

**ESQUEMA DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL
MUNICIPIO DE LA FLORIDA**

GESTION DEL RIESGO VOLCANICO

Equipo:

Ing. Diana Alejandra Guerrero¹
Ing. Ruth Otero¹
Ing. Paola Andrea Paredes¹
Ing. Diana Marcela Rodriguez¹
Ing. Andrés Patiño¹
Ing. Fernando Villota¹
Dr. Antonio Costa²
Dr. Jean-Claude Thouret³
Dr. Gustavo Córdoba¹

Revisión:

Dr. Antonio Costa²
Dr. Jean-Claude Thouret³
Dr. Gustavo Córdoba¹

Supervisión:

Dr. Gustavo Córdoba¹

1. *Grupo de Investigación en Amenazas, Riesgos y Medio Ambiente, GRAMA. Universidad de Nariño, Colombia*
2. *Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Bologna, Italia*
3. *Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand, Francia*

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. Generalidades	2
2. Análisis de la amenaza volcánica	5
2.1 Estudios previos	5
2.2. Análisis probabilístico de la amenaza	10
2.2.1. Amenaza por corrientes piroclásticas de densidad	16
2.2.2. Amenaza por Lahares.....	32
2.2.3. Amenaza por Onda de Choque.....	41
2.2.4. Amenaza por proyectiles balísticos.....	58
2.2.5. Amenaza por Caída de Ceniza.....	75
2.3. Compilación de la amenaza volcánica.....	98
2.4. Definición de vulnerabilidad estructural	103
2.4.1. Definición de vulnerabilidad	104
2.4.2. Identificación, caracterización y localización de elementos expuestos ..	105
2.4.3. Marco conceptual para la caracterización de elementos estructurales .	109
2.4.4. Caída de Tefra.....	109
2.4.5. Onda de choque.....	113
2.4.6. Lahares.....	118
2.4.7. Enterramiento	121
2.4.8. Resultados.....	123

3. Evaluación de riesgo	130
4. Decisiones con base en el Riesgo	132
4.1. Introducción	132
4.2. Conceptos	132
<i>4.2.1. Tasa Anual de Amenaza Aceptable en términos de Riesgo</i>	132
<i>4.2.2. Nivel de riesgo aceptable</i>	134
4.3. Aplicación	137
4.4. Umbrales de riesgo	140
5. Conclusiones y recomendaciones	147
Referencias.....	149

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Resumen miembros encontrados por Calvache (1990). a) 4.500 ybp, b) 4.000 ybp, c) 2.900 ybp, d) 2.300 ybp, e)1.100 ybp, y f) 1866 D.C.. Fuente: Modificada de Calvache (1990).....	6
Figura 2. Diagrama explicativo del alcance de flujos piroclásticos asumido por Calvache (1990). Se puede observar que el mismo fue asumido que se extiende un 50% y un 70% más allá del último punto datado. Fuente. Calvache (1990).....	7
Figura 3. Ubicación de los muestreos hechos por Calvache (1990). La zona sombreada muestra la posible extensión de depósitos de flujos piroclásticos. El óvalo rojo muestra el casco urbano de La Florida. Fuente: Modificado de Banks et. Al. (1997).....	8

Figura 4. Tercera versión del Mapa de Amenazas del Volcán Galeras. En amarillo la zona de amenaza baja, donde la severidad ponderada es inferior a 10. En naranja la zona de amenaza media, donde la severidad ponderada está entre 10 y 20. La región en rojo determina la zona de amenaza alta, cuya severidad ponderada supera 20..... 9

Figura 5. Cuarta versión del Mapa de Amenazas del volcán Galeras. Escala 1:30.000. Fuente: Copyright 2015 Servicio Geológico colombiano. 10

Figura 6. Representación esquemática de la probabilidad total (P_T) de que un fenómeno alcance los puntos A y B. P_T depende de la recurrencia del evento (P_R) en O y la probabilidad geográfica (P_A y P_B). Note que P_R es la misma para ambas localidades. La probabilidad condicional a que ocurra el evento en O implica $P_R=1$ 11

Figura 7. Esquema representando un muestreo bidimensional por a) Muestreo Hipercúbico Latino (LHS), y b) puramente aleatorio (MC). Note que en MC es posible que se agrupen las combinaciones, situación que no sucede con LHS. Para mejorar la exactitud de M..... 14

Figura 8. Esquema del caso en que dos eventos alcanzan una misma localidad con diferentes probabilidades. La inferencia bayesiana tiene en cuenta esta intersección de probabilidades (zona roja)..... 15

Figura 9. Dataciones realizadas por el Instituto de Física del Globo de Clermont-Ferrand, Francia 18

Figura 10: Localización de los muestreos de carbón para las dataciones. 19

Figura 11. Área dentro de la cual se asume, que se pueden iniciar las CPDs. El círculo rojo indica la zona del cráter y el círculo verde encierra el área máxima desde donde pudieran iniciarse los CPDs..... 26

Figura 12. Distribución OLHS de los lugares de inicio de CPDs. En cada una de las 5 áreas se realizaron 256 simulaciones. Note que hay 4 sectores circulares y un círculo, donde también se realizan las 256 simulaciones.....	27
Figura 13. Distribución de probabilidades de flujos piroclásticos en la cuenca de El Barranco.....	28
Figura 14. Modelamiento 3D de CPDs con Open Foam. a) Situación inicial del material. b) Iniciación de curva donde se presenta sobre-elevación. c) Separación del flujo hacia Panchindo. d) Separación del flujo hacia el Cucho	29
Figura 15. Esquema de líneas de energía con diferentes H/L. Nótese que algunas remontarán el obstáculo y otras no. Para saber la probabilidad de que estas líneas cumplan con un H/L máximo, se cuenta las que están más hacia la izquierda y luego se divide. Fuente: este estudio.	30
Figura 16. Distribución probabilística del alcance de Corrientes piroclásticas de Densidad (CPDs) por el método de líneas de energía.....	31
Figura 17. Distribución de probabilidades en porcentaje, de llegada de Corrientes Piroclásticas de Densidad. Nótese que las cuencas Panchindo y El Cucho tienen probabilidades no despreciables de ser alcanzadas por CPDs.....	32
Figura 18. Actividad ganadera en la cabecera de la cuenca de El Barranco. Puede notarse el trazo del “Camino Real”.	35
Figura 19. Probabilidades de excedencia de impacto para presiones dinámicas de a) 5 kPa, b) 10 kPa, c) 20 kPa, d) 30 kPa. Los polígonos sombreados corresponden a los centros urbanos. El casco urbano de La Florida es el polígono superior central.....	40

Figura 20. Probabilidades de excedencia de inundación de: 3a) 25 cm, 3b) 50 cm, 3c) 1m, 3d) 1.25 m.	41
Figura 21. Actual mapa de zonificación de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras. Tomado de: Copyright 2015, Servicio Geológico Colombiano SGC	44
Figura 22. Dominio computacional del problema en que la parte baja de la malla se ajusta a la topografía del volcán.....	47
Figura 23. Modelos de explosiones volcánicas: (a) modelo de fuente puntual y (b) modelo de tubo de choque. Fuente: Modificado de Saito, & Takayama, (2005).	48
Figura 24. Sección transversal este-oeste del volcán Galeras donde se puede observar la reflexión de la onda de choque (a) Reflexión frente de onda primaria (b) propagación de onda secundaria	51
Figura 25. Zonificación de la amenaza por onda de choque para diferentes escenarios de presión inicial (a) 0.4MPa, (b) 1.0MPa, (c) 3.0MPa y (d) 6.0MPa.	53
Figura 26. Distribución probabilística para escenarios de sobrepresión de: (a) 200 Pa, (b) 1.000 Pa, (c) 2.000 Pa y (d) 35.000 Pa.	54
Figura 27. Distribución probabilística para escenarios de sobrepresión en el municipio de La Florida de: (a) 200 Pa, (b) 1.000 Pa, (c) 2.000 Pa y (d) 35.000 Pa.....	57
Figura 28. Fotografía que evidencia el impacto de proyectiles balísticos y los incendios forestales generados el 3 de enero de 2010. Copyright 2010 Alberto Quijano Vodniza, Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño.....	59
Figura 29. Mapa de amenaza por proyectiles balísticos del Volcán Galeras. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).....	61

Figura 30. Esquema de comportamiento de proyectil balístico, en donde α , es el ángulo de lanzamiento, v_0 la velocidad inicial, d el diámetro de la partícula y v la velocidad de llegada ... 62

Figura 31. a) Trayectorias hipotéticas esperadas (sin considerar el viento) para proyectiles balísticos en Galeras cada 30° horizontales y b) Perfiles topográficos del cráter 67

Figura 32. Relación de velocidad inicial (v) del balístico en función del diámetro (d) para proyectiles en el caso específico del volcán Galeras. Los puntos son datos de los registros geológicos tomados de Ingeominas (1997)..... 69

Figura 33. Comparación del comportamiento de los proyectiles balísticos en el modelo desarrollado respecto al software Eject1.4. a) Trayectoria del proyectil, b) distribución de la velocidad a lo largo de la trayectoria. 70

Figura 34. Comparación de las distribuciones de proyectiles balísticos generadas por el Servicio Geológico Colombiano (2015) y los resultados de esta investigación. Las líneas punteadas indican la estimación resultante en este trabajo. Fuente. Modificada de Servicio Geológico Colombiano (2015)..... 72

Figura 35. Distribución probabilística del impacto de proyectiles balísticos con una energía superior a 10^3 Julios en el Municipio de la Florida (Nariño)..... 73

Figura 36. Distribución probabilística determinando la envolvente de amenaza en la zona de estudio. 74

Figura 39. Zonificación de la amenaza por impacto de proyectiles balísticos en el municipio de La Florida. 75

Figura 40. Distribución de frecuencia de la altura de columna en las erupciones de Galeras. 80

Figura 41. Distribución de frecuencia de la magnitud en las erupciones de Galeras. 80

Figura 42. Ubicación del punto de toma de datos de reanálisis (modelos integrados con datos satelitales).....	86
Figura 43. Rosa de los vientos del sector de Barranco en el volcán Galeras para altitudes de 5.000, 10.000 y 15.000 m.s.n.m.	87
Figura 44. Relación entre los espesores obtenidos con PARFIT y los espesores medidos por el SGC las figuras corresponden a las diferentes erupciones de Galeras en el periodo 2004 – 2009 a) 11 de Agosto de 2004, b) 12 de Julio de 2006, c) 17 de Enero de 2 90	90
Figura 45. Distribución de probabilidad de caída de 0.5 kg/m ²	93
Figura 46. Distribución de probabilidad de caída de 1 kg/m ²	94
Figura 47. Distribución de probabilidad de caída de 5 kg/m ²	95
Figura 48. Distribución de probabilidad de caída de 10 kg/m ²	96
Figura 49. Distribución de probabilidad de caída de 50 kg/m ²	97
Figura 50. Zonificación de la amenaza por caída de material volcánico en el municipio de La Florida.....	98
Figura 51. Distribución de severidades ponderadas en el municipio de La Florida, para todas las amenazas volcánicas de Galeras. El borde calderico se encuentra en la parte inferior de la figura (Severidad Ponderada mayor que 50).....	101
Figura 52. Clasificación de todas las amenazas del volcán Galeras de acuerdo con su severidad ponderada (SP). Rojo: SP > 20. Anaranjado: 10 < SP < 20. Amarillo: SP < 10.....	102
Figura 53. Detalle del estudio a alta resolución de la distribución de Severidades Ponderadas (SP). Rojo: SP > 20. Anaranjado: 10 < SP < 20. Amarillo SP < 10. El sombreado corresponde a la Zona de Amenaza Alta del SGC, a escala 1:30.000. En gris oscuro el casco urbano de La Florida.	103

Figura 54. Distribución de porcentaje de daño de la cubierta en función a) del espesor de l ceniza, b) en función de la carga en kPa.....	111
Figura 55. Porcentaje de daño del elemento estructural (cubiertas), en función de la carga de ceniza en centímetros, respecto a la estructura completa. Fuente Adaptada de Torres et al., (2017).....	112
Figura 56. Porcentaje de daño de las viviendas en función de la presión dinámica en kPa.	117
Figura 57. Recopilación de información de las investigaciones realizadas por Valentine (1998); Spence et al. (2004); Zanchetta et al., (2004). Fuente:Tomada de Moriano et al., (2017).	119
Figura 58. Porcentaje de daño de las viviendas en función de la presión dinámica en kPa.	121
Figura 59. Distribución del porcentaje de daño en función de la altura del depósito. Tomado de Ciurean et al. (2017).....	122
Figura 60. Distribución de las tipologías encontradas para el fenómeno de caída de tefra en el Municipio de La Florida, para un total de 3958 puntos de muestreo.....	123
Figura 61. Mapa de clasificación tipológica de los elementos estructurales del Municipio de la Florida ante caída de ceniza.	124
Figura 62. Distribución de las tipologías encontradas para Onda de choque Municipio de la Florida, para un total de 3958 puntos de muestreo.	125
Figura 63. Distribución de las tipologías encontradas para Lahares Municipio de la Florida, para un total de 773 puntos de muestreo.....	127

Figura 65. Tipología de los elementos estructurales del municipio de la Florida ante enterramiento por lahares. Cabe notar que para este caso todos los elementos poseen una misma clasificación tipológica. 129

Figura 67. El riesgo específico se obtiene para cada amenaza, multiplicando la probabilidad correspondiente al respectivo nivel de intensidad por la respectiva vulnerabilidad de cada Tipología. En negro una curva hipotética de probabilidades y en verde una curva típica de vulnerabilidad 131

Figura 68. Rangos de Tasa Anual de Amenaza Aceptable para diferentes tipos de infraestructura. Fuente: Modificada de Connor (2011). 133

Figura 69: Esquema de una distribución probabilística de cierta amenaza aceptable en términos de riesgo contra su intensidad. Si la aceptabilidad se ha definido con cierto valor, esta corresponde a una intensidad. Fuente: Este estudio, aplicando ideas de Connor (2011). 134

Figura 70: Esquema que muestra el cruce de las curvas de tasa de amenaza probabilística en un lugar determinado con las curvas de vulnerabilidad estructural de tres tipologías. Este procedimiento permite confirmar si cierta tipología está o no dentro de un nivel 136

Figura 71. Zona de Amenaza Volcánica Alta (ZAVA) del volcán Galeras en el municipio de La Florida. Fuente: Modificado de Servicio Servicio Geológico Colombiano (2015). 138

Figura 72. Severidades Ponderadas, elementos expuestos y ZAVA. En Rojo la unión de Severidades Ponderadas Alta por CPDs y Media Lahares. Los puntos amarillos muestran los elementos expuestos y la zona sombreada la ZAVA. Fuente: Este estudio y Servicio Geológico Colombiano. 139

Figura 73. Umbrales de Amenaza y Riesgo. Note que de acuerdo con Connor (2011), a partir de una probabilidad en 25 años de 10^{-3} , se requiere mitigación, en consecuencia elementos

en riesgo clasificado como Tolerable y Medianamente Tolerable requieren es este tipo de medidas.

..... 142

Figura 74. Riesgo volcánico total predios..... 146

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Miembros y sus dataciones. Cada miembro tiene varias muestras.* 5

Tabla 2. *Volúmenes de depósitos de flujos piroclásticos del volcán Galeras* 23

Tabla 3. *Volúmenes de Flujos Piroclásticos que utilizar en los modelamientos* 24

Tabla 4. *Cálculo de volumen mínimo y máximo esperado de los lahares para la parte alta de la microcuenca de Barranco.* 37

Tabla 5. *Características de los proyectiles balísticos en el volcán Galeras.* 60

Tabla 6. *Rangos de condiciones iniciales para el modelamiento de proyectiles balísticos en el volcán Galeras.* 68

Tabla 7. *Asignación de volumen y altura de columna a las erupciones según su VEI.* 78

Tabla 8. *Análisis de las frecuencias de las erupciones según su altura de columna (km).*

..... 79

Tabla 9. *Análisis de las frecuencias de las erupciones según su magnitud*..... 79

Tabla 10. *Clasificación de las erupciones basada en la magnitud y la altura de columna*

..... 81

Tabla 11. *Clasificación de las erupciones de Galeras respecto a su altura de columna* . 82

Tabla 12. *Clasificación de las erupciones de Galeras respecto a su magnitud* 83

Tabla 13. *Clasificación de los eventos recientes del volcán Galeras* 84

Tabla 14. *Principales eventos eruptivos de Galeras del periodo 2004-2010*..... 89

Tabla 15. *Tabla de severidades usada en la zonificación de la amenaza volcánica de la Tercera Versión del Mapa de Amenazas del volcán Galeras.* 99

Tabla 16. <i>Severidades por amenaza e intensidad</i>	100
Tabla 17. <i>Ejemplos de tipologías presentes en algunas veredas del municipio de La Florida</i>	107
Tabla 18. <i>Tipologías definidas para el municipio de la Florida.</i>	110
Tabla 19. <i>Parámetros de factor de forma (a), carga media (yo) y espesor medio (yo) para cada tipología</i>	111
Tabla 20. <i>Descripción de la Tipologías 1,2 y 3 encontradas en el sector de estudio</i>	114
Tabla 21. <i>Parámetros o coeficientes propios para cada tipología estructural ante Onda de Choque.</i>	115
Tabla 22. <i>Porcentaje de daño para las tipologías 1, 2, 3 expuestas a diferentes niveles de Presión Dinámica</i>	117
Tabla 23. <i>Porcentaje de daño para las tipologías 1, 2, 3 expuestas a diferentes niveles de Presión Dinámica.</i>	120
Tabla 24. <i>Cálculo de vulnerabilidad de vidrios ante onda de choque en el municipio de la Florida - Nariño</i>	126
Tabla 25. <i>Clasificaciones y rangos de rangos de pérdidas esperadas (riesgo total) de acuerdo al Decreto 1077 de 2015 y clasificación de Woo (2008)</i>	143
Tabla 26. <i>Estadística del número de edificaciones y personas bajo cada nivel de riesgo, en todo el municipio</i>	143

ACRÓNIMOS

MAVDT: Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial Corponariño:
Corporación Autónoma Regional De Nariño

UNGRD: Unidad Nacional Para La Gestión Del Riesgo De Desastres Cdgrd: Consejo
Departamental Para La Gestión Del Riesgo De Desastres (Antiguo Crepad)

DGRD: Dirección Administrativa Para La Gestión Del Riesgo De Desastres

CMPGRD: Consejo Municipal Para La Gestión Del Riesgo De Desastres. (Antiguo
Clopad)

PMGRD: Plan Municipal Para La Gestión Del Riesgo De Desastres.

POT: Plan De Ordenamiento Territorial

EOT: Esquema de Ordenamiento Territorial

PDPAD: Plan Departamental Para La Prevención Y Atención De Desastres

INVIAS: Instituto Nacional De Vías

Sem: Secretaría De Educación Municipal

ZAVA: Zona De Amenaza Volcánica Alta

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que la vigencia de largo plazo del Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de La Florida – Departamento de Nariño, se encuentra expirada, se realiza la respectiva revisión y ajuste de este instrumento de planificación; lo cual permite a las autoridades correspondientes disponer de herramientas eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales.

En este documento se avoca la Gestión del Riesgo volcánico del Municipio de La Florida, con metodologías innovadoras para el país, pero verificadas y de amplia utilización en el ámbito mundial.

La Guía Nacional para el Análisis del Riesgo del Marco de Sendai recomienda se priorice el análisis probabilístico del riesgo (UNISDR, 2017). Por lo cual, en este apartado se usan las más recientes metodologías para la cuantificación del riesgo, complementando la información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano, aportando con el estudio probabilístico de las amenazas de origen volcánico a las que está expuesto el Municipio de La Florida, lo que permite la cuantificación del riesgo.

En este proceso se llevó a cabo un análisis de vulnerabilidad estructural ante cada una de las amenazas asociadas al volcanismo del Galeras, lo cual, en conjunto con el análisis de cada una de estas amenazas, se llega al riesgo. Finalmente, se tiene en cuenta los costos de las pérdidas esperadas, para llegar a niveles de riesgo No Tolerable, Medianamente Tolerable, Tolerable y Aceptable, que a su vez permiten decidir las medidas de Reducción del Riesgo que debe tomar el Municipio en relación con la Amenaza Volcánica.

1. Generalidades

El volcán Galeras es el volcán más activo de Colombia (Stix et al., 1997), se encuentra ubicado en el departamento de Nariño al suroccidente de la Republica Colombiana, a 9 kilómetros al occidente de Pasto en las coordenadas 1°13'43.8" de latitud norte y 77°21'33" de longitud este, con una altura de 4276 m.s.n.m. en el dominio geográfico de la depresión interandina Cauca-Patía entre las cordilleras Occidental y Central (SGC, 2015). Según Calvache (1990), la actividad de Galeras se caracteriza principalmente por la generación de emisiones de gas, ceniza, flujos de lava andesíticas y erupciones vulcanianas que han dejado depósitos de caída y flujos piroclásticos.

Normatividad

La Constitución de 1991 en su Artículo 311 (Corte Constitucional, 2015) estipula que le corresponde al municipio “ordenar el desarrollo de su territorio, promover la participación comunitaria y el mejoramiento social y cultural de sus habitantes”.

Por otra parte, la Ley 1523 de 2012 (Congreso de la República, 2012) establece que el ordenamiento territorial debe integrar el análisis de riesgo en el diagnóstico de los POT. Entre las diferentes disposiciones que hace esta Ley, se establecen las relacionadas con la autonomía municipal y definiciones relacionadas con la Gestión del Riesgo.

18. Prevención de riesgo: Medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. (Congreso de Colombia, 2012, p.8)

21. Reducción del riesgo: Es el proceso de la gestión del riesgo, está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo. (Congreso de Colombia, 2012, p.9)

Por otra parte, el Artículo 6, define los objetivos del Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. En el apartado 2.2 la Ley deja en claro que el objetivo es “Desarrollar y

mantener el proceso de reducción del riesgo” (Congreso de Colombia, 2012, p.11). Por lo que el trabajo de Gestión del Riesgo volcánico en el Municipio de La Florida debe enfocarse en la **reducción del riesgo**, según su definición en el punto 21 de la Ley 1523.

En el Artículo 19 se establece que los respectivos alcaldes son la instancia a nivel municipal de la dirección del Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. En su Artículo 14, esta Ley puntualiza que los alcaldes son los responsables directos de la “implementación de los procesos de gestión del riesgo en el distrito o municipio, incluyendo el conocimiento y la reducción del riesgo” (Congreso de Colombia, 2012, p.13) (el subrayado es nuestro). Y en su Parágrafo, señala que son los alcaldes los encargados de la planificación del desarrollo local, y de tomar acción es en materia de gestión del riesgo de desastres, especialmente, a través de los planes de ordenamiento territorial.

Por lo anterior, en el estudio del Riesgo volcánico del Municipio de La Florida hace un aporte al conocimiento, en concordancia con el Artículo 14 de la Ley 1523 de 2012.

El Decreto Ley 1077 de 2015 define los estudios técnicos y sus respectivas orientaciones para los estudios básicos, los cuales se adelantan en el marco de la revisión o formulación de los POT. Si bien este decreto no menciona explícitamente amenazas diferentes a las Inundaciones, Movimientos de masa y Avenidas Torrenciales, esto no quiere decir que su conocimiento no se deba ajustar a norma alguna, por lo cual en este estudio nos ceñimos al Decreto 1077 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Los estudios básicos deben contener la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza, con condición de amenaza y con condición de riesgo, además deben determinar medidas que permitan orientar normas urbanísticas en cuanto a restricciones y/o condiciones para su manejo. De igual manera, estos estudios permiten priorizar áreas que requieran posteriormente la realización de los estudios detallados (UNGRD, 2015).

De acuerdo con el Decreto 1077 del 2015, para los estudios básicos de los suelos urbanos y de expansión urbana (ARTICULO 2.2.2.1.3.2.1.1), la amenaza debe analizarse empleando métodos estadísticos, determinísticos **o probabilísticos**. En el caso del suelo de uso rural, este decreto dice que los métodos de análisis de la amenaza *pueden ser* de tipo heurístico o estadístico, sin descartar la posibilidad del uso otros métodos.

Para los municipios que se encuentren expuestos a amenazas por otros fenómenos naturales, como en este caso, la amenaza volcánica “debe evaluarse con base en la información disponible generada por las autoridades y sectores competentes y de acuerdo con la situación de cada municipio o distrito” (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2015, ARTICULO 2.2.2.1.3.1.3, Parágrafo 2) (el subrayado es nuestro).

Para toda el área de influencia del volcán Galeras, existe actualmente un mapa geológico a escala 1:100.000 (Ingeominas, 2000; Murcia & Cepeda, 2012) y de amenaza volcánica a escala 1:30.000 (Servicio Geológico de Colombia, 2015), en este último se incluye el Municipio de la Florida. Adicionalmente, se ha realizado la respectiva recopilación de la información disponible. Sin embargo, el Decreto 1077 expone que, para las zonas rurales con alto grado de exposición, los estudios básicos deben realizarse a una escala mínima de 1:5.000 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2015). Para cuantificar el riesgo, es necesario contar con un análisis probabilístico de la amenaza, por lo que a partir de los insumos disponibles se desarrolla este tipo de análisis como un aporte al conocimiento de las consecuencias de las amenazas de origen volcánico a las que está expuesto el Municipio de La Florida.

Teniendo en cuenta lo anterior, el municipio ha establecido las acciones institucionales, financieras y técnicas con la Universidad de Nariño para realizar estos estudios, en concordancia con lo establecido por la Ley 1523 del 2012 y el Decreto 1077 de 2015 (Art. 2.2.1.3.2.1), cumpliendo los requerimientos técnicos y escalas requeridas en la normatividad vigente.

Es importante recalcar que el Plan Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia 2015-2025 en el acápite 4: **Estrategias destinadas al logro de los objetivos propuestos**, establece que: “La Gestión de la información para el conocimiento del riesgo y apoyo a los procesos de reducción del riesgo y manejo de desastres, a cargo de la UNGRD, IGAC, DANE, IDEAM, SGC, UNIVERSIDADES, CAR, ENTIDADES TERRITORIALES, ENTRE OTROS” (UNGRD, 2013, p.24)

Es claro, por lo tanto, que las Universidades son Competentes para aportar en el estudio del Riesgo, tal como se hace en este documento.

2. Análisis de la amenaza volcánica

2.1 Estudios previos

Las amenazas del volcán Galeras han sido estudiadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), anteriormente llamado Ingeominas. El SGC ha presentado varias versiones de mapas de amenaza, iniciando con dos versiones (Cepeda, 1990), basadas principalmente en registros históricos del Siglo XX.

Posteriormente Calvache (1990) en su tesis de maestría realiza un estudio de la geología del volcán, en la cual logra hacer dataciones (Tabla 1), e identificar 6 miembros de erupciones que dejaron depósitos de flujos piroclásticos identificables del estadio actual Galeras del Complejo Volcánico del mismo nombre (Calvache, 1995). La Figura 1 muestra un compendio de estos miembros. Es importante notar que depósitos con edades mayores a 5000 ybp no son tenidos en cuenta por pertenecer a otro estadio del Complejo Volcánico Galeras (Calvache, 1995).

Tabla 1. *Miembros y sus dataciones. Cada miembro tiene varias muestras.*

Miembro	Edad ¹⁴ C
1866	170 +/- 50
	180 +/- 60
1100	980 +/- 80
	1140 +/- 120
	1220 +/- 100
	1220 +/- 150
2300	2300 +/- 90
	2390 +/- 80
2900	2910 +/- 80

	2940 +/- 140
	2940 +/- 180
4000	3940 +/- 110
	4110 +/- 150
	5050 +/- 220
4500	4520 +/- 70
	5050 +/- 1000

Fuente: modificado de Calvache (1990).

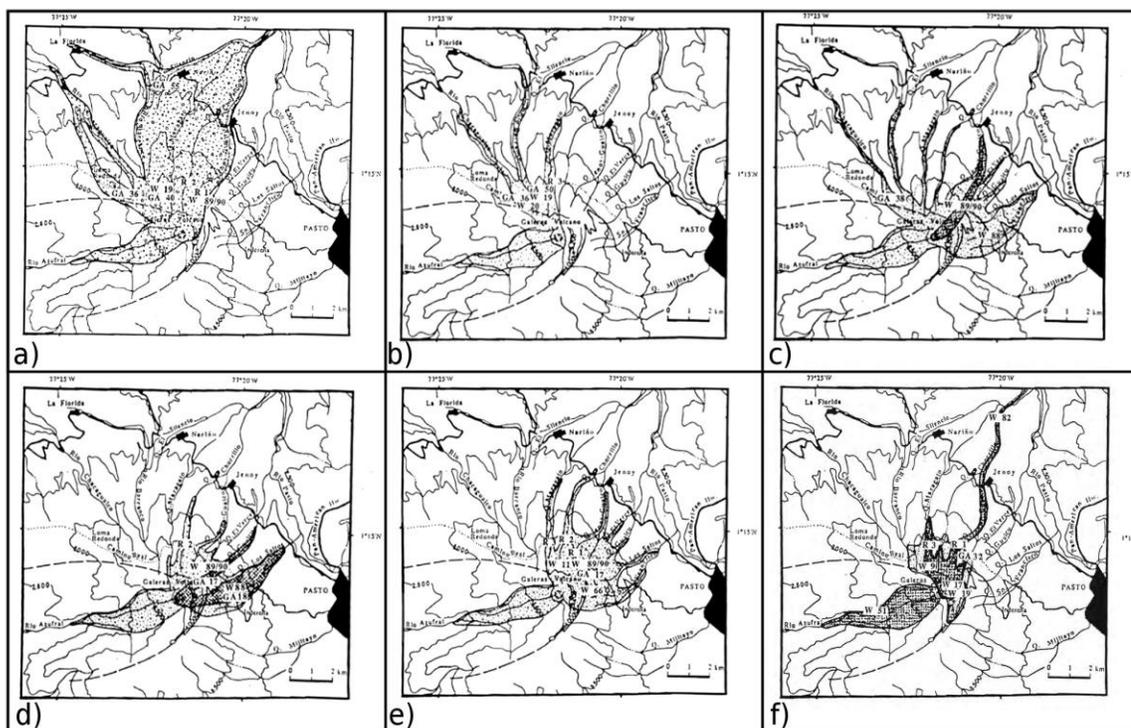


Figura 1. Resumen miembros encontrados por Calvache (1990). a) 4.500 ybp, b) 4.000 ybp, c) 2.900 ybp, d) 2.300 ybp, e) 1.100 ybp, y f) 1866 D.C.. Fuente: Modificada de Calvache (1990).

El posible alcance de los flujos piroclásticos es estimado por Calvache (1990) asumiendo: “arbitrariamente que se extienden entre un 50% y un 70% más de la distancia entre el cráter y el último punto datado” (p.19), como puede verse en la figura 2.

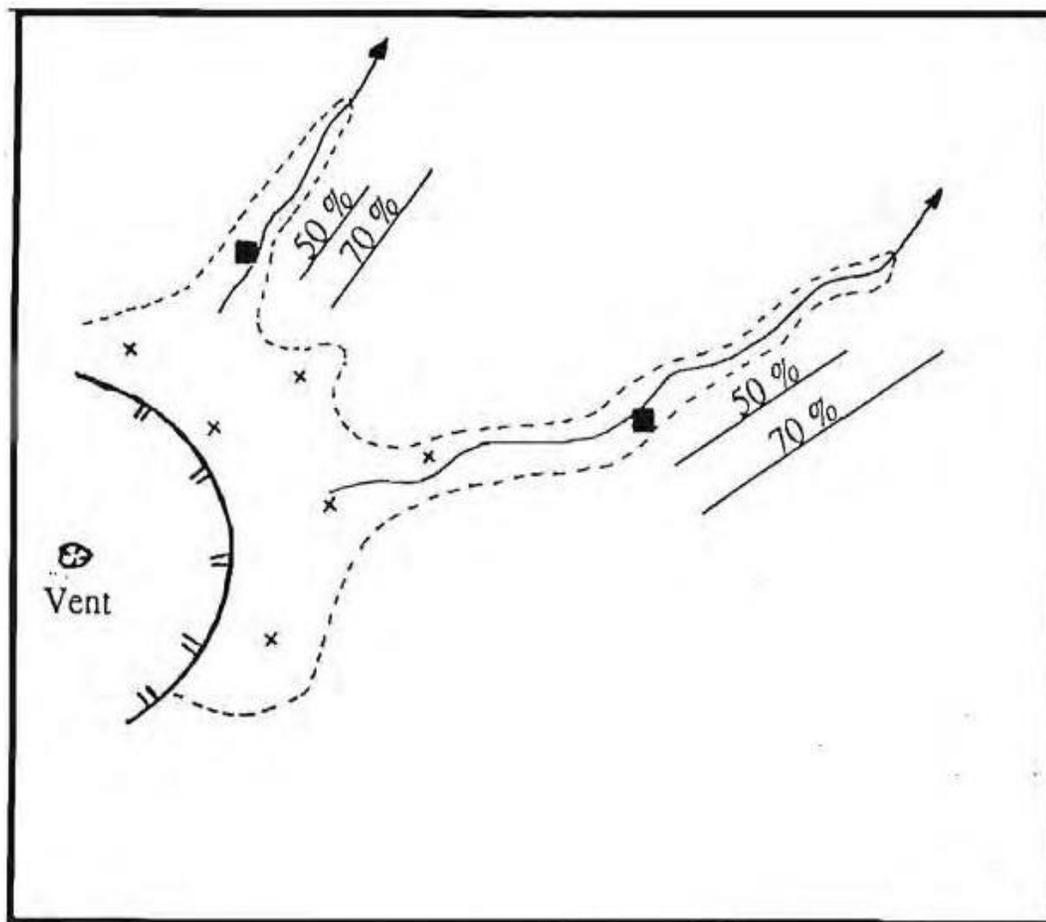


Figura 2. Diagrama explicativo del alcance de flujos piroclásticos asumido por Calvache (1990). Se puede observar que el mismo fue asumido que se extiende un 50% y un 70% más allá del último punto datado. Fuente: Calvache (1990)

Por otra parte, Banks et al., (1997) hacen un compendio de esta información y reconstruyen el área total que pudo ser afectada por todos los miembros encontrados en Calvache (1990). La Figura 3 extrae la figura pertinente, donde se muestra en sombra esa área y dentro del círculo rojo la ubicación del casco urbano de La Florida; también se pueden ubicar con mayor detalle que en Calvache (1990) los puntos donde se dataron los depósitos de flujos piroclásticos. Es de notar que en el mismo artículo ellos advierten que tienen un “sesgo hacia las poblaciones” del norte del volcán y sugieren que de manera urgente se hagan estudios que permitan eliminar dicho sesgo.

En este estudio se atiende esta sugerencia, abordando el análisis de las amenazas de Galeras de una manera detallada y probabilística, usando los últimos desarrollos científicos, aportando con nuevas dataciones y aplicando herramientas numéricas y computacionales de última generación.

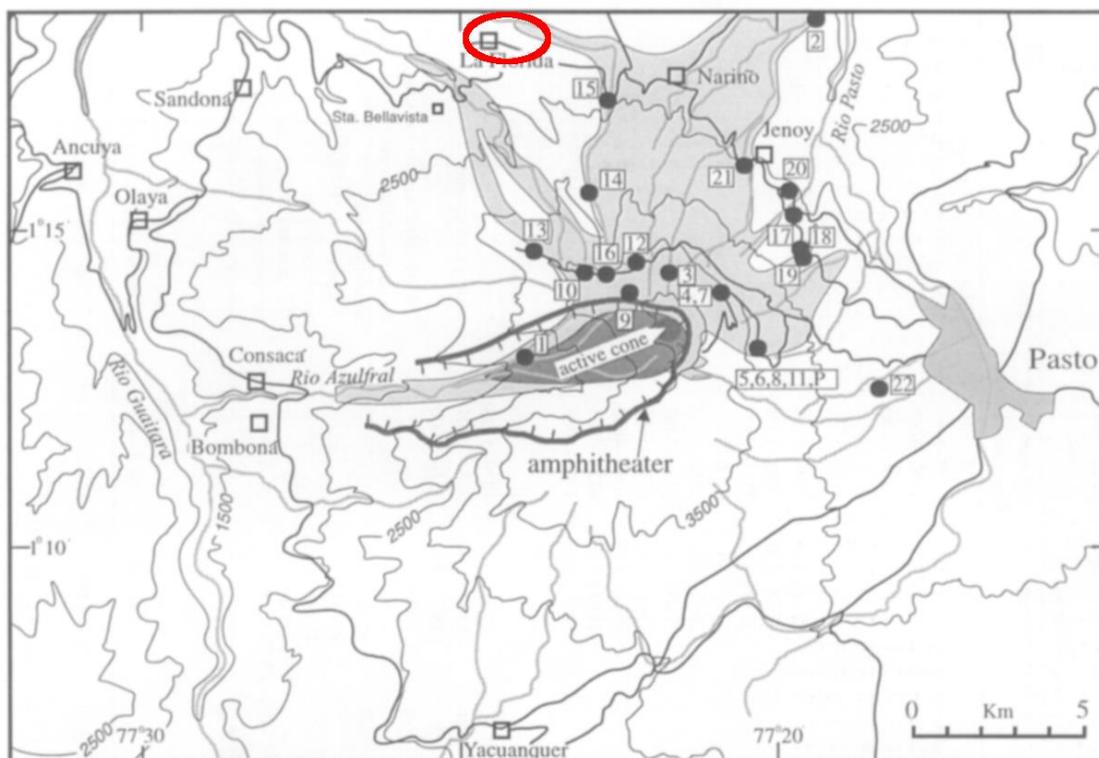


Figura 3. Ubicación de los muestreos hechos por Calvache (1990). La zona sombreada muestra la posible extensión de depósitos de flujos piroclásticos. El óvalo rojo muestra el casco urbano de La Florida. Fuente: Modificado de Banks et. Al. (1997)

A partir de los trabajos de Calvache (1990) y otros aportes; Hurtado & Cortéz (1997) usan la columna estratigráfica generalizada de los depósitos del volcán Galeras para encontrar probabilidades de ocurrencia de caída de cenizas, flujos piroclásticos, flujos de lava y lahares. Estas probabilidades fueron usadas para ponderar sus respectivas severidades, cuyo resultado es denominado Severidad Ponderada (SP) (Hurtado & Cortéz, 1997), lo que permitió a Ingeominas el desarrollo de la tercera versión del Mapa de Amenazas de Galeras (Hurtado & Cortéz, 1997; Ingeominas, 1997), la cual presenta tres zonas: zona de amenaza alta los lugares donde la severidad ponderada es mayor que 20; amenaza media cuando la severidad ponderada está entre 10 y 20;

y zona de amenaza baja si la severidad ponderada es menor que 10. La Figura 4 muestra la tercera versión del Mapa de Amenazas del volcán Galeras. Es de notar que, en esta ponderación, Hurtado & Cortéz (1997) no tuvieron en cuenta ni onda de choque ni proyectiles balísticos.

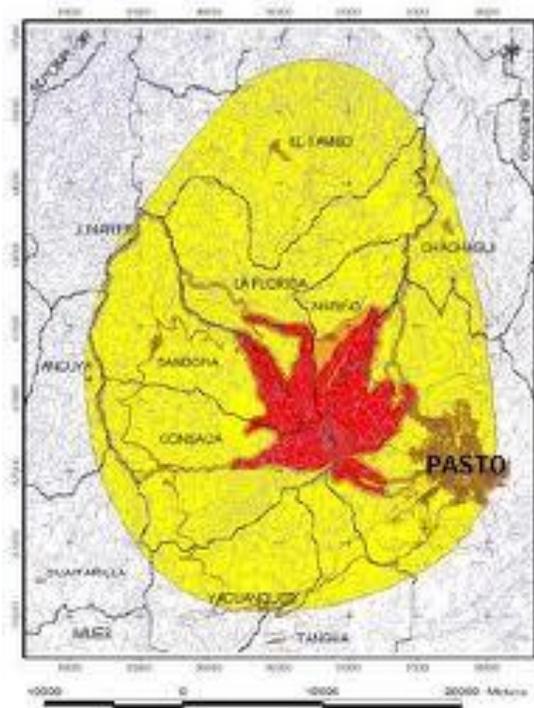


Figura 4. Tercera versión del Mapa de Amenazas del Volcán Galeras. En amarillo la zona de amenaza baja, donde la severidad ponderada es inferior a 10. En naranja la zona de amenaza media, donde la severidad ponderada está entre 10 y 20. La región en rojo determina la zona de amenaza alta, cuya severidad ponderada supera 20.

Por otra parte, la Corte Constitucional, mediante Sentencia T-269 de 2015 ordenó al Servicio Geológico Colombiano (SGC)

“elaborar un detallado estudio técnico por medio del cual se evalúen los niveles de riesgo, condiciones de vulnerabilidad y elementos expuestos que se encuentran actualmente en la zona de influencia del Galeras con el objeto de presentar un mapa actualizado de amenaza volcánica del mismo”. (Corte Constitucional, 2015)

Ante lo cual el SGC elaboró una cuarta versión del Mapa de Amenazas de Galeras (Figura

5)

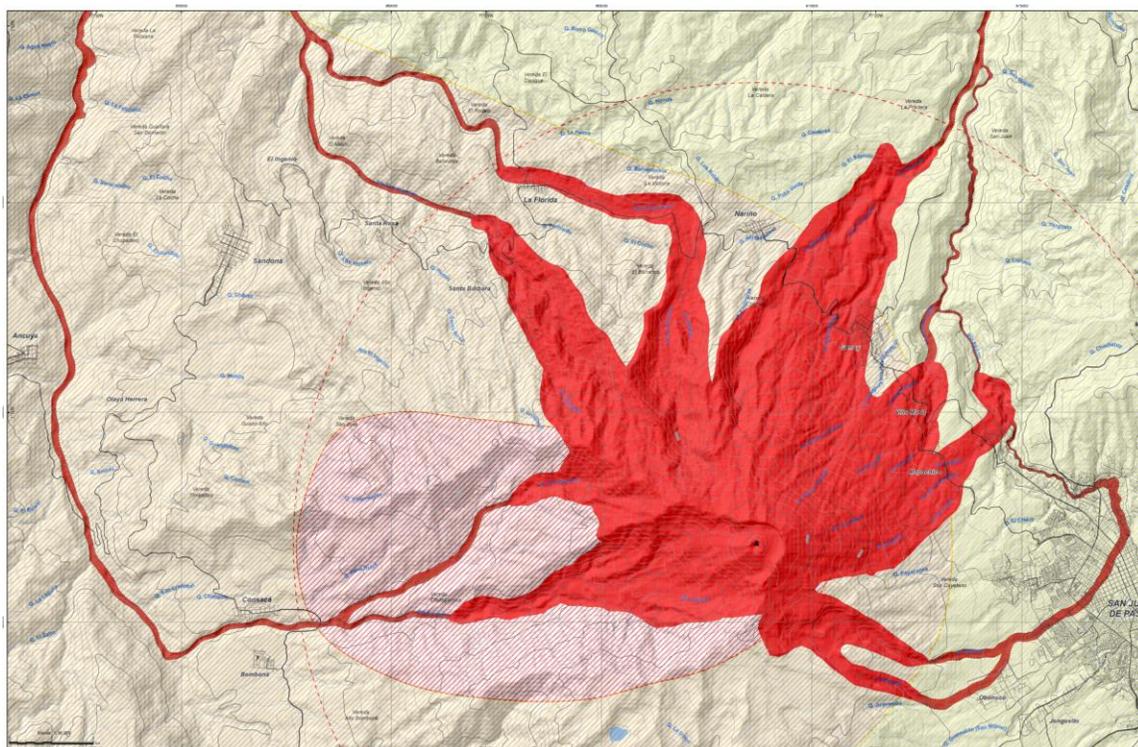


Figura 5. Cuarta versión del Mapa de Amenazas del volcán Galeras. Escala 1:30.000. Fuente: Copyright 2015 Servicio Geológico colombiano.

La cuarta versión retomó información del tercer mapa de amenazas del volcán Galeras, adicionando datos de la actividad reciente del volcán y resultados de simulaciones computacionales, con el objetivo de mejorar el acercamiento a la distribución de los fenómenos resultado de futuras erupciones. (Servicio Geológico Colombiano, 2015). No obstante, si nos atenemos al Decreto 1077 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, la escala actual de este mapa (1:30.000) no cumpliría con los requisitos exigidos para los planes y esquemas de ordenamiento territorial. Y además por ser un mapa determinístico, no hace posible la cuantificación del riesgo.

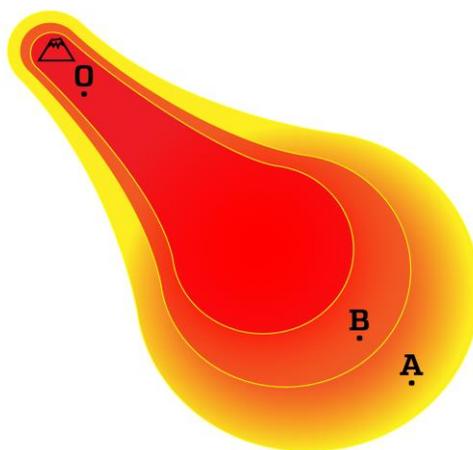
2.2. Análisis probabilístico de la amenaza

El Acuerdo de Sendai (UNISDR, 2015) marca pautas para la Gestión del Riesgo de obligatorio cumplimiento para los países firmantes, entre ellos Colombia. Como parte de este

acuerdo, se generó la Guía Nacional para el Análisis del Riesgo (UNISDR, 2017), donde se listan varios métodos para ese análisis, de los cuales el probabilístico es el más recomendado.

La probabilidad (P_T) de que un evento potencialmente dañino afecte a un lugar dado, está compuesta por la probabilidad de que ocurra dentro de un rango de tiempo (P_R) o probabilidad temporal, y la probabilidad de que un lugar dado sea alcanzado por esa amenaza (P_L) o probabilidad geográfica, como puede verse en la ecuación 1 y que se muestra de manera esquemática en la Figura 6.

$$P_T = P_R * P_L \quad (1)$$



$$P(A) = P_R \times P_A$$

$$P(B) = P_R \times P_B$$

Figura 6. Representación esquemática de la probabilidad total (P_T) de que un fenómeno alcance los puntos A y B. P_T depende de la recurrencia del evento (P_R) en O y la probabilidad geográfica (P_A y P_B). Note que P_R es la misma para ambas localidades. La probabilidad condicional a que ocurra el evento en O implica $P_R=1$.

Uno de los problemas que enfrenta la vulcanología es encontrar periodos de recurrencia para erupciones explosivas, puesto que en general los depósitos de cada amenaza son muy escasos o incluso nulos (como por ejemplo de Onda de Choque), debiendo recurrir a registros históricos

y/o narrados (Ver Espinoza, 2012). Esto es especialmente cierto en el caso Galeras, puesto que los registros geológicos solo han permitido reconocer 6 miembros (Banks et al., 1997; Calvache, 1990; Calvache, et al., 1997). Sin embargo, es de notar que Hurtado & Cortéz (1997) extraen una columna estratigráfica generalizada, de la cual diferencian 45 depósitos, logrando aproximar probabilidades de ocurrencia para flujos piroclásticos, flujos de lava, lahares y caídas piroclásticas. Con esta metodología los autores no pudieron tener en cuenta la recurrencia de onda de choque ni proyectiles balísticos; dado que las muestras son de diferentes lugares, las probabilidades mostradas en Hurtado & Cortéz (1997) resultan en probabilidad topográfica, y la temporalidad de las dataciones fue tomada en cuenta.

En el presente estudio se trabaja la probabilidad asumiendo el peor de los casos donde $P_R = 1$, es decir, en caso de que ocurra el evento de interés (dígase Corrientes Piroclásticas de Densidad, Lahares, Onda de Choque, etc), lo que se conoce como Probabilidad Condicional (Sheridan et al., 2010; Stefanescu et al., (2012a)). En este estudio se resuelve el problema de cómo encontrar la probabilidad de que un evento de origen volcánico afecte a un lugar dado, aceptando que independientemente de cuándo suceda el evento o su frecuencia o recurrencia, lo que nos interesa es la probabilidad de que ese evento con cierta magnitud afecte a ese lugar; por lo que se está asumiendo el 100% de probabilidad temporal.

Al no disponer de un muestreo estadísticamente significativo en los datos geológicos de Galeras para aproximar probabilidades que permitan obtener resultados confiables, se optó por generar un muestreo estadísticamente válido o representativo por medio de simulación de escenarios hipotéticos. Cada simulación depende de ciertos parámetros de entrada, los cuales a su vez dependen del evento a simular. Los valores de estos parámetros de cada escenario hipotético son las incertidumbres del sistema inicial. Es de recalcar que el método probabilístico es el más usado y aceptado para abocar el problema de las incertidumbres en la estimación de amenazas (Dalbey et al., 2008; Sheridan et al., 2010; Sparks, 2009; Stefanescu et al., 2012).

Es importante anotar que las combinaciones deben estar restringidas a un rango finito de valores, es decir, entre valores máximos y mínimos. En el caso de las amenazas volcánicas, estos

valores y las características físicas y reológicas de los fenómenos a analizar vienen dados por la historia geológica del volcán.

