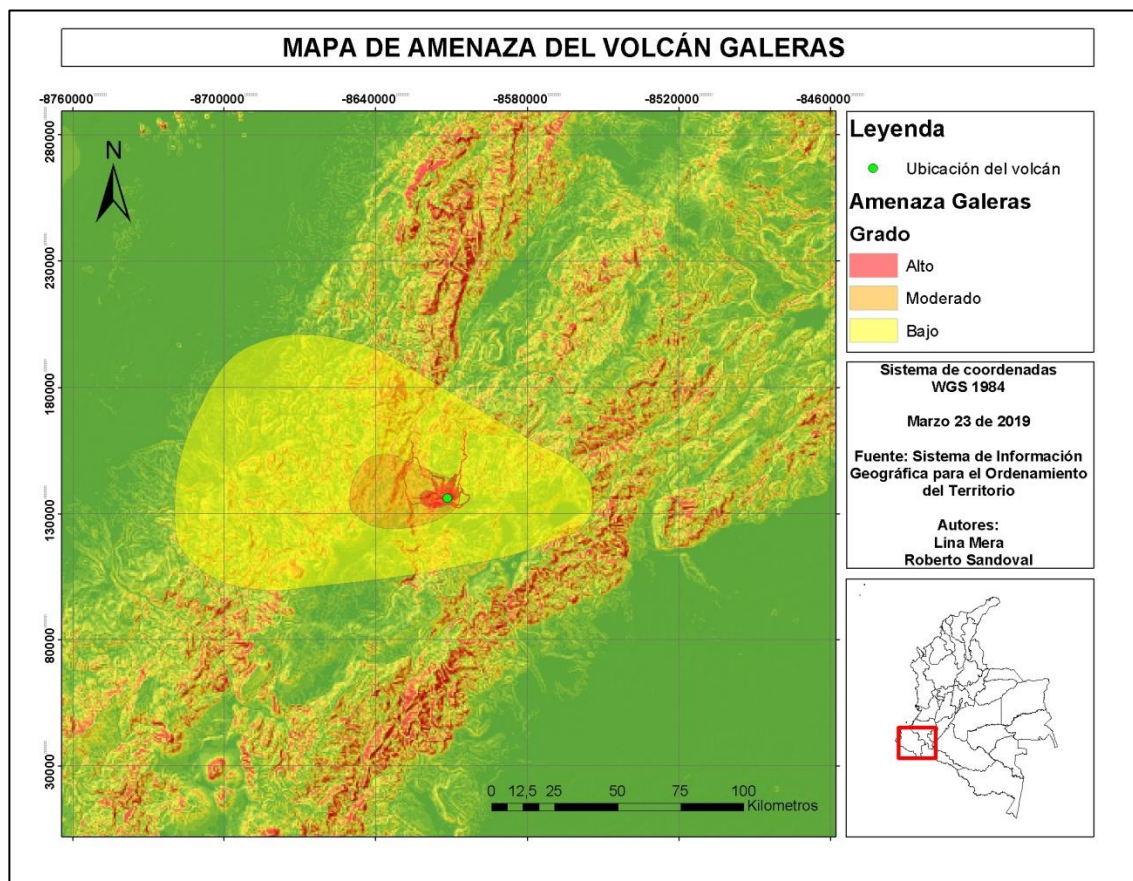


Figura 14: Mapa de Amenaza del Volcán Galeras.

A partir de la información dada por el SGC, el cual se encuentra en facultades de recopilar y estudiar los distintos procesos geológicos que se presentan en el país, se toma que históricamente el Volcán Galeras desde 1988 se reactivó después de

¹²² COLOMBIA. DANE. Generalidades, citado por SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras – Colombia. Memoria. 2015. p. 8-9.

38 años de reposo, y a partir de esta fecha “la actividad del volcán ha generado numerosas erupciones de tipo “vulcaniano””¹²³

Teniendo esta información, tomamos que, si históricamente el Volcán Galeras ha presentado en su mayoría erupciones de tipo Vulcanianas, la probabilidad de que la siguiente erupción sea de este tipo es alta, por lo cual se le adopto el tipo de actividad eruptiva vulcaniana, sin embargo, hay que tener en cuenta que el comportamiento de los volcanes puede cambiar en cada erupción, por lo cual, también puede tener la posibilidad que este TAE pueda cambiar en un futuro.