Cada amenaza volcánica tiene su propia combinación de condiciones iniciales, que dependen de los datos de entrada requeridos por cada programa computacional; el número de combinaciones posibles resulta infinito al tratarse de números reales no enteros, por lo que se requiere un muestreo representativo de todos los casos posibles; siendo el Método de Montecarlo (MC) el más aceptado matemáticamente (Anderson, 1999; Dalbey et al., 2008; Eckhardt, 1987; Hastings, 1970; Matala, 2008).

En el ámbito del análisis probabilístico de las amenazas volcánicas, en general se usan muestreos que reducen substancialmente el número de muestras usadas por el MC, como por ejemplo el Muestreo Hipercúbico Latino (LHS), el cual es un muestreo también aleatorio, pero estratificado (ver figura 7), que reduce en más de un 90% el número de muestras; o avances como el Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal (OLHS) que reducen hasta en un 99% la cantidad de muestras requeridas (Baalousha, 2009; Dalbey et al., 2008; Matala, 2008; Sheridan et al., 2010; Stein, 1987). En el presente estudio se desarrollaron rutinas para Octave/Matlab que adaptaron las ideas de Dalbey et al. (2008) para generar un mínimo de 128 combinaciones OLHS, que dan un error de muestreo $e < 10^{-4}$ (ver detalles en Rodríguez et al., 2017).

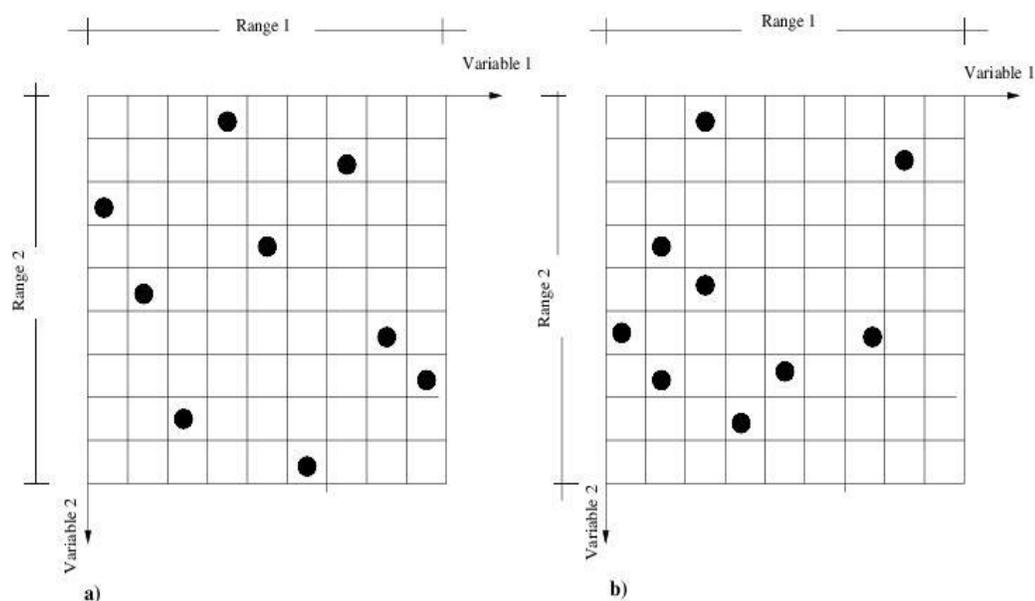


Figura 7. Esquema representando un muestreo bidimensional por a) Muestreo Hipercúbico Latino (LHS), y b) puramente aleatorio (MC). Note que en MC es posible que se agrupen las combinaciones, situación que no sucede con LHS. Para mejorar la exactitud de M

Como lo muestra la Figura 8, puede haber casos donde el flujo provenga desde varias fuentes pero que alcancen la misma localidad, como es el caso de flujos piroclásticos generados por colapso de columna, donde debido a su capacidad de dispersión (alta energía potencial inicial y movilidad) pueden alcanzar el mismo lugar desde varios puntos de inicio. Este problema es abordado en este estudio aplicando el concepto de probabilidad bayesiana. Es de notar que la probabilidad frecuencial mide la recurrencia de un evento comparado con el número total de eventos analizados ($P = N_i/N_T$). Sin embargo, la inferencia bayesiana, que a la larga se basa en la Teoría de Decisiones, hace un análisis dinámico de una secuencia de datos incluso en múltiples dimensiones (Ding & Liu, 2012; Ferson, 2005; Gutiérrez & Zhang, 2009; Solow, 2001). Esto nos permite tratar estadísticamente el problema de determinar la probabilidad de que un flujo llegue incluso desde varias fuentes.

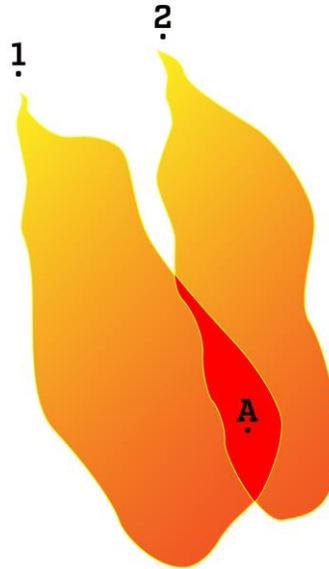


Figura 8. Esquema del caso en que dos eventos alcanzan una misma localidad con diferentes probabilidades. La inferencia bayesiana tiene en cuenta esta intersección de probabilidades (zona roja).

Esta inferencia se basa en la probabilidad condicional definida como en la ecuación 2.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (2)$$

Donde $P(A|B)$ es la probabilidad de A dado un evento B, $P(A \cap B)$ es la intersección de probabilidades, y $P(B)$ la probabilidad frecuencial de B.

En la inferencia bayesiana, la ecuación 2 deviene en la ecuación 3.

$$P(A|B) = \frac{P(A)P(B|A)}{P(B)} \quad (3)$$

Donde $P(A|B)$ es la probabilidad *a posteriori* de A dado un evento B y $P(B|A)$ es la *probabilidad condicional* de que ocurra B dado un evento A, $P(A)$ es una *probabilidad a priori* de

que se dé A, P(B) es la *probabilidad marginal* o probabilidad de obtener nueva evidencia. Detalles sobre inferencia bayesiana aplicada a amenazas naturales en Córdoba et al., (2018); Guerrero (2016).

Por otra parte, se asume una distribución probabilista tipo Weibull acotada con exponente $n=1$ (ecuación 6), típica en fenómenos volcánicos (Ver Garcia-Aristizabal et al., 2018; Sandri et al., 2016; Sandri et al., 2012), con la cual se ajustaron los datos de probabilidad de cada uno de los fenómenos estudiados.

La distribución Weibull es una distribución de probabilidad que es considerada como la mejor, porque está limitada y los parámetros permiten comparativamente mayor flexibilidad de forma y principalmente, proporciona pronósticos razonables incluso con muestreos pequeños (Weibull, 1951, Quinn & Quinn, 2010). La ecuación 6, muestra esta distribución.

$$P(x) = \frac{\frac{k}{\lambda} e^{-(x/\lambda)^n}}{1 - e^{-(x/x_{min})^n}} \quad (3a)$$

Donde k es un factor de forma, λ la media, x la variable de interés y x_{min} el valor mínimo de x . En el caso particular de lahares, x es o bien la presión dinámica o la profundidad del flujo. En este caso se usó un k de tal manera que la probabilidad máxima no exceda la probabilidad de flujos piroclásticos en la cabecera del Barranco. Por ejemplo, en el caso particular de lahares, x es o bien la presión dinámica o la profundidad del flujo.

2.2.1. Amenaza por corrientes piroclásticas de densidad

2.2.1.1. Introducción

Debido a la amenaza que representan las erupciones volcánicas, es importante tener conocimiento de los fenómenos que se encuentran asociados a estas; varios trabajos investigativos han logrado tener un avance en la comprensión del comportamiento de estos fenómenos. (Ver Druitt 1996 y Sparks et al. 1997). Por otra parte, el desarrollo computacional ha tenido un papel importante en intentar reproducirlos para observar su distribución en la topografía actual, apoyados en la información obtenida en jornadas de campo (ejemplo Patra et al., 2005).

El volcán Galeras en su historia geológica ha tenido varios procesos constructivo-destructivos de domos que de acuerdo a Calvache (1995), reflejan varias etapas establecidas en sucesiones estratigráficas agrupadas según particularidades morfológicas. Sin embargo, muchos de los afloramientos establecidos alrededor del volcán no se presentan en una secuencia muy bien definida, evidenciando el poder erosivo del sector, encontrándose rocas incluso con una seria alteración hidrotermal que podrían demostrar la inestabilidad de antiguos edificios del Complejo volcánico Galeras.

Con el propósito de realizar una estimación de la afectación por corrientes piroclásticas de densidad, al nivel de detalle requerido para llegar a la escala deseada en un área establecida, es necesario complementar los datos provenientes de la geología tanto con dataciones, como con el apoyo de modelos computacionales y así analizar el posible comportamiento de estos flujos sobre la base topográfica actual; para lo cual se deben establecer parámetros básicos de entrada que permitan acercarnos a resultados reales.

En relación con las dataciones, gracias a la colaboración del Dr. Jean-Claude Thouret del Observatoire de Physique du Globe, Clermont'Ferrand, Francia, se enviaron a ese instituto 17 muestras de carbón recogidas en trabajo de campo conjunto con el equipo del Dr. Bernardo Pulgarín del Servicio Geológico Colombiano en la cuenca del Barranco para datación ¹⁴C (Pulgarín & Córdoba, 2017), de las cuales se tienen por el momento datadas 14 muestras. En la Figura 9 se muestra el listado de dataciones (ver anexo 1 para detalles de las dataciones), y en la Figura 10 la ubicación de estas, en la cual se ha señalado las muestras 6 y 9 por estar bajo el casco urbano de La Florida. De manera interesante, esas dataciones en particular comprueban que la edad de los depósitos de flujos bajo el casco urbano y frente a él (6.840 y 7.485 ybp respectivamente) corresponden al edificio volcánico del estadio Urcunina del Complejo Volcánico del Galeras. Además, es de resaltar que en este trabajo de campo conjunto no se pudieron encontrar depósitos de flujos piroclásticos en el sector Norte del Barranco (señalado con una elipse en la Figura 10). Los resultados de este trabajo de campo con sus dataciones complementan el estudio de Calvache (1990) y en especial el de Bakns et. al. (1997), y dan la seguridad que durante el estadio Galeras, no se han presentado flujos piroclásticos que dejen registros geológicos bajo el casco urbano del Corregimiento Especial de La Florida.

Plateforme Nationale LMC14

CEA Saclay - Bât. 450 - Porte 4E - 91191 GIF sur YVETTE Cedex

Série : Thouret180615 - Demandeur : THOURET Jean Claude - Nombre : 15

Numéro	Référence	Nature	mg C	Delta C13	pMC *	Âge BP
SacA53923	1. BAR-17-001 Barranco El Trebol	charbons dans unité	1.43	-25.9	87.354 ± 0.227	1085 ± 30
SacA53924	2. BAR-17-002 El Barranco camin	charbons dans unité	1.51	-24.0	77.174 ± 0.201	2080 ± 30
SacA53925	3. BAR-17-03 El Barranco Camino	charbons dans unité	1.49	-26.7	39.214 ± 0.167	7520 ± 35
SacA53926	4. P1-A2 La Florida 77°24'25,40	charbons dans unité	1.68	-26.6	98.4 ± 0.248	130 ± 30
SacA53927	5. P1-B2 La Florida 77°24'25,40	charbons dans paléos	1.61	-24.1	96.004 ± 0.258	330 ± 30
SacA53928	6. P1-C2 La Florida 77°24'25,40	charbon dans unité C	1.53	-25.6	39.376 ± 0.177	7485 ± 35
SacA53929	7. P5-T1-S El Barranco 77°22'33,	charbons dans unité	1.31	-25.6	97.715 ± 0.267	185 ± 30
SacA53930	8. FLOR17-P1-HB La Florida 77°2	Sol et micro charbons	1.79	-24.9	76.131 ± 0.223	2190 ± 30
SacA53931	9. FLOR17-P1CHC La Florida 77°2	charbons dans unité	1.51	-32.3	42.667 ± 0.199	6840 ± 35
SacA53932	10. PNO-CVG-038-C-3C El Mirad	charbons dans 3è uni	1.45	-25.7	98.649 ± 0.259	110 ± 30
SacA53933	11. SCM-CVG-047-A-3C Barranco	Charbon dans unité in	1.55	-22.4	60.136 ± 0.216	4085 ± 30
SacA53934	12. JGG-CVG-049-E-3C Rive gauc	charbons dans 2è uni	1.49	-25.6	86.859 ± 0.255	1130 ± 30
SacA53935	13. JGG-CVG-049-B-3C Rive gauc	charbons dans 5è uni	1.33	-24.0	68.825 ± 0.251	3000 ± 30
SacA53936	14. GELAT S3-04 gytja sous sable	Fragments bois dans	1.20	-30.3	85.074 ± 0.233	1300 ± 30
SacA53940	15. GELAT Sol TR4 Unité 5	Sol	1.15	-25.7	105.457 ± 0.289	Postérieur à 1950

* Corrigé du fractionnement

Blanc soustrait Sans blanc soustrait

Figura 9. Dataciones realizadas por el Instituto de Física del Globo de Clermont-Ferrand, Francia .

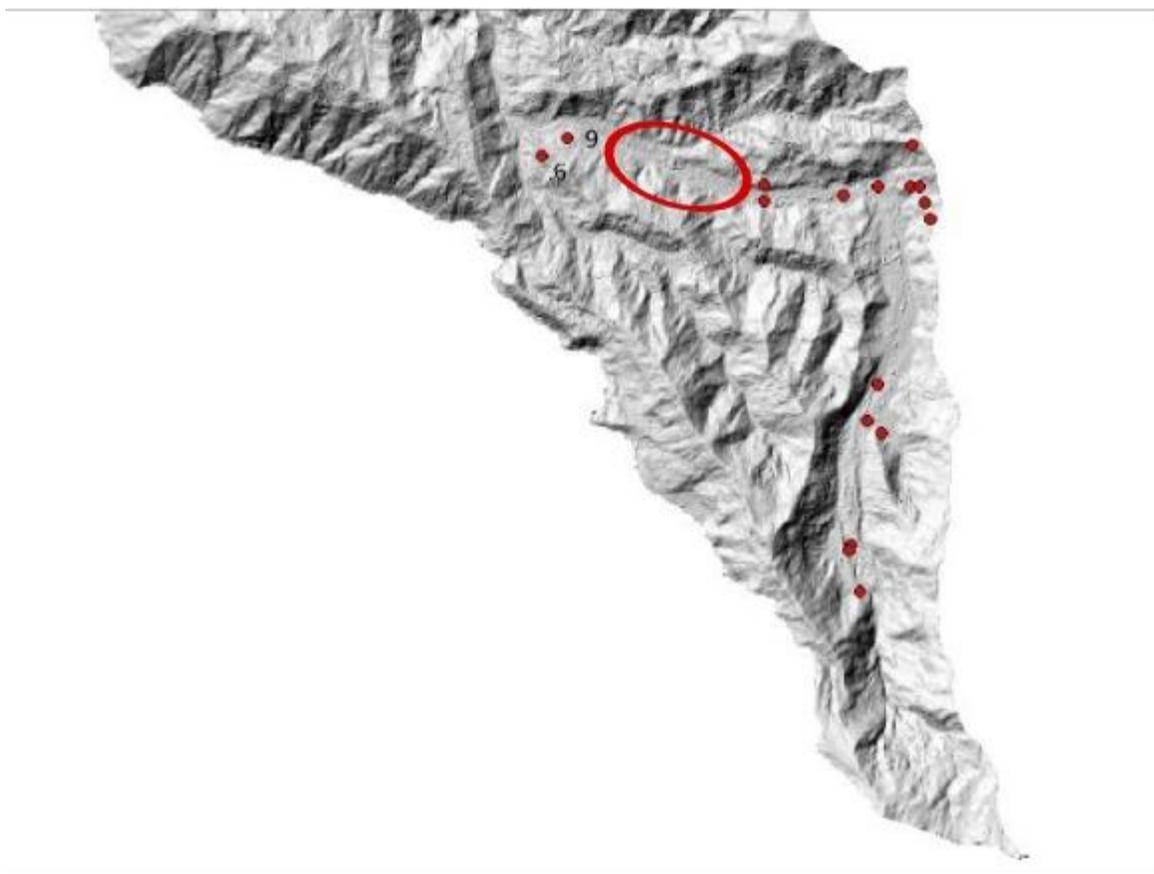


Figura 10: Localización de los muestreos de carbón para las dataciones. Los puntos 6 y 9 corresponden a las dataciones 6 y 9 de la Figura 9. La elipse encierra el sector norte del Barranco donde no se han encontrado depósitos de flujos piroclásticos Fuente: este estudio.

Es de notar, además, que hacia la vereda Panchindo se dató un microcarbón con suelo de 2190 ybp (muestra 8, Figura 9), cuyo origen es incierto, puesto que no se corresponde con erupciones reconocidas (puede ser fruto de incendio o fuego antrópico, pero también de nube acompañante u oleada piroclástica de una erupción no identificada aún) el cual será tenido en cuenta cuando se analice la amenaza por nube acompañante u oleadas piroclásticas.

Por otra parte, para simular computacionalmente las corrientes piroclásticas de densidad se cuenta con dos tipos de software. El primero es el software TITAN 2D para modelamiento numérico de flujos granulares, desarrollado por la Universidad de Buffalo (Estados Unidos), que trabaja sobre un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en inglés). Este software ha sido utilizado en diferentes escenarios como es el caso del Cerro Machín y el mismo volcán, Galeras, Colombia (García et al., 2011; Murcia, et al., 2010). Dada la capacidad de TITAN2D de

predecir con éxito la extensión y alcance de flujos piroclásticos (Capra et al., 2011; Galas et al., 2007; Ogburn et al., 2016; Patra et al., 2005; Sheridan et al., 2005; Stinton et al., 2004), en este estudio se lo usa para modelar la parte basal de las Corrientes Piroclásticas de Densidad (CPD).

El segundo es el concepto de Líneas de Energía (Heim, 1932) que se basa en la conversión de energía potencial a cinética, la que a su vez se va perdiendo por otras fuerzas que disipan esta energía. Físicamente, se puede demostrar que se basa en el principio expresado en la ecuación de Bernoulli (Córdoba, 2007). Aunque con este concepto solo se puede aproximar el alcance de los flujos, es muy útil por su simplicidad y exactitud. Malin & Sheridan (1982) y Sheridan (1980), desarrollaron el concepto de Conos de Energía para modelar Corrientes Piroclásticas de Densidad. Validaciones de las predicciones estadísticas de este método demuestran que es una de las mejores herramientas computacionales para reproducir *el alcance máximo* de las CPDs, ya que es capaz, dependiendo del modelo de fricción usado, de capturar tanto la parte dominada por la convección como la inercial (Tierz et al., 2016).

Es por esto por lo que en este estudio se usa una TITAN2D para la parte basal del flujo y flujos de bloques y ceniza y las líneas de energía para el alcance máximo por la combinación de las fuerzas convectivas con las inerciales.

2.2.1.2. Volcán Galeras

El Complejo Volcánico Galeras está compuesto por varios edificios volcánicos siendo Galeras el edificio actual cuya actividad se inició hace unos 5000 años (Calvache, 1990; Calvache, 1995; Calvache & Duque-Trujillo, 2016; Calvache et al., 1997). Esta actividad ha generado varias erupciones de tipo vulcaniano con extrusiones de materiales generalmente de composición andesítica que en el registro geológico ha sido definido por seis miembros que se los ha denominado **Unidades Eruptivas** (UE), en los cuales los depósitos más comunes son los de flujos piroclásticos tanto concentrados como diluidos (Calvache, 1990; Servicio Geológico Colombiano, 2015).

En 1998 el volcán Galeras inició una nueva fase de reactivación, a partir de esta fecha se han presentado 28 erupciones o fases eruptivas principales. Esta actividad ha generado columnas eruptivas que han ido desde unos cuantos metros de altura hasta un máximo de 12 km, emitiendo ceniza y lapilli que han sido distribuidas de acuerdo a la dirección del viento (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

En este estudio se han realizado varios trabajos de simulaciones numéricas basadas en la zonificación de la amenaza volcánica del Galeras y su geología, donde cada uno de los códigos utilizados ha necesitado parámetros de entrada específicos dependiendo del tipo de flujo a modelar.

2.2.1.3. Volúmenes de Flujos Piroclásticos

Según Calvache (1990) y Banks et al. (1997), el volumen total de depósitos estimado para el volcán Galeras es de 0,7 km³. De esta manera se puede establecer cuáles serían los rangos de volúmenes de material esperados que serían expulsados en caso de presentarse una erupción explosiva del volcán.

Según Calvache (1990), en orden geocronológico se tiene:

Miembro 4500: Ubicado bajo una capa de biotita, este depósito se encuentra fuertemente alterado; en las quebradas Genoy, El Barranco, Loma Redonda y Chorrillo se distingue una secuencia de flujos piroclásticos matriz soportados; la capa basal es un depósito amarillo con abundante contenido de líticos mayores a 10 cm de diámetro y bajo contenido de pómez dentro de una matriz de ceniza. Le segunda capa corresponde a un flujo de ceniza gris con pequeños clastos de pómez en una matriz rica en cristales de piroxeno y plagioclasa. La distribución de esta unidad es principalmente al Norte hacia el poblado de Nariño y al Noroccidente de Genoy (Calvache, 1990).

El volumen estimado para esta unidad corresponde a 8.653.000 m³, del cual la Quebrada de El Barranco tiene un volumen de 210.000 m³.

Miembro 4000: Este miembro tiene una distribución menor encontrándose al Norte – Oeste del volcán cerca de Loma Redonda, aguas arriba de la Quebrada El Barranco y muy posiblemente aguas arriba de la Quebrada Mapachico. Los depósitos inferiores corresponden a un flujo de ceniza de color amarillo matriz soportado y rico en líticos, seguido de una capa delgada de ceniza de color gris a crema alterado a arcilla con presencia de carbón. Estas capas están cubiertas de un depósito de flujo piroclástico matriz soportado rico en cristales.

El volumen estimado para este miembro es de 1.186.000 m³; distribuyéndose en la Quebrada El Barranco con una longitud de 9 km; un espesor de 1 m y un volumen estimado de 550.000 m³

Miembro 2900: Este depósito tiene dos direcciones preferenciales de distribución, hacia el Este, Noreste y hacia el Noroeste; este último hacia el río Chacaguaico aguas arriba. La parte basal de esta unidad corresponde a un flujo piroclástico masivo pobremente sorteado, rico en líticos, los líticos, así como la matriz están fuertemente alterados. La segunda unidad corresponde a un flujo piroclástico gris clasto-soportado y pobremente sorteado con abundante carbón orgánico.

El volumen estimado para este miembro es de 1.331.000 m³ con una distribución en la Quebrada El Barranco de 33.000 m³ con una longitud de 5.500 m y un espesor de 1m.

Miembro 2300: Este miembro está compuesto de dos flujos muy distintivos, uno de ellos es un depósito “amarillo” y rico en líticos y el otro corresponde a un flujo piroclástico gris con pómez y líticos. La dirección de distribución de la unidad amarilla es hacia el norte, en dirección de la Quebrada Chorrillo, mientras que el segundo flujo se encuentra más confinado y fue encontrado aguas arriba de dos secuencias localizadas al Este y Noreste del volcán: La Quebrada San Francisco y El Verjel.

El volumen estimado para este miembro es de 2.086.000 m³.

Miembro 1100: Se encuentra principalmente distribuido al Noreste del volcán desde la Quebrada Maragato al Norte hasta la Quebrada San Francisco al Este. La secuencia de este miembro inicia con un depósito amarillo de material disgregable compuesto de líticos alterados hidrotermalmente, este depósito parece ser más un “surge” (oleada) que un flujo piroclástico, especialmente por su buen sorteo. Este depósito no es más potente que 20 cm y aparece siguiendo

la topografía como una nube de ceniza cubriendo al flujo principal. Esta unidad se encuentra seguida por una secuencia de flujo piroclástico gris pobremente sorteado en general matriz-soportado.

El volumen estimado para este miembro es de 1.127.500 m³

Miembro 1866: Corresponde a la secuencia estratigráfica mejor documentada de la volcanoestratigrafía del volcán Galeras. Está compuesto por un depósito amarillo rico en líticos y fuertemente alterados, la siguiente unidad corresponde a un flujo parduzco con algunos líticos alterados y fragmentos de roca porfíricas; en zonas altas esta unidad grada hasta una unidad rojiza a la oxidación de fragmentos de roca.

El volumen estimado para este miembro es de 2.893.000 m³.

Hay que destacar que únicamente los volúmenes correspondientes a los miembros 2900, 4000 y 4500 tienen una caracterización en el sector de la Quebrada El Barranco (ver Tabla 2).

En trabajos realizados en simulaciones en el volcán Galeras. (Ver García et al., 2011; Stefanescu et al., 2012a) se utilizan volúmenes estimados a partir de los obtenidos en Calvache (1990) y que se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. *Volúmenes de depósitos de flujos piroclásticos del volcán Galeras*

Miembro	Volumen Total	Volumen Barranco
4500 ybp	8.653.000	210.000
4000 ybp	1.186.000	55.000
2900 ybp	1.331.000	33.000
2300 ybp	2.086.000	-
1100 ybp	1.127.500	-
1986	2.893.000	-

Recuperado de Calvache, 1990

Los valores utilizados en García et al., (2011) asumen como valor mínimo 100.000 m³ y un valor máximo reportado para el **Miembro 2300** de 2.000.000 m³. Sin embargo, de acuerdo a la Tabla 1, en este estudio se considera prudente usar como volumen mínimo la cota superior del mayor depósito estimado por Calvache (1990), es decir 300.000 m³ (que coincide con la sumatoria de los volúmenes depositados de los miembros 4.500, 4.000 y 2.900). El volumen máximo en Galeras reportado por Calvache (1990) corresponde al miembro 1966, aproximadamente 3.000.000 m³. Se considera en este trabajo el volumen del miembro 4.500 como un caso extremo. Por lo cual los volúmenes a utilizar en las simulaciones son los mostrados en la Tabla 3. Nótese que estos volúmenes corresponden a los rangos de volúmenes mínimo y máximo dentro de los cuales se aplica la técnica de muestreo OLHS.

Tabla 3. *Volúmenes de Flujos Piroclásticos que utilizar en los modelamientos*

Volumen	(m³)
Volumen Mínimo	300.000
Volumen Intermedio	1.500.000
Volumen Máximo	3.000.000
Volumen Extremo	8.500.000

2.2.1.4. Coeficiente de Fricción

Uno de los parámetros físicos que gobiernan la movilidad de flujos granulares es la fricción basal (Patra et al., 2005; Savage & Hutter, 1989), la cual puede ser aproximada por la relación H/L o coeficiente de Heim (Heim, 1932; Malin & Sheridan, 1982; Sheridan, 1980). Programas como TITAN2D (Ogburn et al., 2016; Patra et al., 2005; Stinton et al., 2004), FLOW3D (Sheridan et al., 2004) o la aproximación de los Conos de Energía (Malin & Sheridan, 1982), necesitan de información de la fricción en sus parámetros iniciales.

Varios estudios han encontrado que existe una relación inversa entre H/L y el volumen (V) del flujo (Ver figura 2 en Sheridan & Macias, 1995 o Swiler et al., 2016). A partir de una base de datos mundial Ogburn et al. (2016), encuentra relaciones H/L contra V ; con base en las cuales

Ogburn & Calder (2017) proponen dos relaciones H/L contra V , una basada en datos de depósitos de flujos piroclásticos y la otra, más crítica, basada tanto en datos de depósitos, como en reportes de alcance máximo de CPDs, La ecuación 4 muestra dicha aproximación, siendo la que usamos en este trabajo.

$$H/L = 0.06(V^{-0.20}) \quad (4)$$

En el caso de TITAN2D, una información adicional que requiere es el ángulo de fricción interna, definido como el ángulo que una pila de material granular forma al descansar sobre una superficie plana (Dalbey et al., 2008).

De esta forma se encuentra la relación H/L de manera directa, puesto que pasa a ser función de V (ecuación 4). Es decir, las incertidumbres relacionadas con las simulaciones consisten ahora solamente en la localización del sitio de colapso o inicio de los CPDs y su volumen.

2.2.1.5. Localización de pila de material inicial

Tanto el lugar de inicio de las CPDs como su dirección es incierto (García et al., 2011). Para tratar estas incertidumbres se recurrió a distribuir aleatoriamente los sitios de origen de CDPs potenciales; el criterio usado consiste en establecer una zona radial que se pueda asumir como sitio de inicio de estos; uno de ellos es la zona del cráter (distancia media: 650 m). Es de notar que en esta zona se han encontrado depósitos del orden métrico de las últimas erupciones: periodos 1989-19954 y 2004-2010, según información enviada por SGC al Convenio 2017000277 (Gómez, 2018). Desde ahí, eventualmente los CPDs pudieran superar la barrera topográfica del anfiteatro, como en García (2011), donde se ve que la barrera es remontada por flujos cuando el volumen supera los dos millones de metros cúbicos. Sin embargo, existe evidencia fotográfica de que flujos de mucho menor tamaño han podido superar esta barrera. (Ver fotografía erupción 1936 en Ingeominas, 1997). Para tener en cuenta este hecho, se optó por ampliar el área de posible inicio de CDPs hasta una distancia donde se han reportado depósitos de caída (al menos) de los últimos periodos eruptivos del orden centimétrico; esto es 1.200 m de distancia desde el cráter (Figura 11).

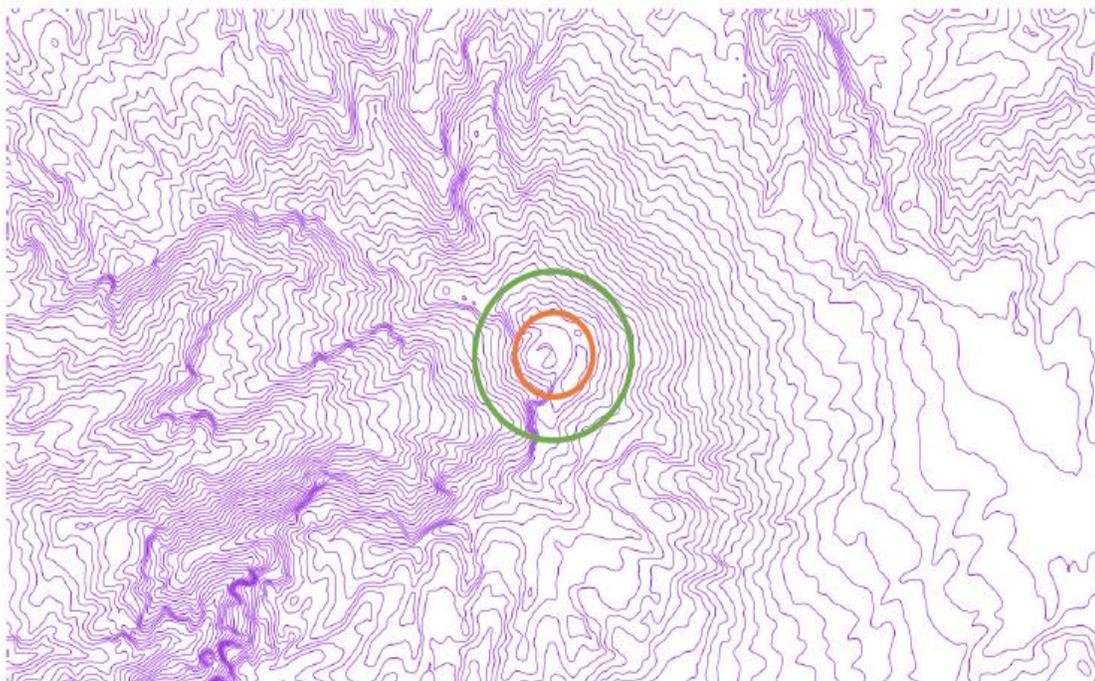


Figura 11. Área dentro de la cual se asume, que se pueden iniciar las CPDs. El círculo rojo indica la zona del cráter y el círculo verde encierra el área máxima desde donde pudieran iniciarse los CPDs.

2.2.1.6. Generación del muestreo para modelamiento de flujos piroclásticos con TITAN2D

El área establecida como posible origen de flujos piroclásticos se dividió en 5 sectores, (4 sectores circulares, más un círculo central) dentro de los cuales se generaron 256 combinaciones con las incertidumbres L_x , L_y y V (donde L_x es la coordenada UTM x de la localización, L_y es la coordenada UTM y de la localización y V el volumen), usando la técnica de muestreo OLHS para un total de 1280 realizaciones. La Figura 12 muestra esta distribución, los rangos de volumen son los indicados en la sección respectiva.

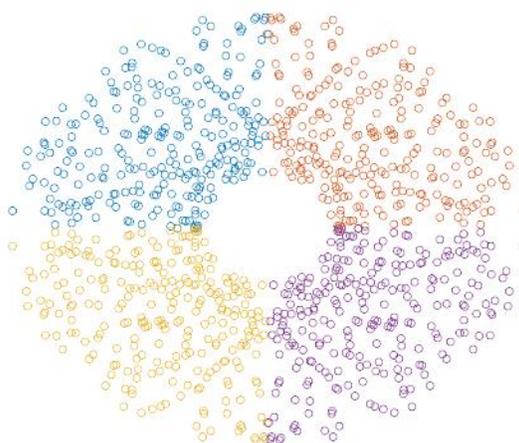


Figura 12. Distribución OLHS de los lugares de inicio de CPDs. En cada una de las 5 áreas se realizaron 256 simulaciones. Note que hay 4 sectores circulares y un círculo, donde también se realizan las 256 simulaciones.

Debido a que es posible que desde lugares de inicio diferentes los flujos piroclásticos alcancen el mismo lugar, se recurrió a la aproximación bayesiana de las probabilidades (método explicado en la sección respectiva). La figura 13 muestra el resultado de la distribución probabilista bayesiana de flujos piroclásticos o la parte basal de CPDs en el sector de El Barranco, en caso de que ocurran en el volcán Galeras. Es de notar que estas probabilidades se refieren a la probabilidad de llegada de un flujo con más de 20 cm de espesor en su parte basal. Este límite se debe tanto a limitantes computacionales como a que en Galeras lo más probable es que se presenten flujos relativamente pequeños, tal como lo anota García et al. (2011), quienes también asumen 20 cm como límite de corte de la información de TITAN2D.

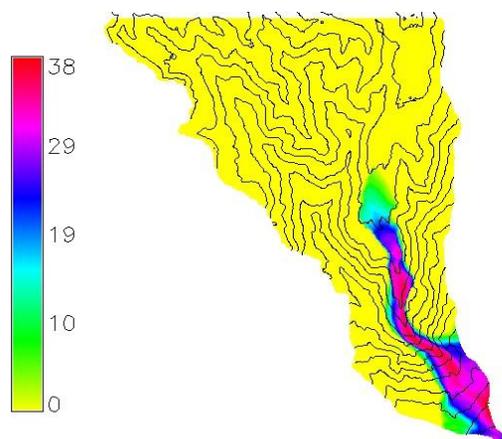


Figura 13. Distribución de probabilidades de flujos piroclásticos en la cuenca de El Barranco.

2.2.1.7. Aproximación probabilística de CPDs con Líneas de Energía

Una vez hecha la aproximación a la amenaza por flujos piroclásticos, se debe tener en cuenta la complejidad de estos flujos, en caso de que exista una parte importante de nube acompañante que se desprenda de la parte más densa o que se produzca una oleada piroclástica.

Para examinar el comportamiento complejo de los CPDs en la cuenca del barranco, se procedió a modelar tridimensionalmente un flujo piroclástico con un volumen correspondiente al máximo contemplado por García et al. (2011). Para ello se recurrió al software multifísico OpenFoam (ver detalles sobre este programa en sección Onda de Choque). La Figura 14 muestra una perspectiva de 4 momentos; la Figura 12a muestra la localización asumida para el arranque de la CPD, la que fue ubicada en la parte superior del Barranco (aproximadamente a 3.800 msnm); la Figura 12b indica el momento cuando el flujo impacta la primera curva donde se inicia a producir un sobrealto; la Figura 12c muestra como parte del flujo se separa para dirigirse por la cuenca del Panchindo y finalmente en la Figura 12d se ve como el flujo se ha desbordado también hacia la cuenca del Chucho. Esta simulación mostró que al menos para el caso de CPDs grandes es posible que se presente separación de las partes del flujo, situación no contemplada ni por los registros geológicos hechos hasta antes de este estudio (Ver Banks et al., 1997; Calvache, 1990; Calvache & Williams, 1992), ni por simulaciones anteriores de flujos piroclásticos (Ver García et al., 2011; Stefanescu, Patra, et al., 2012). Una separación de la nube acompañante y dirigida hacia Panchindo sería compatible con el hallazgo de un microcarbón de edad 2190 ybp encontrado en el

trabajo de campo conjunto con el equipo del Dr. Bernardo Pulgarín del Servicio Geológico Colombiano (Pulgarín y Córdoba, 2017), caso que se compruebe quemado por nube acompañante u oleada piroclástica. Por lo anterior, se decide recurrir al concepto de líneas de energía, ya que estas son capaces de predecir el alcance máximo de las CPDs, como se mencionó más arriba.

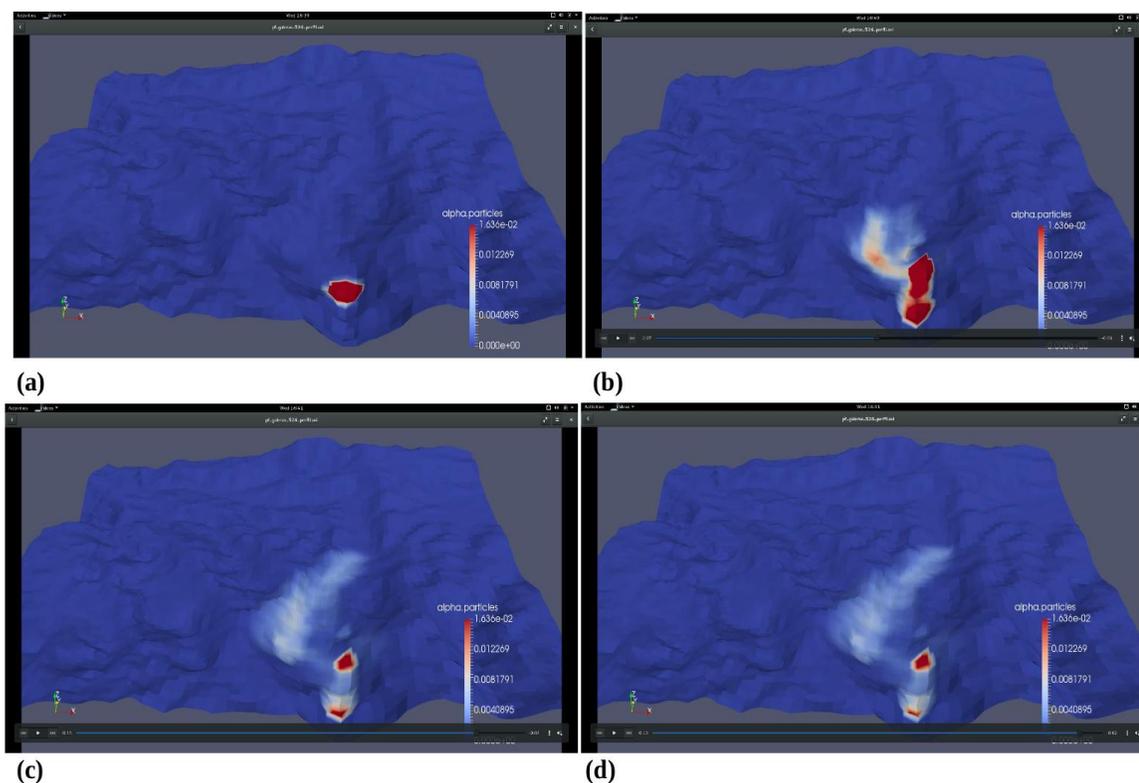


Figura 14. Modelamiento 3D de CPDs con Open Foam. a) Situación inicial del material. b) Iniciación de curva donde se presenta sobre-elevación. c) Separación del flujo hacia Panchindo. d) Separación del flujo hacia el Cucho

Al no contar con suficientes registros geológicos ni históricos que permitan llegar a curvas de probabilidad como las obtenidas por Sheridan & Macías (1995) en el volcán Colima, la metodología usada consistió primero en aceptar que la altura de colapso de columna más probable en Galeras es de 100 m a 200 m (Calvache, 1990; García et al., 2011), dejando como fija esta variable; segundo, se obtuvo una base de datos de relaciones H/L para cada uno de los pixels del modelo digital de elevación; tercero, teniendo el rango de volúmenes (ver sección anterior) y aplicando la ecuación 4 se obtiene el valor de H/L correspondiente; cuarto, se desarrolló un script para Octave/Matlab que permite un conteo de las veces que el H/L del pixel es mayor o igual al correspondiente de cada volumen.

La Figura 15 muestra este concepto de manera esquemática, donde cada punto tiene su respectivo H/L . Si el coeficiente de Heim que corresponde al volumen ensayado es menor que la línea de energía respectiva, se la pasa a contar para luego encontrar las probabilidades.

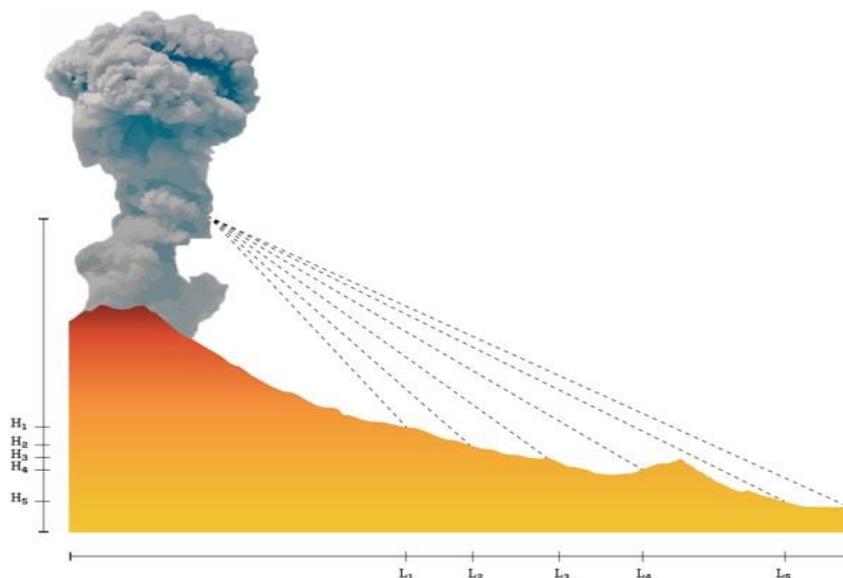


Figura 15. Esquema de líneas de energía con diferentes H/L . Nótese que algunas remontarán el obstáculo y otras no. Para saber la probabilidad de que estas líneas cumplan con un H/L máximo, se cuenta las que están más hacia la izquierda y luego se divide. Fuente: este estudio.

Como resultado de esta metodología se obtuvo la distribución probabilística en la parte alta del municipio de La Florida; como se indica en la Figura 16. Es de notar que en el caso de CPDs existe la probabilidad, aunque baja (menor del 10%), de que estos se dirijan también hacia la quebrada Panchindo y El Cucho.

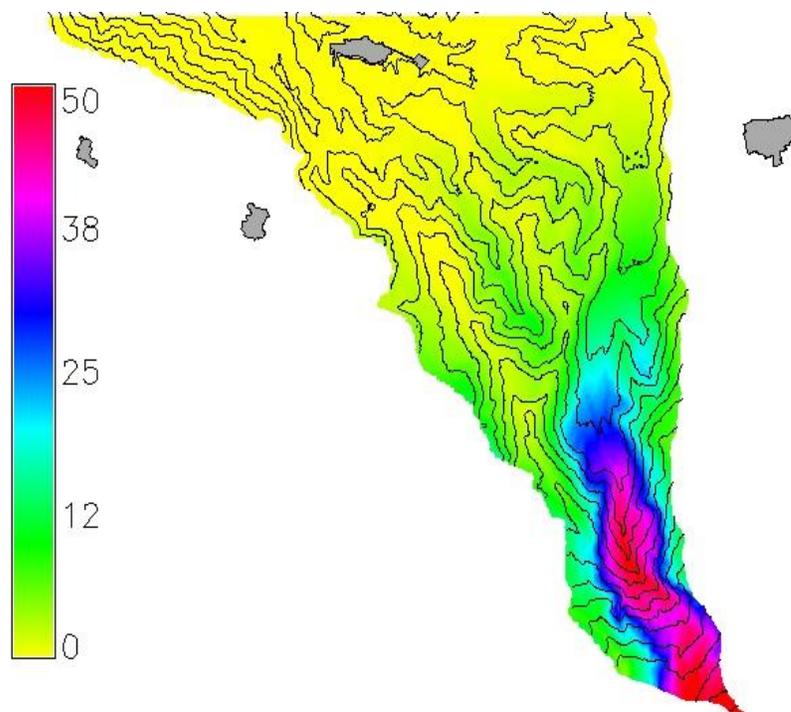


Figura 16. Distribución probabilística del alcance de Corrientes piroclásticas de Densidad (CPDs) por el método de líneas de energía.

Para tener en cuenta tanto la parte basal de los flujos, como su nube acompañante y posibles oleadas piroclásticas, se procedió a hacer una envolvente de probabilidades, donde el alcance máximo en su mayoría es el que predicen las Líneas de Energía. En las partes más encañonadas, el peso mayor de probabilidad lo da la parte basal, es decir las predicciones de TITAN2D tal como se observa en la Figura 17.

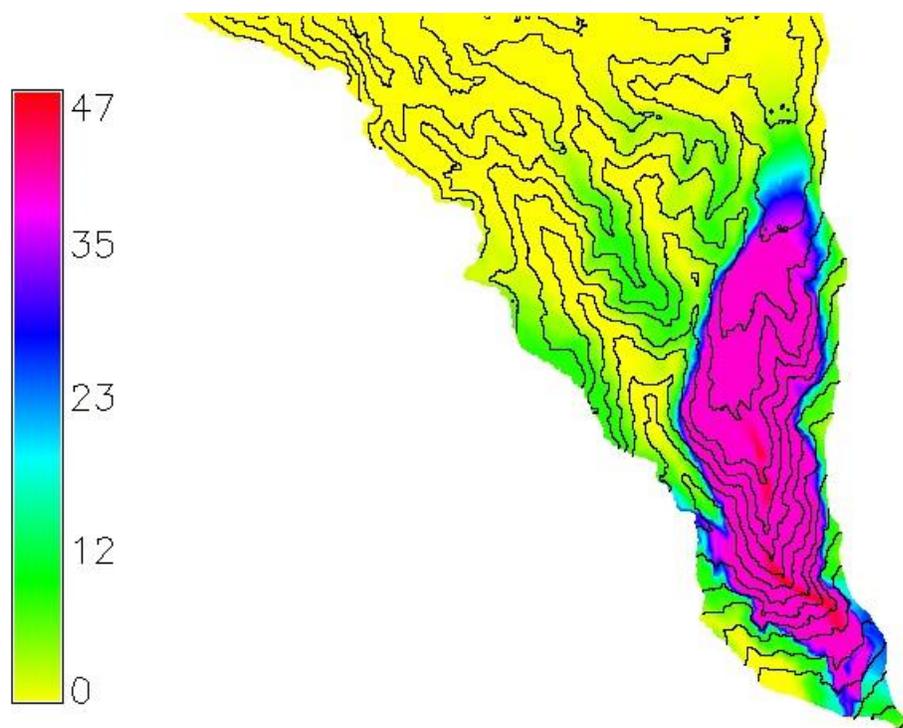


Figura 17. Distribución de probabilidades en porcentaje, de llegada de Corrientes Piroclásticas de Densidad. Nótese que las cuencas Panchindo y El Cucho tienen probabilidades no despreciables de ser alcanzadas por CPDs.

2.2.2. Amenaza por Lahares

El creciente asentamiento de las poblaciones sobre las zonas de influencia volcánica alrededor del mundo se ha convertido en un asunto de suma importancia para los organismos encargados del ordenamiento territorial y la gestión del riesgo. Se calcula que alrededor de 500 millones de personas viven en zonas aledañas a volcanes (Organización Panamericana de la Salud, 2002). Los efectos de las erupciones volcánicas comprenden productos directos, como la caída de ceniza y los flujos piroclásticos y productos posteriores como flujos de lodo de origen secundario.

Los flujos de lodo o lahares de origen secundario consisten en una mezcla de sedimentos, rocas y agua que viajan por las laderas de los volcanes a gran velocidad (Smith & Fritz, 1989) y usualmente son provocados por la removilización de depósitos de flujos piroclásticos y ceniza a causa de la precipitación (IDEAM, 2015).

Debido a que las actividades agropecuarias en una zona influyen ampliamente en los procesos de infiltración y evaporación del agua precipitada en el suelo, la configuración ambiental del área de estudio es uno de los componentes determinantes al momento de evaluar la amenaza por lahares.