Por su parte, la zona de influencia del volcán, tiene presencia de distintos asentamientos humanos con cantidades de población distinta; sin embargo, nos encontramos con que el asentamiento con mayor población es de 440.000 habitantes y también es la capital del departamento, por lo cual, mucha infraestructura crítica se encuentra concentrada en esta zona.

Por la cantidad de información en cuanto a población directamente influenciada por la actividad del volcán, es posible no tomar la información de mayor peso en cuanto a un solo lugar que nos ofrece el SGC de 440.000 habitantes en la capital del Departamento, sino los 500.000 habitantes que se encuentran en la zona próxima al volcán.

A partir de esto, el valor que se le da según la tabla de variables al TAE del Volcán Galeras es de 0,204 y el nivel de UT que se le asignaría a la población influenciada por el volcán sería NUTS3, la cual tiene un peso de 0,16. Con esto se aplica el modelo de la siguiente manera:

$$PDV = (Población * NUT) + (AE * TAE)$$

$$PDV = (0.67 * 0.16) + (0.33 * 0,219)$$

¹²³ *Ibíd.* p. 13.

$$PDV = 0,17943$$

Según el resultado obtenido a partir del modelo propuesto para el PDV del Volcán Galeras, multiplicado por 100, es del 17,943%, es decir, este se encuentra dentro del grado 3 de la escala de PDV, teniendo como referencia, una erupción volcánica de tipo vulcaniana con posible afectación en áreas cuya unidad territorial puede llegar hasta los 800.000 habitantes concentrados en un área delimitada.

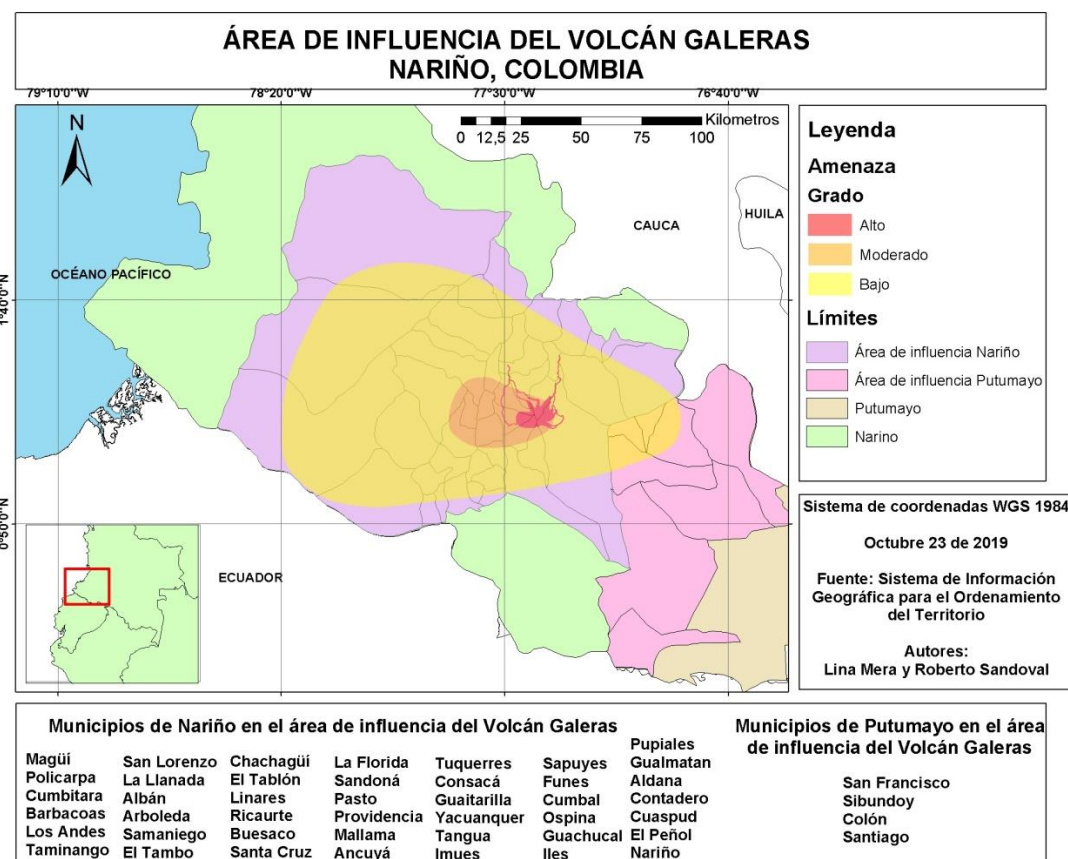


Figura 15: Área de influencia de Volcán Galeras Nariño, Colombia.