La baja tasa de infiltración de los depósitos ocasionados por los altos niveles de tefra, junto a la insuficiente o nula capacidad de evapotranspiración de la cuenca causada por la limitada flora que cubre los depósitos volcánicos, puede provocar cambios en la respuesta hidrológica del sector frente a factores como la pendiente y la precipitación (Pierson et al., 1992).

Para la investigación de amenazas asociadas a la actividad volcánica, se adelanta el análisis de amenaza por lahares secundarios de la microcuenca del Barranco, ubicada en la parte alta del volcán Galeras y la cual debido a sus características geológicas y ambientales representa una amenaza para la población del municipio. El estudio de la amenaza se realiza aplicando métodos estadísticos para la generación de escenarios de modelamiento con base en las condiciones geológicas de la zona.

2.2.2.1. La microcuenca del río Barranco

La microcuenca del río Barranco se localiza sobre el flanco norte del volcán Galeras y ocupa gran parte del municipio de La Florida. Hacia la parte media y baja de la cuenca se encuentra situada la cabecera urbana (con más de 1500 habitantes) y una porción del sector industrial, agrícola y ganadero del municipio, que se dedican principalmente a la producción y venta de productos lácteos. La zona alta de la microcuenca de Barranco se halla sobre la cima del volcán Galeras y constituye una de las principales zonas de vida del territorio, al encontrarse en la categoría de páramo sub andino según la tipificación de Holdridge (1987). Esta formación presenta una temperatura media de 3 a 6°C, con promedio anual de lluvias entre los 500 a 1.000 mm y pertenece a la provincia de humedad superhúmedo. Las oscilaciones de temperatura son amplias entre el día y la noche, donde los valores inferiores a cero son frecuentes. En el municipio de La Florida se ubica por encima de los 3.200 m.s.n.m., y representa el 2,43% de éste con 331,77 hectáreas (Ver documento Diagnóstico Dimensión Biofísica).

Actualmente una fracción de la parte alta de la microcuenca de Barranco se encuentra ubicada dentro del Santuario de Flora y Fauna del Volcán Galeras (SFFG). En total 468 hectáreas del municipio pertenecen al Santuario de Flora y Fauna del Volcán Galeras (Parques Nacionales Naturales de Colombia, 2015), ubicándose en el sector sur del municipio en la parte alta de las microcuencas de Barranco y Panchindo con 201 y 206 hectáreas respectivamente.

Uno de los principales fines de la declaratoria de santuario, es el de salvaguardar el patrimonio ambiental y el equilibrio ecosistémico del sector. A pesar de los esfuerzos de las autoridades por preservar el estado de este, se ha registrado la práctica ilegal de actividades como la ganadería, deforestación, ampliación de la frontera agrícola e incorporación de especies foráneas en el sector de la parte alta de la microcuenca de Barranco. La ganadería se destaca como uno de los principales inconvenientes, debido a que ésta se realiza sobre un área con grandes pendientes (Figura 18), lo que ha favorecido a la formación de terracetos (patas de vaca), provocando una variabilidad en la estabilidad natural de las pendientes y generando movimientos de deformación lentos (“creep” en inglés) que pueden desembocar en fenómenos mayores. Esta intervención antrópica favorece la generación de lahares secundarios debido a la reducción de la infiltración ocasionada tanto por la compactación que produce el continuo pisoteo que hace el ganado, como por la ingesta de los brotes del pajonal que nace en el páramo del SFFG.

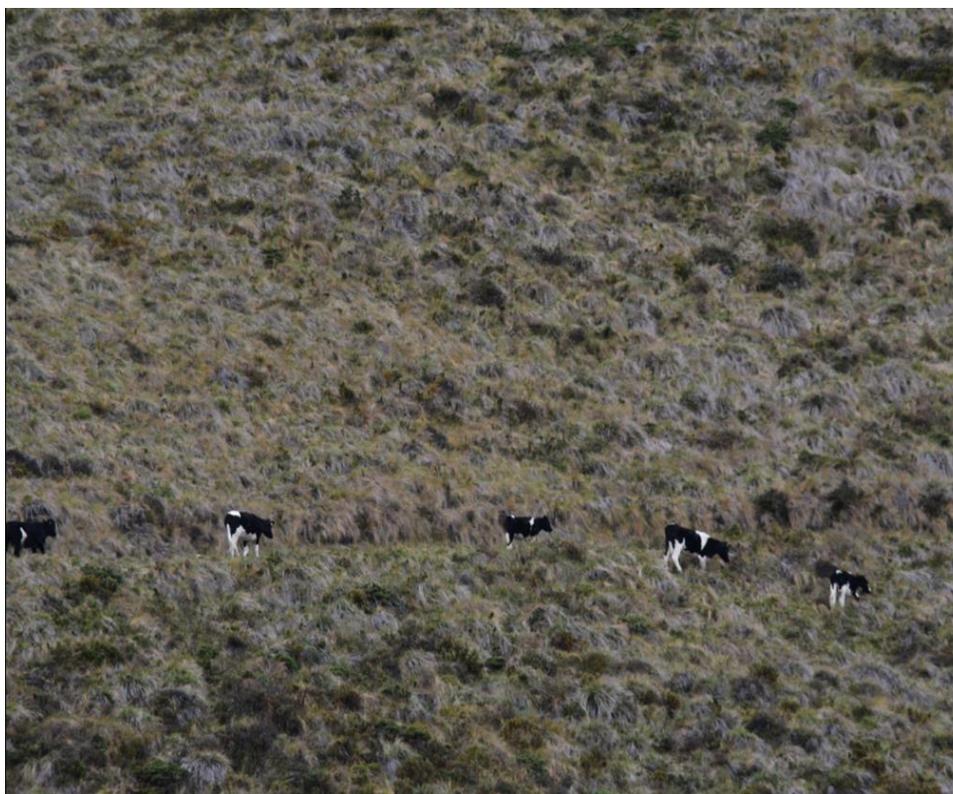


Figura 18. Actividad ganadera en la cabecera de la cuenca de El Barranco. Puede notarse el trazo del “Camino Real”.

2.2.2.2. Modelamiento de la amenaza por lahares secundarios.

TITAN2F o TITAN DOS FASES es un software desarrollado en la Universidad de Buffalo, Estados Unidos para la simulación numérica del comportamiento de flujos bifásicos sobre un modelo de terreno digital. El software TITAN2F fue desarrollado sobre la base del sistema del programa TITAN2D que realiza el modelamiento de flujos granulares secos (Patra et al., 2005). TITAN2F, sin embargo, toma en cuenta la dinámica del material sólido a través del modelo Mohr-Coulomb y la combina con modelos hidráulicos por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes (Córdoba et al., 2015; Córdoba et al., 2018).

TITAN2F permite la simulación de un flujo de lodo sobre un modelo de elevación digital con base a las condiciones iniciales ingresadas por el usuario. Sin embargo, para la evaluación de la amenaza es importante resaltar que se desconocen los valores exactos de las condiciones iniciales con las que se puede desencadenar un flujo. Es por lo que se recurre a métodos estadísticos

de muestreo para la generación de un número dado de escenarios esperados, teniendo en cuenta la configuración del área de estudio.

Titan2F necesita de tres condiciones iniciales: el volumen total, la velocidad inicial y la concentración de sólidos del flujo, las cuales devienen en las incertidumbre a tratar, ya que no es posible saber con antelación el valor de estas condiciones y menos aún bajo que combinación de estas ha de ocurrir un flujo, razón por la cual se hace un tratamiento probabilístico tipo OLHS (explicado más arriba), que permita obtener un muestreo estadísticamente válido de todos los casos posibles dentro de un rango factible de cada una de las tres variables; por lo cual es necesario encontrar los valores mínimos y máximos que pudieran tomar estas variables para de esta manera proceder con la técnica de muestreo.

El rango de concentraciones se definió de acuerdo a las concentraciones de sedimentos típicas en lahares, que van desde lahares fangosos (concentraciones desde 0.20 a 0.30), flujos hiperconcentrados (concentración entre 0.3 y 0.5) e incluso flujos granulares (concentraciones mayores a 0.5) (Helens & Pierson, 1985; Pierson, 1980; Pierson & Scott, 1985). En concordancia con las condiciones físico-matemáticas de TITAN2F se asume un rango de concentraciones entre 0.2 y 0.6.

Para el cálculo del volumen máximo y mínimo se deben tener en cuenta tres factores: el máximo volumen esperado de sólidos, el máximo volumen de líquidos y la concentración de sólidos (Tabla 4). Para el cálculo del volumen máximo de los flujos y teniendo en cuenta los parámetros morfométricos de la parte alta de la cuenca tales como pendiente, tiempo de concentración y caudal, se estimó que la microcuenca es capaz de drenar un volumen de agua máximo de 777.190 m³, el cual suponiendo un flujo altamente concentrado (60% de sólidos) transportaría hasta 1'443.783 m³ de material granular, dando como resultado un volumen total del flujo de 2'220.973 m³. El cálculo del volumen mínimo del flujo se realiza a través del estimativo del volumen de material sedimentado que posee una alta susceptibilidad a ser integrados en un flujo, es decir que como mínimo, es de esperar el movimiento del material de la cabecera del Barranco. Tomando en cuenta una profundidad media de suelo de 0,50 m se estableció un volumen de 96.967 metros cúbicos que pudieran ser removilizados en la parte alta de Barranco. Teniendo

en cuenta este volumen y que se tiene un flujo altamente concentrado, serían necesarios 64.644 m³ de líquido para movilizar el lahar, obteniéndose así un volumen mínimo del flujo de 161.611 m³.

Tabla 4. *Cálculo de volumen mínimo y máximo esperado de los lahares para la parte alta de la microcuenca de Barranco.*

Volumen máximo esperado de los lahares		
Fase	Volumen máximo (m ³)	Concentración
Líquida	777.190	40 %
Sólida	1'443.783	60 %
Total Flujo	2'220.973	100%
Volumen mínimo esperado de los lahares		
Fase	Volumen mínimo (m ³)	Concentración
Líquida	64.644	40 %
Sólida	96.967	60 %
Total Flujo	161.611	100%

Como toda cuenca hidrográfica, en la cuenca alta del Barranco, todos los productos que pudieran formarse en ella poseen la tendencia a converger en un mismo punto, denominado punto de salida (sector Divino Rostro); se toma este lugar como el punto de inicio de los flujos, donde la diferencia entre un flujo que se origine en la parte más alta de la cuenca con uno que inicie cerca del punto de salida, será la velocidad con la que pasa por el lugar en cuestión. Teniendo en cuenta la pendiente del canal principal y la fórmula de la gravedad reducida de Iverson (1978) (ecuación 5) se tiene que:

$$Vel = \cos\beta \sqrt{\frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_f} * g * h} \quad (5)$$

Donde,

Vel: velocidad del flujo en un punto dado, en m/s

β : ángulo opuesto a la pendiente del canal principal.

ρ_f : densidad del flujo

ρ_w : densidad del agua

g : gravedad en m/s^2

h : diferencia de alturas entre el punto más alto de la cuenca y el punto de salida.

De lo anterior se obtuvo que el rango de velocidades para los lahares en la parte alta del Barranco oscila entre los 0 (flujo arrancan justo desde ese lugar) y 11.43 m/s (caso de que flujos arranquen desde el extremo más alto de la cuenca).

Una vez determinados los rangos de las condiciones iniciales se procede con la técnica de muestreo de las variables. El objetivo de este proceso es el de crear un muestreo estadísticamente válido de combinaciones condiciones iniciales según los parámetros establecidos. Las técnicas de muestreo son variadas y pueden ir desde una simple generación aleatoria de números hasta modelos más complejos como Montecarlo o el muestreo hipercúbico latino (LHS por sus siglas en inglés) (Matala, 2008; Pilger et al., 2008; Rodríguez et al., 2017; Stein, 1987). El muestreo hipercúbico latino ortogonal (OLHS) aplica la base de LHS para la generación estratificada de números aleatorios, con la gran ventaja de que el primero requiere un número inferior de muestras para que la población obtenida tenga representatividad estadística (Dalbey et al., 2008; Sheridan et al., 2010). A través de OLHS se obtuvo un total de 128 escenarios hipotéticos de lahares con diferentes combinaciones, de acuerdo a los rangos de volúmenes, velocidades y concentraciones calculados anteriormente.

Posteriormente, el modelado de los escenarios propuestos se realizó a través de la herramienta computacional TITAN2F sobre un modelo de elevación digital con resolución de tres metros para la parte alta de la cuenca y de un metro de resolución en la franja occidental del Barranco (por ejemplo en los sectores urbanos, Zaragoza, etc), procesado y ajustado mediante el sistema de información geográfico GRASS. TITAN2F modela la evolución temporal de los diferentes parámetros del flujo a lo largo de su recorrido como la altura de inundación, la velocidad, la concentración de sólidos y la presión dinámica.

Debido a que en la trayectoria de los posibles lahares se encuentran ubicados el Hospital municipal, el Colegio San Bartolomé y parte de la población urbana del municipio, se desarrolló en este trabajo un modelo digital de elevación de 1 metro a partir de un levantamiento hecho por Drone con resolución de 1 cm.

El cómputo de los niveles de la amenaza se realizó teniendo en cuenta la evolución espaciotemporal de dos factores. Primero, las presiones dinámicas, litostática e hidrostática, puesto que es el parámetro potencialmente destructivo (ver capítulo de vulnerabilidad). Segundo, el nivel de inundación, ya que induce enterramiento por los sedimentos; dicho enterramiento puede causar varios niveles de pérdidas, dependiendo el elemento expuesto, bien sea cobertura vegetal o edificaciones. Para presión dinámica se extrajo la probabilidad frecuencial de excedencia de 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 kPa, notando que 10 kPa de sobrepresión es capaz de derribar seres humanos y con 35 kPa puede haber destrucción total de las edificaciones de concreto armado (ver capítulo de vulnerabilidad). Además se calculó la probabilidad frecuencial de inundación de 25, 50, 75, 100, 125 y 150 cm, teniendo en cuenta que en este trabajo se encontró que 125 cm de enterramiento implica pérdida irreparable del inmueble y que con 20 cm se tendría pérdida total de cultivos (ver capítulo de vulnerabilidad).

Como se mencionó en la Sección 2.2, se asume una distribución Weibull acotada (ecuación 3a), donde se usó un k tal que la probabilidad máxima no exceda la probabilidad de flujos piroclásticos en la cabecera del Barranco.

La Figura 19 muestra los resultados de probables impactos por presión dinámica en cuatro de los casos estudiados en el sector Barranco. Las zonas en sombra son los centros urbanos; el casco urbano de La Florida se encuentra en la parte superior central de la zona en amarillo que denota la parte pertinente del municipio. La figura 19a muestra la probabilidad de que se excedan 5 kPa en la cuenca del Barranco, donde se observa que en la parte oriental del mismo, se presenta una mediana probabilidad hacia el sector del Divino Niño, se exceda esta sobrepresión. La figura 19b, muestra la probabilidad de que se excedan 10 kPa. La figura 19c la probabilidad de que se excedan 20 kPa y la 19d las probabilidades de que se excedan 30 kPa. Nótese que a medida que

se incrementa la presión dinámica, la zona de alta probabilidad se va moviendo hacia la parte alta del Barranco y a la vez se restringe cada vez más al canal actual del río.

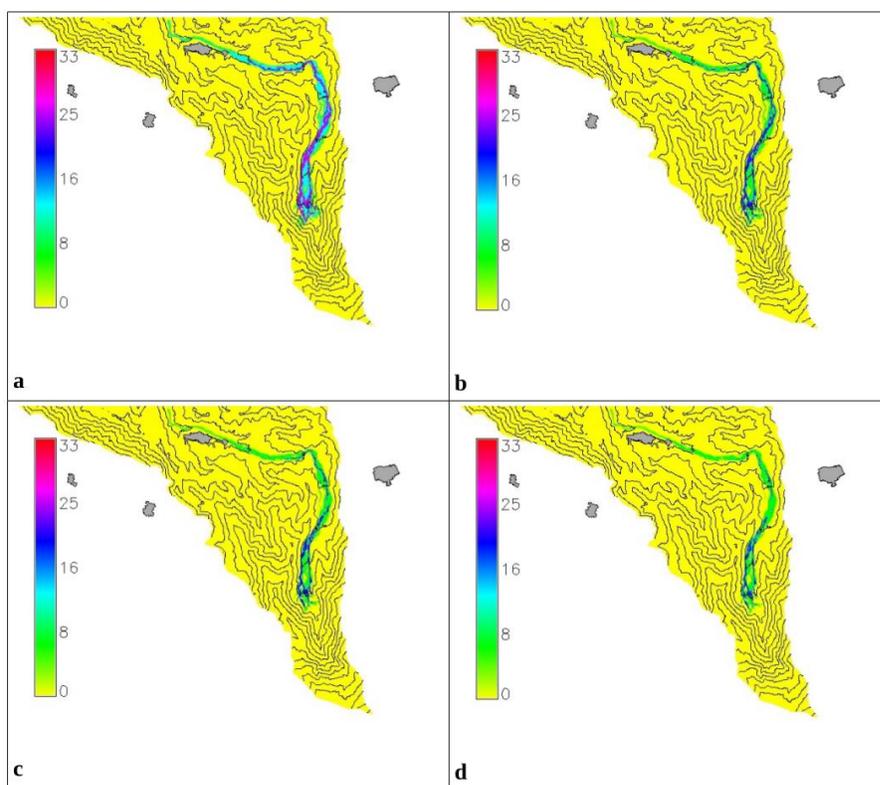


Figura 19. Probabilidades de excedencia de impacto para presiones dinámicas de a) 5 kPa, b) 10 kPa, c) 20 kPa, d) 30 kPa. Los polígonos sombreados corresponden a los centros urbanos. El casco urbano de La Florida es el polígono superior central.

La figura 20 muestra cuatro de los resultados de probabilidades de altura de inundación. La figura 20a muestra la probabilidad de que se excedan 25 cm, la 20b, la probabilidad de excedencia de 50 cm, la 20c la probabilidad de que se exceda 1 metro y la 20d la probabilidad de que se exceda 1.25 metros. En este estudio se ha asumido que un enterramiento de más de 1 metro hace que los costos de reparar igualen o excedan los costos de reemplazar. Como se ve en la figura 20d, esta situación se presentaría con mediana probabilidad en lugares aislados, sin embargo es muy posible que inundaciones por lahares de más de 25 cm (figura 20a) afecten una importante franja alrededor del río Barranco, incluso más allá de los límites del casco urbano de La Florida; pudiendo afectar el hospital, el colegio San Bartolomé y algunas casas ubicadas en la parte baja del casco urbano.

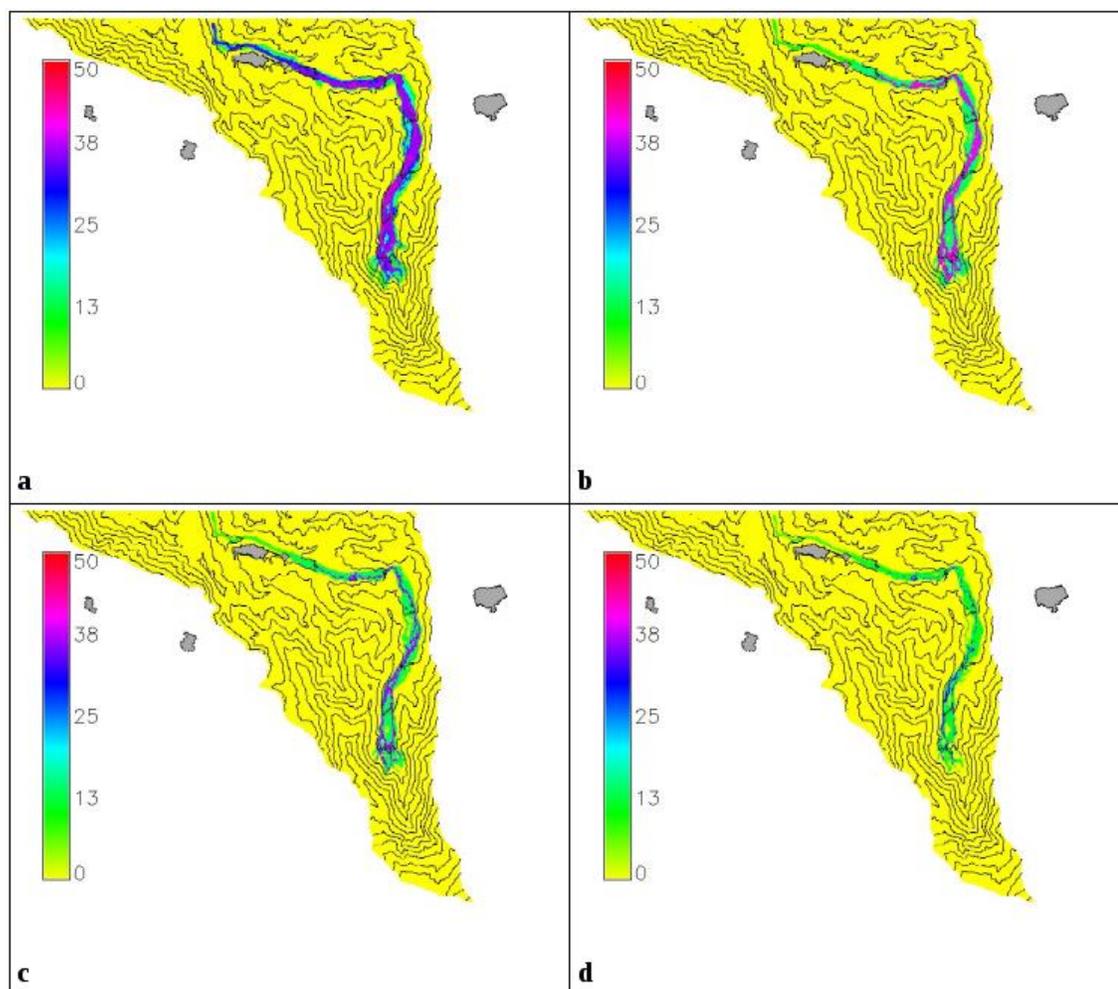


Figura 20. Probabilidades de excedencia de inundación de: 3a) 25 cm, 3b) 50 cm, 3c) 1m, 3d) 1.25 m.

2.2.3. Amenaza por Onda de Choque

Los estudios de ondas de presión generadas por sistemas volcánicos (ondas infrasónicas, ondas sonoras y ondas de choque), pueden estar enfocados por un lado a estudiar la dinámica, mecanismos y energía liberada por explosiones volcánicas (e.g., Morrissey & Chouet, 1997; Johnson, 2003; Yokoo & Ishihara, 2007; Johnson et al., 2018) y por otro lado centrarse en el análisis de la amenaza que éstas pueden representar para estructuras civiles y personas (e.g., Córdoba & Del Risco, 1997; Córdoba & Del Risco, 1998; Saito et al., 2001; Saito & Takayama, 2005; Saito et al., 2009). Este trabajo está enfocado en la amenaza debida a la sobrepresión generada por las ondas de choque producidas por explosiones volcánicas.

Las ondas de choque resultan de la diferencia de presión inicial entre el magma rico en gas a alta presión en el interior del sistema volcánico y la atmósfera, que, hasta el momento de la iniciación de la erupción, están separados por el tapón del conducto volcánico (Clarke *et al.*, 2015). Estas ondas de presión se propagan a través de la atmósfera y pueden viajar kilómetros de distancia a velocidades superiores a la del sonido (Medici *et al.*, 2013), los impactos de esta amenaza dependen de la cercanía a la fuente y a la presión con la que se produce la explosión.

La sobrepresión con la cual llegan las ondas de choque a un punto está determinada por la presión inicial de la explosión; esta presión inicial puede hallarse en un rango de posibles valores, por lo que, para la estimación de la amenaza por onda de choque se hace necesario evaluar diferentes escenarios de presión inicial. El procedimiento para la obtención de los valores de los límites inferior y superior de este rango se discutirá más adelante en este documento.

Las ondas de choque son fenómenos que, a diferencia de otras amenazas volcánicas, no dejan un registro geológico después de su ocurrencia; por lo tanto, para determinar su comportamiento se recurre a modelamientos numéricos computacionales, basados en las leyes físico-matemáticas que gobiernan este tipo de ondas y que permiten determinar su intensidad y forma de propagación. Los modelamientos deben calibrarse con el registro histórico de acuerdo a los impactos que han tenido las ondas de choque tanto en personas como en estructuras civiles en erupciones pasadas.

Los registros históricos indican que erupciones del volcán Galeras han generado ondas de choque que han llegado a afectar los municipios de Pasto y Consacá situadas a 9 y 13 kilómetros de distancia del cráter respectivamente. Según Espinosa (1980) en dichos centros poblados los principales daños causados por este fenómeno son la ruptura de ventanas, apertura de puertas y conmoción en personas.

La última versión del mapa de amenaza de Galeras (Servicio Geológico Colombiano, 2015) cuenta con un mapa realizado por Córdoba & Del Risco (1997, 1998) en el que se hace la zonificación para las ondas de choque producidas por explosiones en el volcán Galeras (Figura 21). Este mapa fue elaborado mediante simulaciones computacionales usando las ecuaciones

Prandtl-Meyer en una dimensión que permite tener en cuenta el efecto de algunas barreras topográficas en la propagación de las ondas, así, hacia la ciudad de Pasto los autores tuvieron en cuenta la reflexión y refracción de la onda en la pared del anfiteatro, mientras que hacia Consacá tuvieron en cuenta la reflexión de la onda en las paredes de la caldera. Ese trabajo no tuvo en cuenta el efecto topográfico de otros sectores del volcán y asume que las paredes de las montañas son totalmente reflectoras.

En el mapa elaborado por Córdoba & Del Risco (1997, 1998) se delimitaron tres zonas de amenaza (alta, media y baja) de acuerdo a la sobrepresión con la que llega la onda de choque. La zonificación realizada en el mapa mencionado no tiene en cuenta escenarios de presión inicial y por lo tanto no permite distinguir la variación de la sobrepresión en una misma zona de amenaza para diferentes escenarios de presión de explosión, caso contrario ocurre con una evaluación probabilística (e.g., Calder et al., 2015; Newhal & Pallister, 2015) en la que se muestra la probabilidad de que la onda de choque llegue con una cierta sobrepresión en un punto determinado de la zona de estudio.

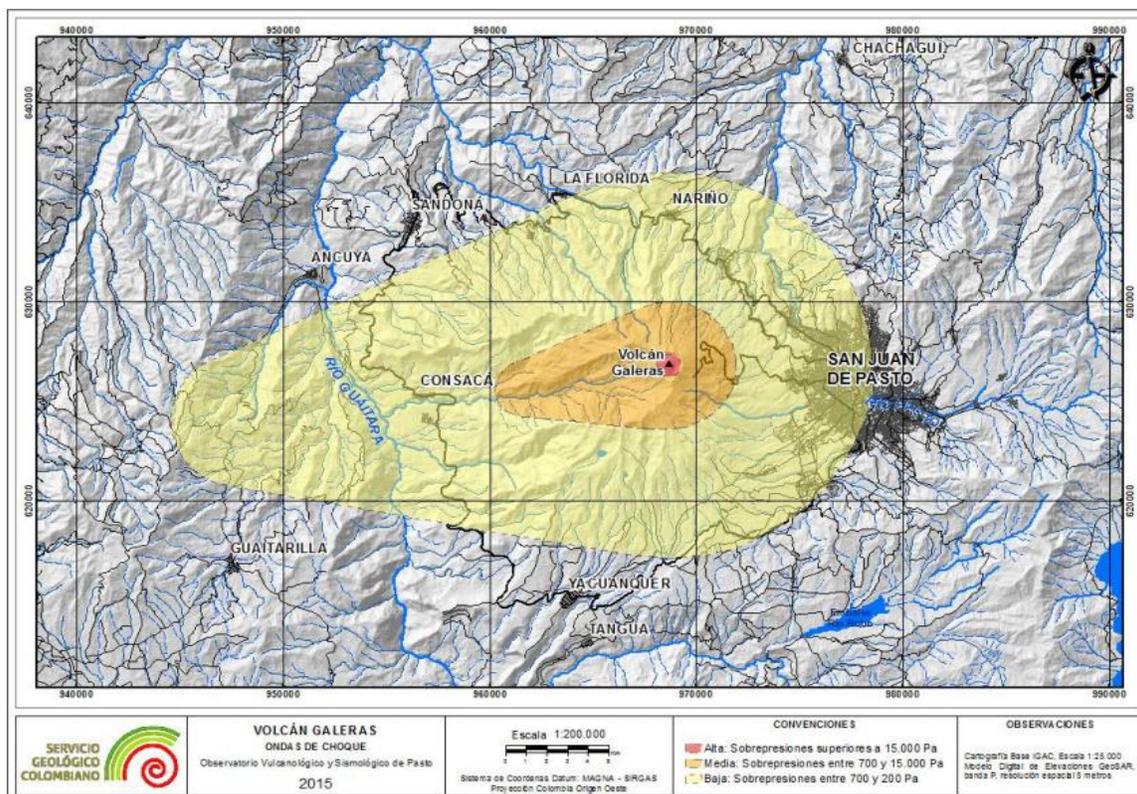


Figura 21. Actual mapa de zonificación de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras. Tomado de: Copyright 2015, Servicio Geológico Colombiano SGC

En el presente trabajo se hizo una evaluación probabilística de la amenaza por onda de choque para el volcán Galeras, esta se realizó mediante simulaciones numéricas usando el programa de modelamiento OpenFoam el cual permite simular fluidos supersónicos en medios compresibles por el método de volúmenes finitos (Zicanov, 2015; Mazumder, 2016). En este trabajo se aprovechan estos avances computacionales que permiten simulaciones tridimensionales, para así tener en cuenta el efecto topográfico de toda el área de influencia del volcán. Las simulaciones se ejecutaron en una malla tridimensional sobre un modelo de elevación digital de la superficie del volcán. Con el fin de determinar todos los escenarios posibles se realizaron modelamientos con diferentes valores de presión inicial de explosión (entre 0.4 y 6 Mpa, como se verá más adelante), para posteriormente realizar un tratamiento estadístico de estos escenarios mediante un análisis frecuencial que luego permitió tener una distribución probabilística de la amenaza.

Con el fin de determinar todos los escenarios posibles, se realizaron modelamientos con diferentes valores de presión inicial de explosión; adicionalmente se realizó un tratamiento estadístico con los diferentes escenarios mediante un análisis frecuencial, que posteriormente permitió tener un mapa de amenaza probabilística en el cual se determinaron las tres zonas de amenaza.

2.2.3.1. Modelo físico matemático

Desde el punto de vista físico, una onda de choque es una onda de compresión que se propaga a través de un medio fluido a velocidades superiores al sonido, las ondas de choque se reflejan y difractan cuando interactúan con barreras sólidas (White, 1983; Saito et al., 2001). El comportamiento de este fenómeno está gobernado por las leyes de conservación de masa, momento (ver ecuaciones de Navier-Stokes) y energía (Córdoba & Del Risco, 1997; Medici et al., 2013; Saito & Takayama, 2005).

2.2.3.1.1. Conservación de masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (u\rho) = 0$$

2.2.3.1.2. Conservación de momento (despreciando fuerzas de cuerpo)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (u(u\rho)) + \nabla p + T = 0$$

2.2.3.1.3. Conservación de energía total

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (u(E\rho)) + \nabla \cdot (up) + \nabla \cdot (T.u) + \nabla j = 0$$

Donde ρ es la densidad de masa, \mathbf{u} es el campo de velocidades, p es la presión, T es el tensor de esfuerzos viscosos, $E = e + |\mathbf{u}|^2/2$ la energía total con e la energía interna, \mathbf{j} el flujo de calor por difusión que puede ser representado por la ley de Fourier.

$$\mathbf{j} = -k\nabla T$$

Donde T es la temperatura y k la conductividad. Además, el aire donde se va a propagar la onda, se considera un gas calóricamente ideal, por lo tanto:

$$p = \rho RT$$

$$e = c_v T$$

Donde R es la constante de los gases ideales y c_v es el calor específico a volumen constante.

2.2.3.2. Procedimiento numérico

Para los modelamientos se usó el solucionador rhoCentralFoam (Greenshields et al., 2009; Greenshields, 2017) del software Openfoam (Lorenzon & Elaskar, 2015; Zicanov, 2015; Mazumder, 2016).

Estudios como los de Wüthrich (2007), Tapia (2009), Asproulias (2014), Freitas (2014), Lorenzon & Elaskar (2015), Trydal (2015), Espinoza et al., (2015) y Berthaut-Gerentes & Delaunay (2015), han validado y demostrado que el OpenFoam es capaz de reproducir de forma adecuada las diferentes situaciones físicas que es capaz de modelar.

2.2.3.2.1. Generación de la malla

La malla fue creada con las herramientas blockMesh y snappyHexMesh de OpenFoam (Greenshields, 2017), el dominio computacional cubre toda el área del municipio de Pasto, La Florida y otros municipios de la zona de influencia del volcán Galeras; para esto se tomó un área de aproximadamente 2116 km². Inicialmente se creó una malla computacional de geometría cubica

que consta de 300 elementos en cada dirección horizontal y con 100 en sentido vertical, la cual se obtuvo mediante el uso de la herramienta blockMesh. Posteriormente, la parte baja de la malla se ajustó a la topografía alrededor del volcán Galeras mediante la técnica de reducción del tamaño máximo de la malla hacia la topografía del volcán Galeras dada por el Modelo Digital de Elevación con la herramienta snappyHexMesh. Finalmente se obtuvo una malla compuesta de 3.028.089 elementos, 9.169.548 caras y 3.137.424 nodos (Figura 22).

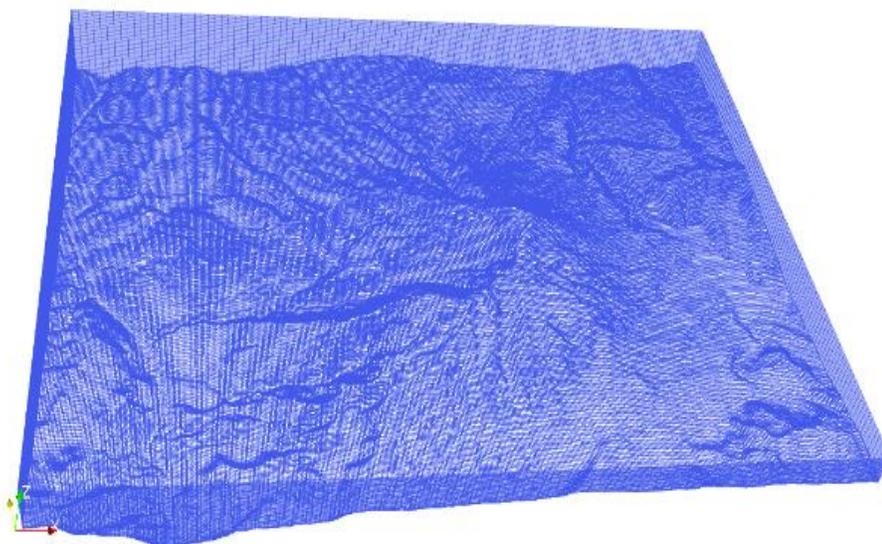


Figura 22. Dominio computacional del problema en que la parte baja de la malla se ajusta a la topografía del volcán.

2.2.3.2.2. Modelo de explosión

Existen dos tipos de modelos base en OpenFoam para simular ondas de choque: El modelo de fuente puntual y el modelo de tubo de choque (como se ve en la Figura 23) (Saito et al., 1997; Voinovich et al., 1998; Saito et al., 2001; Saito et al., 2002; Saito & Takayama, 2005). El modelo de fuente puntual consiste en que, en el tiempo cero de la simulación, un solo elemento de la malla computacional ubicado sobre el cráter volcánico posee una alta presión respecto al resto de elementos; una vez se inicia la simulación la presión del elemento es súbitamente liberada y el efecto de choque se produce. En el caso del modelo de tubo de choque, un tubo es ubicado dentro del cráter volcánico, el interior del tubo se pone a una mayor presión que el resto de los elementos de la grilla, se corre la simulación y se genera la

onda de choque. En este trabajo se usó el modelo de fuente puntual debido a que, de los dos modelos es el que proporciona mayor estabilidad numérica en las simulaciones.

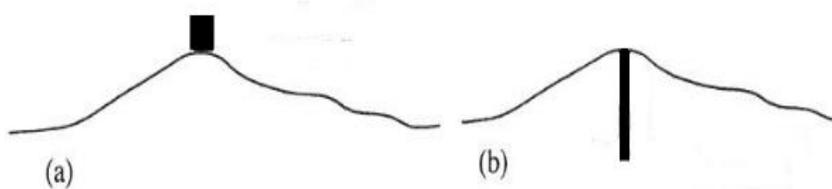


Figura 23. Modelos de explosiones volcánicas: (a) modelo de fuente puntual y (b) modelo de tubo de choque. Fuente: Modificado de Saito, & Takayama, (2005).

2.2.3.2.3. Condiciones de contorno

Para poder resolver un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de forma numérica, es necesario establecer las condiciones de contorno en los bordes del dominio computacional. Las tres principales condiciones que se le pueden asignar a un contorno son: la condición de contorno de Dirichlet o de primer tipo, condición de contorno de Neumann o de segundo tipo y condición de contorno de Robin o de tercer tipo. En la condición de contorno de primer tipo el valor de cualquier variable dependiente está prescrito en el borde; la condición de contorno de Neumann consiste en establecer el valor del gradiente normal al borde de la variable dependiente; en la condición de borde de Robin una combinación lineal del valor de la variable dependiente y su gradiente normal son especificados en la frontera (Mazumder, 2006; Zicanov, 2015).

En el borde del dominio que representa la superficie del volcán se establecieron condiciones de frontera de Dirichlet de velocidad igual a cero (condición sin deslizamiento), para las variables de presión y temperatura se fijan condiciones de frontera natural o de Newman de gradiente igual a cero. Para los bordes del dominio computacional que representan la atmósfera se establecieron condiciones de borde de gradiente igual cero para las variables temperatura y velocidad, para la presión se utilizó una condición de borde especial de OpenFoam ‘wave transmissive’ con el fin de amortiguar la onda de choque y evitar que ésta refleje con los límites del dominio computacional (Richards et al., 2004)

2.2.3.2.4. *Condiciones iniciales*

Los modelamientos numéricos requieren una serie de valores iniciales para cada una de las variables involucradas en cada simulación, para este caso fue necesario establecer condiciones iniciales para la temperatura, velocidad y presión.

Con el fin de asegurar estabilidad numérica fue necesario tomar valores constantes de temperatura y presión atmosféricas; por tanto, se tomaron valores representativos para estas variables atmosféricas a la altura media del municipio, lo cual corresponde a una altura de 3000 metros sobre el nivel del mar aproximadamente. De esta forma, en todas las simulaciones se utilizaron valores de presión atmosférica de 70.120 Pa y una temperatura de la atmosfera de 9°C, (Çengel & Boles, 2015).

Las erupciones de un volcán explosivo como el volcán Galeras pueden ser más o menos energéticas dependiendo de la presión liberada en el momento de la explosión (Clarke, 2015). Acorde a esto, la presión inicial se convierte en una variable que puede estar dentro de un rango de posibles valores. Teniendo en cuenta lo anterior, se debieron determinar los límites máximos y mínimos del rango de presiones iniciales o de explosión, teniendo en cuenta que según el registro histórico de Galeras las ondas de choque han sido capaces de romper ventanas en la ciudad de Pasto.

Para establecer el valor mínimo del rango de presiones se hicieron varias pruebas con diferentes valores de presión inicial, de esta forma, se encontró que para lograr una sobrepresión de 100 Pa en Pasto, que es la sobrepresión capaz de generar ruptura de ventanas de grandes dimensiones en esta ciudad, se necesitó un mínimo de 0.4 MPa de presión de explosión. Esta misma metodología fue aplicada por Córdoba & Del Risco (1997, 1998) para elaborar los mapas de amenaza por onda de choque usados en la tercera (Hurtado & Cortez, 1997) y cuarta versión (SGC, 2015) del mapa de amenazas del volcán Galeras.

Para poder determinar el valor máximo del rango de presiones también se tuvo en cuenta el registro histórico dado en Espinosa (1980). En razón de que en la ciudad de Pasto el mayor efecto producido por la onda de choque ha sido la ruptura de ventanas se tomó como valor máximo

el valor de sobrepresión necesario para fracturar todas las ventanas comunes (3mm de espesor) independientemente de sus dimensiones, este valor de sobrepresión es de 1 kPa, (Mercx et al., 1991; Valentine, 1998; Saito et al., 2001; Saito & Takayama, 2005; Atkinson et al., 2009). Aplicando el método de ensayo y error, se obtuvo un valor de presión inicial de 6 MPa con el que se llega a la ciudad de Pasto con aproximadamente 1 kPa de sobrepresión.

En resumen, el rango de presiones iniciales que utilizamos tiene como límite inferior 0.4 Mpa y como límite máximo 6 Mpa. En virtud de que la fuente es puntual y con un solo grado de libertad, el muestreo estadístico requerido está compuesto de 29 escenarios de muestra (Guerrero et al., 2018, McClung, 2001 y Ruiz-Bueno, 2008).

2.2.3.3. Análisis probabilístico

La evaluación probabilística de una amenaza de origen volcánico P depende, por una parte, de la probabilidad de ocurrencia en el tiempo P_0 y por otra de la probabilidad de que el evento llegue a un punto específico con un nivel de intensidad determinado P_I (Maskrey, 1993). Así, la probabilidad de que una onda de choque llegue con una cierta intensidad en un instante y lugar determinados viene dada por la expresión: $P = P_0 * P_I$.

Este estudio está enfocado solamente en los niveles de intensidad de una onda de choque a un punto determinado, por lo que, se asume que $P_0 = 1$, lo que se denomina probabilidad condicional, es decir, la probabilidad de que cuando un evento ocurra este tenga una cierta intensidad (Dalbey et al., 2008; Sheridan et al., 2010; Rodriguez et al., 2017).

La determinación de la probabilidad de que un evento llegue con una cierta intensidad P_I en un punto se determina mediante un cálculo de frecuencia relativa, la cual se determina como el cociente entre el número de eventos que llegaron con una determinada intensidad y el número total de eventos evaluados.

2.2.3.4. Resultados y discusión

De las simulaciones se obtiene principalmente información acerca de la distribución de sobrepresiones en la superficie producidas por las ondas de choque generadas en cada modelamiento. La distribución de presiones en superficie no es uniforme, esto se debe al efecto de las diferentes condiciones topográficas del terreno con las cuales la onda de choque interactúa, haciendo que esta se refleje y refracte (Saito et al., 2001). En la figura 24 se puede observar este fenómeno, cuando el frente de onda principal se encuentra con el borde del anfiteatro del volcán (figura 24a), parte de la onda se refleja, esto hace que este frente pierda energía; la onda reflejada o secundaria empieza a viajar en sentido contrario (figura 24b) llegando a alcanzar eventualmente el frente opuesto de la onda principal adicionándole energía.

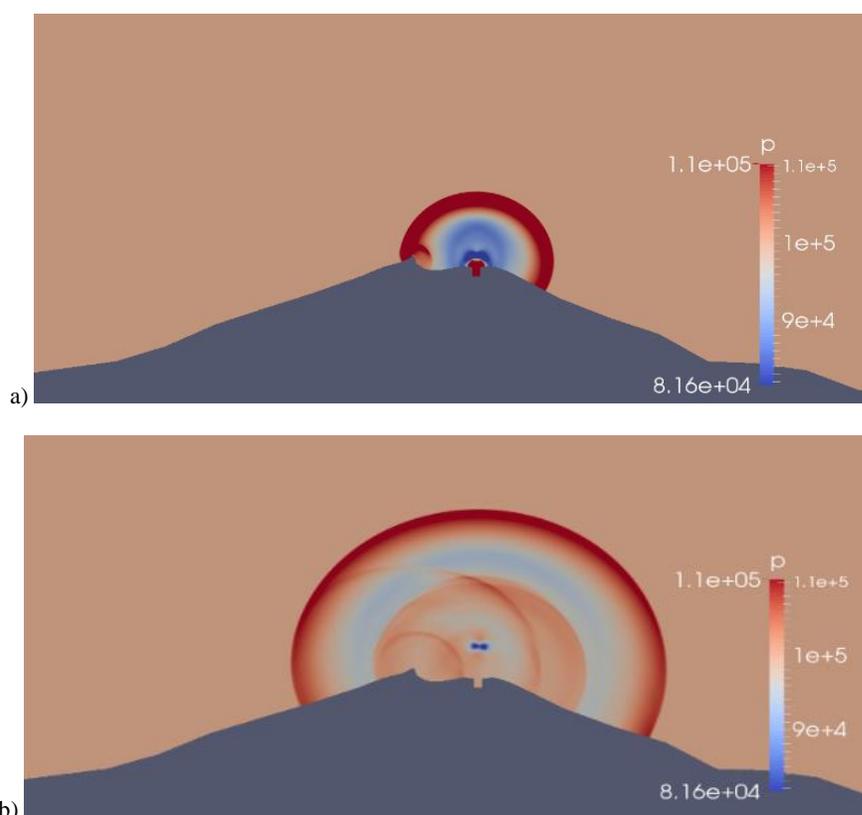


Figura 24. Sección transversal este-oeste del volcán Galeras donde se puede observar la reflexión de la onda de choque (a) Reflexión frente de onda primaria (b) propagación de onda secundaria

2.2.3.5. *Análisis de escenarios*

En la figura 25 se muestran cuatro escenarios específicos con diferentes presiones de explosión (0.4 Mpa, 1.0 Mpa, 3.0 Mpa y 6.0 Mpa). Se delimitaron tres zonas de sobrepresión representadas con tres colores diferentes como se describe a continuación: con color rojo las zonas donde se tienen sobrepresiones mayores a 15.000 Pa (sobrepresión capaz de hacer peligrar la vida humana); con naranja sobrepresiones entre 700 y 15.000 Pa (donde se puede tener expulsión y ruptura de la totalidad de vidrios expuestos, daño menor a estructuras y conmoción en personas); y finalmente de color amarillo los sectores donde las sobrepresiones se encuentran entre 200 Pa y 700 Pa (donde puede haber vibración y fractura de la mayoría de vidrios expuestos). La zonificación de los tres niveles de amenaza aquí descrita se hizo con los mismos rangos de sobrepresión utilizados en el mapa de amenaza por choque del actual mapa de amenazas del volcán Galeras (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

En los cuatro casos que se muestran en la figura 25 se observa que la zona roja es la que menos variaciones tiene respecto a los otros dos niveles de amenaza ya que esta se concentra básicamente en la parte del cráter y las zonas más cercanas a este. Por el contrario, las zonas con sobrepresiones entre 700 Pa y 15.000 Pa y las zonas que tienen sobrepresiones entre 200 Pa y 700 Pa cambian considerablemente dependiendo del valor de la presión de explosión. Por ejemplo, en el escenario de 0.4 Mpa (figura 25a), la zona correspondiente a sobrepresiones entre 200 Pa y 700 Pa de sobrepresión es la que ocupa la mayor parte del área computacional. En el escenario de 6.0 MPa (figura 25d) la zona representada de color naranja es la que ocupa la gran mayoría del área de estudio. Las variaciones entre escenarios muestran la importancia de hacer el estudio con un método probabilístico que permita tener en cuenta todos los casos posibles, a diferencia del método utilizado por Córdoba & Del Risco (1997, 1998).