La figura 14, representa los municipios que se encuentran dentro del área de amenaza del volcán Galeras.

CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta lo que se ha intentado hacer desde la vulcanología para poder medir el potencial destructivo de un volcán, el cual pueda involucrar variables físicas y humanas, con esta escala se logra un primer acercamiento a eso que tanto le ha costado a esta disciplina diseñar, abriendo posibilidades de que nuevas variables puedan ser tenidas en cuenta desde distintos enfoques.
- En la búsqueda de obtener una escala que permita la categorización del Potencial Destructivo Volcánico surge esta propuesta, la cual está basada en diferentes variables de tipo físico y humano, abriendo paso a una interpretación de los datos enfocados al territorio. Los criterios que se tuvieron en cuenta serán explicados a continuación.
- La identificación de las variables necesarias para trabajar en esta investigación se dividió principalmente en dos partes. La primera de ellas se trata de lo relacionado con el tema vulcanológico. En este caso se decidió trabajar con la actividad eruptiva y sus tipos, los cuales son pliniana, vulcaniana, estramboliana, hidromagmática, y efusiva. Por otra parte, fue necesario involucrar algún factor que representara las zonas o lugares que puedan llegar a verse afectadas en caso de una erupción volcánica. La variable escogida para responder a esta necesidad fue la población abordada desde las Unidades Territoriales, las cuales también presentan unas divisiones internas. Los tipos de Unidad Territorial con los que se trabajó en esta investigación son NUT1, NUT2, NUT3 y LAU.
- A la hora del establecimiento de los diferentes grados que tienen como objetivo categorizar el PDV a partir de alguna erupción en relación con el territorio, se tuvo en cuenta un método estadístico llamado proceso de

jerarquización, el cual permite asignar unos valores determinados a cada variable, basándose en una jerarquía previamente estipulada por los desarrolladores del trabajo. En esta investigación se obtuvieron 8 grados, los cuales están organizados de la siguiente manera: grado 1, de 0 a 9,9 %; grado 2, de 10% a 14,9%; grado 3, de 15% a 19,9%; grado 4, de 20% a 24,9%; grado 5, de 25% a 29,9%; grado 6, de 30% a 34,9%; grado 7, de 35% a 39,9%; y grado 8, de 40% en adelante. La categorización del PDV dependerá de cada uno de los porcentajes obtenidos a partir de la unión de los dos parámetros principales, es decir, la suma ponderada del valor correspondiente a la Actividad Eruptiva con el de la Población, previamente multiplicados por cada una de sus alternativas.

- El volcán Galeras ubicado en el departamento de Nariño, Colombia, fue el escogido para la puesta a prueba de la escala de PDV, y así poder comprobar su aplicabilidad en casos reales. Por medio de datos históricos, mapas de amenaza, estudios vulcanológicos sobre el tipo de actividad eruptiva que presenta el volcán a trabajar y datos estadísticos relacionados con los asentamientos humanos localizados dentro del área de influencia del volcán, se logró llegar a una cifra, que en el caso del Galeras es 17,943%, la cual quiere decir que, según la escala de PDV, este volcán se encuentra en un grado 3.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRONICO, Daniele; DI ROBERTO, Alessio; DE BENI, Emanuela; BEHNCKE, Boris; BERTAGNINI, Antonella; DEL CARLO, Paola y POMPILIO, Massimo. Pyroclastic density currents at Etna volcano, Italy: The 11 February 2014 case study. EN: Journal of Volcanology and Geothermal Research. Mayo, 2018, Vol 357. p. 92-105.
- AVERY GOMEZ, Elizabeth; PLOTNICK, Linda; ROHN, Eli y TUROFF, Murray. Towards a Unified Public Safety Scale. 40th Hawaii International Conference on Systems Science. Big Island, Hawaii: Proceedings of HICSS, January 2007. p. 11.
- BARRANTES CASTILLO, Gustavo. y MALAVASSI ROJAS, EDUARDO. Mapa de peligros del volcán Poás. EN: Cuadernos de Geografía. 2015. Vol. 24, No. 2, p. 157-172.
- BENIOFF, Hugo. The physical evaluation of seismic destructiveness. EN: Bulletin of the Seismological Society of America. Mayo, 1934. Vol. 24, no. 4, p. 398-403.
- BRANNEY, M.J. y KOKELAAR, Peter. London Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites. Londres: Geological Society. 2002. 143 p. ISBN 1-86239-097-5.
- BOBROWSKY P. T. Encyclopedia of Natural Hazards. 1st. Springer, 2013. 415 p. ISBN: 978-90-481-8699-0.
- CAREY, Steven & SIGURDSSON, Haraldur. The intensity of plinian eruptions. EN: Bulletin of volcanology. January 1989, Vol. 51, Issue 1. p 28–40.
- COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA INGEOMINAS. Generalidades Volcán Galeras. Actividad Histórica [En