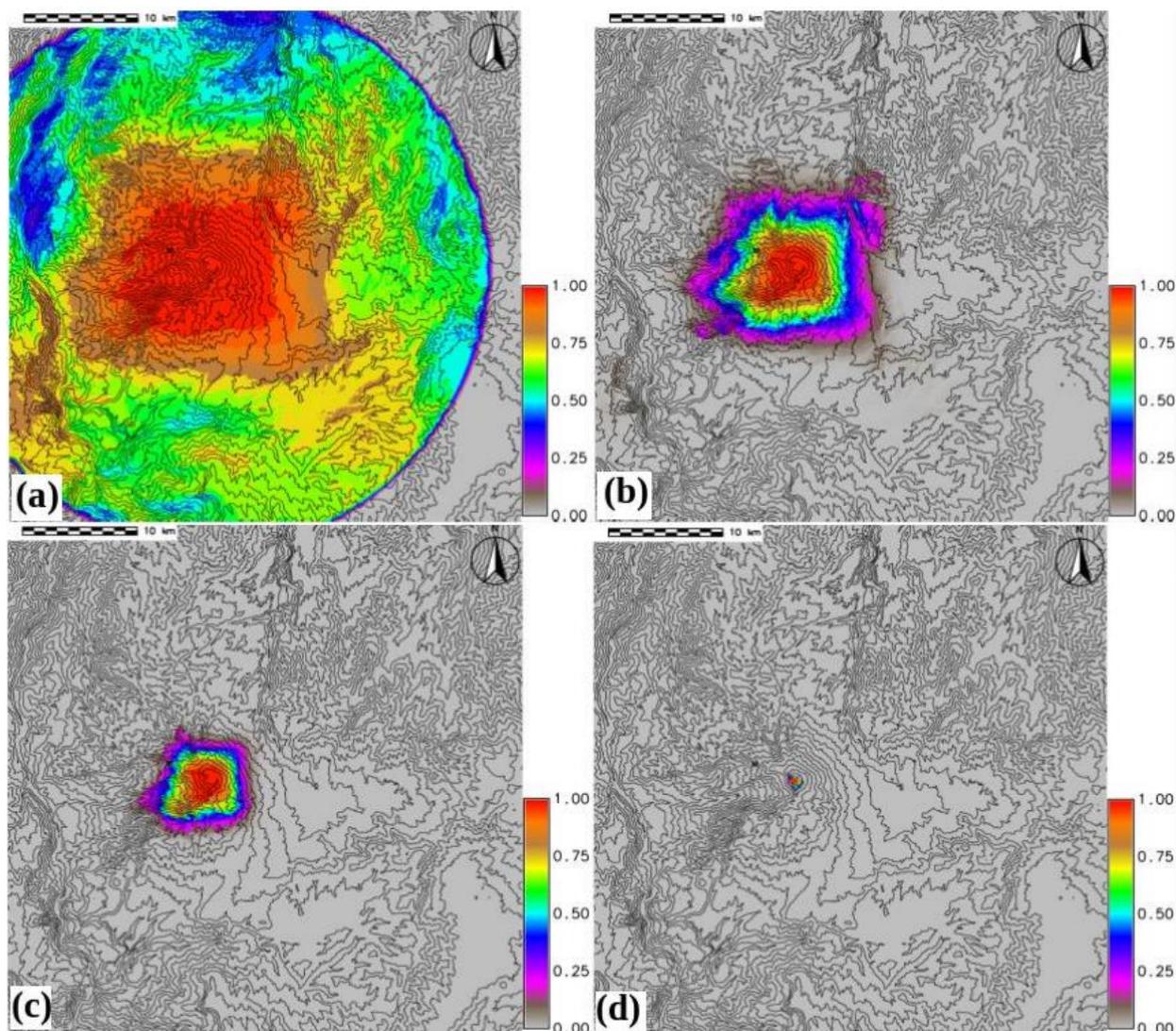


Figura 25. Zonificación de la amenaza por onda de choque para diferentes escenarios de presión inicial (a) 0.4MPa, (b) 1.0MPa, (c) 3.0MPa y (d) 6.0MPa.

Al igual que en la zonificación hecha por Córdoba & Del Risco (1998), el presente estudio muestra que la reflexión y refracción de la onda con el anfiteatro del volcán hace que la distribución de la sobrepresión generada por la onda de choque sea mayor hacia el municipio de Consacá. Sin embargo, en la figura 25b y 25c se observa que además existe una elongación de la distribución de sobrepresión en dirección Noreste y Sureste, comportamiento que no fue predicho en estudios anteriores, además se observan pequeñas porciones aisladas rodeadas de zonas con mayor o menor presión, todo lo anterior se debe a que en este estudio se tuvo en cuenta la influencia de la reflexión y refracción de las ondas en todas las barreras topográficas presentes en la zona.

2.2.3.6. Evaluación probabilística de la amenaza por Onda de choque

Siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 2.2.3.3. se obtuvieron mapas de la distribución probabilísticos para diferentes escenarios de sobrepresión, los diferentes escenarios fueron establecidos de acuerdo a los efectos que la onda de choque puede tener sobre ventanas y estructuras. Los casos de sobrepresión evaluados fueron: 200Pa, 1000 Pa, 2000 Pa, 10000 Pa, 15000 Pa, 20000 Pa, 25000 Pa, 30000 Pa y 35000 Pa. En este informe se muestran algunos escenarios teniendo en cuenta los efectos que generan las sobrepresiones sobre vidrios y estructuras, estos escenarios son: 1) cuando se produce fractura de vidrios grandes (200 Pa), 2) casi la totalidad de vidrios expuestos son fracturados (1.000 Pa), 3) los vidrios se fracturan y salen expulsados pudiendo causar daño a personas (2.000 Pa) y 4) la sobrepresión capaz de producir un daño considerable a estructuras (35.000 Pa).

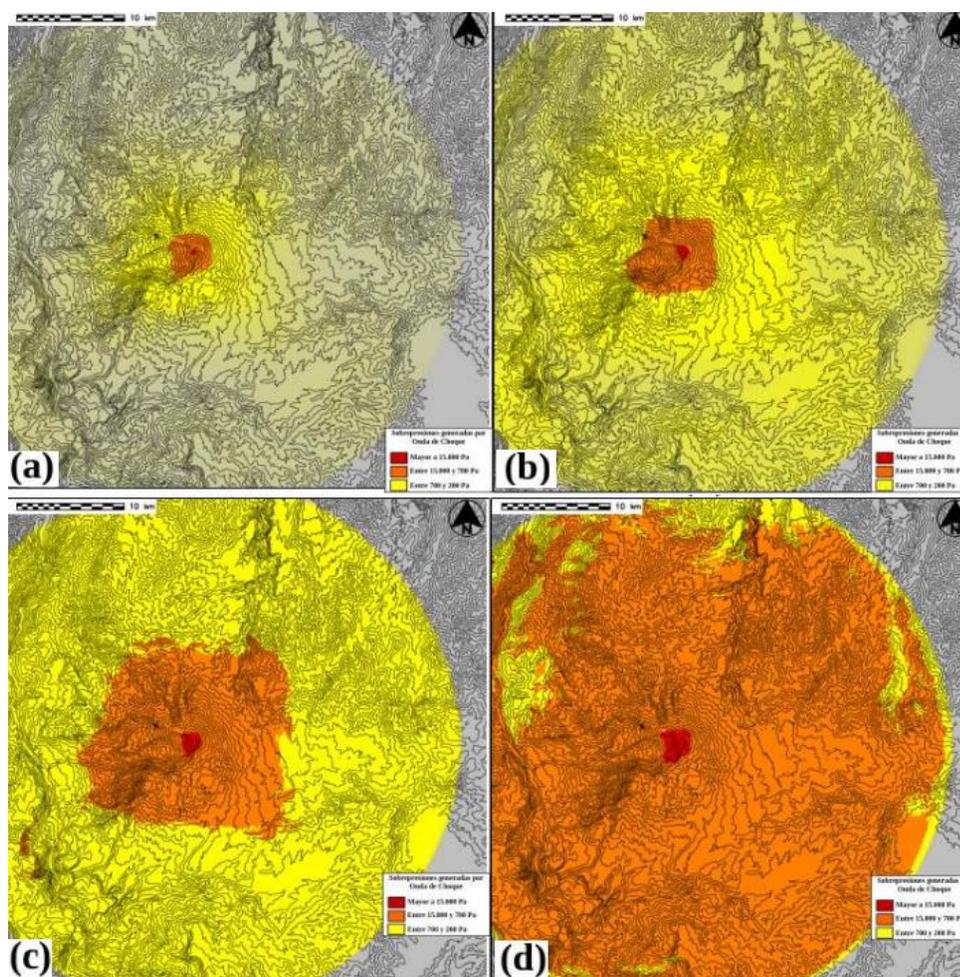


Figura 26. Distribución probabilística para escenarios de sobrepresión de: (a) 200 Pa, (b) 1.000 Pa, (c) 2.000 Pa y (d) 35.000 Pa.

En la figura 26 se puede ver que las distribuciones de probabilidad de la llegada de la onda de choque con una determinada sobrepresión cambian de manera significativa dependiendo del caso analizado. En la figura 26a se muestra que para la mayoría de los municipios de la zona de influencia entre ellos Pasto, La Florida, Nariño, Consacá y Sandoná, la probabilidad de que la sobrepresión supere los 200 Pa se encuentra entre un 45% y 95%, mientras que en la zona más cercana a la fuente de la explosión las probabilidades alcanzan el 100%.

En la figura 26b se muestra la probabilidad de que una onda de choque llegue con una sobrepresión mayor o igual a 1kPa. Este escenario de sobrepresión tiene una probabilidad de ocurrencia despreciable en gran parte de la zona de influencia de la amenaza por onda de choque; sin embargo, se puede observar que en algunas zonas cercanas al cráter de Galeras donde existe población permanente y por lo tanto estructuras civiles, se tienen probabilidades entre 10% y 50% para un fenómeno que produce principalmente pérdidas económicas por ruptura de vidrios.

En este mismo escenario de sobrepresión se observa una zona aislada localizada en la parte suroeste en el cañón del río Guáitara, donde la probabilidad de tener sobrepresiones mayores o iguales a 1kPa está entre el 5% y 20%. Como se mencionó anteriormente, la presencia de estas zonas aisladas es debida a la reflexión de la onda en el cañón del río Guitara y zonas aledañas. El mismo efecto se puede ver en la parte suroriental de Pasto y pequeñas islas al noreste de la fuente de generación de la onda de choque.

Al analizar la figura 26c se observa que la probabilidad de llegada de la onda de choque con sobrepresiones mayores o iguales a 2000 Pa se reduce notablemente respecto a los dos casos anteriores, esta sobrepresión además de producir pérdidas económicas es potencialmente peligrosa para la vida humana. Las zonas con mayor probabilidad de que las ondas de choque lleguen con 2000 Pa son la parte oriental del municipio de Consacá y el sector sur del municipio de La Florida (sector del Barranco), donde las probabilidades de este escenario de sobrepresión están entre el 10% y 80%. En la figura 26d donde se muestra la probabilidad de que se tengan sobrepresiones superiores o iguales a 35 kPa, se observa que

las probabilidades de destrucción de estructuras son despreciables en la mayor parte del área de estudio excepto en el cráter mismo.

En la figura 27 se muestra la probabilidad de llegada de las ondas de choque con una determinada sobrepresión en el municipio de La Florida. Las distribuciones de probabilidad que se muestran son para los escenarios de 200 Pa, 1000 Pa, 2000 Pa y 35000 Pa de sobrepresión. En el primer escenario evaluado que tiene 200 Pa de sobrepresión (figura 27a), se observa que todo el municipio se encuentra con probabilidades de ocurrencia entre 35% y 100%. En el sector del Barranco Alto las probabilidades son del 100%, mientras que en el casco urbano se tiene aproximadamente el 85% de probabilidad de ocurrencia de este escenario. En los sectores más alejados de la fuente de explosión como la parte norte de los corregimientos de Robles, Tunja y Matituy, las probabilidades son más bajas llegando al 35% de probabilidad de ruptura de vidrios grandes.

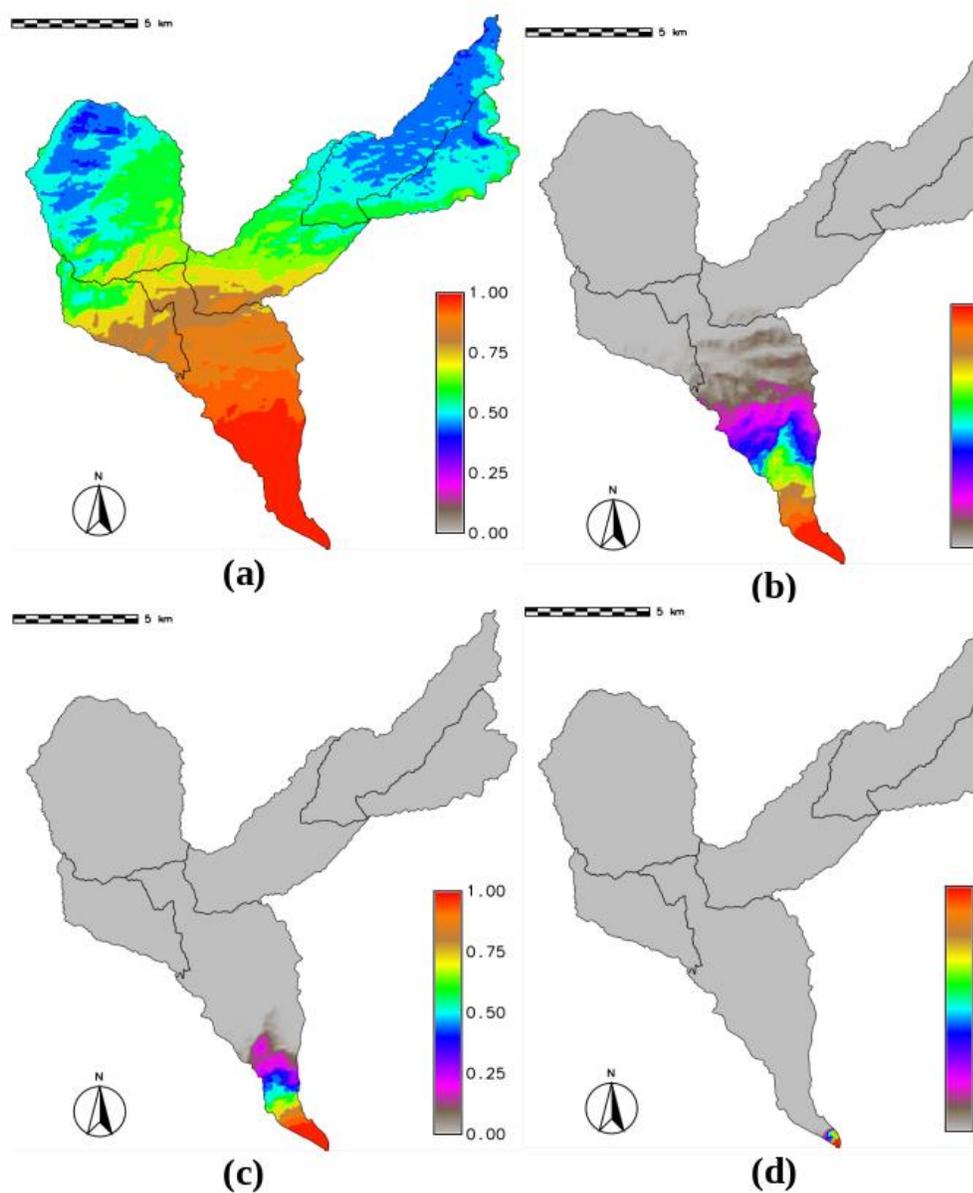


Figura 27. Distribución probabilística para escenarios de sobrepresión en el municipio de La Florida de: (a) 200 Pa, (b) 1.000 Pa, (c) 2.000 Pa y (d) 35.000 Pa.

El escenario de sobrepresión de 1000 Pa se muestra en la figura 27b, aquí se observa que en la mayoría del área del municipio la probabilidad es despreciable. En la zona del corregimiento especial se observa el mismo patrón presente en la figura 27a donde la parte del Barranco tiene la mayor probabilidad de ocurrencia y va disminuyendo gradualmente a

medida que se avanza hacia el la zona urbana del municipio, en el casco urbano la probabilidad esta entre 1% y 5% aproximadamente.

El siguiente escenario evaluado se muestra en la figura 27c en el que la onda de choque genera sobrepresiones iguales o mayores a 2.000 Pa. Se observa que las zonas que se verían afectadas por estas sobrepresiones son las más próximas al cráter del volcán Galeras; la distribución de probabilidades muestra que zonas próximas al Divino Rostro, donde existe la presencia de personas y animales, las probabilidades están aproximadamente entre el 50% y 70%.

Finalmente, en la figura 27d se muestra el escenario de 35.000 Pa, en esta figura se observa que las probabilidades de ocurrencia de este escenario se reducen a una pequeña parte al sur del municipio donde normalmente no hay presencia de personas ni animales domésticos; sin embargo, si eventualmente alguna forma de vida se viera expuesta a este nivel de sobrepresión las consecuencias podrían ser fatales, este nivel de sobrepresión es capaz incluso de causar daño a estructuras de concreto.

2.2.4. Amenaza por Projectiles Balísticos

Los proyectiles balísticos se definen como partículas de un diámetro generalmente mayor a 0.1 m que en las erupciones volcánicas son expulsadas del cráter, siguiendo una trayectoria parabólica y generando impactos sobre la superficie (Konstantinou, 2015). Su potencial daño se debe a la fuerza de impacto y a las altas temperaturas que los caracterizan, generando incendios forestales, pérdidas de estructuras y en los seres vivos daños severos que pueden resultar en pérdidas fatales.

En el volcán Galeras la actividad del reciente periodo eruptivo ha traído consigo expulsión de proyectiles y representa el evento con mayor probabilidad en las erupciones volcánicas de tipo explosivo (Servicio Geológico Colombiano, 2015), generando incendios forestales, como los ocurridos en las erupciones del 24 de abril de 2009 y el 2 de enero de 2010 (Figura 28) (Acosta y Muñoz, 2012; INGEOMINAS, 2010).



Figura 28. Fotografía que evidencia el impacto de proyectiles balísticos y los incendios forestales generados el 3 de enero de 2010. Copyright 2010 Alberto Quijano Vodniza, Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño.

La Tabla 5 presenta las características de los proyectiles definida por el SGC (Ingeominas, 1997; Servicio Geológico Colombiano, 2015), resultado de la información histórica analizada y el modelamiento numérico, en los cuales se establecen las dimensiones de los mismos y el máximo alcance esperado.

Tabla 5. *Características de los proyectiles balísticos en el volcán Galeras.*

Tamaño diámetro (m)	Alcance (km)	Nivel de amenaza	Fuente
0.4 - 1 3.5 (max)	1	Alta	INGEOMINAS (1997)
1.5 (max)	1-2.5	Media	3a Versión del Mapa de Amenazas
< 1	5	Baja	
< 1	4.4 - 5.3	Media	SGC (2015)
>1	1.6 – 2.3	Media	4a Versión del Mapa de Amenazas

Realizada a partir de (INGEOMINAS, 1997; Servicio Geológico Colombiano, 2015)

La actual versión del Mapa de Amenazas para este fenómeno (Figura 29) no contempla un nivel de amenaza bajo, debido a la peligrosidad del impacto directo de los proyectiles (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

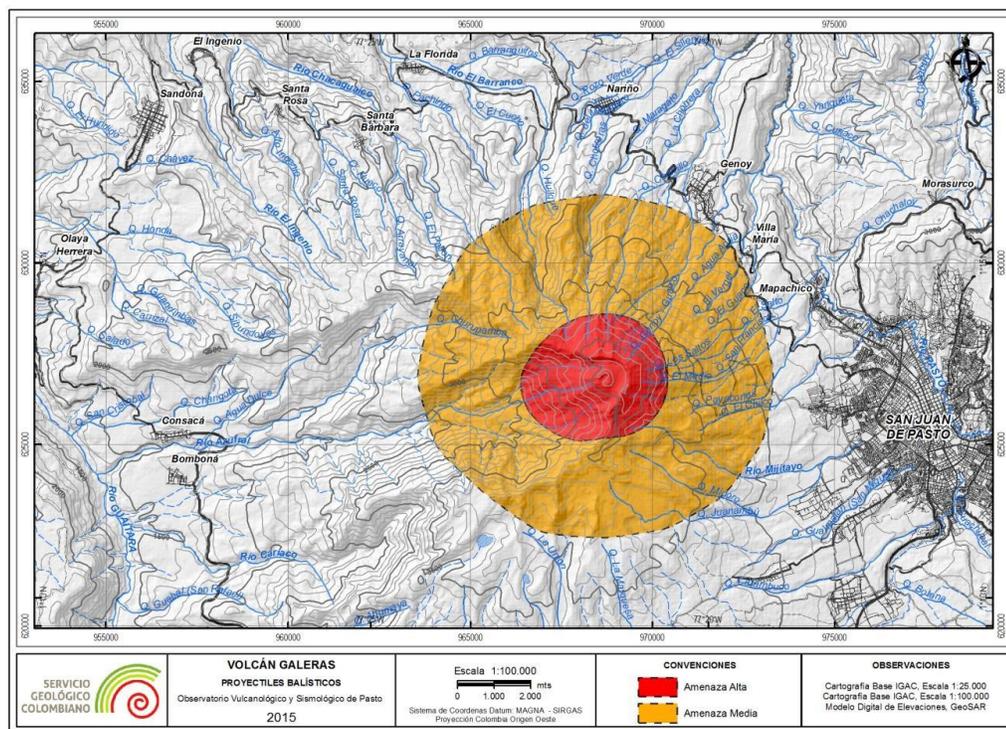


Figura 29. Mapa de amenaza por proyectiles balísticos del Volcán Galeras. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015)

2.2.4.1. Conocimiento del fenómeno

Pese a que en Galeras se tienen registros históricos de algunos de los balísticos expulsados, también existe incertidumbre al asociarlo con un evento eruptivo determinado, por lo cual se conoce parcialmente su distribución (Servicio Geológico Colombiano, 2015). Sin embargo, atendiendo al conocimiento que se tiene de la física del fenómeno presente en muchos volcanes del mundo, se pueden dar pautas para realizar su evaluación.

Los proyectiles balísticos (Figura 30) al ser expulsados siguen trayectorias parabólicas que dependen del ángulo, tamaño, densidad y velocidad inicial de los mismos. Las trayectorias se ven afectadas principalmente por el coeficiente de arrastre de la atmósfera, más no por condiciones de viento (Alatorre-Ibargüenitoia, et al, 2006).

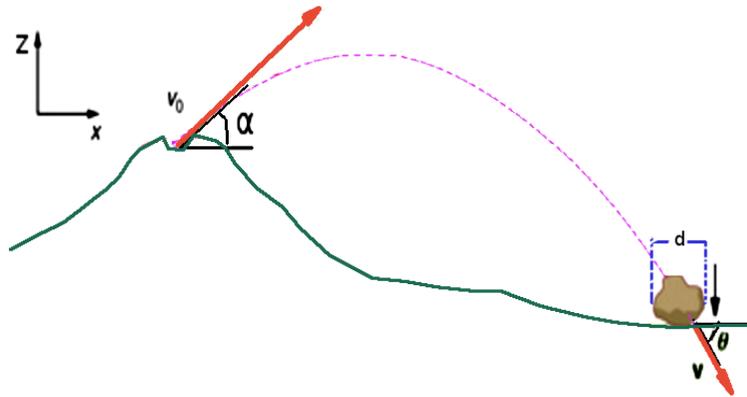


Figura 30. Esquema de comportamiento de proyectil balístico, en donde α , es el ángulo de lanzamiento, v_0 la velocidad inicial, d el diámetro de la partícula y v la velocidad de llegada

2.2.4.2. Análisis computacional

Computacionalmente existen diferentes herramientas y modelos que permiten calcular la trayectoria y características físicas de los proyectiles balísticos; para este caso, se modificó y adaptó al paquete de programación matemática de alto nivel Octave, la rutina de programación en Matlab™ propuesta por Connor (2015), en conjunto con el sistema de ecuaciones balísticas propuestas por Alatorre-Ibargüengoitia et al., (2006) y Alatorre-Ibargüengoitia, et al, (2012). Estos scripts de Octave/Matlab sistematizan el modelo matemático que describe la trayectoria de un proyectil balístico en la atmósfera.

2.2.4.3. Descripción de la trayectoria

A continuación se describe el cálculo de la trayectoria del proyectil balístico que está implementado en su totalidad en las rutinas de programación Octave/Matlab desarrolladas en el presente estudio.

En cada instante (i) de la simulación se tiene la aceleración en dirección x y altura z , como se indica en las Ecuaciones 7 y 8 respectivamente:

$$ax_i = \frac{-D \cdot V_{(i-1)} \cdot V_{x(i-1)}}{m} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$az_i = \frac{-D \cdot V_{(i-1)} \cdot V_{z(i-1)}}{m} - g \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde D es un parámetro que depende del coeficiente de arrastre y el área transversal del balístico (Ecuación 9); $V_{(i-1)}$ corresponde a la velocidad en el momento inmediatamente anterior al instante i ; m es la masa del balístico y g la aceleración gravitacional.

$$D = \frac{\rho_a A C_d}{2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

En donde:

ρ_a = densidad de la atmósfera en kg/m^3

A = área transversal del balístico

C_d = coeficiente de arrastre

El modelo de Connor (2015) asume que ρ_a y C_d , son valores constantes, sin embargo, en realidad la densidad atmosférica tiene variabilidad en función de la altitud y C_d considera valores entre 0 a 0.5 en función del número de Reynolds (Mastin, 2001). En un radio próximo al cráter, Mastin (2001) usa el coeficiente reducido $C_{dr} = C_d(r/r_d)^2$ que se reduce a 0 con el radio, mientras para nuestro caso se tomó la reducción de C_d a cero para un radio inferior a $r_d = 500$ m del cráter.

El modelo desarrollado en el presente estudio tiene en cuenta la variación de la densidad de la atmósfera a partir del siguiente análisis para el instante (i) de simulación:

$$\rho_a = \frac{Pa(i)}{R * T(i)} \quad (\text{Ecuación 10})$$

En la Ecuación 10 la densidad de la atmósfera está en función de R que es la constante del aire (287 N.m/Kg. k), la temperatura ($T(i)$) y la presión atmosférica ($Pa(i)$) que, a su vez depende de la temperatura y la altura, la que se define de acuerdo con la expresión dada en la Ecuación 11.

$$Pa(i) = 760e^{\left(-0.3416 \frac{z(i)}{r(i)+273.15}\right)} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde la presión atmosférica está dada por la altura del balístico $z(i)$ en el tiempo (i) de simulación. La temperatura $T(i)$ se define en la Ecuación 12:

$$T(i) = 29.3 - (0.00606 * z(i)) + 273.15 \text{ (Ecuación 12)}$$

Las ecuaciones 11 y 12 fueron incorporadas en la ecuación 10, a fin de representar la variación de la densidad atmosférica, teniendo además como base el Gradiente térmico ambiental para la zona andina de Colombia (Eslava, 1992; Pabón-Caicedo & Eslava-Ramírez, 2001).

Cabe aclarar que en el momento inicial $(i=0)$ las aceleraciones en x y z son iguales a cero $(ax_i=az_i=0)$ y la velocidad inicial (v_i) es un factor ingresado por el usuario.

Las velocidades en las componentes horizontal y vertical para el instante i se describen en las ecuaciones 13 y 14:

$$Vx_{(i)} = Vx_{(i-1)} + ax_i * t \text{ (Ecuación 13)}$$

$$Vz_{(i)} = Vz_{(i-1)} + az_i * t \text{ (Ecuación 14)}$$

Donde Vx_i y Vz_i son las velocidades en las componentes x y z para el instante i , $Vx_{(i-1)}$ y $Vz_{(i-1)}$ corresponden a las aceleraciones calculadas en el paso inmediatamente anterior y t es el incremento en el tiempo de simulación, el cual tiene una variación de 0.1 segundos.

La trayectoria o posición del balístico en el momento i , está dado por las Ecuaciones 15 y 16.

$$x_i = x_{(i-1)} + vx_{(i)} * t + 0.5 * ax_i * t^2 \text{ (Ecuación 15)}$$

$$z_i = z_{(i-1)} + vz_{(i)} * t + 0.5 * az_i * t^2 \text{ (Ecuación 16)}$$

Dónde la posición x_i y la altura del proyectil z_i dependen de la posición anterior $x_{(i-1)}$ y $z_{(i-1)}$ y la velocidad y aceleración para el instante i .

Para el momento de inicio ($i=0$), la localización del proyectil (x_i y z_i) está dada por el usuario como condición inicial.

Cada punto de la trayectoria del proyectil con su localización (con su velocidad y aceleración) se cruza con el perfil topográfico para determinar los puntos de colisión y las características del impacto.

Adicionalmente, el modelo desarrollado realiza el cálculo de la fuerza del impacto (Ecuación 17) y la energía de la colisión (Ecuación 18).

$$F = m * a_i \text{ (Ecuación 17)}$$

En la ecuación 17 se define la fuerza del proyectil en función de su masa (m) y la aceleración en el instante i , la cual se toma a partir de las ecuaciones 15 y 16.

$$E = \frac{m*v_i^2}{2} \text{ (Ecuación 18)}$$

La energía del impacto (Ecuación 18) depende de la masa (m) y la velocidad del balístico (v_i) en el instante i , la cual se calcula a partir de la ecuación 19.

$$v_i = \sqrt{Vx_{(i)}^2 + Vz_{(i)}^2} \text{ (Ecuación 19)}$$

2.2.4.4. Condiciones iniciales

Con el fin de presentar una evaluación probabilística de este peligro, se aplicaron las ideas de Dalbey (2008); Sheridan (2010) y Villarosa & Guerrero (2018), explicadas en la sección Análisis Probabilístico, para lo cual se determinan rangos de las condiciones iniciales que permitan definir los escenarios hipotéticos.

El modelo desarrollado, requiere inicialmente:

- Densidad de bloque (kg/m^3)
- Ángulo de eyección (grados)
- Radio (m)
- Velocidad inicial de los bloques (m/s)

La densidad es tomada a partir de los valores encontrados por estudios previos en Galeras (Calvache & Williams, 1992), que muestran un rango de densidades de clastos entre 2300 a 2800 kg/m^3 .

Los ángulos de lanzamiento, en general se toman entre 10 a 70° (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2006); sin embargo, dadas las condiciones topográficas del cráter del volcán, se extrajeron perfiles topográficos cada 5 grados a partir del cráter sobre un DEM de 3 m de resolución, con lo cual se determinó el ángulo mínimo dependiendo de la topografía.

A manera de ejemplo se indican en la Figura 31 los distintos perfiles del cono, extraídos cada 30°. Puede observarse la asimetría del cráter por lo cual se decidió tomar como ángulo mínimo de eyección 30° y un ángulo máximo de 90°.

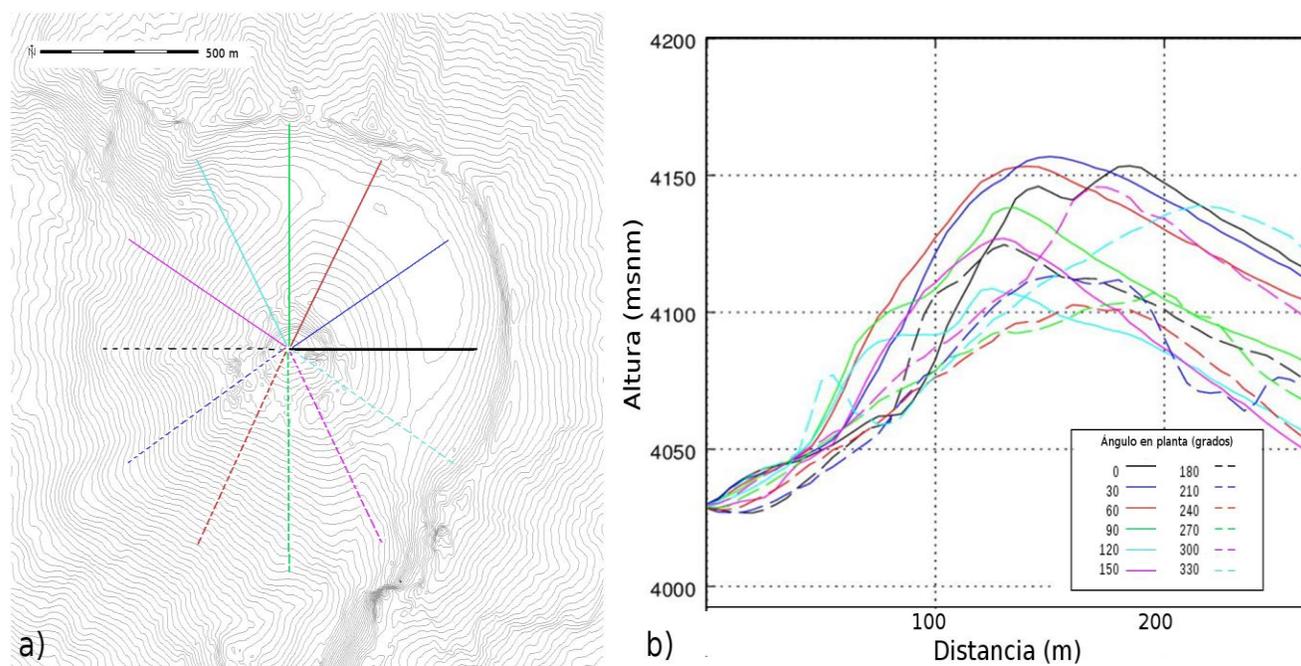


Figura 31. a) Trayectorias hipotéticas esperadas (sin considerar el viento) para proyectiles balísticos en Galeras cada 30° horizontales y b) Perfiles topográficos del cráter

Las velocidades iniciales para este fenómeno en otros volcanes se encuentran cercanas a los 300 m/s (Maeno et al., 2013; Del Pozzo et al., 2017). Sin embargo, con el fin de determinar un rango de velocidades iniciales y alcance potencial en Galeras, aplicamos distintas pruebas para los casos extremos dados por las combinaciones de las condiciones de inicio, tal como lo sugiere Del Pozzo et al. (2017).

La velocidad inicial depende de la energía de la explosión y de la masa del proyectil (Alatorre-Ibargüengoitia et al., 2006; Del Pozzo et al., 2017). Al no contar con datos sobre energía de las explosiones (que no necesariamente es la misma que la energía total de sus respectivas erupciones), se optó por buscar una relación velocidad inicial con la distancia de impacto-masa del balístico. Para el volcán Galeras se tiene el registro histórico de balísticos que permiten, en conjunto con distintos ensayos, identificar la velocidad inicial requerida. Con esta información se realizaron pruebas tipo ensayo y error con un script desarrollado en este trabajo que permitieron ajustar una correlación entre diámetros y velocidades iniciales de los balísticos. Para el caso

específico de volcán Galeras los registros geológicos muestran proyectiles con diámetros entre 0.2 y 3.5 metros; para los proyectiles de menor tamaño se reporta un alcance máximo de 5.3 km; mientras que los proyectiles de diámetros superiores a un metro muestran un alcance de aproximadamente 2.3 km (Ingeominas, 1997).

Una vez ejecutadas las pruebas y analizados los resultados, se realizó un ajuste por regresión con el cual se obtuvo una distribución que sigue una ley de potencia para la relación diámetro-velocidad para el volcán Galeras (Figura 32). Esta relación se expresa en la Ecuación 20.

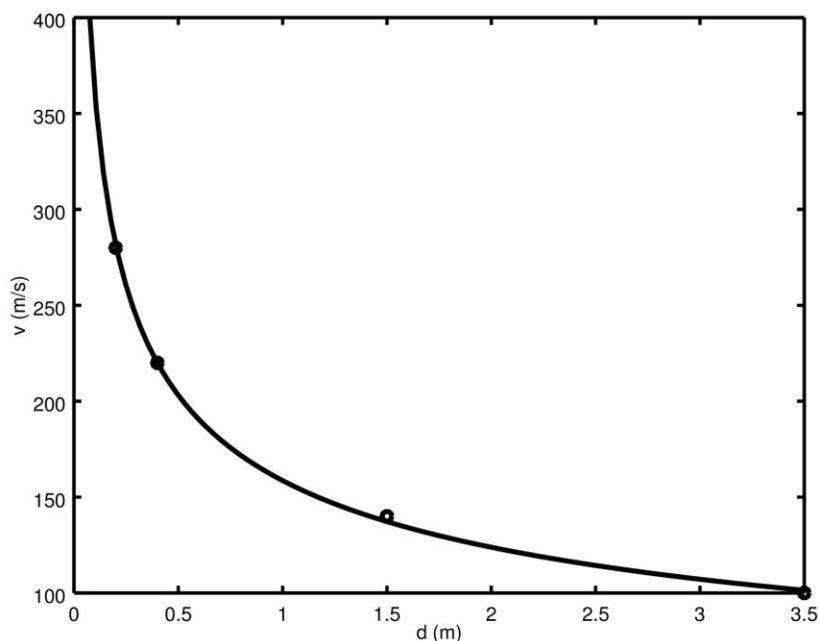
$$v = 158,6 * d^{-0,3569} \text{ (Ecuación 20)}$$

En la ecuación 20 la velocidad (v) del proyectil balístico está en función de su diámetro (d). Cabe recalcar que la ecuación 20 es válida solamente para Galeras, con proyectiles balísticos dentro del rango de tamaño y distancia encontrados en los registros geológicos arriba anotados.

Finalmente, los parámetros iniciales para el modelo se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. *Rangos de condiciones iniciales para el modelamiento de proyectiles balísticos en el volcán Galeras.*

Parámetro	min	max
Ángulo	30°	90°
Diámetro	0,2 m	3,5 m
Densidad	2300 kg/m ³	2800 kg/m ³
Velocidad inicial	281.7 m/s	101.4 m/s



2.2.4.5.

Figura 32. Relación de velocidad inicial (v) del balístico en función del diámetro (d) para proyectiles en el caso específico del volcán Galeras. Los puntos son datos de los registros geológicos tomados de Ingeominas (1997).

Validación con otras herramientas de modelamiento

El modelo ajustado en el presente estudio es comparado con la herramienta Eject 1.4 (Mastin, 2001), la cual es usada para el modelamiento de proyectiles balísticos en distintos ambientes volcánicos (Mastin, 2001; Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Para comparar el comportamiento de los dos modelos se realizaron pruebas para diámetros de 0,20 m y 3,5 m, con una velocidad inicial de 281,69 m/s y 101,42 m respectivamente, la cual se extrae a partir de la Ecuación 19. Para todos los casos se trabajó con una densidad de 2500 kg/m³, un ángulo de eyección de 45° y se tomó la reducción del coeficiente de arrastre ($C_d=0$) en los primeros 500 metros.

Como se puede observar en la Figura 33a, el modelo utilizado presenta una distribución de la trayectoria muy ajustada a la generada por el software Eject 1.4 tanto para proyectiles de gran diámetro (3,5m) como para los más pequeños (0,2m).

En cuanto a la distribución de velocidad (Figura 33b), para proyectiles de gran diámetro (3,5 m) no se encuentran diferencias significativas entre el modelo desarrollado y Eject 1.4; sin embargo, la predicción de la velocidad para proyectiles cercanos a 0,2 m presenta diferencias en los primeros 500 m, esto debido a que se asume una reducción del coeficiente de arrastre $C_d=0$, mientras que el modelo Eject 1.4 hace un incremento progresivo de este parámetro, haciendo que para el caso puntual, en la primera sección de la trayectoria el modelo desarrollado presente una sobreestimación de la velocidad; sin embargo, una vez comienza a descender el balístico, la velocidad predicha por el modelo tiene una diferencia máxima menor al 5% respecto al calculado por la herramienta Eject 1.4.

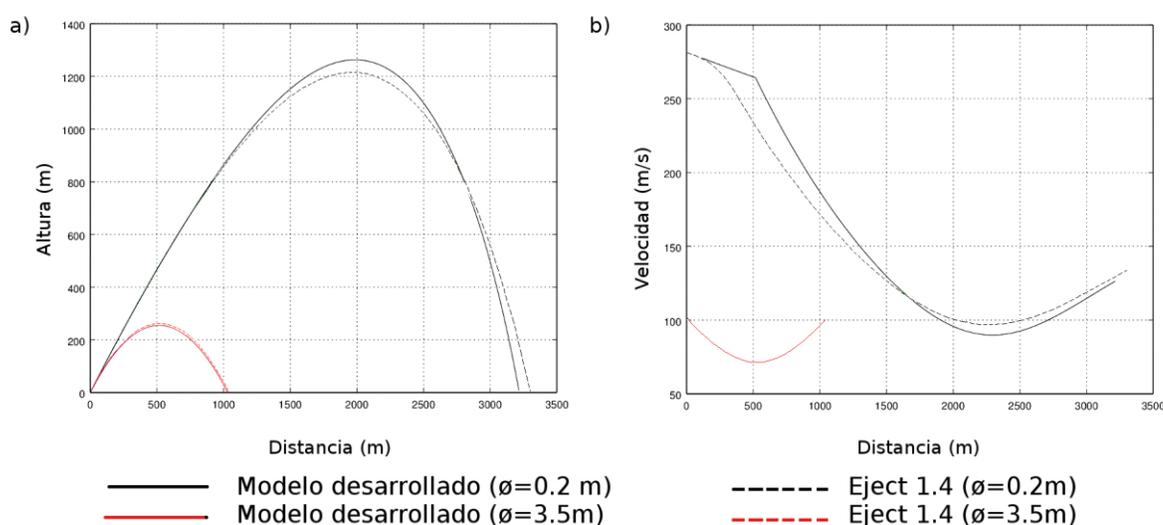


Figura 33. Comparación del comportamiento de los proyectiles balísticos en el modelo desarrollado respecto al software Eject1.4. a) Trayectoria del proyectil, b) distribución de la velocidad a lo largo de la trayectoria.

Dado que las diferencias no son significativas, se procedió a usar el modelo desarrollado con el fin de generar múltiples escenarios y cubrir la estimación de la amenaza de manera probabilística. De esta forma, en cada trayectoria analizada (una trayectoria cada 5 grados horizontales), se generaron escenarios hipotéticos producto de la combinación de los rangos de condiciones iniciales (diámetro-velocidad, ángulo de eyección y densidad), usando la técnica del Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal (Dalbey et al., 2008), la cual para ser representativa requiere de 128 muestras en cada una de las trayectorias (Rodríguez et al., 2017). Esto nos da un total de 9216 modelamientos.

2.2.4.6. Resultados

Investigadores como Alatorre-Ibargüengoitia (2012), Del Pozzo (2017) y Ortiz (1996) han determinado que en general la energía de impacto de proyectiles balísticos supera la energía requerida para la penetración de diversos materiales, la cual se encuentra en el orden de 10^3 Julios para cubiertas livianas (teja de asbesto cemento, aluminio, policarbonato, entre otros), mientras que para el concreto reforzado la energía requerida para la penetración está en el orden de 10^4 Julios y se espera destrucción total del concreto reforzado para una energía cercana a 10^6 Julios (Williams et al., 2017; Williams, 2016). Por lo anterior, en vista del daño que ocasiona y su potencial peligrosidad, en este trabajo se opta por realizar la zonificación de la amenaza para una energía de impacto de 10^6 julios.

Una vez ejecutados los scripts de Octave, se obtiene la distribución probabilística frecuencial del impacto en función de su energía, para los niveles de energía que se requieran. Sin embargo, los resultados mostraron probabilidades de impacto siempre mayores al 1%, por lo que se optó por extrapolar el límite al 0.1% a partir de los mismos. Esta extrapolación nos permitió dar una zona buffer de cerca de 70 metros para extender el análisis hasta el límite de interés de 0.1%.

2.2.4.7. Verificación de la distribución de impactos

A manera de verificación de los resultados obtenidos mediante el modelo desarrollado, se presenta una comparación de estos con la distribución de esta amenaza definida por el Servicio Geológico Colombiano (2015).

La Figura 34 muestra la distribución obtenida para 9216 modelamientos de proyectiles balísticos en todo el radio de afectación del volcán Galeras. A partir de los puntos de impacto y su respectivo diámetro se elabora una interpolación de los mismos para finalmente clasificar la amenaza en 2 zonas: Tal como en Servicio Geológico Colombiano (2015), para la zona de amenaza alta se tienen impactos de proyectiles con diámetros superiores al metro, para la zona de amenaza media los balísticos esperados tendrían un diámetro inferior a este umbral. De manera general los resultados indican que el modelo desarrollado sobreestima el área de influencia del fenómeno en un 13% (ver Figura 34) respecto a la definida en la actual versión del mapa de amenaza (Servicio Geológico Colombiano, 2015), lo que coloca a este trabajo del lado de la seguridad.

2.2.4.7.1. Resultados para el caso específico del municipio de la florida

Para el municipio de la Florida se realizó la extracción de los resultados, considerando la probabilidad de impacto de los proyectiles que superen una energía específica en el punto de colisión con la topografía de la zona.

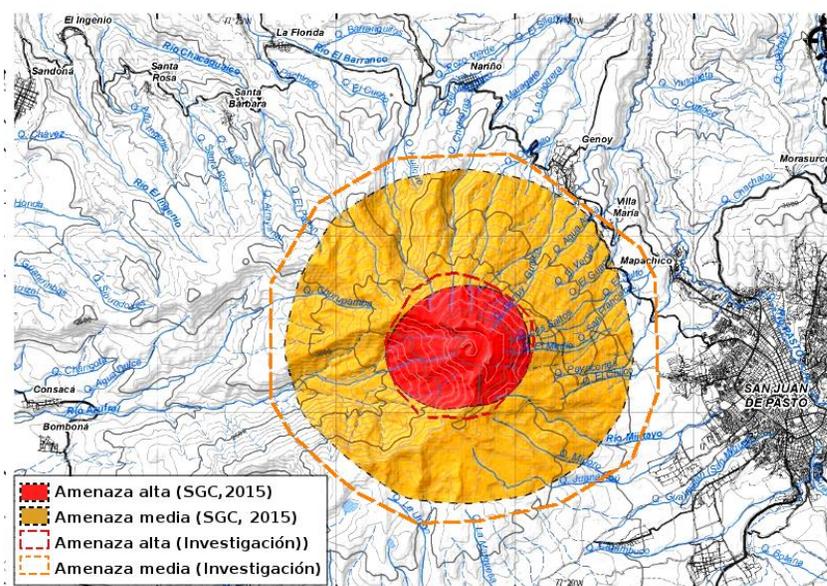


Figura 34. Comparación de las distribuciones de proyectiles balísticos generadas por el Servicio Geológico Colombiano (2015) y los resultados de esta investigación. Las líneas punteadas indican la estimación resultante en este trabajo. Fuente. Modificada de Servicio Geológico Colombiano (2015)

La Figura 35 presenta la distribución probabilista del impacto de proyectiles balísticos que superen una energía de 10^3 Julios, la cual es capaz de perforar los materiales de cubiertas catalogadas como livianas (ver capítulo de vulnerabilidad). Los resultados muestran que hasta 1.3 km, se tiene una probabilidad de más del 50%, a partir de esta distancia hasta 3 km del cráter se tienen probabilidades cercanas al 20% y finalmente desde los 3 km hasta 5.3 km las probabilidades son menores al 10%.

Para una energía de impacto superior a 10^6 , la distribución probabilística de llegada de estos proyectiles indica que a una distancia entre 2.7 km a 5.6 km del cráter, las probabilidades de impacto de un proyectil que supere esta nivel de energía son menores al 10%, sin embargo a

medida que se acerca al cráter (2,7 a 1,5 km) la probabilidad aumenta al 20 %, y para una distancia menor a 1,5 km del cráter, las probabilidades de impacto de proyectiles son mayores al 20%, llegando a superar el 75% de probabilidad en los primeros 500 m de distancia. Cabe destacar que este nivel de energía puede destruir estructuras de concreto reforzado, por lo tanto, en caso de existir elementos expuestos de estas características en la zona podrían tener este tipo de daños.

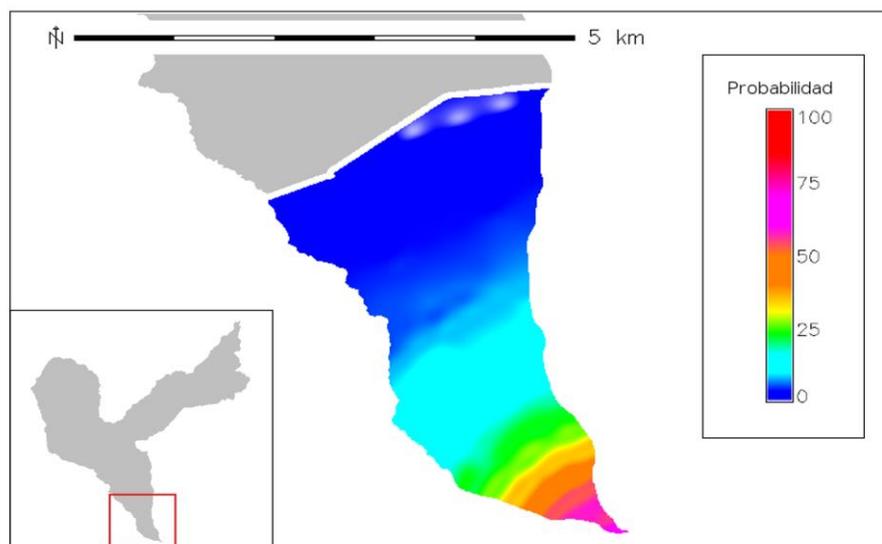


Figura 35. Distribución probabilística del impacto de proyectiles balísticos con una energía superior a 10^3 Julios en el Municipio de la Florida (Nariño).

Aplicando la distribución Weibull explicada más arriba, se tiene la distribución presentada en la Figura 36, resaltando que probabilidades de impacto superiores al 75% cubren la zona cercana a 800 metros del cráter, entre 1 y 3 km, se tienen probabilidades desde 10 % hasta 20%, la región con probabilidades menores al 10% se encuentra a partir de los 3 km hasta 5.3 km del cráter.