línea]. [Bogotá, Colombia] [.s.f] [citado 20 febrero 2019]. Disponible en: https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Actividad_historica_galeras.pdf.

- COLOMBIA. OBSERVATORIO SISMOLOGICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO – UNIVERSIDAD DEL VALLE. Elkin de Jesús Salcedo Hurtado En: Observatorio Sismologico del Suroccidente Colombiano. [Cali, Colombia]. [.s.f]. [citado 20 febrero 2019]. Disponible en: <http://geografia.univalle.edu.co/grupo-de-investigacion-territorios?id=31>
- COLOMBIA. SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Conversatorio de Gestión del Riesgo Volcánico. Manizales: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO República de Colombia, 2013.
- COMISIÓN SISMOLÓGICA EUROPEA. Directrices y Material de Referencia. EN: Escala Macrosísmica europea 1998 (EMS-98). Hamburgo. 2008. Vol. 27. p. 21.
- CORONADO PADILLA, Jorge. Escalas de Medición. Bogotá, D. C: Paradigmas, Vol 2, (2), julio-diciembre de 2007. p. 104 - 125. ISSN 1909-4302.
- COSTA RICA. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSO. Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia y cantón. En: Estimación y Proyecciones de Población. San José - Costa Rica. [En línea]. [Costa Rica] 2016 [citado 20 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/>
- DANKHE, 1986, 42, citado por HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos Y BAPTISTA LUCIO, Pilar. Metodología de la investigación. 2a. ed. México: McGraw-Hill, 2000. p. 59.

- ESCOBAR PÉREZ, Jazmine y CUERVO MARTÍNEZ, Ángela. Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. EN: Avances en Medición. 2008. 6, 27–36.
- ESPAÑA. PARQUE NATURAL DE LA ZONA VOLCÁNICA DE LA GARROTXA. El vulcanismo: Guía de campo de la Zona Volcánica de La Garrotxa. 1 ed. Catalunya: Olot, 2012. 106 p. ISBN 978-84-393-8851-7.
- ESPAÑA. REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la Lengua Española. [En línea]. 2019. Madrid – España. [citado 30 enero 2019]. Disponible en: <https://dle.rae.es/?id=Trg1grH>.
- ESTADOS UNIDOS. President's Commission on Critical Infrastructure Protection. Critical Foundations Protecting America's Infrastructures. October 1997. p. 192.
- EUROPA. DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. REGLAMENTO (UE) No 549/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 21 de mayo de 2013 relativo al Sistema Europeo de Cuentas Nacionales y Regionales de la Unión Europea (Texto pertinente a efectos del EEE). Edición en lengua española. 2013. p. 362.
- EUROPA. EUROSTAT. Local Administrative Units (LAU). [En línea]. [.s.f]. [citado 30 enero 2019]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/local-administrative-units>.
- EVANS, Michael J. y ROSENTHAL Jeffrey S. Probabilidad y estadística. Barcelona: Editorial Reverté, S.A, 2005. p. 751. ISBN: 84-291-5034-X.
- GARZÓN, Gustavo; SANTACOLOMA, Cristian; GALLE, Bo y SOLARTE Efraín. Estrategias De Medición De Gases Volcánicos En Colombia Utilizando Sensores Ópticos Remotos. EN: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas Pamplona. Enero, 2008. vol. 6, no. 2, p, 1-8.

- GÓMEZ CASTILLO, Gemma; MENDOZA, Manuel; MACÍAS, José Luis; GRANADOS LOPEZ, Ema. Riesgo volcánico: estado del arte y desafíos de trabajo. EN: Revista Geográfica. Enero – Diciembre. 2017. Vol 158, p. 69-106.
- GONZÁLES C., Elena; ESCOBAR, Estela; BECERRA, Rafael; GOSÁLVEZ, Rafael y DÓNIZ, Javier. Aportes recientes en la Volcanología 2005-2008. Ciudad Real – España: Centro de Estudios Calatravos, 2010. p. 402. ISBN: 978-84-614-1025-5.
- GRAJALES QUINTERO, Alberto; SERRANO MOYA, Edgar y HAHN VON-H, Christine. Los Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación. EN: Luna Azul. Marzo 2013. N° 36, p. 285-306.
- GUIJARRO MARTÍNEZ, Francisco y AZNAR BELLVER, Jerónimo. Nuevos métodos de valoración. Modelos multicriterio. Valencia: Universitat Politecnica, 2012. p. 50. ISBN 978-84-8363-982-5.
- JAIN Sreepat. Fundamentals of Physical Geology. Volcanic Features. New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London: Springer Geology, 2014. p. 494. ISBN 978-81-322-1539-4.
- KITCHI, Rob y TATE, Nicolas J. Conducting Research in Human Geography: Theory, Methodology and Practice. Essex: Pearson, 2000. 330 p.
- LARIO GÓMEZ, Javier y BAJARDÍ AZCÁRATE, Teresa. Introducción a los Riesgos Geológicos. Madrid – España: Editorial UNED, 2007. p.302. ISBN: 978-84-362-7231-4.
- LOCKWOOD, John P. y HAZLETT, Richard W. Volcanoes Global Perspectives. 1 ed. Wiley-Blackwell, 2010. p. 551. ISBN 978-1-4051-6249-4 (hardback) – ISBN 978-1-4051-6250-0 (pbk.).

- LUGO, H., J. Las Erupciones más potentes. En: La Superficie de la tierra. II. Procesos catastróficos, mapas. El relieve mexicano. Primera Edición electrónica. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica. [s.p.]. ISBN: 978-607-163857-1.
- MARTÍ, Joan y ARAÑA, Vicente. La volcanología actual. Magnitud de las erupciones. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1993. p. 580. ISBN: 978-84-00-07363-3.
- MÉXICO. CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN. Volcanes: Peligro y Riesgo Volcánico en México. México D.F. 2014. p. 8. ISBN: 970-628-734-5.
- MONROE, James; WICANDER, Reed y POZO, Manuel. Geología. Dinámica y Evolución de la Tierra. 4 ed. Madrid – España: Editorial Paraninfo, 2008. p. 744. ISBN: 0-495-01020-0.
- NEWHALL G., Cristopher y SELF, Stephen. The Volcanic Explosivity Index (VEI) An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. EN: Journal of Geophysical Research Oceans. 1982. Vol 87, No. C2. p. 1231-1238.
- PEREZ, Francisco José y RODRIGUEZ, Alejandro. ¿Cómo se miden las erupciones volcánicas? El índice de explosividad volcánica. En: Enseñanza de las ciencias de la tierra. 2015. Vol. 23, Nº. 1. p. 24-32.
- PERU. INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU. Peligros Volcánicos. [En línea]. En: Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS). Lima – Perú. [s.f]. [citado 30 septiembre 2018]. Disponible en: <https://ovs.igp.gob.pe/peligros-volcanicos>.
- PUJADAS, Alber; BRUSI, David & PEDRINACI, Emilio. ¡Los volcanes han cambiado! Nuevos enfoques de terminología volcánica. EN: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 1999. vol 7, No. 3, p. 200 - 209.

- QUESADA, Fernando, BLANCO, Jorge y MARTIN, Ana. Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México. EN: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. Vol 23, No. 2. p. 113-124.
- ROMERO, Carlos. Análisis de las decisiones Multicriterio. Primera Edición. Madrid: Isdefe, 1996. 115 p. ISBN: 84-89338-14-0.
- TARBUCK, Edward J. y LUTGENS, Frederick. Ciencias de la tierra una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S. A, 2005. p. 712. ISBN edición española: 84-205-4400-0.
- TORRES CORREDOR, Roberto; VILLARREAL, Patricia y GÓMEZ MARTÍNEZ, Diego. Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. EN: Boletín de Geología. 2017. Vol. 39, N° 2, 67-82.
- TSUYA, Hiromichi. Geological and petrological studies of volcano Fuji, 5. On the 1707 eruption of volcano Fuji. EN: Bull. Earthquake. 1955. Res. Inst., 33, 841--888.
- TSUYA, Hiromichi y MORIMOTO Ryohei. Types of volcanic eruptions in Japan. EN: Bulletin of Volcanology. 1963. Volume 26, Issue 1, 209–222.
- SAATY, Thomas y VARGAS, Luis. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Second Edition. New York: Springer, 2012. ISBN 978-1-4614-3596-9.
- SIGURDSSON, Haraldur; HOUGHTON, Bruce; RYMER, Hazel; STIX, John y MCNUTT, Steve. The Encyclopedia of Volcanoes. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press, 1999. Ed. 1. p. 1442.