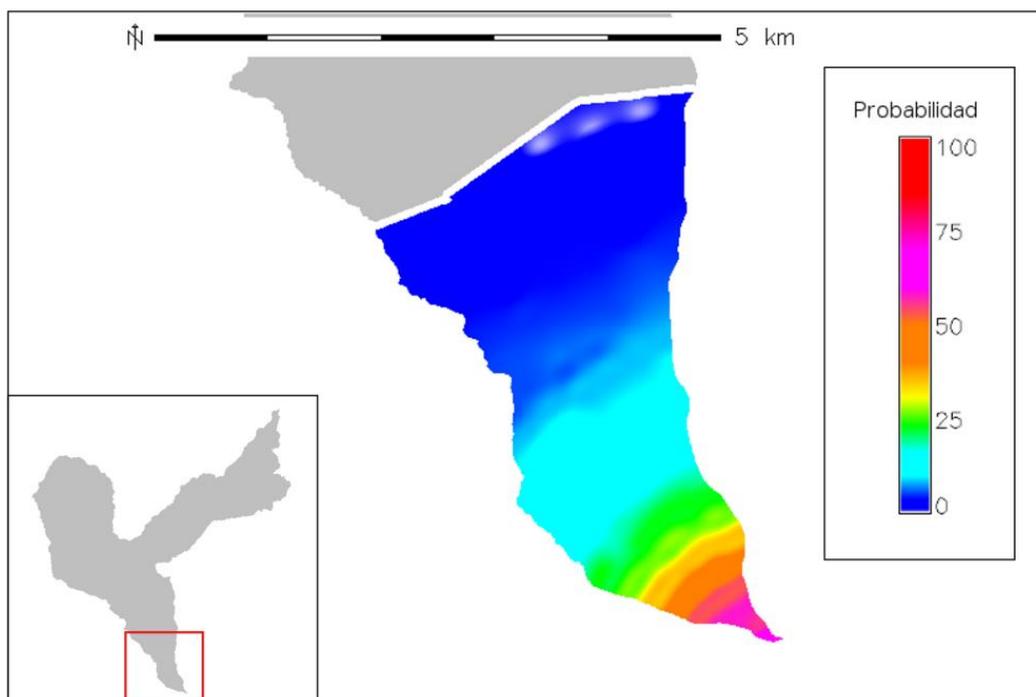


Figura 36. Distribución probabilística determinando la envolvente de amenaza en la zona de estudio.

Teniendo en cuenta que el Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Cultura, exige la clasificación y zonificación de amenaza en tres niveles: alta, media y baja, para el método probabilístico empleado en este estudio, se tienen como base las consideraciones tomadas por Hurtado & Cortéz (1997) e Ingeominas (1997) para la definición de dichos niveles, teniendo en cuenta que la severidad de los casos analizados es la misma y asumiendo una probabilidad de ocurrencia de erupción explosiva del 100%.

Por lo anterior, la zonificación de amenaza por impacto de proyectiles balísticos en el Municipio de la Florida se define a continuación y se representa gráficamente en la Figura 37.

- Amenaza alta: corresponde a la zona de mayor cercanía al cráter con una distancia menor a 1,5 km, en la cual las probabilidades de impacto de proyectiles balísticos con una intensidad (energía de impacto) de carácter destructivo es superior al 20%.

- **Amenaza media:** Para esta zona las probabilidades de impacto de proyectiles balísticos se encuentran entre un 10% a 20%, el área definida para este nivel está a partir de 1,5 km del cráter hasta un máximo aproximado de 2,5 km.
- **Amenaza baja:** Se considera un bajo nivel de probabilidad a los valores inferiores al 10%, la distribución probabilística indica que en una franja desde 2,5 km hasta 5.3 km (a partir del cráter) presenta este nivel de amenaza en la zona del Barranco alto y Santuario de Flora y Fauna del Galeras, correspondiente al municipio de la Florida.

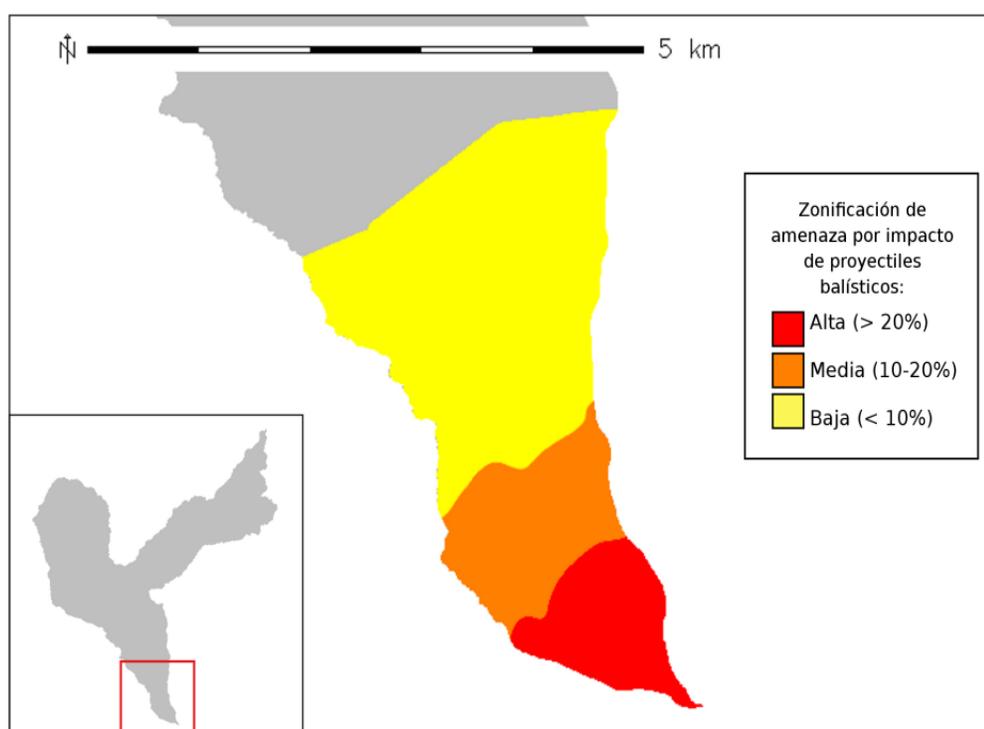


Figura 39. Zonificación de la amenaza por impacto de proyectiles balísticos en el municipio de La Florida.

2.2.5. Amenaza por Caída de Ceniza

Las erupciones volcánicas explosivas generalmente producen considerables volúmenes de ceniza y partículas que posteriormente y por medio de la acción del viento se dispersan hasta alcanzar varios kilómetros de distancia (Marti et al., 2017). Una cantidad pequeña de ceniza puede representar un riesgo para la salud humana y prácticas de ganadería y agricultura (Girault et al.,

2014) además el transporte y los servicios de acueducto y alcantarillado pueden verse afectados. Sin embargo, grandes proporciones de ceniza podrían ser capaces de provocar el colapso de estructuras en las poblaciones cercanas e inclusive ser causante de problemas en el tránsito aéreo a nivel mundial (Costa et al., 2006, Folch et al., 2012). Es por ello por lo que una de las principales preocupaciones de los entes encargados de la gestión del riesgo es el estudio de este tipo de fenómenos.

Actualmente existen diferentes tecnologías que nos permiten modelar el comportamiento esperado de estos sucesos por medio de modelos físico – matemáticos y bajo una serie de condiciones iniciales (Girault et al., 2014). Las condiciones iniciales son las que definen la calidad de los resultados obtenidos por medio de estos modelos. Conocer las características de la historia eruptiva del volcán, así como el estado meteorológico de la zona es de vital importancia para este tipo de investigaciones.

El presente estudio abarca el modelamiento probabilístico de dispersión de ceniza por medio del programa HAZMAP (Macedonio et al, 2005), haciendo uso del software para la obtención de condiciones iniciales de erupciones PARFIT (Macedonio & Costa, 2014) y datos meteorológicos satelitales que se realizó como parte del diagnóstico de gestión de riesgo del municipio de La Florida, Nariño, Colombia.

2.2.5.1. Análisis de la información histórica del volcán Galeras

Galeras es la fase más reciente del complejo volcánico Galeras y su edad está datada en aproximadamente 5000 años (Calvache, 1990). El análisis del comportamiento de Galeras se ha realizado a partir de registros geológicos, en el caso de erupciones muy antiguas, y el registro de las erupciones tanto históricas como las documentadas por el Observatorio vulcanológico de Pasto; es por ello que para su estudio, la historia eruptiva se divide en tres fases: una fase pre conquista donde los registros eruptivos se limitan al análisis de los depósitos encontrados, la segunda fase surge entre el periodo de conquista y la instauración del observatorio para el volcán, es aquí donde se recopilan registros históricos de los periodos eruptivos del volcán que fueron documentados por los habitantes de la ciudad. Finalmente, la última etapa corresponde al periodo comprendido entre

la instauración del Observatorio Vulcanológico de Pasto y el periodo actual. La principal diferencia entre cada una de las fases anteriormente mencionadas radica en la completitud y el detalle de los datos que se posee. Por ejemplo, en la primera etapa, debido a que algunas erupciones por su tamaño no suelen dejar un depósito bien definido, es normal suponer que ciertos eventos son pasados por alto, sobre todo aquellos cuyo volumen no fue lo suficientemente grande. La segunda etapa, aunque por su parte posee una mayor completitud en el registro de sus erupciones, muchos de los datos corresponden a descripciones cualitativas de los mismos, lo cual genera amplios rangos en el momento de analizar la información. La tercera etapa es la que podría considerarse completa en todos los aspectos, debido a que se posee registro cualitativo y cuantitativo de los dos principales periodos eruptivos sucedidos en Galeras, aun cuando el tamaño de los eventos no fuese de gran envergadura.

Para analizar esta información se tomaron como base dos principales referentes:

- Información del registro de erupciones que provee el Servicio Geológico Colombiano, anteriormente INGEOMINAS (Ingeominas, n.d.; Ingeominas, 2010).
- Registro de erupciones de la base de datos para Galeras del Smithsonian Institution.

Las erupciones se analizaron teniendo en cuenta dos factores importantes: el volumen estimado y la altura de columna de la erupción. Sin embargo, algunos registros no poseen este tipo de información, por lo cual se decidió aproximar los datos teniendo en cuenta su respectivo el Índice de Explosividad Volcánica (VEI por sus siglas en inglés) y los rangos de volumen y altura de columna que se proponen Newhall & Self (2014) respecto al VEI ajustándose a la historia eruptiva de Galeras tal y como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. *Asignación de volumen y altura de columna a las erupciones según su VEI.*

VEI	Volumen m3 máximo	Volumen m3 mínimo	Valor del volumen m3	Altura de columna (km) mínimo	Altura de columna (km) máximo	Valor Altura de columna (km)
1	1.00E+06	1.00E+04	5.00E+05	0.1	1	0.55
2	1.00E+07	1.00E+06	5.00E+06	1	5	3
3	1.00E+08	1.00E+07	5.50E+07	3	15	10
4	1.00E+09	1.00E+08	5.50E+08	10	25	12
5	1.00E+010	1.00E+09	5.50E+09	25		

Fuente: Modificado de Newhall & Self, 2014.

Para el caso de Galeras se consignaron un total de 76 erupciones registradas entre el año 3120 a.C. y el año de 2010 de la presente era, de las cuales se utilizaron dos parámetros principales: la magnitud del evento, $M = \text{Log}[\text{masa}(\text{en kg})] - 7$, que fue deducida del volumen de la erupción y la intensidad obtenida de acuerdo a la altura de columna. Para cada uno de estos parámetros se realizó un análisis estadístico con el fin de determinar el comportamiento de estos en la historia del volcán; para lo cual se agrupó la información en diferentes clases de acuerdo a los rangos obtenidos y el número de erupciones registradas. En el caso de la magnitud se obtuvo un total de 11 clases, mientras que para la altura de columna se definieron 8 clases tal y como se muestra en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8. *Análisis de las frecuencias de las erupciones según su altura de columna (km).*

Número de la clase	Altura de columna (km)	Frecuencia
1	2	13
2	4	30
3	6	4
4	8	4
5	10	18
6	12	5
7	14	2
8	Y mayor...	0

Tabla 9. *Análisis de las frecuencias de las erupciones según su magnitud*

Número de la clase	Magnitud	Frecuencia
1	0.0 -0.5	2
2	0.51 - 1.0	2
3	1.1 -1.5	5
4	1.51 -2.0	15
5	2.1 - 2.5	4
6	2.51 - 3.0	29
7	3.1 - 3.5	0
8	3.51 - 4.0	14
9	4.1 - 4.5	3
10	4.51 – 5.0	2
11	Y mayor...	0

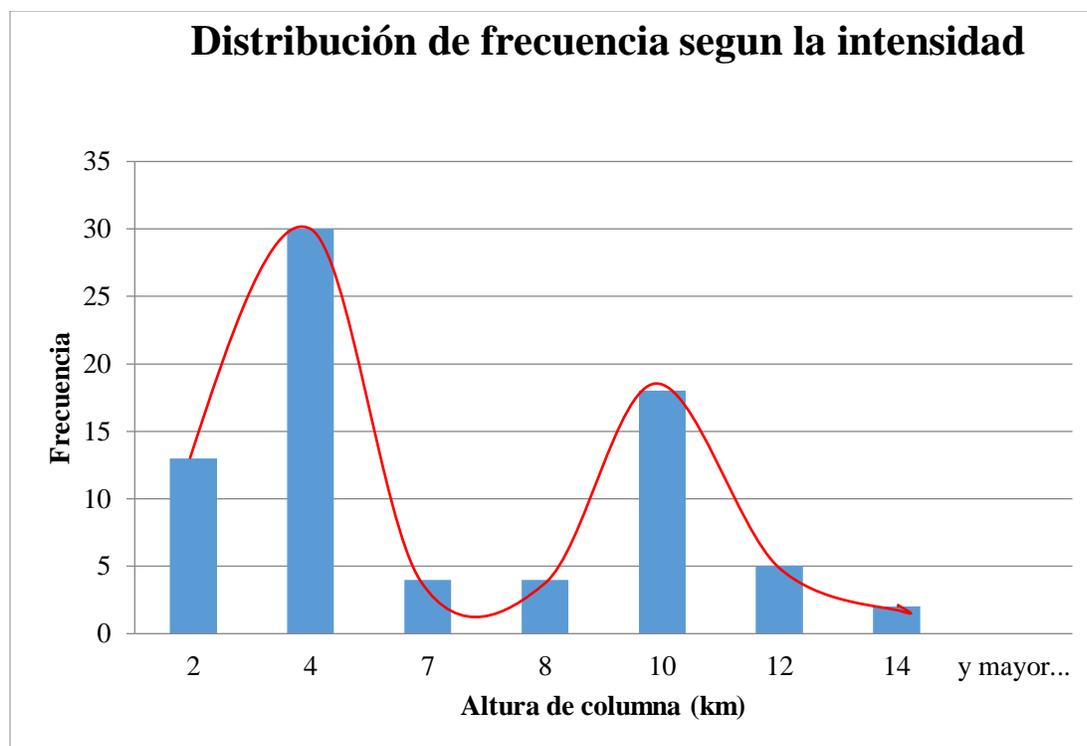


Figura 40. Distribución de frecuencia de la altura de columna en las erupciones de Galeras.

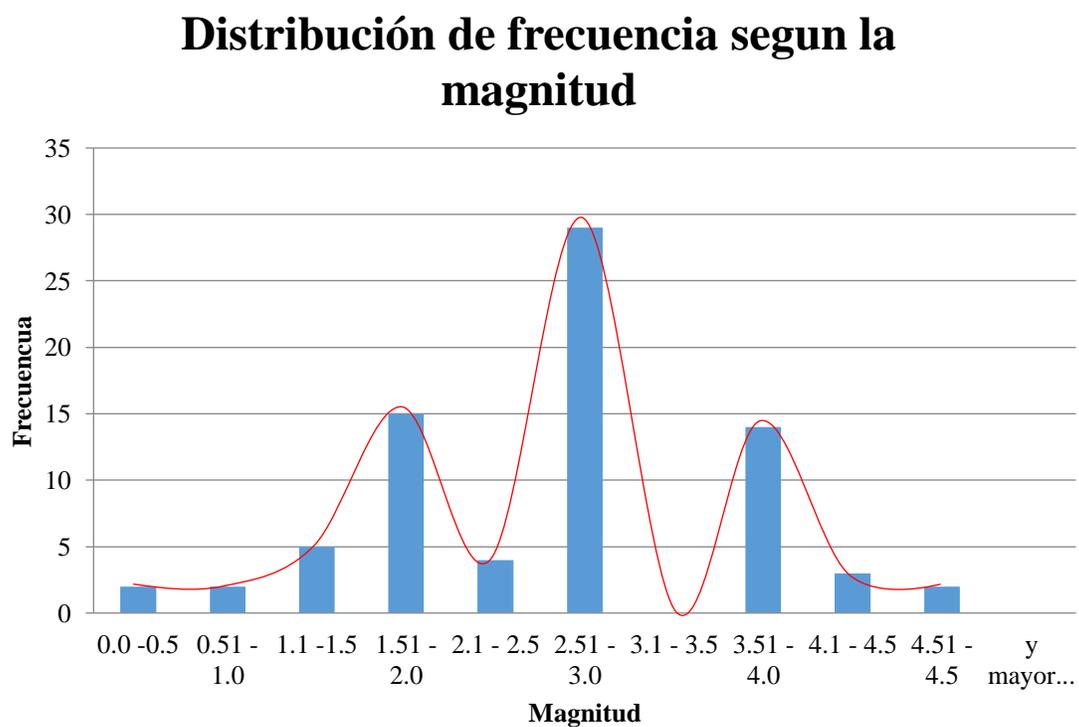


Figura 41. Distribución de frecuencia de la magnitud en las erupciones de Galeras.

Dadas estas tendencias y sus correspondientes agrupaciones fue posible obtener una clasificación de las erupciones de acuerdo a su magnitud e intensidad, tal y como lo muestra la Tabla 10.

Tabla 10. *Clasificación de las erupciones basada en la magnitud y la altura de columna*

Tamaño del Evento	Clasificación por intensidad (Altura de Columna)		Clasificación por Magnitud (Masa eruptada)	
	Altura de Columna Mínima	Altura de Columna Máxima	Magnitud Mínima	Magnitud Máxima
Pequeño	1	6	Menor a 2.0	2.0
Mediano			2.01	4.0
Grande	6.1	14	4.01	Mayor a 4.01

Finalmente se procede a obtener los pesos correspondientes a cada una de las clasificaciones obtenidas donde:

$$\text{Peso} = \frac{\text{frecuencia del tipo de evento}}{\text{número de eventos evaluados}}$$

La Tabla 11 muestra la clasificación obtenida para las alturas de columna eruptiva y su respectivo peso, donde se puede observar que la variación de los pesos de las erupciones pequeñas respecto a las grandes; es decir que las probabilidades de que suceda un evento de baja altura de columna tiene una probabilidad de aproximadamente 62%, mientras que la probabilidad de que suceda un evento con una altura de columna mayor a 7 km es de aproximadamente 38%.

Tabla 11. *Clasificación de las erupciones de Galeras respecto a su altura de columna*

Número de la clase	Altura de columna (km)	Frecuencia	Frecuencia Escenario	Peso	Peso (%)	Clasificación por altura de columna
1	2	13				
2	4	30	47	0.62	61.84	Pequeño
3	6	4				
4	8	4				
5	10	18				
6	12	5	29	0.38	38.16	Grande
7	14	2				
8	Y mayor...	0				

La Tabla 12, al igual que la Tabla 11, muestra tanto la clasificación de las erupciones según su magnitud como el peso de cada uno de los tipos. Sin embargo, en el caso de la magnitud a diferencia de la altura de columna, la variación de los pesos entre una clase de erupción y otra varía ampliamente, obteniéndose el mayor peso para los eventos de magnitud media, seguido por los eventos de magnitud pequeña y finalmente los eventos de gran magnitud.

Tabla 12. *Clasificación de las erupciones de Galeras respecto a su magnitud*

Número de la clase	Magnitud del evento	Frecuencia	Frecuencia Escenario	Peso	Peso (%)	Clasificación por magnitud
1	0.0 -0.5	2				
2	0.51 - 1.0	2				
3	1.1 -1.5	5	24	0.316	31.6	Pequeño
4	1.51 -2.0	15				
5	2.1 - 2.5	4				
6	2.51 - 3.0	29	47	0.618	61.8	Mediano
7	3.1 - 3.5	0				
8	3.51 - 4.0	14				
9	4.1 - 4.5	3				
10	4.5 - 5.0	2	5	0.066	6.6	Grande
11	Y mayor...	0				

A través de los datos compilados también fue posible realizar un análisis de la completitud de los datos recolectados y se determinó que los registros de eventos son completos desde el año 1923; debido a que algunos periodos de tiempo se basan únicamente en registros geológicos y teniendo en cuenta las condiciones de alta pluviosidad de la zona es de esperar algunos eventos (especialmente los más pequeños) no presenten depósitos visibles. Realizando el análisis de frecuencia de las erupciones de los últimos 100 años se obtuvo que los pesos de los eventos de pequeña, mediana y gran magnitud son de 51.1, 42.2 y 6.6 por ciento respectivamente, observándose un aumento representativo en el peso de las erupciones pequeñas conduciendo a su vez a la disminución del peso de las erupciones medianas. Por su parte la intensidad presentó un peso de 53.3 por ciento para las erupciones pequeñas y 46.6 por ciento en las erupciones grandes

Una vez obtenida esta información, para el análisis de las erupciones de Galeras se procedió a clasificar los eventos recientes, debido a que estos son los que poseen mayor precisión en los datos recolectados, tal y como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13. *Clasificación de los eventos recientes del volcán Galeras*

Fecha del Evento				Tamaño del evento	
Día	Mes	Año	Hora	Clasificación por altura de columna	Clasificación por magnitud del evento
16	7	1992	16:40:00	Pequeño	Pequeño
14	1	1993	13:41:00	Pequeño	Pequeño
4	4	1993	16:03:00	Pequeño	Pequeño
13	4	1993	03:21:00	Pequeño	Pequeño
7	6	1993	03:42:00	Pequeño	Pequeño
21	3	2000	--	Pequeño	Pequeño
7	6	2002	--	Pequeño	Pequeño
16	7	2004	--	Pequeño	Pequeño
21	7	2004	--	Pequeño	Pequeño
11, 12	8	2004	23:49:00	Grande	Pequeño
11	10	2004	--	Pequeño	Pequeño
21	11	2004	15:44:00	Grande	Pequeño
24	11	2005	02:46:00	Pequeño	Pequeño
8	7	2006	16:48:00	Pequeño	Pequeño
12	7	2006	10:58:00	Grande	Pequeño
4	10	2007	--	Grande	Mediano
17	1	2008	20:06:00	Grande	Pequeño
14	2	2009	19:10:00	Pequeño	Pequeño
20	2	2009	07:04:00	Grande	Mediano
13	3	2009	15:55:00	Pequeño	Pequeño

24	4	2009	07:32:00	Pequeño	Pequeño
29	4	2009	10:15:00	Pequeño	Pequeño
7, 8	6	2009	06:38:00	Grande	Mediano
30	9	2009	09:14:00	Grande	Mediano
20	11	2009	20:37:00	Grande	Pequeño
2	1	2010	19:43:00	Grande	Mediano
25	8	2010	04:00:00	Pequeño	Pequeño

2.2.5.2. Obtención, procesamiento y estudio de los datos de vientos del área de influencia de Galeras

Uno de los factores más importantes al momento de evaluar la dispersión de ceniza consiste en conocer la configuración de los vientos de la zona, debido a que de estos depende en gran medida la dirección y el alcance de las partículas (Jenkins et al., 2015).

El Centro Europeo de Previsiones a Mediano Plazo (o ECMWF por sus siglas en inglés) ofrece un catálogo de información meteorológica a nivel mundial con una resolución hasta de 0.125 grados de latitud-longitud (aproximadamente 13 kilómetros) ordenados en una malla ordenada de datos procesados a través de la técnica de re análisis ERA-Interim (Dee et al., 2011). Para el presente estudio se obtuvo un perfil de 20 años correspondientes a la más reciente fase eruptiva de Galeras (1993-2012) con datos cada 6 horas de los vientos sobre uno de los puntos de información más cercanos al cráter del volcán tal y como se observa en la Figura 42.

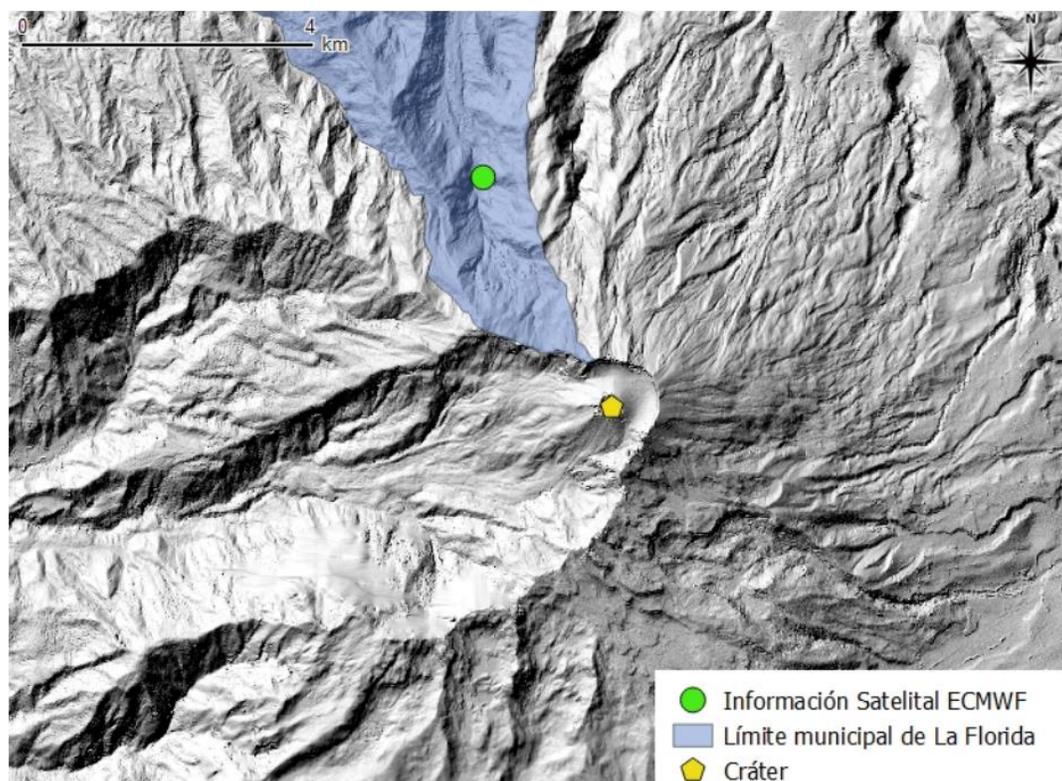


Figura 42. Ubicación del punto de toma de datos de reanálisis (modelos integrados con datos satelitales).

El perfil obtenido posee la información de vientos en diferentes niveles de presión atmosférica que corresponden a altitudes desde los 2.800 m.s.n.m. hasta los 40.000 m.s.n.m. divididos en un total de 37 niveles de presión.

Con el fin de evaluar la tendencia de los vientos se realizó un análisis de los datos en 3 diferentes altitudes: 5.000, 10.000 y 15.000 m.s.n.m. debido a que estas corresponden a las altitudes aproximadas del cráter del volcán y las alturas medias de columnas pequeñas y grandes respectivamente. Para esto fue necesario procesar los datos de re-análisis (modelos integrados con datos de satelitales) obtenidos anteriormente por medio de rutinas desarrolladas para este estudio bajo el lenguaje de programación GNU Octave, para que posteriormente pudieran ser leídos y graficados en el software WRPLOT. WRPLOT es un programa computacional que permite analizar y graficar la tendencia de la dirección y la velocidad de los vientos de una zona (Hamann, 2018). La Figura 43 muestra 3 imágenes correspondientes a las rosas de los vientos en cada uno de los niveles de altitud mencionados anteriormente. La primera gráfica muestra una tendencia de

los vientos hacia la dirección Norte y con velocidades entre 0.3 y más de 11 m/s con gran predominancia en las altas velocidades. La segunda rosa de los vientos muestra el comportamiento de los vientos en dirección Norte-Este con mayor incidencia en la dirección Norte y con velocidades incluso sobre los 11 m/s. Finalmente hacía los 15.000 m.s.n.m. las direcciones se dividen tanto en la dirección Norte como en la dirección Noreste del flanco del volcán y las velocidades varían entre 0.3 y más de 11 m/s.

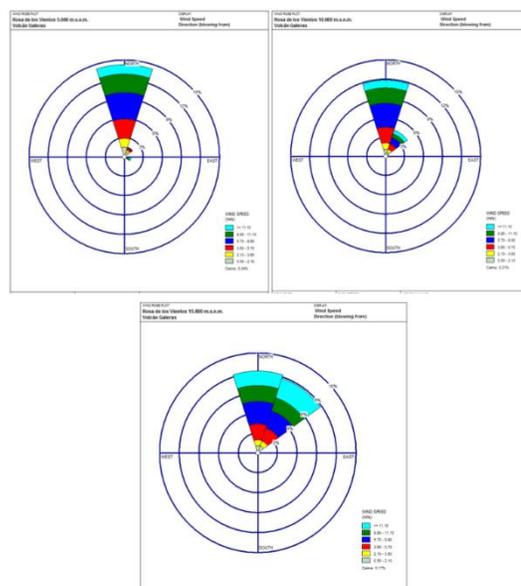


Figura 43. Rosa de los vientos del sector de Barranco en el volcán Galeras para altitudes de 5.000, 10.000 y 15.000 m.s.n.m.

Una vez analizada esta información, se procedió al procesamiento de los datos de viento en todos los niveles de presión atmosférica, para lo cual se desarrollaron rutinas en Octave que permitieran convertir los datos obtenidos del ECMWF al formato winds.dat tal y como lo requiere el presente estudio de las amenazas.

2.2.5.3. Reconstrucción de las condiciones iniciales de las erupciones mediante el programa PARFIT

PARFIT es un código que permite la estimación de las condiciones de inicio de una erupción a través de la información del depósito de caída. PARFIT está diseñado para reconstruir los datos de depósitos de ceniza y la granulometría necesarios para correr el modelo HAZMAP (Macedonio & Costa, 2014). Para su funcionamiento, el programa requiere conocer el espesor del

depósito de caída en diferentes secciones estratigráficas, la distribución de la granulometría y la configuración de los vientos de una hora cercana al evento.

Por medio del estudio de las erupciones se definió un total de 9 eventos del periodo eruptivo comprendido entre 2004 y 2010 (Tabla 14) que lograran abarcar las clasificaciones anteriormente descritas y que además contaran con información detallada de la erupción obtenida por el Servicio Geológico Colombiano.

Posteriormente se solicitó al Servicio Geológico Colombiano (SGC) los datos correspondientes a la estimación de las isópacas de los eventos elegidos.

Una vez obtenida la información y haciendo uso de los datos anteriormente consignados, se procedió a realizar la reconstrucción de las columnas eruptivas de cada uno de los nueve eventos por medio de PARFIT y teniendo en cuenta el perfil de vientos más cercano a la hora de la erupción.

Finalmente se evaluó la información obtenida mediante PARFIT con los datos brindados por el SGC con el fin de medir la correlación entre los datos obtenidos mediante el software y los datos medidos como se observa en la Figura 44.

Tabla 14. *Principales eventos eruptivos de Galeras del periodo 2004-2010*

Fecha del Evento				Tamaño del Evento		
Día	Mes	Año	Hora	Clasificación por altura de columna	Clasificación por magnitud del evento	
11	8	2004	23:49:00	Grande	Mediano	
12	7	2006	10:58:00	Grande	Pequeño	
17	1	2008	20:06:00	Grande	Mediano	
20	2	2009	07:04:00	Grande	Mediano	
24	4	2009	07:32:00	Pequeño	Mediano	
8	6	2009	06:38:00	Grande	Mediano	
30	9	2009	09:14:00	Grande	Mediano	
20	11	2009	20:37:00	Grande	Pequeño	
2	1	2010	19:43:00	Grande	Mediano	
2	1	2010	19:43:00	Grande	Mediano	

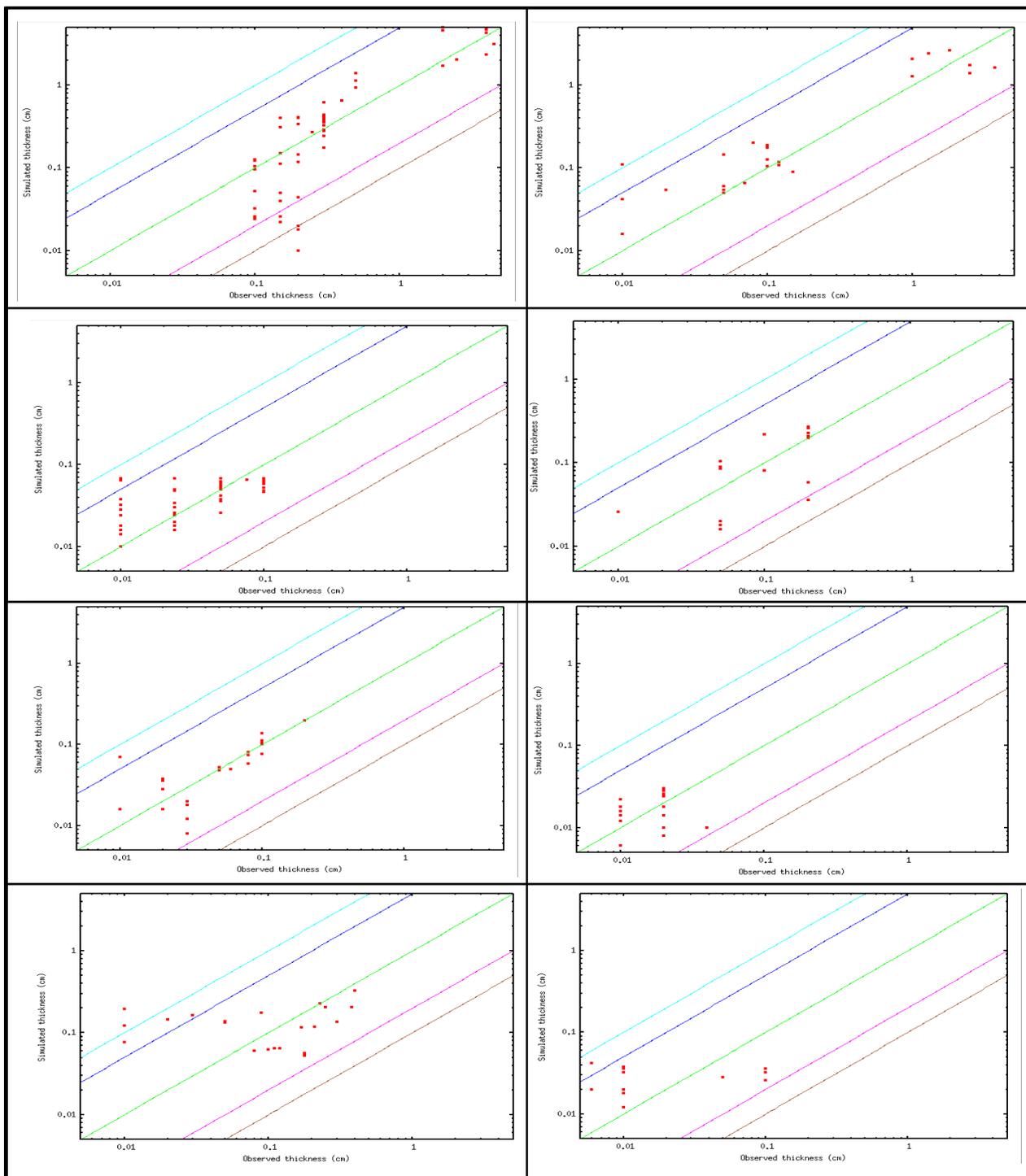


Figura 44. Relación entre los espesores obtenidos con PARFIT y los espesores medidos por el SGC las figuras corresponden a las diferentes erupciones de Galeras en el periodo 2004 – 2009 a) 11 de Agosto de 2004, b) 12 de Julio de 2006, c) 17 de Enero de 2

La Figura 44 muestra la relación entre los espesores extractos de la isópacas observados estimadas (eje x) y los espesores simulados mediante PARFIT (eje y), de manera que entre más cerca se encuentren los datos de la línea verde central mayor es la relación entre estos.

Debido a la calidad de la información y a la clasificación del tipo de erupción por magnitud y altura de columna, se decidió trabajar con la información correspondiente a los eventos eruptivos de 24 de abril de 2009 (Figura 44e), 30 de septiembre de 2009 (Figura 44g) con el fin de obtener un escenario que represente los eventos eruptivos de magnitudes pequeña y mediana. De igual manera se tuvo en cuenta la información de masa y altura de columna del evento del 21 de noviembre de 1925 estimada del SGC con el objetivo de obtener la información de una erupción de gran envergadura.

2.2.5.4. Modelamiento de la amenaza probabilística por dispersión de ceniza mediante software HAZMAP

HAZMAP es un modelo computacional para la simulación de la dispersión de partículas volcánicas desde una fuente concreta. HAZMAP es capaz de generar un modelo de depósito o la probabilidad de la acumulación específica dada a través de un umbral indicado por el usuario y con base en la información de vientos de varios días (Macedonio & Costa, 2016).

Para su funcionamiento HAZMAP requiere de una serie de parámetros que deben ser ingresados por el usuario entre los que se destacan los siguientes:

- Información de la columna eruptiva como la altura de columna y la masa total de la erupción.
- Las clases de partículas donde cada una de ellas debe contener su diámetro, densidad y forma.
- En caso de que se trabaje en modo de probabilidad se debe ingresar él o los umbrales correspondientes.
- Información de vientos sobre diferentes niveles de presión atmosférica.

La obtención de estos datos requirió tanto el estudio detallado que se realizó a través de herramientas computacionales (PARFIT), como el análisis de la información histórica de Galeras y los datos de vientos de la región obtenidos del ECMWF y procesados.

La granulometría se obtuvo a partir de la caracterización de erupciones de volcanes análogos y con base en el estudio de Costa et al (2016), procediendo con el método de ensayo y error donde se tuvo en cuenta tanto los porcentajes de partículas finas y gruesas como la participación del agregado conformado gracias a la cohesión de las partículas finas (Costa et al., 2010; Mastín et al., 2016).

Utilizando el modo probabilístico de HAZMAP y el perfil de vientos de los 29 años (1988-2016) se realizó el modelamiento de tres escenarios de diferente clasificación de magnitud que corresponden a las fechas de 24 de abril de 2009 para un escenario pequeño, 30 de septiembre de 2009 para un escenario de mediana magnitud y finalmente la erupción del 21 de noviembre de 1925 representaría los eventos de gran magnitud.

Para el modelamiento de la dispersión de ceniza se hizo uso del perfil completo de vientos obtenidos de la ECMWF con el fin de trabajar sobre el modo probabilístico de HAZMAP. La definición de los umbrales para el cálculo de las probabilidades correspondientes se determinó con base en la información necesaria para el estudio de vulnerabilidad, el cual determinó como importantes las cargas de 0.5, 1, 5, 10 y 50 kg/m² que corresponden aproximativamente a los espesores de 0.1, 0.2, 1-2, 2-4 y 10-20 centímetros de depósito, según su densidad. Cada una de estas cargas fue modelada en los cuatro escenarios elegidos para el modelamiento en el anterior título de este estudio, obteniendo un total de 20 mapas de distribución de probabilidades donde cada uno de los eventos modelados posee una distribución de probabilidades para cada carga elegida.

Una vez obtenidos los mapas, éstos se dividieron por eventos con el fin de multiplicar cada uno de los mapas obtenidos por el peso correspondiente calculado con base en la magnitud y altura de columna de la erupción, con el fin de ajustar las probabilidades de caída a las condiciones de la historia eruptiva de Galeras.

Los mapas de probabilidades para cada carga fueron obtenidos calculando la máxima probabilidad obtenida en cada punto en los diferentes escenarios modelados y previamente ajustados mediante su peso. Se obtuvo entonces distribuciones de probabilidad de caída para cada una de las cargas mencionadas anteriormente, generando cinco resultados tal y como se muestra a continuación.

2.2.5.5. Resultados

El presente estudio dio como resultados diferentes distribuciones de probabilidad de caída de material a lo largo del municipio para cada una de las cargas especificadas: 0.5, 1, 5, 10 y 50 kg/m².

En la distribución de probabilidad de caída de 0.5 kg/m² (correspondiente a un espesor de depósito de ceniza entre 0.1 cm y 0.2 cm) se puede observar que la parte alta de Barranco es la que posee mayor incidencia de la amenaza con probabilidades cercanas al 100%, el sector de Zaragoza y la cabecera municipal se mantiene entre el 60 y 40 por ciento mientras que la zona norte del municipio presenta probabilidades menores o iguales al 10 % tal y como se observa en la Figura 45.

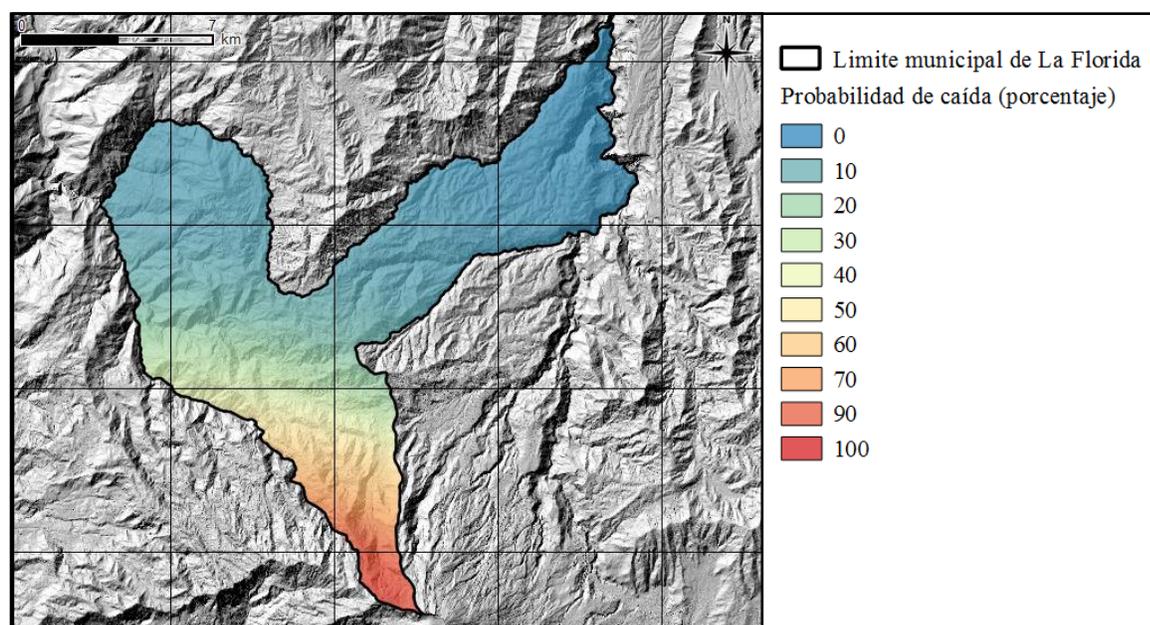


Figura 45. Distribución de probabilidad de caída de 0.5 kg/m².

La probabilidad de caída para 1 kg/m^2 (2 a 4 milímetros de depósito) se encuentra entre valores máximos cercanos al 70% concentrados en la zona sur del municipio correspondiente a la parte alta de Barranco, en la zona urbana y el resto de la zona norte del municipio se concentran probabilidades menores al 30% tal y como se observa en la Figura 46.

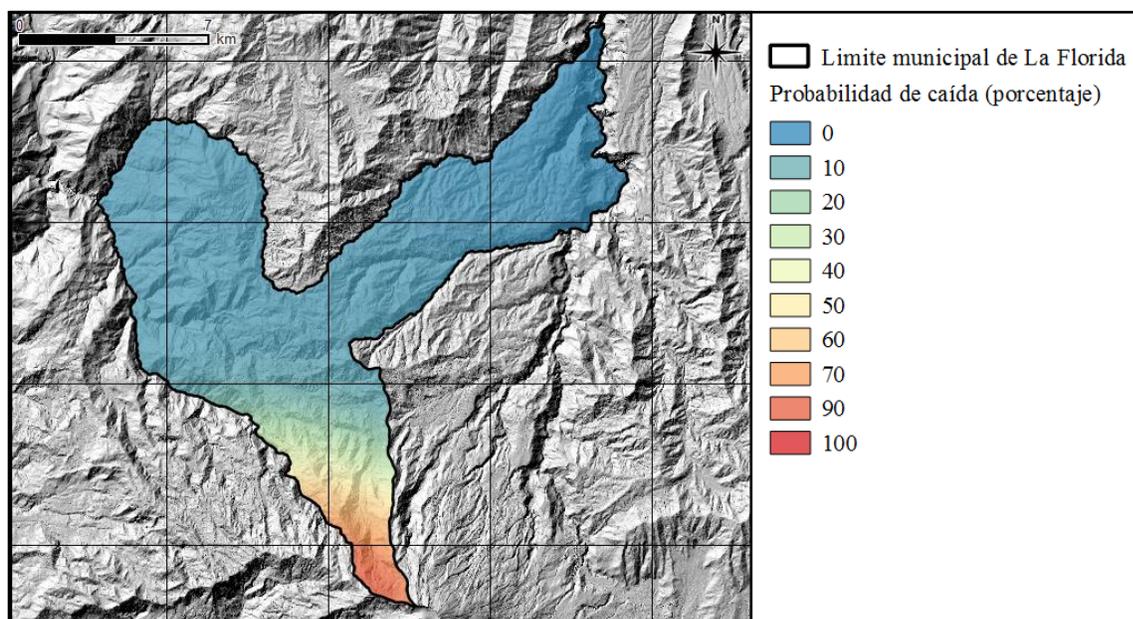


Figura 46. Distribución de probabilidad de caída de 1 kg/m^2 .

La probabilidad de caída para 5 kg/m^2 (aproximadamente 1 o 2 centímetros de depósito) posee máximos cercanos al 10% concentrados en la zona sur del municipio correspondiente a la parte alta de Barranco, la zona urbana aparece con probabilidades de aproximadamente 5 % y en el resto de la zona norte del municipio se concentran probabilidades menores al 3 % tal y como se observa en la Figura 47.

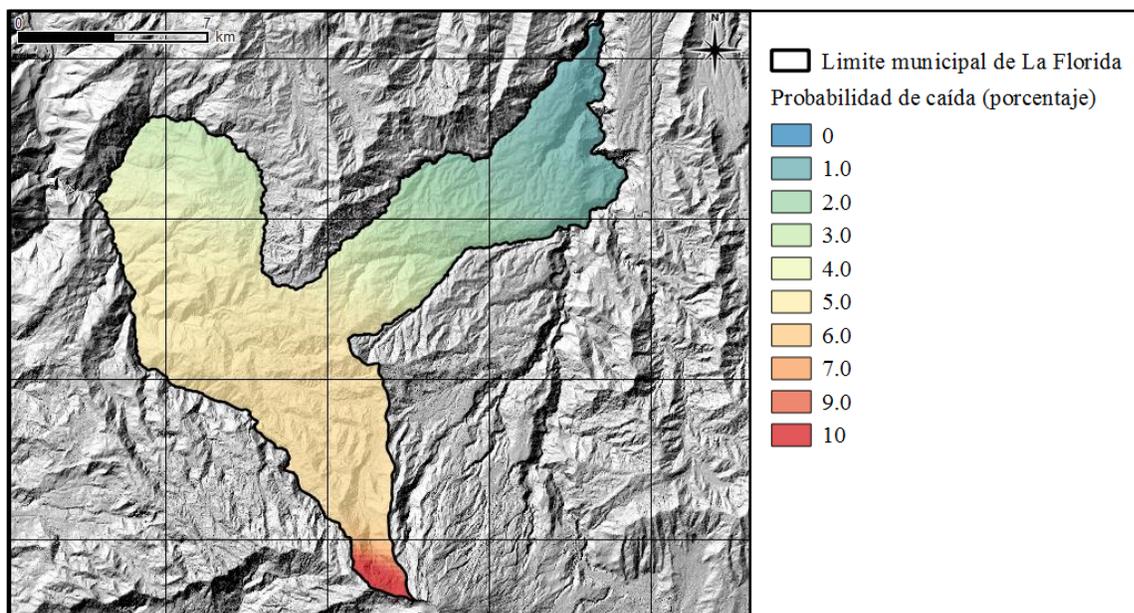


Figura 47. Distribución de probabilidad de caída de 5 kg/m².

El comportamiento de la probabilidad de caída de 10 kg/m² o 2 centímetros de depósito es muy similar a la anterior carga, donde los máximos no superan al 7 % y se encuentran concentrados en la parte alta de Barranco. Sin embargo, hacia la cabecera municipal los valores se mantienen en menos del 5 % y la zona norte del municipio posee valores cercanos o menores al 1 % como se muestra en la Figura 48.