- SIGURDSSON, Haraldur; HOUGHTON, Bruce; RYMER, Hazel; STIX, John y MCNUTT, Steve. The Encyclopedia of Volcanoes. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: Academic Press, 2015. Ed. 2. p. 1393.
- SKJONG, Rolf y WENTWORTH, Benedikte. Expert Judgement and risk perception. EN: The International Society of Offshore and Polar Engineers. 2001. Vol IV, p. 540.
- USGS. Volcanic Gas Monitoring at Mount St. Helens [en línea]. [EE.UU]: United States Geological Survey, feb 2018 [citado 28 mayo 2018]. Disponible en: https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/st_helens/monitoring_gas.html.
- WALKER L., George, P. Explosive volcanic eruptions - a new classification scheme. EN: Geologische Rundschau. July 1973, Vol. 62, No. 2. p .431–446.
- WALKER L., George, P. The Taupo pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption?. En: Journal of Volcanology and Geothermal Research. August 1980. Volume 8, Issue 1. p. 69-94.
- WESTEN, V., C. Modelamiento de la erosión en los depósitos de flujo piroclástico del volcán Mount Pinatubo, Filipinas. EN: ResearchGate. May 2014, 1-22.
- WILSON, G; WILSON, T.M.; DELIGNE, N.I. y COLE, J.W. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. New Zeland. EN: Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014, Vol. 286 p.148–182.
- VARGAS, Carlos A; PUJADES, Lluís y CANEVA, Alexander. Attenuation Structure of the Galeras Volcano, Colombia. Colombia: Boletín de Geología. 2012. Vol. 34, N° 2, 149-161.

- VLADIMIROVNA, Olga. Probabilidad. EN: Fundamentos de Probabilidad y Estadística. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2005. p. 346. ISBN: 968-835-857-6.
- VOIGHT, B. The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. EN: Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1990. Vol 44. p. 349-386.

Anexo 1: Planillas Juicio de Expertos

Respetado juez:

Usted ha sido seleccionado para evaluar el instrumento: Relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva que hace parte de la investigación Propuesta de Escala de Medición del Potencial Destructivo de la Actividad Volcánica en el Territorio.

La evaluación de los instrumentos es de gran relevancia para lograr que sean válidos y que los resultados obtenidos a partir de éstos sean utilizados eficientemente; aportando tanto al área investigativa de la psicología como a sus aplicaciones. Agradecemos su valiosa colaboración.

NOMBRES Y APELLIDOS DEL JUEZ: Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Áreas de experiencia profesional

Geociencias, Riesgos naturales, Geofísica y Sismología.

Objetivo de la prueba:

Establecer la relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva

Respetado juez:

Usted ha sido seleccionado para evaluar el instrumento: Relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva que hace parte de la investigación Propuesta de Escala de Medición del Potencial Destructivo de la Actividad Volcánica en el Territorio.

La evaluación de los instrumentos es de gran relevancia para lograr que sean válidos y que los resultados obtenidos a partir de éstos sean utilizados eficientemente; aportando tanto al área investigativa de la psicología como a sus aplicaciones. Agradecemos su valiosa colaboración.

NOMBRES Y APELLIDOS DEL JUEZ: Jhonattan Fernández Córdoba

Áreas de experiencia profesional

Geociencias, Riesgos naturales, Geofísica, Vulcanología y Sismología.

Objetivo de la prueba:

Establecer la relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva

Respetado juez:

Usted ha sido seleccionado para evaluar el instrumento: Relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva que hace parte de la investigación Propuesta de Escala de Medición del Potencial Destructivo de la Actividad Volcánica en el Territorio.

La evaluación de los instrumentos es de gran relevancia para lograr que sean válidos y que los resultados obtenidos a partir de éstos sean utilizados eficientemente; aportando tanto al área investigativa de la psicología como a sus aplicaciones. Agradecemos su valiosa colaboración.

NOMBRES Y APELLIDOS DEL JUEZ: Sandra Bedoya

Áreas de experiencia profesional

Geociencias, Riesgos naturales, Geología y Geomorfología.

Objetivo de la prueba:

Establecer la relevancia entre los parámetros Población y Actividad Eruptiva