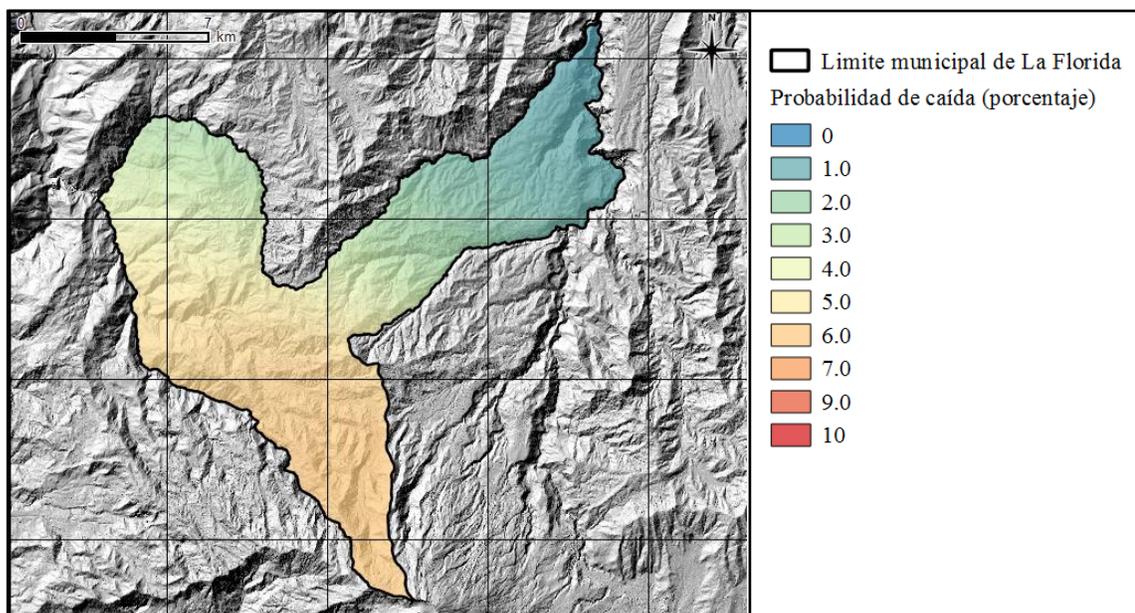


Figura 48. Distribución de probabilidad de caída de 10 kg/m².

Finalmente, la Figura 49 muestra la distribución de probabilidad de caída de carga de 50 kg/m² e indica valores máximos cercanos al 6 por ciento concentrados en la parte alta de Barranco, mientras que el casco urbano y el resto del municipio poseen probabilidades menores al 5 %.

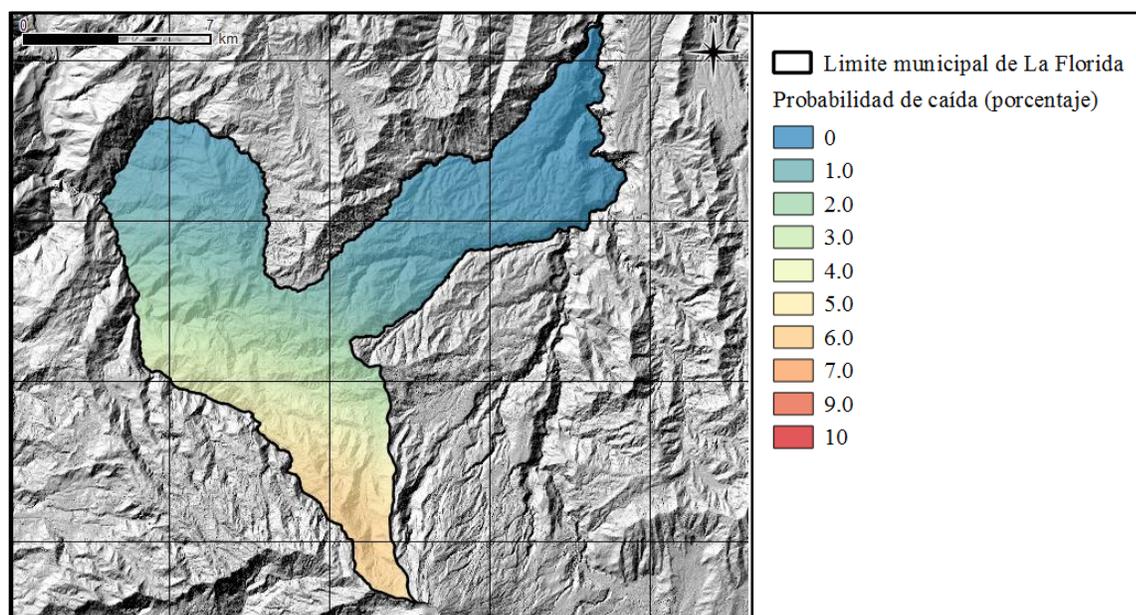


Figura 49. Distribución de probabilidad de caída de 50 kg/m².

2.2.5.6. Zonificación de la amenaza por caída de ceniza en el municipio de La Florida, Nariño

Como parte del estudio, se hace necesario presentar la información obtenida en un solo mapa que permita definir tres sectores especiales donde la amenaza se divide en tres componentes: amenaza alta, amenaza media y amenaza baja; adicionalmente, se definió un sector adicional de amenaza muy baja dentro del municipio. La zonificación de la amenaza por caída de ceniza y lapilli en el municipio de la Florida se hizo teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- La zona de amenaza muy baja corresponde a lugares con probabilidad menor al 5% de caída de al menos 1 kg/m².
- La zona de amenaza baja corresponde a lugares con probabilidad mayor al 5% de caída de al menos 1 kg/m².
- La zona de amenaza media corresponde a lugares con probabilidad mayor al 5% de caída de al menos 10 kg/m².
- La zona de amenaza alta corresponde a lugares con probabilidad mayor al 5% de caída de al menos 50 kg/m².

Obteniéndose así una zonificación tal y como se observa en la Figura 50 donde el color rojo determina las zonas en amenaza alta, el anaranjado delimita la zona de amenaza media y los colores amarillos (fuerte y pastel) hacen referencia a las zonas de amenaza baja y muy baja respectivamente.

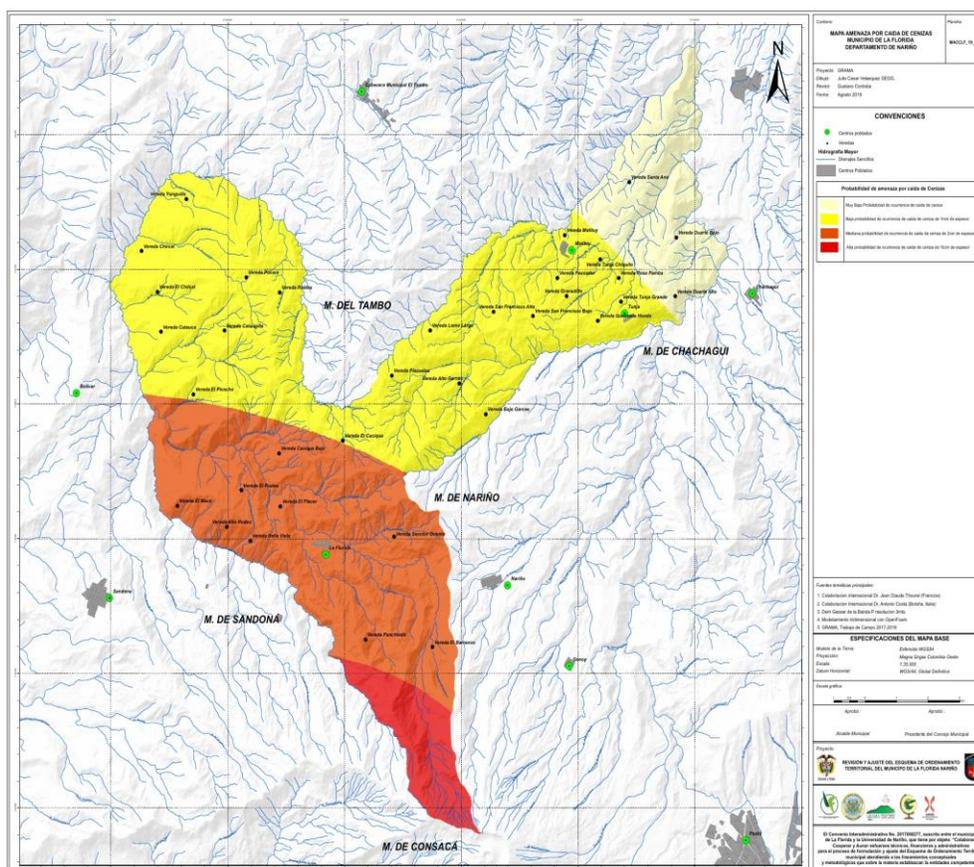


Figura 50. Zonificación de la amenaza por caída de material volcánico en el municipio de La Florida.

2.3. Compilación de la amenaza volcánica

En virtud de la necesidad de cumplir con la exigencia del Decreto 1077 del 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, se procede a zonificar las amenazas compilándolas en un solo mapa, a pesar que las decisiones de reducción del riesgo que se toman en este esquema son basadas en Riesgo y no en Amenaza. Aclarando que tras realizar el análisis probabilístico de cada una de las amenazas volcánicas del volcán Galeras, se obtuvo una distribución probabilística

de las mismas para diferentes niveles de intensidad, información a partir de la cual se obtiene el riesgo específico y total.

La metodología planteada por Hurtado y Cortéz (1997) para la zonificación de la amenaza volcánica de la Tercera Versión del Mapa de Amenazas del Galeras, llega a tal objetivo a partir del análisis probabilístico de un conjunto de amenazas (flujos piroclásticos, caídas piroclásticas y lahares) seguido de una ponderación de cada una de ellas con su severidad (Tabla 15). Sin embargo, ya que en este estudio en el Análisis del Riesgo del EOT del Municipio de La Florida se logra estimar probabilidades para cada intensidad de cada una de las amenazas estudiadas, la severidad ponderada se subdivide dependiendo de dichas intensidades, en particular para los casos de Corrientes Piroclásticas de Densidad (CDPs), Onda de Choque, Lahares y Caídas Piroclásticas. Para el caso de Flujos Piroclásticos y Proyectiles Balísticos se asume una severidad 5 (ver Tabla 16).

Tabla 15. *Tabla de severidades usada en la zonificación de la amenaza volcánica de la Tercera Versión del Mapa de Amenazas del volcán Galeras.*

Tipo de daño	Severidad
Destrucción total sin posibilidad de supervivencia	5
Pequeña posibilidad de supervivencia	4
Destrucción de propiedad, posibilidad de supervivencia	3
Daño total a cultivos, daño parcial en propiedades y personas, viviendas, agricultura, puentes.	2
Daño parcial sin peligro para las personas	1

Fuente: Modificada de Hurtado y Cortéz (1997)

La Tabla 16 muestra las severidades que se aplican en este trabajo para cada amenaza volcánica de Galeras y para sus intensidades respectivas, donde se ha asumido que si el evento es capaz de destruir totalmente un elemento (en el sentido de daños no reparables, conducentes a reemplazo total) su Severidad es 5, como es el caso de CPDs donde tanto para la parte basal como para la nube acompañante, se asume Severidad 5.

Tabla 16. *Severidades por amenaza e intensidad*

Amenaza	Intensidad	Severidad
Corrientes Piroclásticas de Densidad	-	5
Proyectiles Balísticos	-	5
Caídas Piroclásticas	> 10 cm	3
	< 10 cm	2
Onda de choque Impacto por lahares	> 80 kPa	5
	30 – 80 kPa	4
	10 -/ 30 kPa	3
	1 – 10 kPa	2
	< 1 kPa	1
Enterramiento por lahares	> 1.5 m	5
	1 – 1.5 m	4
	0.5 – 1 m	3
	< 0.5	2

Continuando con la metodología aplicada por el entonces Ingeominas, se procede a calcular las severidades ponderadas parciales y totales, de acuerdo con la metodología usada por Hurtado y Cortéz (1997):

$$WS_i = S_i \times P_i \quad (\text{Ecuación 21})$$

$$WS_T = 100 \frac{WS_i}{\sum WS_i} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde S_i es la severidad respectiva, P_i la probabilidad, WS_i la severidad ponderada parcial y WS_T la severidad ponderada total.

La severidad ponderada de cada amenaza y cada intensidad se hizo en este estudio con la

Ecuación 22 usando la herramienta GRASS_GIS con álgebra de mapas; obteniéndose el mapa de severidades ponderadas para cada intensidad a partir de la multiplicación de cada severidad con la probabilidad de ocurrencia geográfica de esa intensidad. Es de notar que los eventos no son mutuamente excluyentes, por lo que la sumatoria de WS_i no puede dar 100%, aunque se puede normalizar el resultado a 100. Posteriormente se procedió a realizar envolventes de las severidades ponderadas para cada amenaza, para así encontrar la severidad ponderada total con la ecuación 22. La Figura 51 muestra la distribución de severidades ponderadas resultante; se aprecia que la cabecera de la cuenca del barranco tiene una severidad ponderada mayor que 50%, mientras que en la parte alta de esta cuenca esta severidad es en su mayoría mayor que 20; además se visualiza que gran parte del cauce del río Barranco también tiene severidades ponderadas mayores que 20.

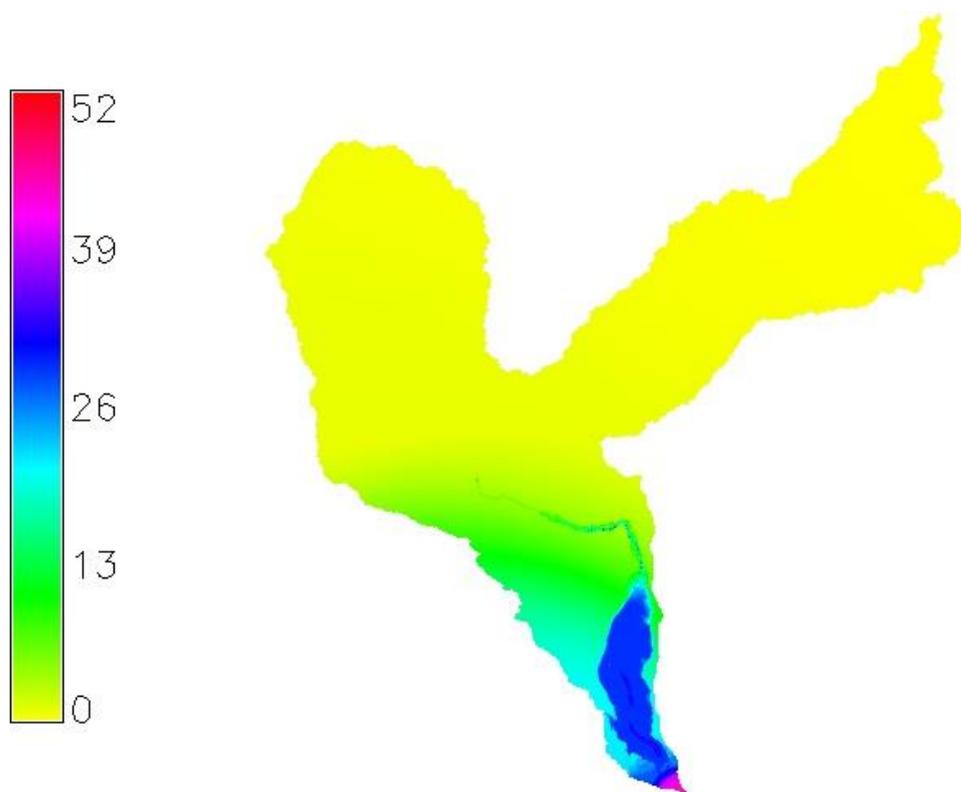


Figura 51. Distribución de severidades ponderadas en el municipio de La Florida, para todas las amenazas volcánicas de Galeras. El borde calderico se encuentra en la parte inferior de la figura (Severidad Ponderada mayor que 50).

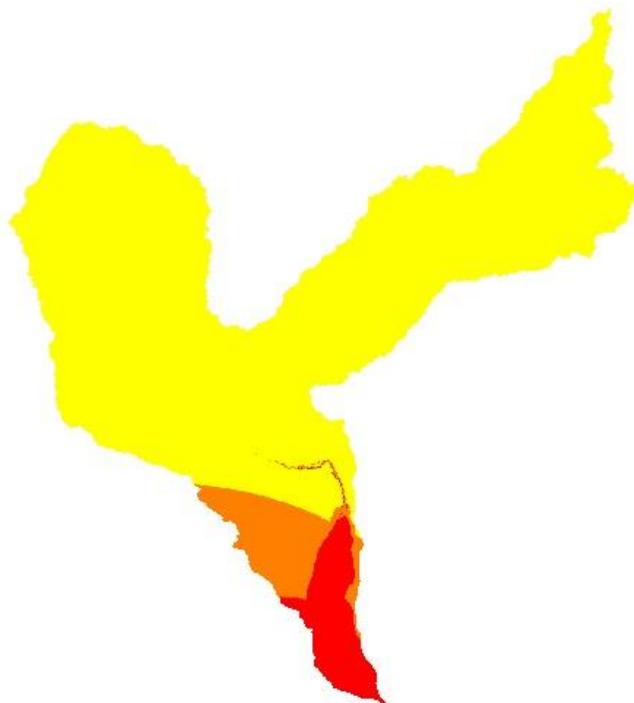


Figura 52. Clasificación de todas las amenazas del volcán Galeras de acuerdo con su severidad ponderada (SP). Rojo: $SP > 20$. Anaranjado: $10 < SP < 20$. Amarillo: $SP < 10$.

En la metodología aplicada por Ingeominas para el desarrollo de la Tercera Versión del Mapa de Amenazas de Galeras (Hurtado y Cortéz, 1997), la zonificación se hace dividiendo en tres zonas: Amenaza Alta, si $WS_T > 20$; Amenaza Media, si $20 < WS_T < 10$; y Amenaza Baja si $WS_T < 10$. Siguiendo esa idea y acorde con las exigencias del Decreto 1077 relacionado con una clasificación en tres zonas, en este estudio se unifican todas las amenazas, a saber: Onda de Choque, Caídas Piroclásticas, Corrientes Piroclásticas de Densidad, proyectiles Balísticos, Impacto por Lahares y Enterramiento por Lahares. La Figura 53 muestra esta compilación de amenazas clasificadas por su severidad ponderada en todo el municipio., mientras que la figura 49, muestra un detalle de estas severidades ponderadas en la zona del Barranco, donde se comprueba que gran parte del cauce del río Barranco se encuentra con una Severidad Ponderada mayor que 20.

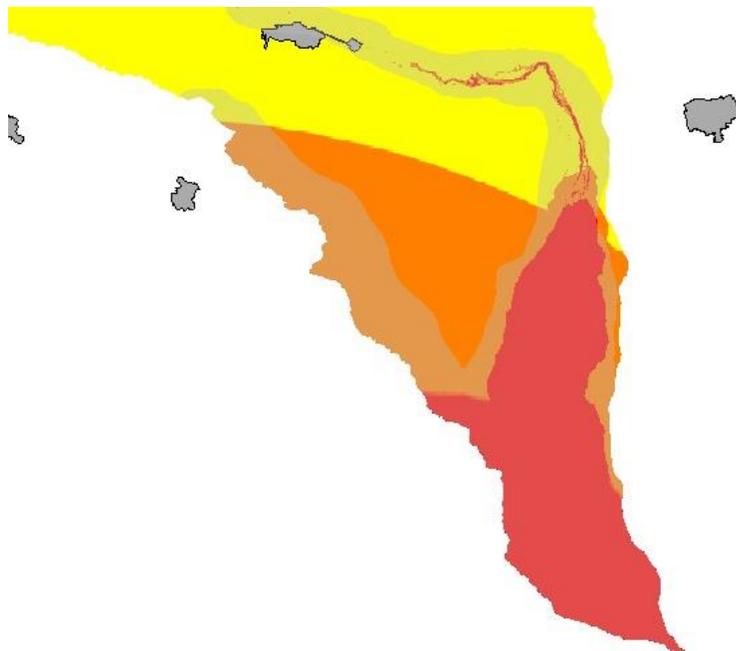


Figura 53. Detalle del estudio a alta resolución de la distribución de Severidades Ponderadas (SP). Rojo: $SP > 20$. Anaranjado: $10 < SP < 20$. Amarillo $SP < 10$. El sombreado corresponde a la Zona de Amenaza Alta del SGC, a escala 1:30.000. En gris oscuro el casco urbano de La Florida.

2.4. Definición de vulnerabilidad estructural

Como elemento constituyente del análisis y cuantificación del riesgo volcánico se encuentra la evaluación y caracterización de los elementos expuestos ante los fenómenos naturales. En el presente estudio, con el ánimo de contribuir a la evaluación del riesgo para fenómenos asociados a la actividad volcánica en el municipio de la Florida, se realizó una evaluación de 3958 elementos estructurales (es de notar que aquí se refiere a elementos estructurales y no a casas, ya que una casa puede estar construida de manera compleja, mostrando varios de lo que aquí se ha llamado elementos estructurales), sobre los cuales fue posible analizar su nivel de susceptibilidad ante la llegada de fenómenos de actividad volcánica como: Caída de ceniza, onda de choque, lahares (enterramiento e impacto).

Teniendo en cuenta que el municipio de la Florida no contaba con una base de datos que permitiera conocer estas características, a continuación se presenta el desarrollo del trabajo de campo y una herramienta que facilitó dicha toma de datos. De igual forma son presentados los fundamentos científicos para la caracterización de estos elementos expuestos y finalmente, se

presenta el comportamiento esperado de los elementos estructurales a distintos niveles de intensidad para cada uno de los fenómenos volcánicos evaluados.

Lo anterior teniendo en cuenta el Decreto 1807 de 2014 el cual establece las siguientes etapas generales en el desarrollo del estudio de vulnerabilidad:

1. Identificación y localización de los elementos expuestos.
2. Caracterización de los elementos expuestos: tipología, exposición y resistencia.
3. Tipos de daño o efectos esperados como resultado de los escenarios de vulnerabilidad.

2.4.1. Definición de vulnerabilidad

La ley 1523 del 2012 en su Artículo 4, en el punto 27 define vulnerabilidad como

Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. (Congreso de Colombia, 2012, p.10)

De manera similar, es entendida como la predisposición o susceptibilidad de un elemento o sistema a ser afectado o dañado, como resultado de un impacto de amenazas naturales (Ettinger et al., 2016; Thywissen, 2006), notando que estas definiciones son recogidas por el Marco de Sendai en su Guía Nacional para el Análisis del Riesgo (UNISDR, 2017).

Estimar la vulnerabilidad ante peligros de origen volcánico es complejo (Ettinger et al., 2016; Ortiz, 1996; Thouret et al., 2014) debido entre otros a que cada fenómeno amenazante se origina bajo características particulares y a que, para distintos niveles de intensidad del mismo se

tienen diversos efectos sobre los elementos expuestos en el área de afectación. (ver Gaume et al., 2009, para detalles).

Sin embargo, se puede cuantificar la vulnerabilidad como la relación entre el costo de reparar un elemento afectado y el costo de reemplazar dicho elemento como se muestra en la Ecuación 23 (UNDRO, 1990).

$$V = \frac{\text{Costo de reparar}}{\text{Costo de reemplazar}} \text{ (Ecuación 23)}$$

Donde el costo de reparar es el valor que conlleva restaurar el elemento y el costo de reemplazar equivale al valor del elemento nuevo, por lo tanto, la vulnerabilidad (V) de un elemento se expresa entre valores de 0 a 1.

2.4.2. Identificación, caracterización y localización de elementos expuestos

Los elementos expuestos incluyen los elementos físicos (bienes e infraestructura), así como también los servicios ambientales, recursos sociales, económicos y de importancia, que al estar localizados en una zona de amenaza pueden ser potencialmente afectados en caso de que ésta ocurra (Servicio Geológico Colombiano, 2015; UNISDR, 2009), tal como lo estipula la Ley 1523 del 2012. En el presente trabajo se realizó la valoración de elementos físicos de manera cuantitativa para el posterior análisis de riesgo ante los distintos fenómenos volcánicos de Galeras; a saber, caída de tefra, onda de choque, impacto por lahares, enterramiento por lahares y corrientes piroclásticas de densidad (CPD).

El área de estudio depende de la zona de afectación de la amenaza potencial (Servicio Geológico Colombiano, 2015); en el caso del Municipio de la Florida se tiene que los fenómenos de onda de choque y caída de ceniza pueden cubrir toda el área del municipio, en cambio para los fenómenos de lahares y CPDs la zona evaluada abarca desde la parte alta del sector barranco hasta la cabecera municipal de la Florida. Por lo tanto, tenemos dos zonas o escenarios de exposición: el sector barranco-cabecera municipal y todo el municipio de la Florida.

Con el objetivo de documentar la información que se obtiene del trabajo en campo para su posterior análisis, se elaboró un formulario donde se registran cada una de las características de viviendas que son consideradas pertinentes para el análisis de vulnerabilidad frente a los distintos fenómenos volcánicos evaluados en el municipio, así por ejemplo:

Las caídas piroclásticas afectan directamente los techos, por lo que se tienen en cuenta las características de la cubierta como el material de cobertura, el estado general entre otros. Para el caso de la onda de choque, el elemento más vulnerable son los vidrios de las ventanas, por lo cual es necesario conocer el porcentaje de aberturas (área, material y dimensión de ventanas), información obtenida de las fachadas de la vivienda. En cuanto a lahares, el daño proviene del impacto (presión dinámica) y la presión hidro y lito-estática, y los daños ocasionados por el enterramiento que ocasiona el depósito de sedimentos. Para vulnerabilidad ante impacto y presión hidro y lito-estática el cuestionario requiere información sobre la composición de la estructura, si presenta o no refuerzo, cual es el material de muros y el estado general de la vivienda. Finalmente, para el caso de enterramiento es importante conocer el porcentaje de oquedades en el primer piso de la vivienda, debido a que la presencia de estos vacíos facilita el ingreso de material del flujo.

Dada la amplitud del área de estudio y el tiempo requerido para el post procesamiento de información tomada en campo, se optó por implementar un aplicativo para Android que permita sistematizar la información de forma rápida y segura; para esto el Equipo EOT con el apoyo del Programa de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Nariño desarrolló el Aplicativo Móvil para Android CASSANDRA, en el cual los formularios diseñados frente a las amenazas señaladas son ingresados en un dispositivo o herramienta electrónica (celular o Tablet con sistema operativo Android), en él se georeferencian las viviendas y se almacena la información en archivos de texto plano (.txt), facilitando así su post-procesamiento, visualización y análisis en un sistema de información geográfico.

Con esta aplicación se lograron procesar más de 3500 elementos estructurales en el municipio de la Florida. Para aquellos lugares de la zona rural donde no se logró acceder a las viviendas, se utilizó la herramienta Google Earth para la ubicación de la vivienda y clasificación de techos, mientras que para la clasificación estructural se hizo observación a distancia (registro

fotográfico). A partir de esta información, se procedió a clasificar las casas en tipologías estructurales. En la tabla 17 se muestra algunos ejemplos de las tipologías presentes en algunas veredas del municipio, las cuales se definen de acuerdo a metodologías de evaluación de la vulnerabilidad de elementos estructurales en entornos volcánicos, como se detalla más adelante para cada uno de los fenómenos de actividad volcánica evaluados en Galeras.

Tabla 17. *Ejemplos de tipologías presentes en algunas veredas del municipio de La Florida*

Tipología 1: construcciones con techos en teja traslucida, teja zinc, teja de fibrocemento (eternit) y teja de policarbonato.

Vereda Bellavista	Vereda Carmelo	Vereda Catauca
		
		
Vereda Pescador Bajo	Vereda Picacho	Vereda Pucara

Tipología 2: construcciones con techos de teja de barro.

Vereda Bellavista	Vereda Chaupiloma	Vereda La joya
		
		



Se resalta que para el caso de estructuras como la mostrada en la imagen D, para caída de ceniza su tipología es 1, sin embargo, para lahares y onda de choque por la composición estructural se clasifica como tipología 2.

Con la implementación de la herramienta Google Earth y la comparación fotográfica, se obtiene información de aproximadamente 458 muestras adicionales de la parte rural del municipio. Se procede así a integrar estos datos con los ya almacenados en el aplicativo y se tiene finalmente la información de **3958** muestreos o elementos estructurales. Los elementos estructurales se definieron en función de las características físicas de los mismos (tipología estructural), ocurriendo en muchas ocasiones que un mismo predio presentaba edificaciones con características correspondientes a más de una tipología, por tal razón en estos casos fue tomado como elemento estructural independiente, teniendo entonces más de un elemento estructural por predio. Por lo

anterior el número de elementos estructurales no corresponde necesariamente a la cantidad de viviendas presentes en el municipio.

2.4.3. Marco conceptual para la caracterización de elementos estructurales

En esta sección se mencionan los estudios de vulnerabilidad que soportan el desarrollo y la construcción del formulario para toma de datos, acorde con cada elemento estructural identificado en el municipio de la Florida. Para ello a continuación se explica el daño generado por cada uno de los fenómenos volcánicos que se evaluaron en el volcán Galeras.

2.4.4. Caída de Tefra

Se denominan piroclastos a los materiales volcánicos sueltos expulsados en una erupción, los cuales se generan debido a la fragmentación del magma y de las rocas en las paredes del cráter y el conducto volcánico (Del Pozzo et al., 2017). Dichos fragmentos se depositan a diferentes distancias del cráter, según su tamaño, densidad y dirección del viento. Los fragmentos más pequeños conocidos como cenizas volcánicas pueden afectar grandes zonas cercanas al volcán. Entre sus efectos se tienen problemas de salud, contaminación de fuentes de agua, daños en cultivos, entre otros (Ver Behncke et al., 2012; Blong et al., 2017; Spence et al., 2005). Para grandes espesores del orden decimétrico pueden ocasionar el colapso de las cubiertas (Behncke et al., 2012; Blong et al., 2017), en especial si la ceniza se encuentra húmeda (Del Pozzo et al., 2017; Wilson et al., 2014, Blong, 1984).

El análisis de vulnerabilidad de las cubiertas del municipio de la Florida se realiza teniendo en cuenta antecedentes como los trabajos de Torres et al., (2017) y CORPOSSO (2009), a nivel regional, así como también diversos estudios a nivel internacional, como los abarcados por Spence et al. (2005) y Zuccaro et al. (2008).

En este trabajo se tiene en consideración principalmente la investigación de Torres et al. (2017) en la cual se establecen las relaciones de daño para distintos tipos de cubiertas en el área de influencia del volcán Galeras, basadas en su tipología, distancia entre apoyos y su estado. Del trabajo de campo realizado en el municipio de la Florida, se definieron 3 tipologías representativas (Tabla 18) las cuales pudieron ser adaptadas a las analizadas por Torres et al., (2017).

Tabla 18. *Tipologías definidas para el municipio de la Florida.*

Tipología	Descripción de Tipología
1	<p style="text-align: center;">LM_B_C</p> <p>LM (Liviana -Moderada) corresponde a los techos que tienen hojas de zinc, aluminio, cartón o similares con material acrílico o vidrio y aquellas que tienen tejas de asbesto-cemento o láminas predeterminadas en ciertas cerámicas. La estructura de cubierta puede ser en madera o metálica. Se considera en estado bueno (B) y luces cortas (C).</p>
2	<p style="text-align: center;">P_B_C</p> <p>P (cubierta pesada) para techos que tienen tejesones o tejas de barro; la estructura de soporte generalmente es en madera. A nivel general la estructura se encuentra en estado bueno y luz corta.</p>
3	<p style="text-align: center;">L_B_C</p> <p>L corresponde a Losas (macizas o aligeradas) soportadas directamente sobre muros o sistemas porticados. Estructura en estado bueno y luz corta.</p>

Adaptada de Torres et al., (2017)

Para estructuras de tipologías 2 y 3 en mal estado de conservación, por seguridad se las clasificó como la tipología inmediatamente inferior, puesto que su resistencia al nivel de sobrecarga es menor.

La función de vulnerabilidad para cada una de ellas, sigue la Ecuación 24 (Torres et al., 2017).

$$V = (1 - e^{-(\frac{y}{y_0})^\alpha \ln 0,5}) \text{ (Ecuación 24)}$$

En donde, V es el daño esperado para cierto nivel de intensidad (y); y_0 y α son parámetros específicos del sistema estructural, de tal forma que y_0 , es la intensidad que genera el 50 % de daño o pérdida esperada y α corresponde al factor de forma.

La Tabla 19 muestra los parámetros a usarse en la ecuación 24 para las tipologías definidas en el municipio de la Florida.

Tabla 19. *Parámetros de factor de forma (α), carga media (γ_0) y espesor medio (γ_0) para cada tipología*

Parámetro/Tipología	1	2	3
α	3	3	3
γ_0 (cm)	4	12	21
γ_0 (kPa)	0,5	1,5	2,67

Adaptada de Torres et al., (2017).

En la Figura 54 se presenta la distribución de las curvas de vulnerabilidad resultante de aplicar la Ecuación 24 para cada una de las tipologías, en función de su espesor (cm) y carga (kPa).

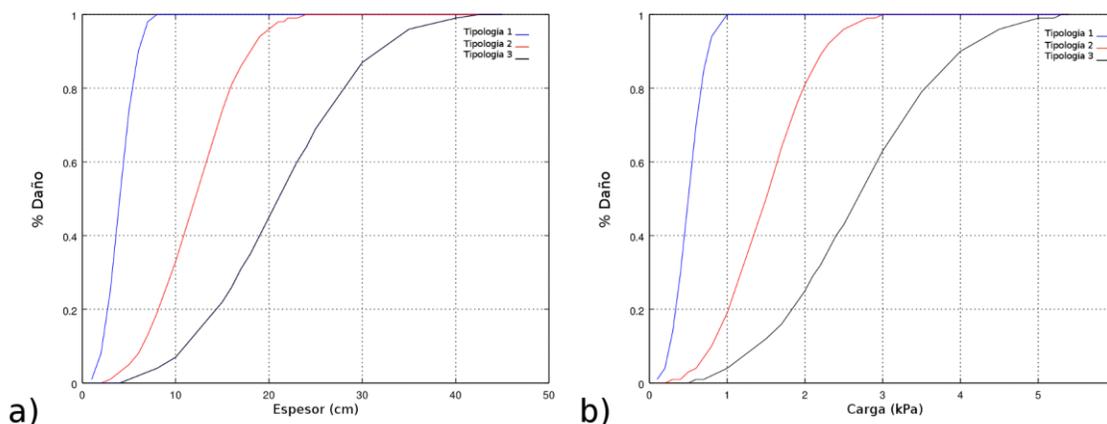


Figura 54. Distribución de porcentaje de daño de la cubierta en función a) del espesor de l ceniza, b) en función de la carga en kPa

Adicionalmente se debe tener en cuenta el impacto del daño de la cubierta sobre toda la vivienda, para ello Torres et al. (2017) presentan en su análisis una relación media del porcentaje de daño de la cubierta respecto a la edificación, el cual tiene en consideración la tipología, su estado de conservación y el número de pisos; acorde a esto, en este trabajo se define la relación media de porcentaje de daño correspondiente para cada una de las tipologías definidas para el municipio de la Florida, las cuales fueron adaptadas de Torres et al., (2017), asumiendo un estado de conservación regular para elementos estructurales de una sola planta, puesto que la mayoría de las viviendas del municipio poseen esta característica; por seguridad, se toma el valor del mayor porcentaje de esta relación en cada una de las tipologías. Finalmente en la Figura 55 se aprecia que el daño total de cubiertas de la Tipología 1 representa el 11% de la edificación; para la tipología 2 el porcentaje de daño de la cubierta respecto al total de la estructura es cercano al 35%; y en el caso de las losas (Tipología 3), dado que si bien es cierto ofrecen mayor resistencia a la sobrecarga, en caso de colapso, se generaría un daño de más del 75% de toda la edificación.

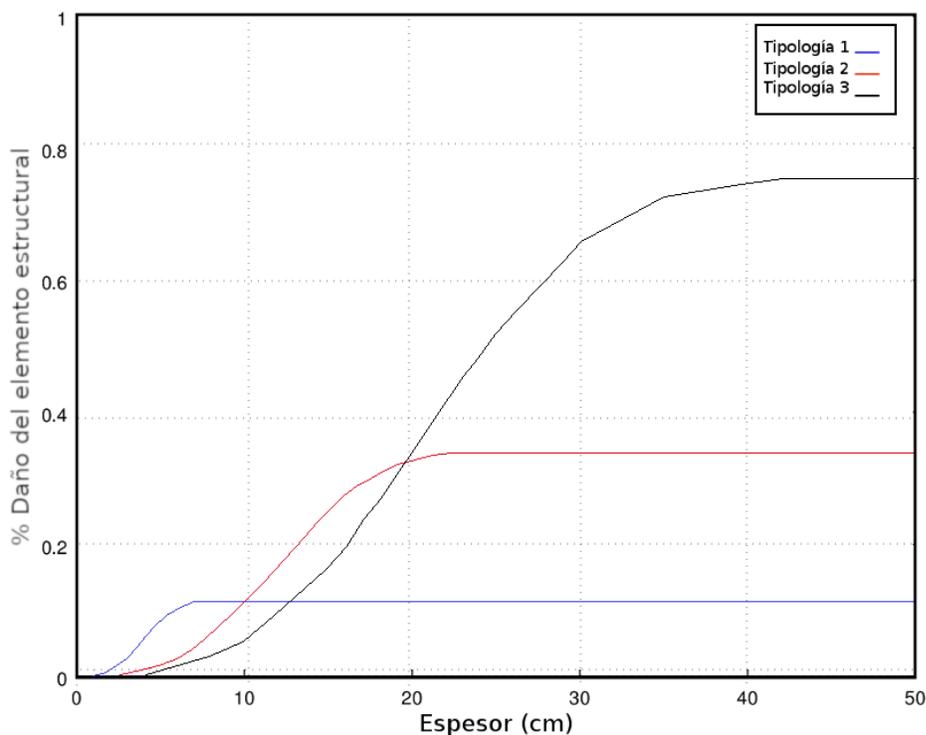


Figura 55. Porcentaje de daño del elemento estructural (cubiertas), en función de la carga de ceniza en centímetros, respecto a la estructura completa. Fuente Adaptada de Torres et al., (2017).

2.4.5. Onda de choque

Como se explica en la sección 2.2.3. Este tipo de fenómeno es una onda de presión que viaja a través del aire y se desplaza a grandes velocidades (Medici et al., 2013). Los daños ocasionados dependen en su mayoría de la cercanía a la fuente y la sobrepresión con la que se genere la explosión. Según Espinosa (1980), la capital del departamento de Nariño y algunos centros poblados que se encuentran alrededor del volcán Galeras han sufrido como mínimo daños en ventanas y apertura de puertas por este fenómeno.

Elementos como las ventanas, que generalmente se componen de un marco y una lámina u hoja de vidrio, se ven seriamente afectados ante esta amenaza, ya que debido a su baja resistencia pueden llegar a fragmentarse o incluso generar cortaduras o lesiones considerables en las personas y los animales (Fisher, 2008).

Investigaciones como las de Saito & Takayama (2005), Mercx et al. (1991) y Saito et al. (2001) relacionan niveles de sobrepresión y el daño esperado en elementos de estructuras como muros, techos y ventanas (presiones típicas de ruptura). Por otra parte, Pickering & Bockholt (1971) hacen una revisión exhaustiva de la literatura sobre el daño por explosiones nucleares a estructuras en entornos urbanos y presentan un conjunto de criterios de daño probabilístico para una serie de estructuras. Como resultado de esta investigación, estos autores presentan valores de sobrepresión con un 10%, 50 % y 90% de probabilidad de que una estructura dada falle (daño irreparable y colapso total).

Para la elaboración de las curvas de vulnerabilidad se requiere determinar el porcentaje de daño para cada sobrepresión, siendo el ciento por ciento el correspondiente a la destrucción total. En este trabajo se asume por seguridad que se presenta daño económicamente irreparable correspondiente al valor intermedio que proponen Pickering y Bockholt (1971) (50% de probabilidad de destrucción total).

Una vez determinado el porcentaje de daño, se procede a realizar la clasificación tipológica de las viviendas presentes en el municipio de la Florida para onda de choque. Se toma como

referencia además de la información proporcionada en los estudios de Pickering y Bockholt (1971) la investigación de Valentine (1998). Las características de estas tipologías se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. *Descripción de la Tipologías 1,2 y 3 encontradas en el sector de estudio*

Tipología	Descripción
1	Viviendas individuales, casas adosadas, apartamentos y hoteles con o sin sótano. Muros: Madera.
2	Mampostería no reforzada: Viviendas individuales, casas adosadas, apartamentos y hoteles con o sin sótanos. Muros: Ladrillo
3	Mampostería reforzada: Edificios comerciales, residenciales y oficinas. Muros: Ladrillo macizo, bloque de hormigón.

Modificado de Pickering y Bockholt (1971) y Valentine (1998).

Para tener en cuenta el deterioro que presentan en su estructura algunas construcciones catalogadas en un principio como tipologías 2 y 3, por seguridad se las clasifíco como la tipología inmediatamente inferior ya que su resistencia al impacto es menor.

Haciendo interpolación de los datos de Pickering & Bockholt (1971); Rodríguez, (2016), se obtuvo la función sigmoide (Caballero *et al.*, 2014), en la cual hay una progresión desde unos niveles bajos al inicio, un incremento en la parte intermedia hasta una desaceleración en la parte final; su representación gráfica tiene una típica forma de sigma. La expresión matemática de la función sigmoide se compone por cuatro partes y está dada por las siguientes ecuaciones según sea el caso.

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ c * \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & \text{si } 0 < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - d * \left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \text{si } \frac{a+b}{2} < x \leq 20 \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad \text{Ecuación 25}$$

Dónde:

x : es la variable independiente de la cual la función depende.

a y b : son parámetros que se ubican los extremos de la porción inclinada de la curva

c y d : coeficientes propios para cada función.

Para determinar las curvas de vulnerabilidad para cada una de las tipologías evaluadas, los coeficientes a y b se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. *Parámetros o coeficientes propios para cada tipología estructural ante Onda de Choque.*

Onda de Choque			
Parámetros	Tipología 1	Tipología 2	Tipología 3
a	0	0	0
b	20	30	30
<i>Pd</i>	<i>Presión Dinámica</i>		
<i>V</i>	<i>Vulnerabilidad</i>		

a es el valor inicial conocido de x y b corresponde al valor de sobrepresión donde la curva S se estabiliza, o se presenta daño total.

Fuente: modificada a partir de datos de Pickering & Bockholt, 1971; Rodríguez, 2016; Rodríguez et al., 2017.

A continuación se presenta para cada tipología el grupo de ecuaciones obtenidas de reemplazar los datos consignados en la tabla 5 en la ecuación (25).

Tipología 1:

$$V = \begin{cases} 0 & \text{si } Pd \leq a \\ 2,4 * \left(\frac{Pd-a}{b-a}\right)^2 & \text{si } 0 < Pd \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 1,6 * \left(\frac{Pd-b}{b-a}\right)^2 & \text{si } \frac{a+b}{2} < Pd \leq 20 \\ 1 & \text{si } Pd \geq b \end{cases} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Tipología 2:

$$V = \begin{cases} 0 & \text{si } Pd \leq a \\ 4,4 * \left(\frac{Pd-a}{b-a}\right)^2 & \text{si } 0 < Pd \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 1,15 * \left(\frac{Pd-b}{b-a}\right)^2 & \text{si } \frac{a+b}{2} < Pd \leq 30 \\ 1 & \text{si } Pd \geq b \end{cases} \quad (\text{Ecuación 27})$$

Tipología 3:

$$V = \begin{cases} 0 & \text{si } Pd \leq a \\ 3,0 * \left(\frac{Pd-a}{b-a}\right)^2 & \text{si } 0 < Pd \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 1,5 * \left(\frac{Pd-b}{b-a}\right)^2 & \text{si } \frac{a+b}{2} < Pd \leq 30 \\ 1 & \text{si } Pd \geq b \end{cases} \quad (\text{Ecuación 28})$$

La figura 56 muestra las curvas de vulnerabilidad para onda de choque para las 3 tipologías presentes en el municipio de la Florida, que se obtienen aplicando las ecuaciones (26), (27) y (28) para las tipologías 1, 2 y 3 respectivamente.

Finalmente, aplicando las ecuaciones 26, 27 y 28 para diferentes niveles de intensidad de presión dinámica, se obtiene el porcentaje de daño esperado para los elementos estructurales correspondientes a cada una de las tipologías evaluadas (Tabla 21). Los valores del porcentaje de daño para sobrepresiones de 1 kPa para cada tipología resultan de la evaluación del costo de las ventanas sobre el costo de la edificación, puesto que con esta sobrepresión se esperarían que todas las ventanas expuestas queden destruidas (ver Tabla 22). Es de notar que se encontró que la

tendencia en Tipología 1 es una baja área de vidrios, lo que resulta en un daño bajo para sobrepresiones de 1 kPa, respecto a las otras tipologías (Ver Tabla 20).

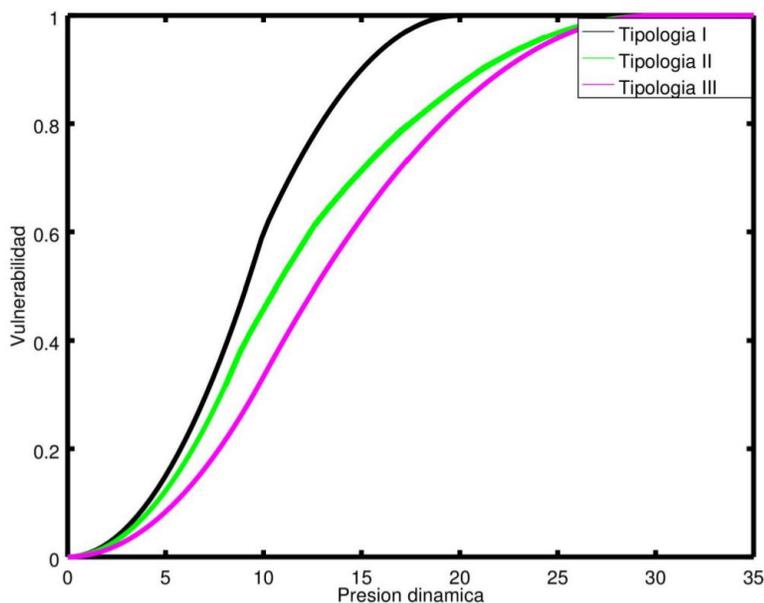


Figura 56. Porcentaje de daño de las viviendas en función de la presión dinámica en kPa.

Tabla 22. Porcentaje de daño para las tipologías 1, 2, 3 expuestas a diferentes niveles de Presión. Dinámica

Presión Dinámica kPa	% de Daño		
	Tipología 1	Tipología 2	Tipología 3
0	0	0	0
1	0.3	0.6	0.6
15	92	71	60
20	100	94	80
30	100	100	100
35	100	100	100

2.4.6. Lahares

Los lahares son uno de los fenómenos volcánicos más destructivos, a ellos se le atribuyen más de 30.000 pérdidas humanas en el siglo XX (Witham, 2005). Esto se debe a las grandes velocidades de desplazamiento, acarreamiento de sólidos y a la fuerza de impacto que genera, características que le permiten destruir cualquier tipo de obra civil (Jakob & Hungr, 2005).

En el 2008 en la erupción del Volcán Chaitén, se originaron lahares secundarios producto de la acumulación de cenizas y pómez que produjo el desbordamiento del curso del río Blanco y logró afectar a la ciudad de Chaitén (Duhart et al. 2009). Un caso igual de importante fue el ocurrido en Colombia el 13 de noviembre de 1985 tras la erupción del volcán Nevado del Ruiz, donde se formaron lahares por el derretimiento que sufrió parte de su glaciar, los cuales al tomar contacto con flujos piroclásticos causaron que alrededor de 23000 personas perdieron la vida y 5000 resultaron afectados (Voight, 1996; Thouret et al., 2007; Herd, 1986; Naranjo et al. 1986). Como se mencionó en la sección “amenaza por lahares” de este documento, se debe considerar que en caso de una erupción del volcán Galeras, dadas las condiciones actuales (características geológicas y ambientales) de la microcuenca del Barranco, se pueden formar lahares.

Para el análisis de riesgo es necesario determinar la vulnerabilidad de las construcciones ante este fenómeno, por lo cual se consultaron las investigaciones de Zanchetta et al. (2004), Spence et al. (2004) y Valentine (1998), que abordan el daño causado a estructuras por sobrepresiones generadas por flujos de gravedad; cada uno de estos estudios presenta una clasificación estructural y proponen determinados rangos de afectación. Valentine (1998) propone probabilidades de destrucción total de estructuras ante el impacto de sobrepresiones impartidas por flujos de gravedad, su estudio se basa en observaciones y posteriores deducciones sobre pruebas nucleares de estudios como los de Pickering y Bockholt (1971) y Glasstone y Dolan (1977). De acuerdo con Valentine (1998), estos resultados sirven de analogía para flujos de gravedad de origen volcánico. Moriano et al. (2017) recopila esta información y presenta mediante una clasificación tipológica la relación entre presión de impacto y daño de diferentes tipos de estructuras.

En la Figura 57 se pueden apreciar las seis tipologías expuestas en Valentine (1998), los rangos generales de daño que propone Zanchetta et al. (2004) y la tipología que plantea Spence et al. (2004a).

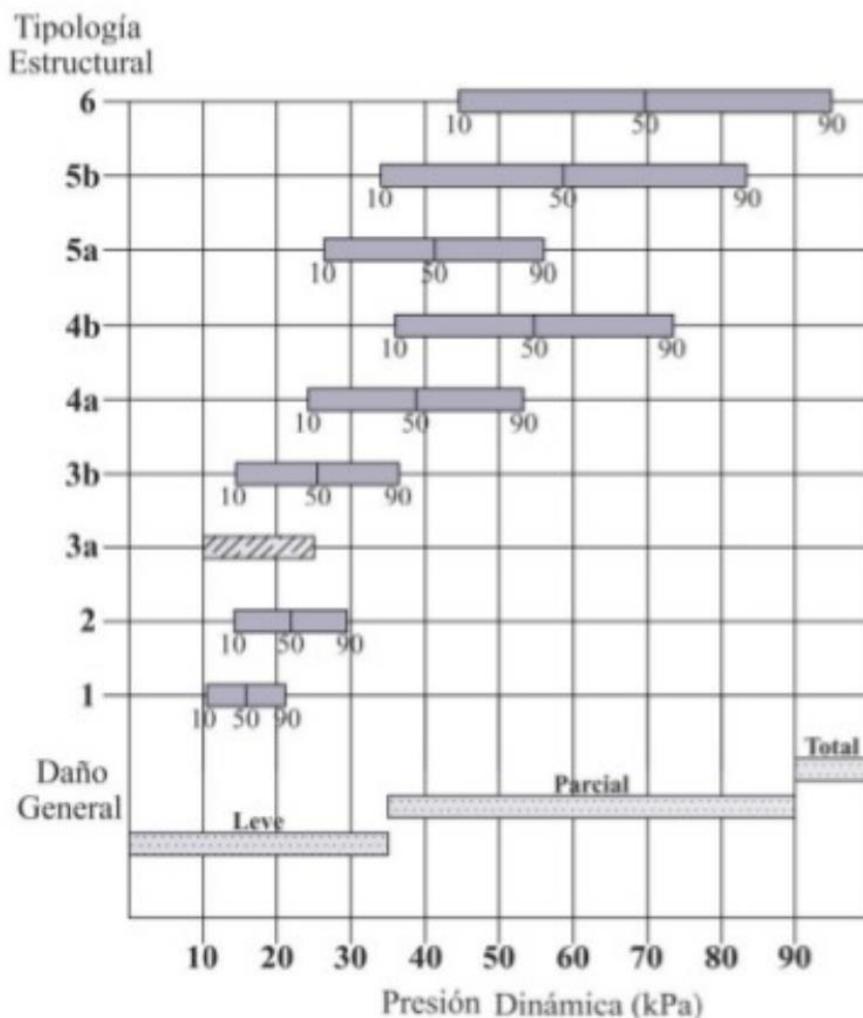


Figura 57. Recopilación de información de las investigaciones realizadas por Valentine (1998); Spence et al. (2004); Zanchetta et al., (2004). Fuente: Tomada de Moriano et al., (2017).

Por lo anterior, la vulnerabilidad ante lahares se desarrollara basada en las tipologías que presenta Valentine (1998), ya que a diferencia de las otras investigaciones cuenta con más información, por ejemplo se exponen rangos entre 10% y 90% de probabilidad de destrucción total

para presiones dinámicas entre 10 y 35 kPa., mientras que Spence et al. (2004a) y Zanchetta et al. (2004) no proveen valores de probabilidad.

El nivel de daño por onda de choque y lahares depende de la sobrepresión de impacto, por lo cual la clasificación tipológica y los rangos de presión capaces de producir daño para ambas amenazas resultan iguales.

En la tabla 23 se muestra el porcentaje de daño de cada tipología estructural para diferentes presiones dinámicas ante lahares; los porcentajes de daño obtenidos muestran que para la tipología uno (1), a partir de 15 kPa de sobrepresión se presentaría daño de más del 90% lo que en este estudio se considera irreparable o pérdida total, mientras que para la tipología dos (2), se presenta daño de más del 90% cuando la sobrepresión es mayor a 20 kPa, finalmente, para la tipología 3, esto ocurre con presiones dinámicas iguales o mayores a 30 kPa.

Tabla 23. *Porcentaje de daño para las tipologías 1, 2, 3 expuestas a diferentes niveles de Presión Dinámica.*

Presión Dinámica kPa	% de Daño		
	1	Tipología 2	3
5	31	24	20
10	62	47	40
15	92	71	60
20	100	94	80
30	100	100	100
35	100	100	100

Haciendo uso de la Tabla 23 se procede a realizar la curva de vulnerabilidad de las 3 tipologías presentes en el municipio de la Florida, tal como se presenta en la Figura 58.

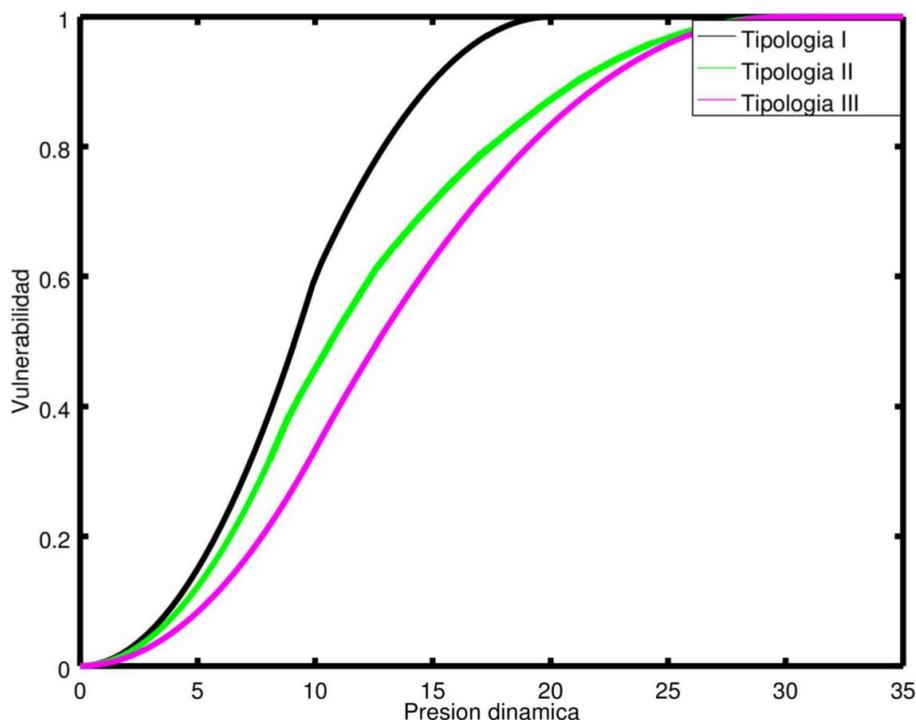


Figura 58. Porcentaje de daño de las viviendas en función de la presión dinámica en kPa.

2.4.7. Enterramiento

Un posible efecto adicional de la ocurrencia de lahares es el enterramiento de los elementos expuestos en la zona de afectación, por ello en el desarrollo de este estudio se tuvo en consideración la incidencia de la altura del depósito sobre el total del elemento estructural evaluado, anotando que para el caso de lotes y áreas dedicadas a la agricultura se asume que el daño es del 100% ante arribo de cualquier espesor de flujo.

Se realizó una evaluación de algunos trabajos previos que orientaran el análisis de susceptibilidad a enterramiento; por ejemplo, Quan Luna et al. (2011) genera curvas de vulnerabilidad física a partir del análisis de 30 edificaciones, en el cual la vulnerabilidad se expresa como la relación entre la pérdida y el valor de la reconstrucción. Eidsvig et al. (2014) realiza la construcción de curvas de fragilidad para distintos estados de daño y Papatoma-Köhle et al. (2012) realiza una distribución de Weibull para generar la vulnerabilidad en función de la altura del depósito. En general los anteriores estudios presentan las distribuciones de vulnerabilidad

promedio para estructuras de composición mixta, sin embargo, dadas las características presentes en el área de estudio, fue necesario identificar una distribución de vulnerabilidad que permitiera tomar construcciones con bajas características de resistencia.

Para el presente estudio se tomó como referencia principal el trabajo de Ciurean et al. (2017), el cual presenta distintas curvas de distribución de daño para diferentes tipos de estructura. Dado que el escenario de exposición de lahares contempla viviendas rurales típicas (en tapia), se optó por seguridad tomar para todos los elementos estructurales la distribución de mayor fragilidad mostrada en la Figura 59.

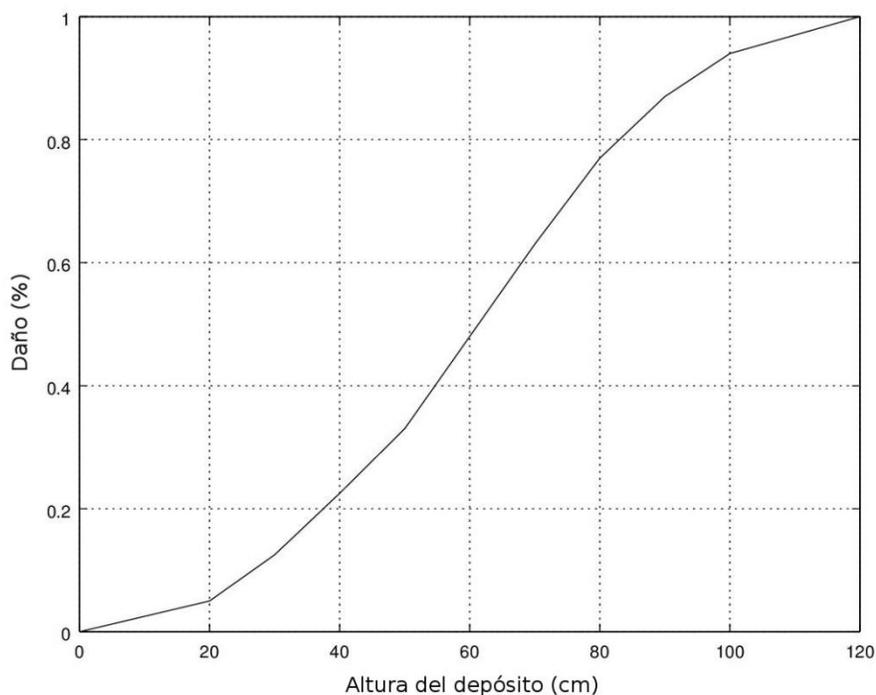


Figura 59. Distribución del porcentaje de daño en función de la altura del depósito.
Tomado de Ciurean et al. (2017)

De tal manera que para niveles de depósito del lahar cercanos a 60 cm se tiene un daño esperado del 50 % de las edificaciones, esto teniendo en cuenta que el ingreso de material a las viviendas representa pérdidas económicas no solo a nivel estructural, sino por daño a bienes que se encuentren en el interior, como los distintos enceres y propiedades de sus habitantes. Para un depósito de altura cercana a 1 m se estima un daño superior al 95 % de la vivienda. Finalmente, se estima daño o pérdida total con un depósito superior a los 120 cm.

2.4.8. Resultados

Efectos esperados y zonificación de vulnerabilidad para cada uno de los fenómenos evaluados:

2.4.8.1. Caída de ceniza

Una vez ingresada la información tomada en campo sobre el aplicativo Cassandra y luego de su posterior análisis, se tienen evaluados 3958 puntos de muestreo en todo el Municipio de La Florida.

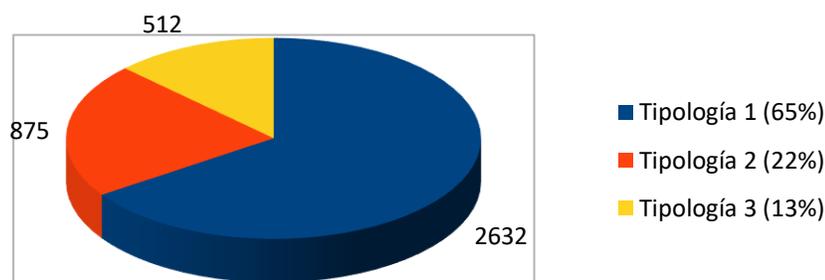


Figura 60. Distribución de las tipologías encontradas para el fenómeno de caída de tefra en el Municipio de La Florida, para un total de 3958 puntos de muestreo.

En la Figura 60 se observa que el 65 % de los elementos estructurales evaluados tienen una clasificación de cubierta Tipo 1, es decir presentan un bajo nivel de resistencia, capaz de soportar una carga máxima de 0.1 kPa u 8 cm de espesor de ceniza húmeda; sin embargo, el colapso de esta cubierta representa un porcentaje del 11% del total de la estructura. En la Tipología 2, encontramos un 22 % de la muestra, la cuales resisten una máxima carga de 0.3 kPa (24 cm de espesor); en esta categoría se encuentran las estructuras típicas de la zona rural, con teja de barro y muros mayoritariamente en tapia. Cabe destacar que el colapso de sus cubiertas tiene un impacto global del 35%.

Los puntos con una tipología 3 abarcan el 13 % de la muestra. Se destaca que esta tipología se hace presente mayoritariamente en los centros poblados y que es la de mayor resistencia ante la carga de ceniza, para un máximo de aproximadamente 0.53 kPa (43 cm de espesor). El colapso

de estas estructuras representa un 75 % del total de la edificación, lo cual puede asumirse como una pérdida total de la estructura. Sin embargo, dado que hay bajas probabilidades de presentarse futuros depósitos con espesores capaces de colapsar este tipo de cubiertas (Torres et al., 2017), esta tipología es conveniente debido a la resistencia que ofrece y la facilidad de darle un adecuado mantenimiento.

Los elementos estructurales expuestos que se han evaluado se representan a lo largo del municipio en la Figura 61, donde puede evidenciarse la distribución y clasificación tipológica de los mismos. Cabe destacar que, hacia las zonas rurales se tienen elementos en su mayoría con tipología 1 y 2, hacia los centros poblados se evidencia presencia de elementos con mayor resistencia (tipología 3).

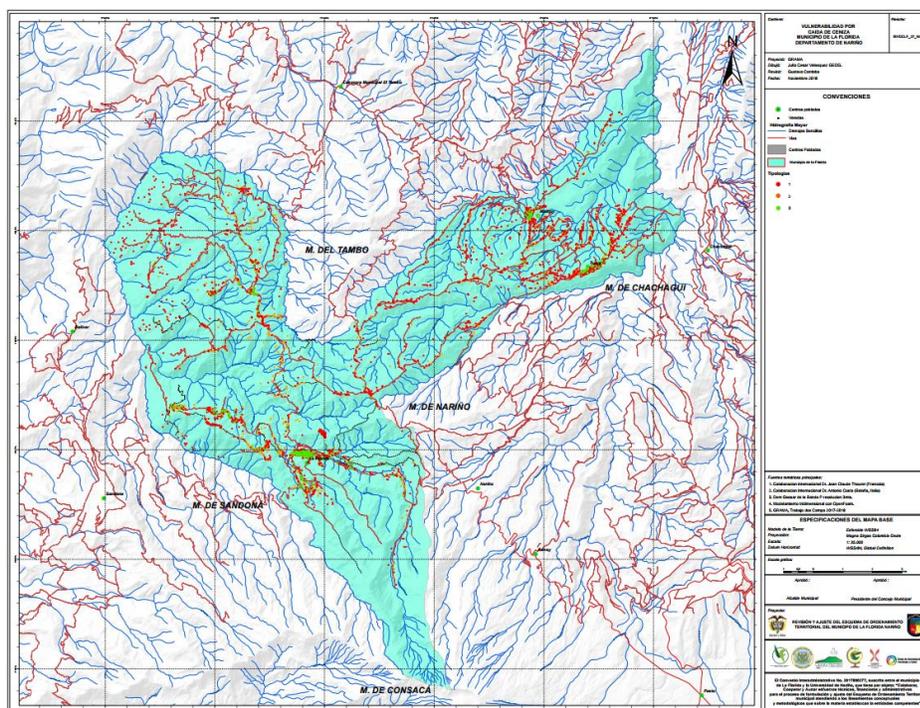


Figura 61. Mapa de clasificación tipológica de los elementos estructurales del Municipio de la Florida ante caída de ceniza.

2.4.8.2. Onda de choque

El análisis de Onda de Choque en todo el territorio del municipio de La Florida cuenta con 3958 muestreos, la Figura 62 presenta la distribución de muestreos según la tipología estructural a la cual pertenezca. Del total de muestras evaluadas, el 6% corresponde a viviendas con características propias de la tipología 1, aproximadamente 684 muestreos (17%) corresponden a la tipología 3 y con un 77%, la clasificación predominante es la tipología 2 con más de 3034 muestreos.

Para el caso de onda de choque, y a partir de las medidas encontradas en campo, se establecieron rangos de área de los vidrios, encontrando que para la Tipología 1 el área predominante se encuentra entre 0.09 y 1 m²; para la tipología 2 con un 38.27% los vidrios tienen un área entre 1 a 2 m² y para la tipología 3 el área de vidrios más representativa está dentro del rango de 2 a 3.5 m².

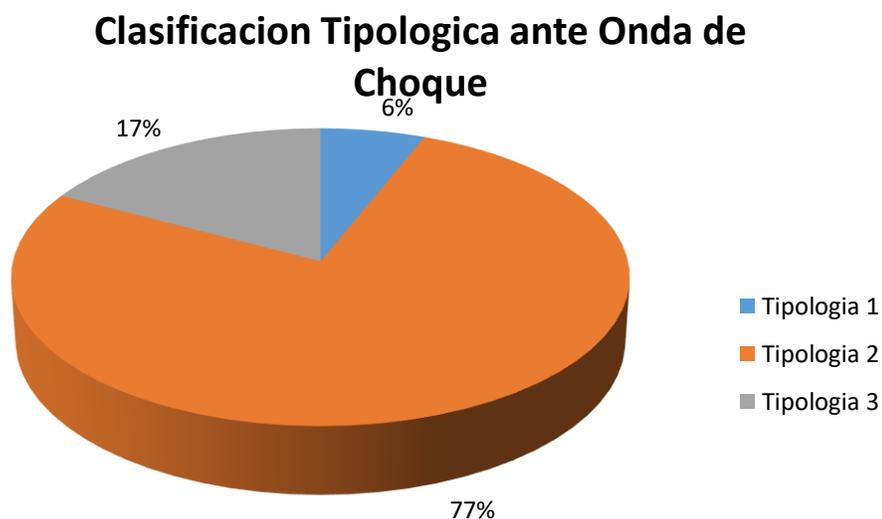


Figura 62. Distribución de las tipologías encontradas para Onda de choque Municipio de la Florida, para un total de 3958 puntos de muestreo.

Para determinar la vulnerabilidad ante este fenómeno se implementa la ecuación (28), para lo cual es necesario conocer la relación entre el costo de reparar el elemento expuesto en este caso las ventanas (vidrios) y el costo total de la vivienda. La tabla 24 muestra el cálculo de la vulnerabilidad de los vidrios ante onda de choque. Para cada tipología se muestra el área el vidrio predominante; por ejemplo, para la tipología 1 se tiene que el área esta entre 0.09 m^2 y 1 m^2 , que por seguridad en esta investigación se tomó el valor máximo del rango presentado (1 m^2) y se asume que el número de ventanas en las fachadas de las construcciones es de dos (2). En las columnas 5 y 6 se consigna el valor de los vidrios según su tipología (costo de reparar) y el valor de la vivienda según sus características estructurales (costo de reemplazar). Una vez se cuenta con esta información se aplica la ecuación de vulnerabilidad (Ecuación 27), cuyos resultados se muestran en la columna 7 de la tabla 24.

Tabla 24. *Cálculo de vulnerabilidad de vidrios ante onda de choque en el municipio de la Florida - Nariño.*

Tipología	Área de Vidrio m^2	Valor de Vidrio m^2	No Ventanas	Costo Vidrio	costo de la Vivienda	Vulnerabilidad
1	1	\$55,000	2	\$110,000	\$ 34,776,787	0.003
2	2	\$110,000	2	\$220,000	\$ 37,757,876	0.006
3	3.5	\$192,500	2	\$385,000	\$ 66,680,811	0.006

2.4.8.3. Lahares

2.4.8.3.1. Presión dinámica

El análisis de Lahar se hace en la zona más susceptible a esta amenaza, que en el territorio del municipio de La Florida corresponde al sector El Barranco, el cual cuenta con 773 muestreos. La Figura 63 muestra la distribución de muestreos según la tipología estructural a la cual pertenezca.

Clasificación Tipologica ante Lahares

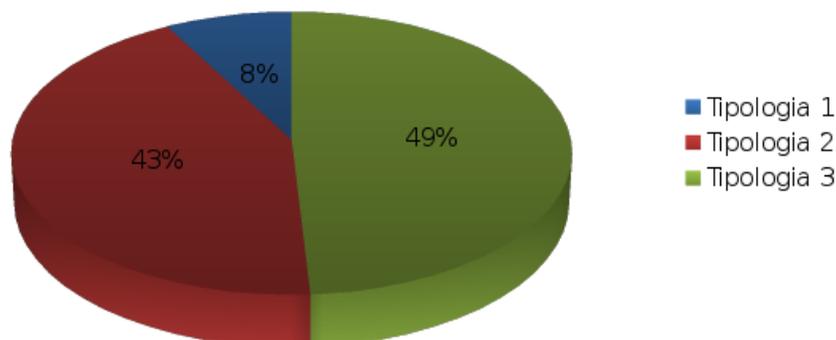


Figura 63. Distribución de las tipologías encontradas para Lahares Municipio de la Florida, para un total de 773 puntos de muestreo.

De la Figura 63 se concluye que aproximadamente la mitad de los muestreos tienen características estructurales propias de la tipología 3, esto quiere decir que se presentan un alto nivel de resistencia en comparación con las otras dos categorías, estas viviendas podrían soportar un impacto de hasta 30 kPa. Por otra parte, la tipología 2, representada por un 43% del total de los muestreos, representa las estructuras típicas de teja de barro, muros en tapia o sin refuerzo, con una resistencia de una máxima de carga de 20 kPa. Finalmente, con tan solo el 8% de los muestreos, la tipología 1 soportaría alrededor de 15 kPa y representa a las estructuras más débiles si se compara con la tipología 2 y 3.

En la Figura 64 se presenta la distribución de daño a los elementos estructurales para distintos niveles de sobrepresión. En ella se puede identificar (Figura 64a) que, para 1 kPa de sobrepresión, un porcentaje mayor del 60% de los elementos estructurales expuestos presentan un daño máximo del 0.6%. Los elementos mayormente expuestos presentan una tipología 2, con la cual para una sobrepresión de 10 kPa tendrían un daño aproximado del 47% de su estructura (Figura 64b). Para 20 kPa de intensidad, todos los elementos expuestos en la zona sufren un daño superior al 70% y finalmente para 35 kPa, se estima pérdida total de todos los elementos expuestos en el sector (Figuras 64c y 64d respectivamente).

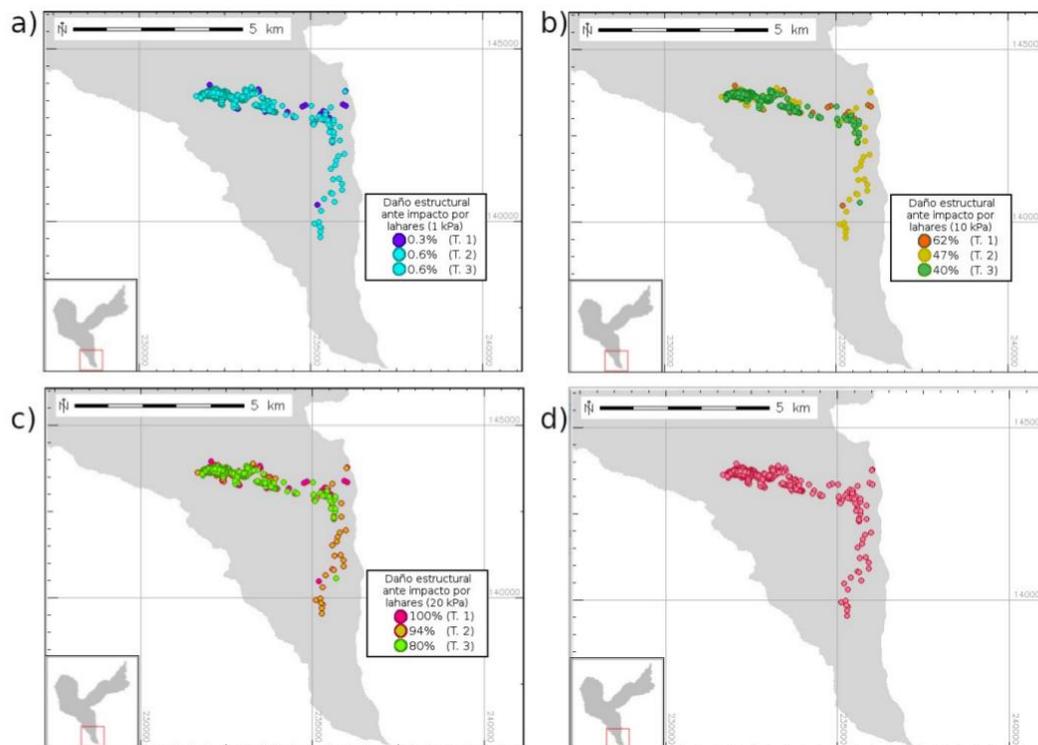


Figura 64. Distribución de daño a los elementos estructurales del sector Barranco-Cabecera Municipal, ante el impacto de lahares a) 1 kPa, b) 10 kPa, c) 20 kPa y d) 35 kPa.

2.4.8.3.2. Enterramiento

De los 773 puntos evaluados en el sector del Barranco - Casco urbano, los elementos estructurales se clasificaron en una sola tipología; en la Figura 65 se muestra la distribución de estos a lo largo de la cuenca del Barranco. En el óvalo rojo se indica que cerca de un 3% de los elementos estructurales cuentan con un alto nivel de exposición en la zona alta del Barranco, por lo cual es probable que estos tengan un nivel de enterramiento capaz de generar un daño de más del 50% en las viviendas. La gran mayoría de los elementos están en el casco urbano del municipio, sin embargo, su nivel de exposición es mucho menor, teniendo en cuenta que en este caso la exposición está en función de la distancia que tienen estos elementos a la zona de inundación del fenómeno evaluado.

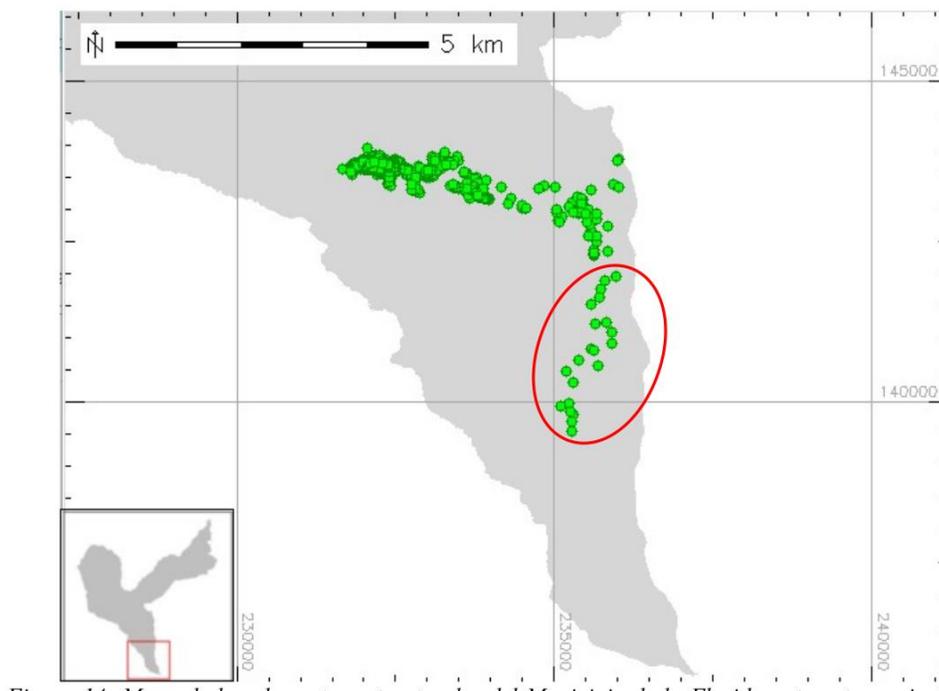


Figura 65. Tipología de los elementos estructurales del municipio de la florida ante enterramiento por lahares. Cabe notar que para este caso todos los elementos poseen una misma clasificación tipológica.

El mapa resultado de la zonificación de vulnerabilidad por onda de choque y lahares se muestra en la figura 66.

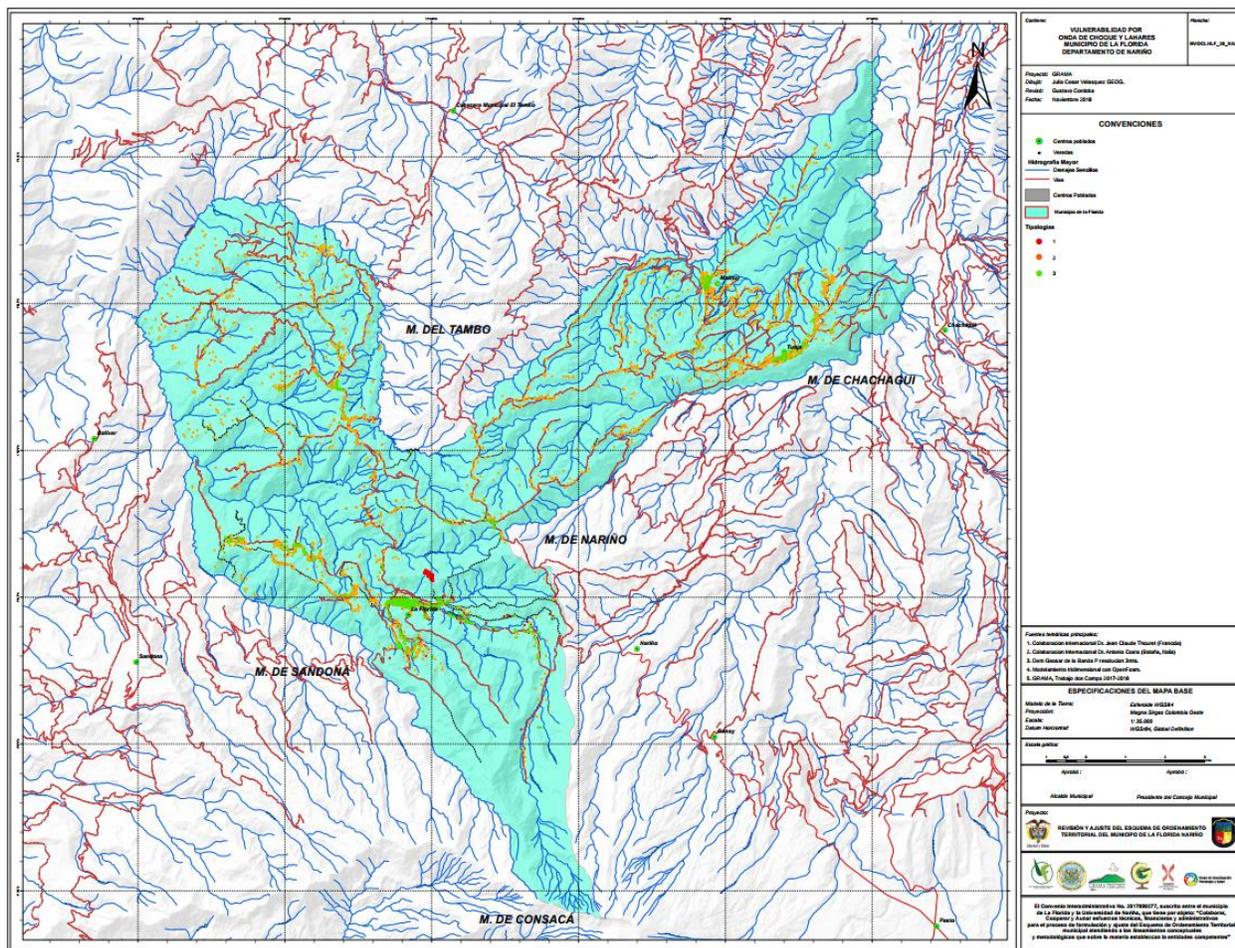


Figura 66. Vulnerabilidad por Onda de Choque y Lahares

3. Evaluación de riesgo

El riesgo volcánico se puede definir como la pérdida causada a un conjunto de elementos expuestos con una vulnerabilidad determinada durante un cierto periodo de exposición a un fenómeno de origen volcánico (Ortiz, 1996; Linares et al., 2004; Bignami et al., 2016). Este tipo de riesgo se conoce como riesgo específico y puede ser descrito por la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo Especifico} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Exposición}$$

El valor de riesgo específico para cada amenaza debe ser evaluado para todos los elementos expuestos, sus tipologías y para cada uno de los diferentes niveles de intensidad de las amenazas

(figura 67). Para esto se deben multiplicar los mapas de amenaza probabilística con los diferentes niveles de intensidad con su respectivo mapa de vulnerabilidad. Se obtiene así un mapa de riesgo específico para cada nivel de intensidad. Finalmente, estos se comparan y se determinan los mayores valores de riesgo, con estos valores se define el mapa de riesgo específico definitivo para cada amenaza.

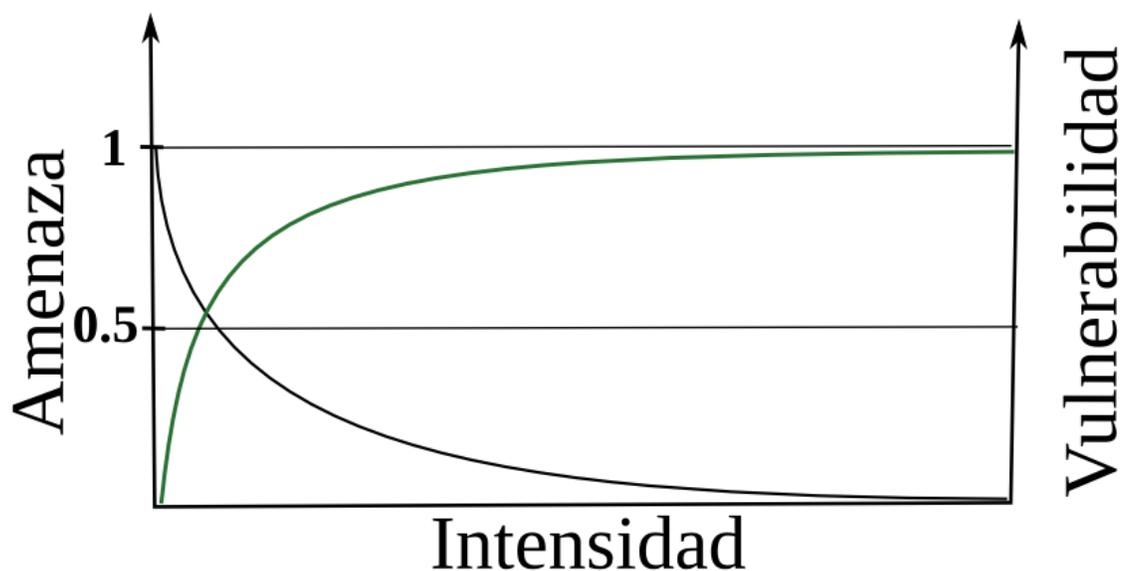


Figura 67. El riesgo específico se obtiene para cada amenaza, multiplicando la probabilidad correspondiente al respectivo nivel de intensidad por la respectiva vulnerabilidad de cada Tipología. En negro una curva hipotética de probabilidades y en verde una curva típica de vulnerabilidad

Este tipo de riesgo, al ser definido como el producto entre la amenaza en términos de probabilidad y la vulnerabilidad en porcentaje de daño esperado (Figura 67), tiene un valor numérico entre cero y uno. Sin embargo, con el fin de tener una imagen clara acerca de los costos socioeconómicos asociados a una situación de desastre, es necesario expresar el riesgo en términos económicos relacionados con el nivel de pérdidas esperadas. Para esto se debe cruzar la información de riesgo específico con los costos de predios y estructuras, obteniendo así lo que se conoce como riesgo total; esta es una herramienta importante para poder hacer una planeación balanceada y segura antes y después de una situación de emergencia (Ortiz, 1996; UNDRO, 1990). En razón de lo anterior, la ecuación que define el riesgo total es la siguiente:

$$\text{Riesgo Total} = \text{Costo} * \text{Riesgo Especifico}$$

Al cruzar la información de riesgo específico y costos se determinaron las pérdidas totales generadas por la interacción de las ondas de choque, caídas de ceniza, balísticos, lahares y corrientes piroclásticas de densidad generadas por erupciones del volcán Galeras y los predios y edificaciones del municipio. El valor de riesgo total definitivo fue la envolvente de riesgo total obtenido por los diferentes fenómenos volcánicos.

4. Decisiones con base en el Riesgo

4.1. Introducción

Como se anotó en el Capítulo de Normatividad, la Ley 1523 de 2012 opta por medidas de reducción del riesgo sobre las de prevención del mismo, lo cual es compatible con la aceptada noción de la imposibilidad de lograr un nivel de riesgo nulo (Di Bucci & Savadori, 2018). Además, el costo de tratar de llegar a una prevención del riesgo, intentando reducirlo a cero, puede ser tan alto que hace imposible llevar a cabo ese propósito (Hsu et al., 2012), por lo que es necesario definir un nivel de riesgo aceptable (Hunter & Fewtrell, 2001), para lo cual en este estudio se recurre a los conceptos de Amenaza Aceptable y Riesgo Aceptable, y así llegar a determinar de una manera sistemática los niveles de riesgo que exige el Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Vivienda y Territorio a partir de los cuales se toma decisiones de las medidas de reducción del mismo en este Esquema para el Municipio de La Florida.

4.2. Conceptos

4.2.1. Tasa Anual de Amenaza Aceptable en términos de Riesgo

Es el grado de afectación que una sociedad o comunidad puede soportar o el nivel a partir del cual se opta por tomar medidas de mitigación. En la Figura 68 se presentan valores de probabilidad anual de amenaza desde 10^{-8} hasta 1 para diferentes elementos expuestos como instrumentos de monitoreo volcánico, carreteras, comunidades, instalaciones y estructuras críticas (reactores). Para aquellas comunidades que se encuentran expuestas a amenazas naturales como terremotos tsunamis y de origen volcánico, el valor de tasa anual de amenaza aceptable se encuentra entre 10^{-6} a 10^{-3} (Connor, 2011). Considerando una recurrencia típica de las erupciones

del Galeras de décadas, como orden de magnitud, deberíamos multiplicar nuestras estimaciones de probabilidad por 10^{-1} . Como tasa anual de amenaza aceptable consideramos 10^{-4} , que es un valor en el rango típico para comunidades. Esto implica que si el valor de la tasa de amenaza per década es superior a 10^{-3} se deben tomar medidas de mitigación.

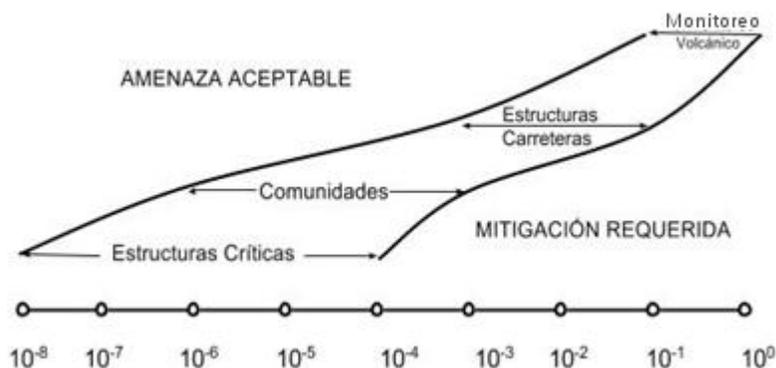


Figura 68. Rangos de Tasa Anual de Amenaza Aceptable para diferentes tipos de infraestructura. Fuente: Modificada de Connor (2011).

La Figura 69 visualiza este mismo concepto con una gráfica que muestra una curva típica de probabilidades de cierta amenaza, en la cual se ha señalado arbitrariamente un posible nivel de amenaza desde donde se deben tomar medidas de mitigación. Note que nivel de amenaza corresponde a cierto nivel de intensidad de la misma.

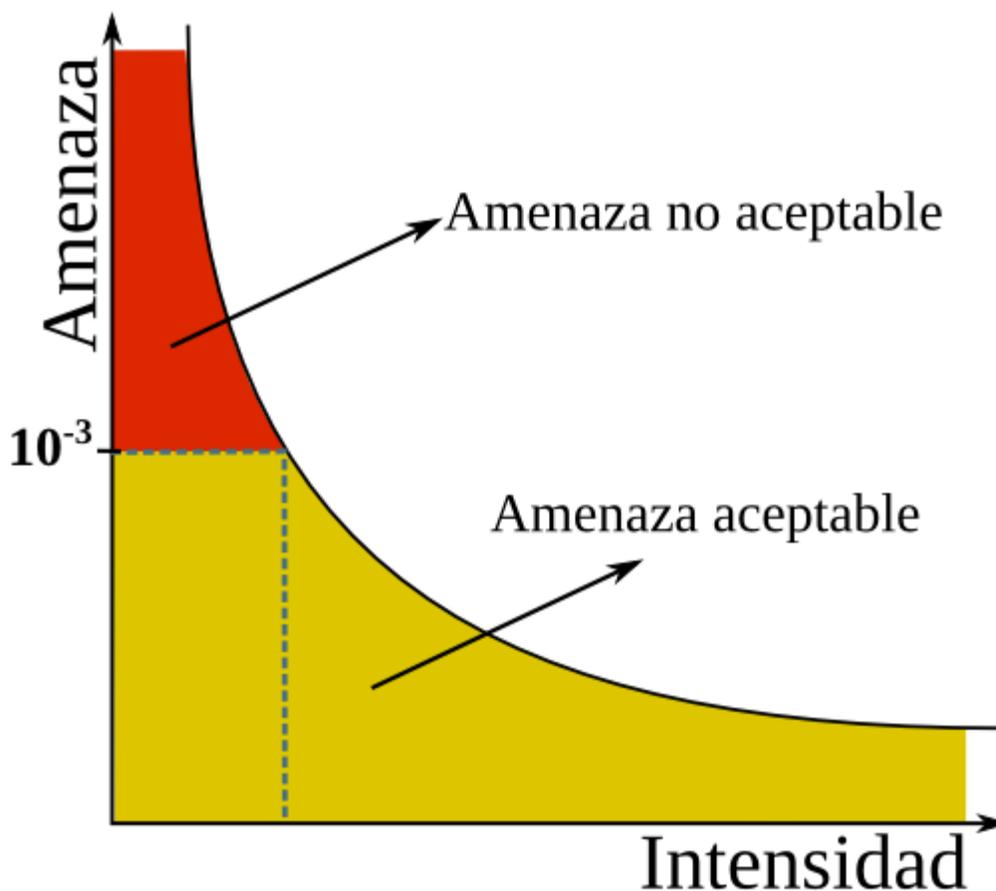


Figura 69: Esquema de una distribución probabilística de cierta amenaza aceptable en términos de riesgo contra su intensidad. Si la aceptabilidad se ha definido con cierto valor, esta corresponde a una intensidad. Fuente: Este estudio, aplicando ideas de Connor (2011).

4.2.2. Nivel de riesgo aceptable

Las Naciones Unidas definen tres niveles de riesgo (UNISDR, 2009): Aceptable, Tolerable y No Tolerable. Donde el Riesgo Aceptable es el nivel de probabilidad de una consecuencia dentro de un período de tiempo, que se considera admisible para determinar las mínimas exigencias o requisitos de seguridad, con fines de protección y planificación ante posibles fenómenos peligrosos (Di Bucci & Savadori, 2018; Hunter & Fewtrell, 2001). Lo tolerable siempre es mayor que lo aceptable, cuyo nivel depende de la capacidad de resiliencia de una comunidad. Lo no tolerable es un nivel que implica que el costo de la no acción supera los costos de la tomar medidas de reducción.

La definición del nivel de Riesgo Aceptable no es política ni a conveniencia de un cierto

grupo de personas. En este trabajo se aplica una metodología sistemática que evita situaciones arbitrarias.

- *Metodología*

La decisión de aceptar o no tolerar una amenaza por parte de una comunidad depende de muchos factores, entre ellos la percepción del riesgo que tengan esas comunidades y personas, quienes son influenciados por la racionalidad del *homo sapiens*, pero sobre la cual el análisis intuitivo costo-beneficio que hace el “*homo economics*” ejerce un papel a veces preponderante (Di Bucci & Savadori, 2018). La racionalidad de grupos de personas se ve influenciada por factores extremadamente complejos, desde la educación racional, la manipulación de sectores políticos y económicos, hasta el imaginario popular.

Por otra parte, el Decreto 1807 de 2014 del Ministerio de Vivienda establece en su Artículo 18, que se deben definir zonas de Alto, Medio y Bajo riesgo, y que en las zonas de Alto Riesgo, se definirá la “mitigabilidad o no mitigabilidad” para tomar alternativas de reducción del riesgo “evaluando su viabilidad de ejecución desde el punto de vista técnico, financiero y urbanístico” (el subrayado es nuestro), por lo cual en el análisis de riesgo se debe considerar la viabilidad de las propuestas que se hagan, de tal manera que se optimicen los recursos disponibles para reducción del riesgo.

A fin de atender los requerimientos de la Norma arriba anotados, y en virtud de que se tiene ya cuantificado el riesgo, en este estudio se opta por realizar un análisis cuantitativo para la toma de decisiones, particularmente las propuestas por Katz & Lazo (2012), Marzocchi & Woo (2009) y Woo (2008) que aplican principios de economía para optimizar recursos limitando las pérdidas esperadas y balancearlas con los costos de las medidas de reducción, lo que permite evaluar de manera directa la viabilidad de las medidas de reducción del riesgo.

Como se explicó más arriba, la mitigabilidad o no mitigabilidad se define en este estudio siguiendo la propuesta de Connor (2011) (ver Figuras 68 y 69). Una vez definidos los niveles de amenaza que requieren mitigación o no, se llega a encontrar los niveles de riesgo que define la Norma, lo cual se realiza cruzando las curvas de amenaza probabilística con las curvas de

vulnerabilidad para cada una de las amenazas y cada una de las tipologías definidas en el Capítulo de Vulnerabilidad Estructural. La Figura 70 muestra un esquema de este procedimiento, notando que el mismo permite ver si cierta tipología estructural estaría o no dentro de un nivel de riesgo aceptable. Este procedimiento permite determinar en cada pixel y cada elemento expuesto el valor correspondiente de Costo de Esperado de Pérdidas ($R=C*E*V*H$) que sería aceptable.

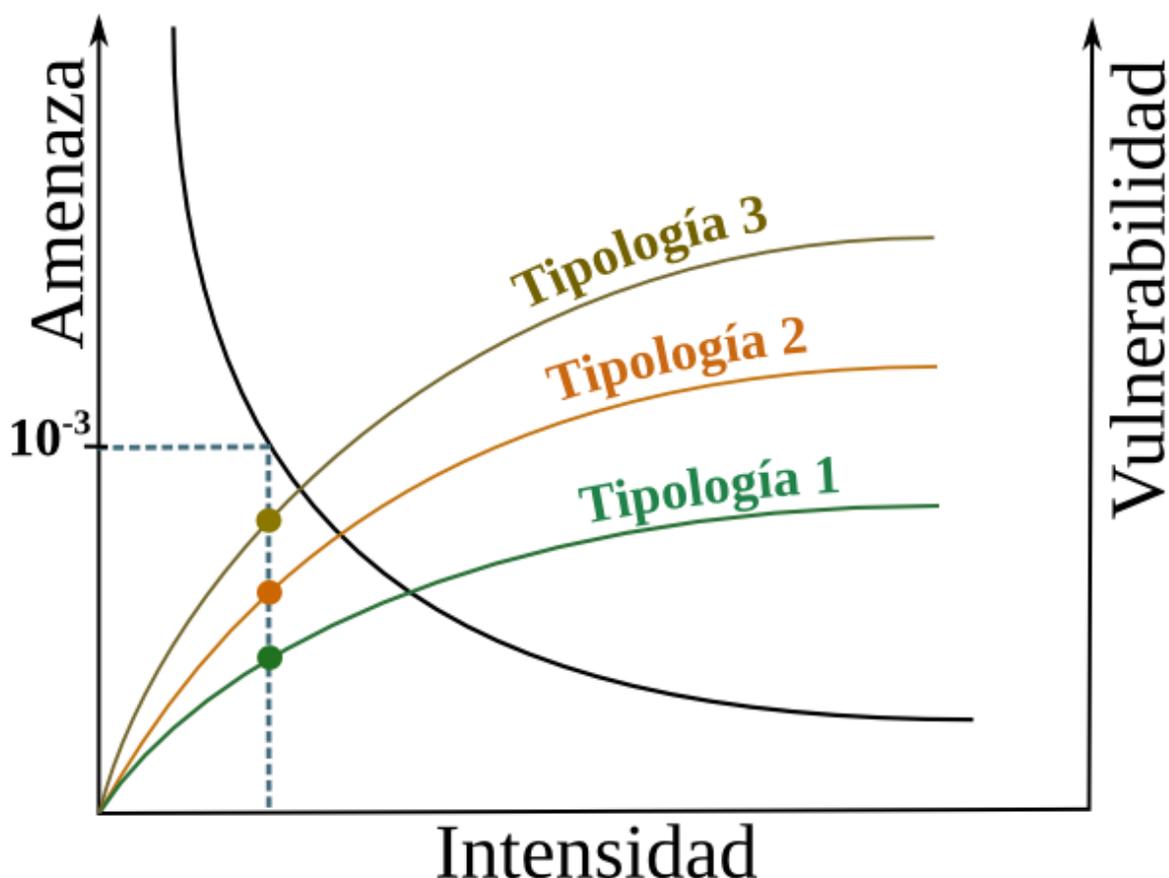


Figura 70: Esquema que muestra el cruce de las curvas de tasa de amenaza probabilística en un lugar determinado con las curvas de vulnerabilidad estructural de tres tipologías. Este procedimiento permite confirmar si cierta tipología está o no dentro de un nivel

Aplicando el análisis costo-beneficio que Woo (2008) adapta para el caso de amenazas volcánicas a partir de los trabajos de Katz & Murphy (1997), es posible encontrar la probabilidad por encima de la cual es necesario aplicar medidas de protección. Para tener en cuenta tanto el costo de reducción de la exposición como el costo de una no acción en caso de desastre, Woo (2008) balancea el costo de no proteger pesado con la probabilidad en una ventana temporal (en

nuestro caso 25 años) de que ese elemento sea alcanzado por un evento destructivo con el costo de la reducción de la exposición. De esta forma, si el Costo de Protección es C_p y el costo de decidir NO Proteger o no tomar acción alguna es L , entonces el umbral de probabilidad es $P_u = C_p/L$.

Para determinar L , se tiene en cuenta el número N de elementos expuestos, el costo V_e por la pérdida de *un* elemento expuesto y F es la fracción de N que debería su supervivencia a la medida de reducción. Por lo que L es la multiplicación de esos tres factores (Ecuación 29).

$$L = F * N * V_e \quad (29)$$

Sin tener en cuenta los costos de las implicaciones psicológicas y sociales de una decisión de reducción del riesgo por medio de la reducción de la exposición, V_e depende del costo del predio (estructura y lote), de la inversión en el nuevo predio y el costo representativo de lo que los habitantes del predio dejan de producir en caso de perecer por un evento eruptivo (Woo, 2008), que tiene un periodo de retorno específico.

4.3. Aplicación

Si se aplica la fórmula para el Riesgo Total $R_T = C * V * H$ (nivel de pérdidas esperadas), analizando para el caso más desfavorable (esto es impacto por Corrientes Piroclásticas de Densidad) donde se asume daño irreparable o vulnerabilidad $V=1$, el Riesgo Total depende solo del Costo de la estructura y el nivel de amenaza. Por lo cual el riesgo depende de los niveles de amenaza aceptable que se establezcan.

El nivel de Riesgo No Tolerable se define como aquel que resulta de una amenaza mayor a un umbral P_u . El costo C_p es el valor de la construcción y predio actual. En el análisis de avalúos, hecho por este estudio, dentro de la Zona de Amenaza Volcánica Alta, ZAVA, (ver Figuras 71 y 72) se encontraron 514 predios urbanos con un valor hasta de 120 millones (aprox. US\$ 40.000) y 74 predios rurales con un valor de hasta 90 millones (aprox. US\$ 30.000), lo que implica que se tiene un 87.2% de predios en urbano y un 12.5% en rural dentro de la ZAVA (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2006). Tomando un promedio ponderado, el valor de un

solo predio es $C_p=US\$ 38.630$.

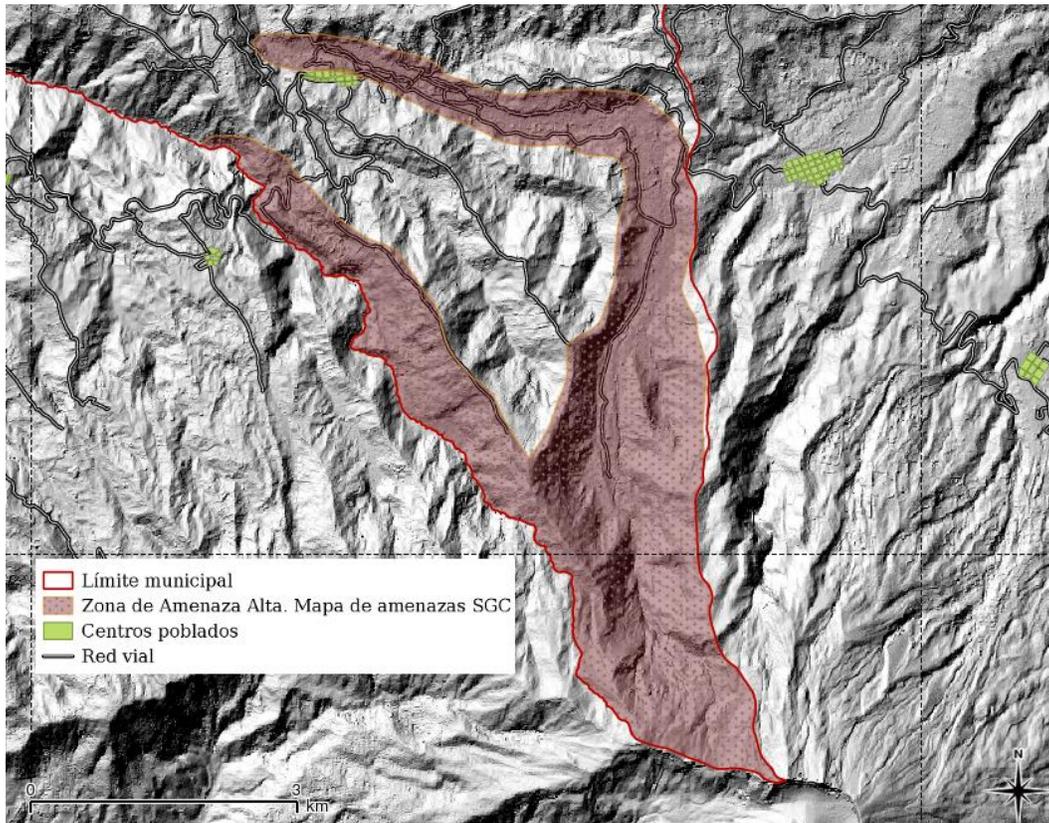


Figura 71. Zona de Amenaza Volcánica Alta (ZAVA) del volcán Galeras en el municipio de La Florida.
Fuente: Modificado de Servicio Servicio Geológico Colombiano (2015).

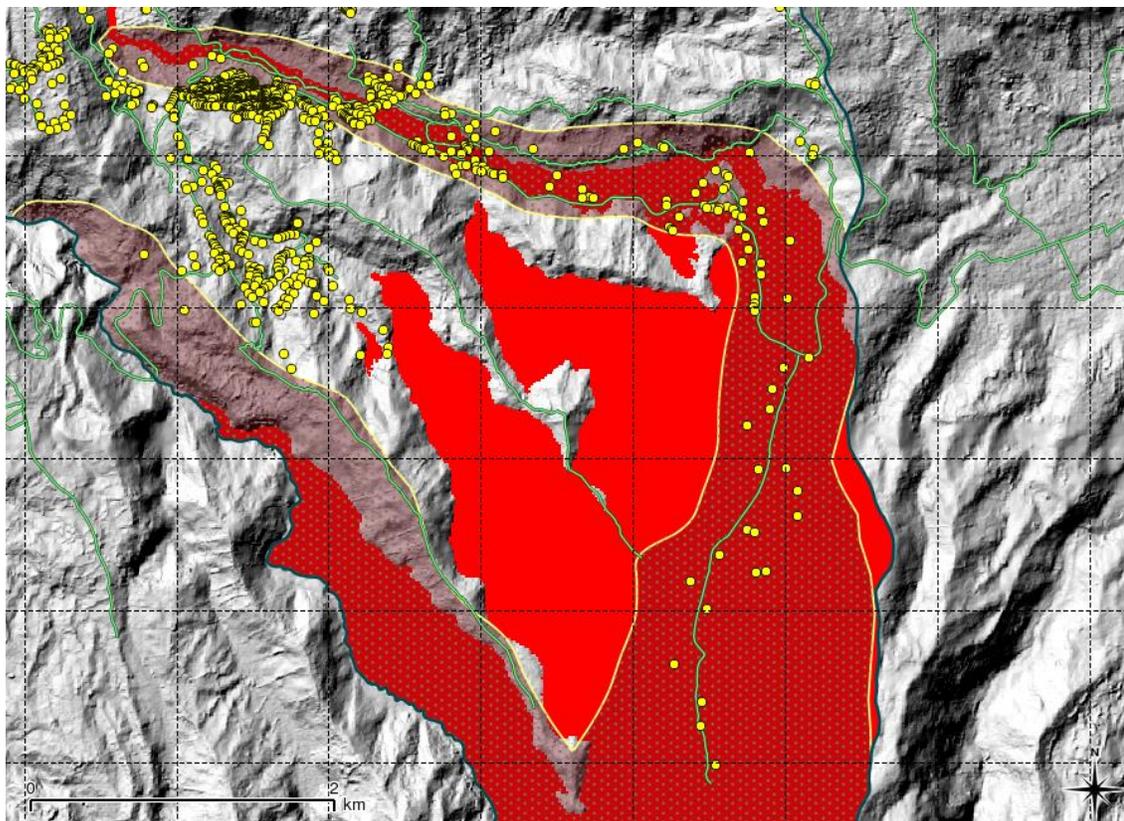


Figura 72. Severidades Ponderadas, elementos expuestos y ZAVA. En Rojo la unión de Severidades Ponderadas Alta por CPDs y Media Lahares. Los puntos amarillos muestran los elementos expuestos y la zona sombreada la ZAVA. Fuente: Este estudio y Servicio Geológico Colombiano.

Si la inversión en reducción del riesgo va a ser asumida por el Estado Colombiano, el análisis costo-beneficio se hace con base en el Producto Interno Bruto (PIB) anual *per capita* de Colombia, que es de alrededor de US\$ 7.900 (en contraste el PIB anual por habitante en La Florida es de alrededor más de US\$ 2.000, ver Capítulo Dimensión Económica), por lo que lo que se dejaría de producir en un periodo de 25 años (asumiendo que en promedio se presenta una erupción cada 25 años) en caso de erupción volcánica que afecte el predio es de alrededor de US\$ 200.0000 (que se puede asimilar al costo de indemnización); monto que es compatible con la aproximación de Woo (2008). Teniendo en cuenta que el promedio de habitantes por casa en la zona del Barranco es de 3.6 hab/casa, entonces $Ve = 3.6 * 200.000 + 38.630 = US\$ 758.630$.

Umbral de probabilidad: caso ZAVA

Sin tomar medidas de protección alguna en la ZAVA y en caso que ocurra un evento volcánico que afecte el Barranco, implicaría que la fracción $F=1$, por lo que la pérdida desde el

punto de vista económico sería $L = 1 * 588 * 758.630 = US\$ 468.8$ millones.

Por otra parte, el costo de la medida de reducción sería $C_p = 588 * 38.630 = US\$ 22.7$ millones.

Por lo que el umbral de probabilidad para el Riesgo Aceptable asumiendo que se tiene en cuenta toda la ZAVA en La Florida (Figura 71) y que es la Nación la que asume estos costos:

$$P_u = 22.7 / 468.79 = 0.048$$

Chequeo umbral de probabilidad usando las severidades ponderadas de este estudio

Del estudio detallado de la amenaza probabilística realizado por este estudio, se tiene que dentro la zona de Severidad Ponderada Alta existen 47 edificaciones. Sin embargo, en amenaza media donde dominan lahares y cuya severidad no se puede desconocer, se tienen 88 predios más, por lo cual en este estudio se define que el número total de predios que deberían su seguridad a las medidas de reducción que se tomen en 135, por lo que $F = 135 / 588 = 0.23$

Resultando en un umbral de probabilidad P_u de

$$P_u = 135 * C_p / L = 0.053$$

Umbral que difiere en un 10% con el umbral resultante de tomar toda la ZAVA

4.4. Umbrales de riesgo

- **Umbral de Riesgo NO TOLERABLE**

Si se asume vulnerabilidad $V=1$ (correspondiente a Corrientes Piroclásticas de Densidad), un nivel de exposición $E=1$ y el umbral de amenaza estimado a partir de toda la ZAVA, este umbral de Riesgo No Tolerable o No Aceptable es:

$$R_{UT} = 38.630 * 0.048 = US\$ 1.872 = 5.6 \text{ millones de pesos}$$

Sin embargo, para estar del lado de la seguridad, en este estudio redondeamos **R_{UT} a 5 millones de pesos**, que equivale a un $P_u = 0.043$, o un 10% de incremento en el nivel de prevención.

Los demás umbrales se toman de acuerdo a la propuesta de Connor (2011), notando que para comunidades, este autor propone que se requieren medidas de mitigación a partir de una probabilidad anual de 10^{-3} , pero en virtud de que el Decreto 1077 exige 4 niveles de riesgo, la tolerabilidad se subdivide en Moderadamente Tolerable con medidas de mitigación obligatorias y Tolerable con medidas de mitigación mínimas. Es de notar que en caso de que no sea posible aplicar medidas de mitigación, la edificación pasara a ser considerada en situación de Riesgo No Tolerable.

Umbral de Riesgo MODERADAMENTE TOLERABLE con medidas de mitigación obligatorias

En este caso, en este estudio la probabilidad en 25 años se define para P_u el siguiente rango:

$$4.8 \cdot 10^{-3} \geq P_u > 10^{-2}$$

El umbral de amenaza de 10^{-2} resulta en un umbral de riesgo moderadamente tolerable de:

$$R_{UTmin} = 38.630 \cdot 0.01 = US\$ 386.3 = 1 \text{ millón de pesos}$$

Por lo que el Rango de Riesgo Moderadamente Tolerable (donde se requieren medidas de mitigación) resulta en:

$$1 \leq R_T < 5, \text{ en millones de pesos.}$$

Umbral de Riesgo TOLERABLE con medidas de mitigación mínimas

En este caso el límite inferior del rango de probabilidades en 25 años está dado por la propuesta de Connor (2011), a partir de la cual se requieren medidas de mitigación:

$$10^{-3} \leq P_u < 10^{-2}$$

Que resulta en un rango para Riesgo Tolerable con medidas de mitigación mínimas:

$$0.1 \leq R_T < 1 \text{ millones de pesos}$$

Riesgo ACEPTABLE

El riesgo aceptable abarca los casos donde las pérdidas esperadas no superen los \$100.000 pesos. Estos rangos tanto de amenaza como de riesgo se resumen en la Figura 73, mientras que la Figura 74 muestra la localización de cada edificación indicando el nivel de riesgo en el que se encuentra.

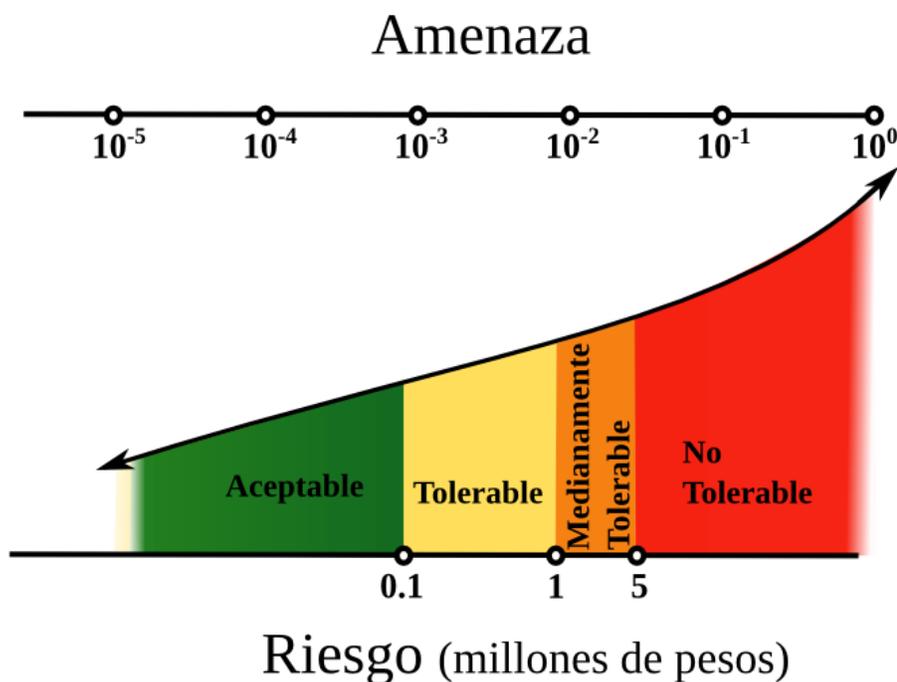


Figura 73. Umbrales de Amenaza y Riesgo. Note que de acuerdo con Connor (2011), a partir de una probabilidad en 25 años de 10^{-3} , se requiere mitigación, en consecuencia elementos en riesgo clasificado como Tolerable y Medianamente Tolerable requieren este tipo de medidas.

La misma metodología se aplicó para obtener los rangos de riesgo para predios, pero en términos de pérdidas esperadas por hectárea. Los resultados se resumen en la Tabla 25.

Tabla 25. Clasificaciones y rangos de rangos de pérdidas esperadas (riesgo total) de acuerdo al Decreto 1077 de 2015 y clasificación de Woo (2008).

Riesgo	Riesgo Decreto 1077/2015	Rango de pérdidas
Edificaciones		
<i>No tolerable</i> (No aceptable)	Alto no mitigable	>\$5.000.000
<i>Moderadamente Tolerable</i> (aceptable con medidas de mitigación obligatorias)	Alto mitigable	\$1.000.000 y \$5.000.000
Tolerable (aceptable con medidas de mitigación mínimas)	Medio	\$100.000 y \$1.000.000
Aceptable	Bajo	<\$100.000
Predios		
<i>No tolerable</i> (No aceptable)	Alto no mitigable	>\$5.000.000 \$/Hectárea
<i>Tolerable</i> (aceptable con medidas de mitigación obligatorias)	Alto mitigable	\$1.000.000\$/Hectárea y \$5.000.000 \$/Hectárea
Moderadamente tolerable (aceptable con medidas de mitigación mínimas)	Medio	\$100.000\$/Hectárea y 1.000.000 \$/Hectárea
Aceptable	Bajo	<100.000 \$/Hectárea.

Por otra parte, la Tabla 26 muestra el número de edificaciones y el número promedio de personas que están ubicadas en las diferentes condiciones de Riesgo.

Tabla 26. Estadística del número de edificaciones y personas bajo cada nivel de riesgo, en todo el municipio.

Riesgo	Número de edificaciones	Número de personas en promedio
<i>No tolerable</i> (No aceptable)	47	170
<i>Moderadamente Tolerable</i> (aceptable con medidas de mitigación obligatorias)	42	152
Tolerable (aceptable con medidas de mitigación mínimas)	46	162
Aceptable	2,485	8,946

NOTA: como se explicó, el número óptimo de predios y personas cuya exposición debe ser reducida fue calculada bajo la presunción de que el Estado asumiría los costos de esta medida. Sin embargo, caso que sea solamente el Municipio de La Florida quien tenga que asumir estos costos, el PIB anual se reduciría de los US\$ 700.000 de Colombia a unos US\$ 200.000, lo que reduciría considerablemente el número óptimo de predios y personas que el municipio sería capaz de ayudar a reducir su riesgo por reducción a la exposición.

Además, es necesario destacar que el valor indicativo de instituciones de uso especial, como el Centro Hospital La Florida E. S. E. y las sedes de la escuela y el colegio San Bartolomé, fue ponderado de acuerdo a los niveles de importancia estipulados en la Norma NSR10 (AIS, 2010), resultando así en edificaciones con un nivel de riesgo no aceptable por amenaza volcánica.

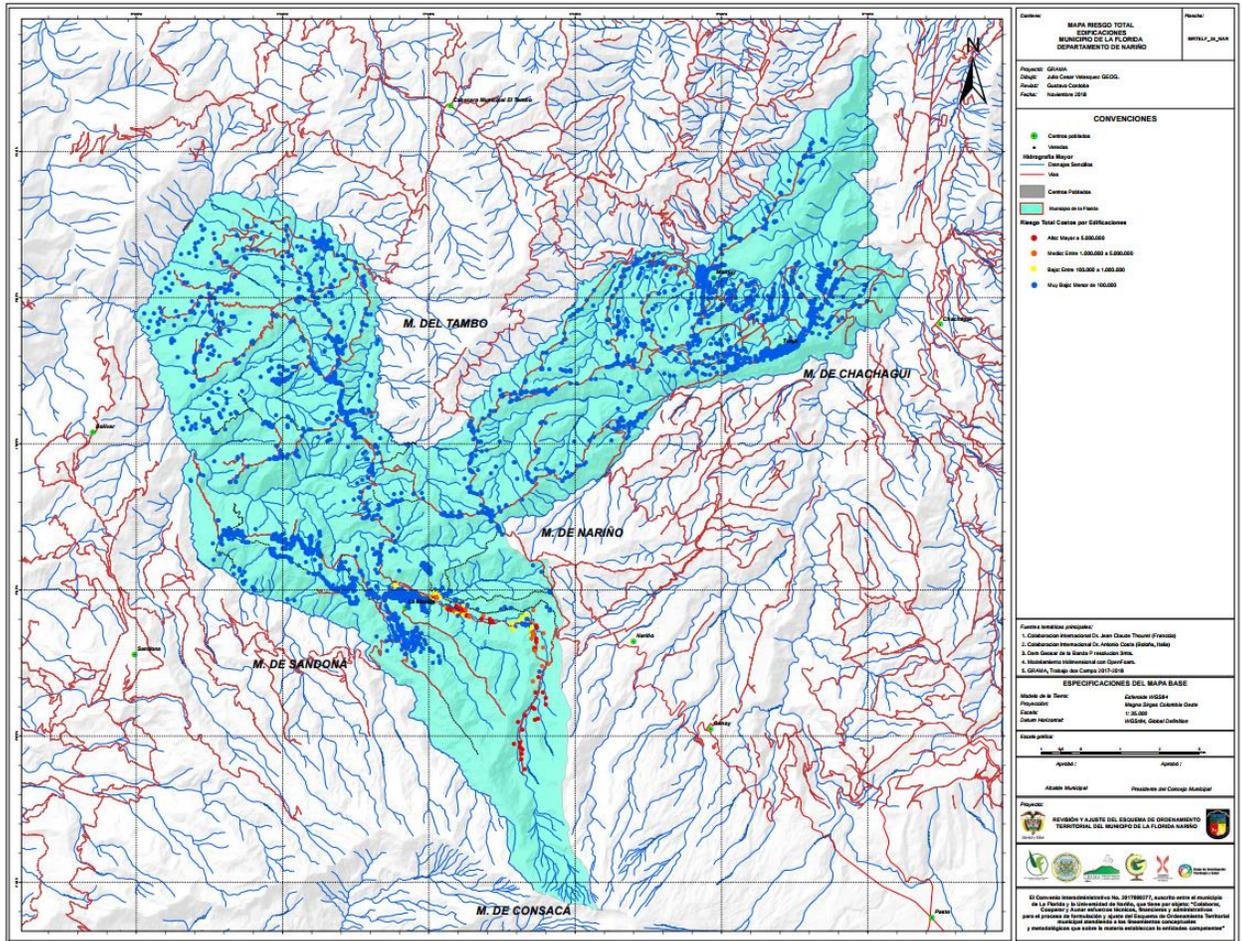


Figura 70. Riesgo volcánico total edificaciones.

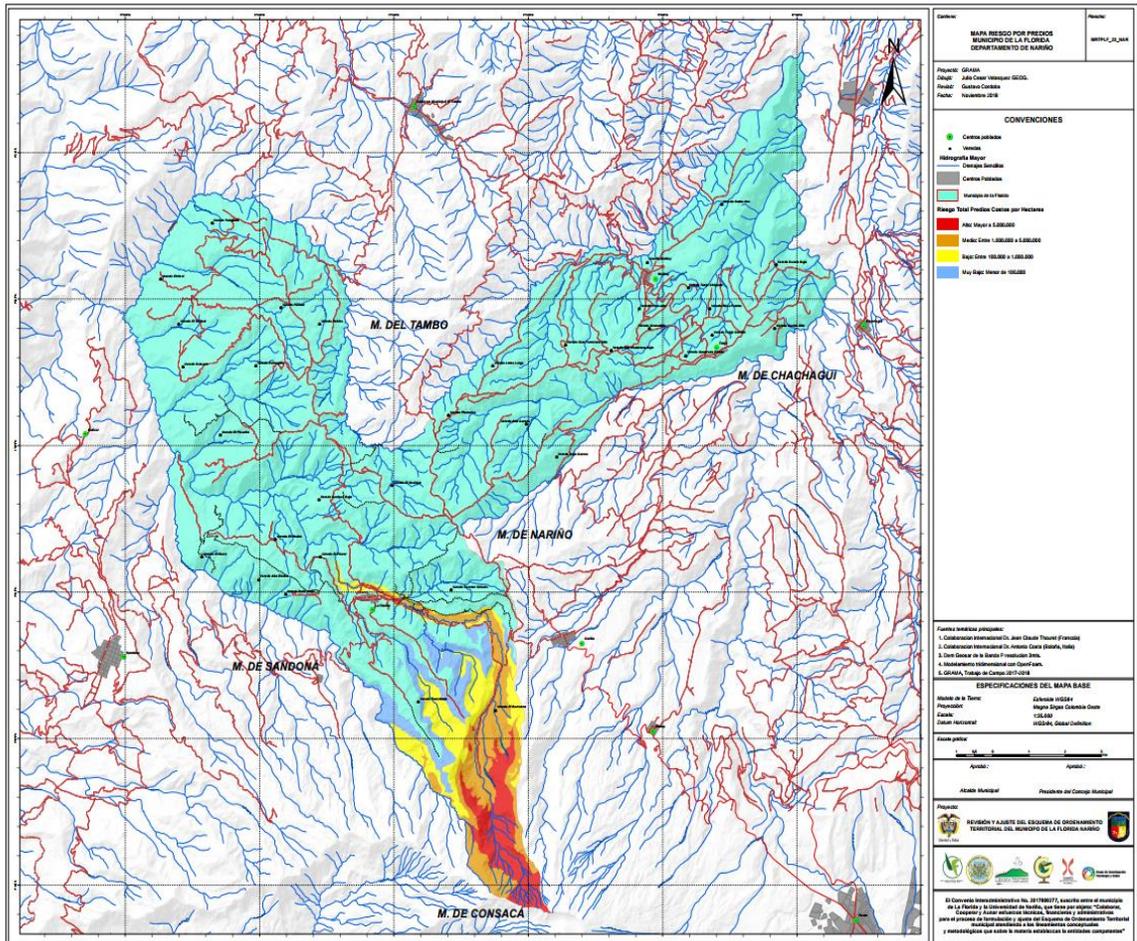


Figura 74. Riesgo volcánico total predios.

5. Conclusiones y recomendaciones

Como parte del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de La Florida, el Grupo de Investigación en Amenazas, Riesgos y Medio Ambiente, GRAMA, de la Universidad de Nariño emprendió este estudio de Gestión del Riesgo volcánico en el cual se ha tenido en cuenta la Constitución, la Ley y demás normatividad; en especial la Competencia que el Plan Nacional de Gestión de Riesgo 2013-2025 le da, entre otras instituciones, a las Universidades para estar a cargo de la Gestión de la información para el conocimiento del riesgo. Es de recalcar que se ha realizado un aporte pionero al Ordenamiento Territorial, en el cual se ha aplicado una metodología clara para tomar decisiones sobre la Reducción del Riesgo basadas en Riesgo, conforme se establecen en las guías, publicaciones internacionales, además de acuerdos internacionales firmados por el país.

Para poder cuantificar el riesgo, se usó la información primaria del Servicio Geológico Colombiano, complementando este conocimiento con aproximaciones probabilísticas a la amenaza volcánica, tal como lo recomienda la Guía Nacional de Gestión del Riesgo del Marco de Sendai, firmado por la República de Colombia.

Mediante un análisis casa a casa se logró hacer una tipificación de todas las viviendas y estructuras presentes en el municipio, a fin de establecer su vulnerabilidad estructural ante cada una de las amenazas volcánicas. Finalmente, se combinó el análisis probabilístico de la amenaza con la vulnerabilidad y los costos, para llegar a determinar el Riesgo Específico y el Riesgo Total al que están expuestas las estructuras y los habitantes del Municipio

El riesgo específico a un detalle de 3 metros por pixel en la zona rural, y 1 metro por pixel en la zona del Corregimiento Especial fue obtenido multiplicando la vulnerabilidad por la amenaza probabilística, lo cual permitió cuantificar riesgo total o pérdidas esperadas en términos económicos.

Finalmente, asumiendo que el volcán hace erupción al menos una vez cada 25 años (lo cual es compatible con la recurrencia media histórica de las erupciones de Galeras), se establecieron umbrales de probabilidad que permiten balancear el costo de una medida de reducción del riesgo mediante reducción de la exposición, con el costo de la inacción. Contemplando las viviendas dentro de la Zona de Amenaza Alta del Galeras (ZAVA) determinada por la Cuarta Versión del Mapa de Amenazas del Galeras, del Servicio Geológico se llegó a determinar rangos de Riesgo No Tolerable, Medianamente Tolerable, Tolerable y Aceptable.

El total de viviendas en situación de Riesgo No Tolerable es de 47, para las cuales se identificó un lugar habitable desde el punto de vista ambiental y que no presenta exposición a las demás amenazas contempladas en el Decreto 1077 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Este estudio recomienda que los recursos para tal reducción del riesgo se gestionen de los recursos que la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, tiene destinado para la Reducción del Riesgo de los habitantes de la ZAVA. Además se recomienda como imperiosa, la construcción y mejora de la vía que del casco urbano de La Florida conduciría al municipio de Chachaguí, pasando por Tuja y Matituy, ya que esta sería la única salida tanto para los habitantes de la Florida, como para el Occidente del Departamento, caso de una erupción de Galeras que afecte la vía circunvalar en el tramo Nariño-Jenoy.

Referencias

Acosta Moncayo, L. A., Muñoz Muñoz, M. M. (2012). Percepción y prevención del riesgo volcánico Galeras en el corregimiento de Mapachico municipio de Pasto. *Biblioteca Virtual Universidad de Nariño*, 115. Retrieved from <http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/bibliotecavirtual/viewer.aspx?&var=85750>

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., Delgado-Granados, H., & Dingwell, D. B. (2012). Hazard map for volcanic ballistic impacts at Popocatepetl volcano (Mexico). *Bulletin of Volcanology*, 74(9), 2155–2169. <https://doi.org/10.1007/s00445-012-0657-2>

Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., Farraz-montes, I. A., & Delgado Granados, H. (2006). at Volcán de Fuego de Colima (México), 2402(09), 195–202. [https://doi.org/10.1130/2006.2402\(09\)](https://doi.org/10.1130/2006.2402(09)).

Anderson, E. C. (1999). Monte Carlo Methods Importance Sampling. E.A. Thompson.

Asproulias, I. (2014). RANS Modelling for Compressible Turbulent Flows Involving Shock Wave Boundary Layer Interactions. PhD. Thesis in faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Manchester.

Atkinson, G., Cusco, L., Painter D., and Tam V. (2009). Interpretation of overpressure markers and directional indicators in full-scale deflagrations and detonations. IChemE SYMPOSIUM SERIES NO. 155, 500-506.

Auker, M. R., Sparks, R. S. J., Siebert, L., Crossweller, H. S., & Ewert, J. (2013). A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology*, 2(1), 1. <https://doi.org/10.1186/2191-5040-2-2>

Baalousha, H. (2009). Using orthogonal array sampling to cope with uncertainty in ground water problems. *Ground Water*, 47(5), 709–713. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00576.x>

Banks, N. G., Calvache V, M. L., & Williams, S. N. (1997). 14C ages and activity for the past 50 ka at Volcán Galeras, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 39–55. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00085-6)

Behncke, B., Berger, J., Jenkins, S., Neri, M., Spence, R., & Stahr, K. (2012). Volcanic events and corresponding damage. In C. Bignami, V. Bosi, C. Costantini, F. Lavigne, & P. Thierry (Eds.), *Handbook for Volcanic Risk Management* (pp. 25–43). Orleans, France: Miavita.

Berthaut-Gerentes, J.; Delaunay, D. (2015) LES: Unsteady Atmospheric Turbulent Layer Inlet. A Precursor Method Application and Its Quality Check. *Computation* 2015, 3, 262-273.

Bignami, C., Bosi, V., Costantini L., Lavigne F., Thierry P. (2016) *Handbook for Volcanic Risk Management, Prevention, Crisis Management and Resilience*, MIAVITA, 2012.

Blong, R. J., Grasso, P., Jenkins, S. F., Magill, C. R., Wilson, T. M., McMullan, K., & Kandlbauer, J. (2017). Estimating building vulnerability to volcanic ash fall for insurance and other purposes. *Journal of Applied Volcanology*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s13617-017-0054-9>

Caballero Hernández, J. A., Diaz Salazar, M., Moradillos Paz-Lago, M. & Pavoni Oliver, S., (2014) Implementación de la Función Sigmoidal Logarítmica en un FPGA. *EAC* [online]. vol.35, n.2, pp.35-44. ISSN 1815-5928.

Calder, E., Wagner, K. and Ogburn S., (2015) Volcanic Hazard Maps. In Loughlin, S., Sparks, S., Brown, S., Jenkins, S. and Vye-Brown, Ch. *Global volcanic Hazards and Risk*, (pp 335-343), Cambridge University Press.

Calvache, M. (1990). *Geology and Volcanology of the Recent Evolution of Galeras Volcano, Colombia*. Louisiana State University.

Calvache, M. (1995). *The geological evolution of Galeras Volcanic Complex*. PhD Thesis. Arizona State University.

Calvache, M. L., & Duque-Trujillo, J. F. (2016). Geomorphological Features of the Galeras Volcanic Complex. In M. Hermelin (Ed.), *Landscapes and Landforms of Colombia* (pp. 193–202). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0_16

Calvache V., M. L., & Williams, S. N. (1992). Lithic-dominated pyroclastic flows at Galeras volcano, Columbia - an unrecognised hazard. *Geology, Boulder*, 20(September 2009), 539–542. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0539](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0539)

Calvache V, M. L., Cortés J, G. P., & Williams, S. N. (1997). Stratigraphy and chronology of the Galeras volcanic complex, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1–4), 5–19. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00083-2)

Capra, L., Manea, V. C., Manea, M., & Norini, G. (2011). The importance of digital elevation resolution on granular flow simulations: a test case for Colima volcano using TITAN2D computational routine. *Nat. Hazards*, 59, 665–680. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9788-6>

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2017). *Thermodynamics: An engineering approach*. Boston: McGraw-Hill.

Cepeda, H. (1990). Memorias del Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del Volcán Galeras. In *Conferencia de riesgos Geológicos del Valle de Aburra* (pp. 111–116). Medellín, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Ciurean, R. L., Hussin, H., van Westen, C. J., Jaboyedoff, M., Nicolet, P., Chen, L., Glade, T. (2017). Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps. *Natural Hazards*, 85(2), 929–957. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2612-6>

Clarke, A., Esposti Ongaro, T., Belousov, A. (2015). Vulcanian Eruptions. In Sigursson, S., *Encyclopedia of Volcanoes* (pp 505-518), ISBN 9780123859389, Academic Press.

Congreso de la República, (2012) LEY 1523 DE 2012. (Abril 24). Diario Oficial No. 48.411 de 24 de abril de 2012.

Connor, C. B. (2011). *A Quantitative Literacy View of Natural Disasters and Nuclear Facilities*. The Berkeley Electronic Press.

Connor, C. B. (2015). PERL script for motion projectile motion with drag. Retrieved from http://131.247.211.166/tiki/tiki-index_raw.php?page=Ballistics

Constantinescu, R., Thouret, J. C., & Irimuş, I. A. (2011). Computer modeling as tool for volcanic hazards assessment: An example of pyroclastic flow modeling at el Misti volcano, Southern Peru. *Geographia Technica*, (2), 1–14.

Córdoba, G. Villarosa, G., & Guerrero, A. (2018). Probabilistic lahar hazard assesment by modeling : the case of Villa La Angostura , provincia de Neuquén , Argentina. In J. C. Thouret

(Ed.), *Hazard and risk mapping The Arequipa-El Misti case study and other threatened cities* (pp. 79–82). Clermont, France: Presses Universitaires Bñlaise Pascal.

Córdoba, G. (2007). *Dilute particle-laden currents: dynamics and deposit patterns*. University of Bristol, UK.

Córdoba, G. A., Sheridan, M. F., & Pitman, B. (2018). Titan2F code for lahar hazard assessment : derivation, validation and verification. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 611–631.

Córdoba, G., & Del Risco, E. (1997). Shock wave hazard map of Galeras volcano, Colombia. In *Shock wave hazard map of Galeras volcano, Colombia*. (p. 54). Puerto Vallarta.

Córdoba, G., & Del Risco, E. (1998). An approach to the volcanic risk assessment due to shock wave hazard at Galeras volcano influenced area. (p. 25). Rome, Italy.

Córdoba, G., Delgado, H., Rodriguez, D., Paredes, P., & Moriano, E. (2018). Quantitative risk analysis for lahar hazard applied to the case of Xalitziñtla , NE flank of Popocatepetl volcano , Mexico. In J. C. Thouret (Ed.), *Hazard and risk mappping: The Arequipa-El Misti case study and other threatened cities* (pp. 83–86). Clermont, France: Presses Universitaires Blaise Pascal.

Córdoba, G., Villarosa, G., Sheridan, M. F., Viramonte, J. G., Beigt, D., & Salmuni, G. (2015). Secondary lahar hazard assessment for Villa la Angostura, Argentina, using Two-Phase-Titan modelling code during 2011 Cordón Caulle eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(4), 757–766. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-757-2015>

Corporación OSSO, Fondo Nacional de Calamidades, OSSO, C., & Fondo Nacional de Calamidades. (2009). Estudio de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del volcán Galeras - Vivienda (p. 80). San Juan de Pasto.

Corte Constitucional. (2015). Constitución Política de Colombia: Actualizada con Actos Legislativos a 2015. Edición Espacial. Corte Constitucional. ISSN: 2344-8997.

Costa, A., Macedonio, G., & Folch, A. (2006). A three-dimensional Eulerian model for transport and deposition of volcanic ashes. *Earth and Planetary Science Letters*, 241, 634–647. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.019>

Costa, A., Folch, A., and MacEdonio, G. (2010) A model for wet aggregation of ash particles in volcanic plumes and clouds: Theoretical formulation. *J. Geophys. Res.-Solid Ea.*, 115, 1–14, doi:10.1029/2009JB007175,

Costa, A., Pioli, L., & Bonadonna, C. (2016). Corrigendum to “Assessing tephra total grain-size distribution: Insights from field data analysis” [*Earth Planet. Sci. Lett.* 443 (2016) 90–107] (S0012821X16300577)(10.1016/j.epsl.2016.02.040). *Earth and Planetary Science Letters*, 465, 205–209. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.03.003>

Dalbey, K., Patra, A. K., Pitman, E. B., Bursik, M. I., & Sheridan, M. F. (2008). Input uncertainty propagation methods and hazard mapping of geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(5), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2006JB004471>

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

Del Pozzo, A. M., Alatorre Ibarguengoitia, M., Arana Salinas, L., Bonasia, R., Capra Pedol, L., Cassata, W., Tellez Ugalde, E. (2017). Estudios geológicos y actualización del mapa de peligros del volcán Popocatepetl. México.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2006). *Estimaciones de población 1985 -2005 y proyecciones de población 2005 -2020 Total municipal por área.*

Di Bucci, D., & Savadori, L. (2018). Defining the acceptable level of risk for civil protection purposes: a behavioral perspective on the decision process. *Natural Hazards*, 90(1), 293–324. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3046-5>

Ding, D., & Liu, X. (2012). Bayesian Methods with Application in Risk Analysis. In *National Conference on Information Technology and Computer Science* (pp. 788–791).

Druitt, T. H. (1996). Pyroclastic Density Currents. In J. S. Gilbert & R. S. J. Sparks (Eds.), *The physics of explosive volcanic eruptions* (pp. 145–182). Cambridge, UK.: The Geological Society.

Duhart, P., Moreno, H., Basualto, D., Mella, M., & Muñoz, J. (2009). Erupción en curso del volcán Chaitén : productos, impactos y colapso parcial de domos del 19 de febrero de 2009.

In F. de C. F. y Matemáticas (Ed.), XII Congreso Geológico Chileno. Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Eckhardt, R. (1987). Stan Ulam, John Von Neumann, and the Monte Carlo Method. *Los Alamos Science*, 15, 131–136.

Eidsvig, U. M. K., Papathoma-Köhle, M., Du, J., Glade, T., & Vangelsten, B. V. (2014). Quantification of model uncertainty in debris flow vulnerability assessment. *Engineering Geology*, 181(August 1987), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.08.006>

Eslava, J. (1992). Perfil Altitudinal de la temperatura media en Colombia. *Geofísica Colombiana*, 1, 37–52.

Espinosa, A. (1980). *Sur les roches basiques et ultrabasiques du bassin du Patía (Cordillere Occidentale del Andes Colombiennes). Etude geologique et petrographique.*

Espinoza, A. (2012). *Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia*. (F. y N. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Ed.). Quindio, Colombia: Universidad del Quindio. Retrieved from http://accefyn.metabiblioteca.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=16817&shelfbrowse_itemnumber=14300

Espinoza, D., Scanlon, T., and Brown, R. (2015). Validation of Tools to Accelerate High-Speed CFD Simulations Using OpenFOAM. 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conferences, (AIAA 2015-3566).

Ettinger, S., Mounaud, L., Magill, C., Yao-Lafourcade, A. F., Thouret, J. C., Manville, V., Manrique Llerena, N. (2016). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541, 563–581. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>.

Ferson, S. (2005). Bayesian methods in risk assessment. *Advances in Nuclear Science and Technology*, 13(May), 415–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-029309-4.50010-6>

Fisher, T. (2008). Synopsis of Causation Blast Injury of the Ear. Ministry of Defence, (September 2008).

Freitas, P., G. (2014). Numerical simulation of Compressible flow over a deep cavity. Master's Thesis of Science Degree in Aerospace Engineering. Instituto Superior Tecnico Lisboa, Portugal.

Folch, A., Costa, A., & Basart, S. (2012). Validation of the FALL3D ash dispersion model using observations of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash clouds. *Atmospheric Environment*, 48, 165–183. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.072>

Galas, S., Dalbey, K., Kumar, D., & Patra, A. (2007). Benchmarking Titan2D Mass Flow Model Against a Sand Flow Experiment and the 1903 Frank Slide. In *The 2007 International Forum on Landslide Disaster Management* (pp. 899–917).

Garcia-Aristizabal, A., Kocot, J., Russo, R., & Gasparini, P. (2018). A probabilistic tool for multi-hazard risk analysis using a bow-tie approach: application to environmental risk assessments for geo-resource development projects. *Acta Geophysica*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0201-7>

García, A. M., Murcia, H. F., Cortés, G. P., & Laverde, C. A. (2011). Simulación de flujos Piroclásticos en el Volcán Galeras con el Código TiTAN2D, 36(1), 135–161. <https://doi.org/10.15446/gc>

Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1–2), 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>

Glasstone, S., & Dolan, P. J. (1977). *The Electromagnetic Pulse and its Effects. The Effects of Nuclear Weapons*. Washington: United States Department of Defense & Energy.

Girault, F., Carazzo, G., Tait, S., & Ferrucci, F. (2014). The effect of total grain-size distribution on the dynamics of turbulent volcanic plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.021>

Gomez, D. (2018). *respuesta_SGC_a_UDENAR_datos_ceniza_23feb18*. Pasto, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Greenshields, C. (2017). *OpenFoam user guide*.

Greenshields, C., Weller, H., Gasparini, L., & Reese, J. (2009). Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a collocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 63, 1–21.

Guerrero López, D. A. (2016). *Aplicación para ANDROID para el cálculo de la amenaza relativa frente a flujos piroclásticos. Tesis de grado*. Universidad de Nariño.

Guerrero, I., Villota, D., Cordoba, G., Gomez H. (2018). Efectos de la concentración de sólidos en el fenómeno de sobre-elevación en canales artificiales curvos. *Ingeniería y Competitividad*, Volumen 20, No. 1, p. 21 – 34.

Gutiérrez, H., & Zhang, H. (2009). Análisis bayesiano para la diferencia de dos proporciones usando R [Bayesian Analysis for the Difference of Two Proportions Using R]. *Revista de Metodos Cuantitativos Para La Economia y La Empresa*, 8(8), 50–70. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77953771831&partnerID=40&md5=7c07be6d8581e8fd7676ef6e38f8cd27>

Hamann, W.-R. (2018). WRPLOT Manual. Retrieved from [~wrh/wrplot.dir/manwrplot.dir/wrinfo.en.pdf](http://wrh/wrplot.dir/manwrplot.dir/wrinfo.en.pdf)

Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications. *Biometrika*, 57(1), 97–109.

Heim, A. (1932). *Der Bergsturz und Menschenleben. Fretz und Wasmuth*. Zurich: Verlag.

Helens, M. S., & Pierson, T. C. (1985). Geological Society of America Bulletin Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars. *Geological Society Of America Bulletin*. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1056](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1056)

Herd, G. (1986). Ruiz volcano disaster. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 67 (19), 457–460.

Holdridge, L. R. (1987). *Ecología basada en zonas de vida*.

Hurtado, A. D., & Cortéz, G. P. J. (1997). Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77(1–4), 89–100. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00088-1)

Hsu, W. K., Tseng, C. P., Chiang, W. L., & Chen, C. W. (2012). Risk and uncertainty

analysis in the planning stages of a risk decision-making process. *Natural Hazards*, 61(3), 1355–1365. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0032-1>

Hunter, P. R., & Fewtrell, L. (2001). Acceptable risk. In *Water Quality: Guidelines, Standards and Health*. (World Heal, pp. 207–225). London, UK: IWA Publishing.

IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D.C., Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/Preliminares.pdf>

Ingeominas. (1997). *Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras (Tercera Versión)*. Bogotá, D.C; Colombia.

Ingeominas, (2000). Atlas de Amenaza volcánica en Colombia. Ingeominas. Código TMPSGCMEDELLI60530. Bogotá.

INGEOMINAS, I. colombiano de geología y minería. (2010). *Resumen de actividad del volcán Galeras del 29 de diciembre de 2009 al 4 de enero de 2010*.

INGEOMINAS, I. colombiano de geología y minería. (n.d.). Actividad historica Galeras.

Iverson, R. M. (1978). Gravity-driven mass flows. *Springer Berlin Heidelberg*, 558–570.

Jacob, M., & Hungr, O. (2015). Debris-flow Hazards and Related Phenomena (pp. 445–487). Chichester, UK.: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5>

Jenkins, S., Wilson, T., Loughlin, S., Sparks, S., Brown, S., Jenkins, S., & Vye-brown, C. (2015). Volcanic ash fall hazard and risk. In *Global Volcanic Hazards and Risk* (pp. 173–222). <https://doi.org/10.1017/CBO9781316276273>

Johnson, J. B., 2003, Generation and propagation of infrasonic airwaves from volcanic explosions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121, 1-14.

Johnson, J. B., Ruiz, M. C., Ortiz, H. D., Watson, L. M., Viracucha, G., Ramon, P., & Almeida, M. (2018). Infrasound tornillos produced by Volcán Cotopaxi's deep crater. *Geophysical Research Letters*, 45, 5436 – 5444. <https://doi.org/10.1029/2018GL077766>

Katz, R. W., & Lazo, J. (2012). *Economic Value of Weather and Climate Forecasts. The Oxford Handbook of Economic Forecasting*. Oxford, UK. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195398649.013.0021>

Katz, R. W., & Murphy, A. H. (1997). Forecast value: prototype decision- making models. In R. W. Katz & A. H. Murphy (Eds.), *Economic Value of Weather and Climate Forecasts*

(pp. 183–217). Cambridge, UK.: Cambridge University Press.

Konstantinou, K. I. (2015). Maximum horizontal range of volcanic ballistic projectiles ejected during explosive eruptions at Santorini caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.012>

Lavigne, F., Thouret, J.-C., Hadmoko, D., & Sukatja, C. (n.d.). Lahars in java: initiations, dynamics, hazard assessment and deposition processes. *Forum Geografi*.

Llinares, M., Ortiz, R., Marrero, J. (2004). Riesgo volcanico, Direccion general de proteccion civil y emergencias. España.

Lorenzon, D., Elaskar, S. (2015). Simulación de flujos supersónicos bidimensionales y axialmente simétricos con OpenFoam. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. 2, No. 2, 65-76.

Macedonio G., Costa A., Longo A., (2005), A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Comput. Geosci.* 31 (7), pp. 837–845

Macedonio, G., & Costa, A. (2014). Parfit-2.1.

Macedonio, G., & Costa, A. (2016). HAZMAP 2.4.4 User Manual. Retrieved from http://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_28001

Maeno, F., Nakada, S., Nagai, M., & Kozono, T. (2013). Ballistic ejecta and eruption condition of the vulcanian explosion of Shinmoedake volcano, Kyushu, Japan on 1 February, 2011. *Earth, Planets and Space*, 65(6), 609–621. <https://doi.org/10.5047/eps.2013.03.004>

Malin, M. C., & Sheridan, M. F. (1982). Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. *Science*, 217(4560), 637–640. <https://doi.org/10.1126/science.217.4560.637>

Mastin, L. G. (2001). A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions. Open-File Report 01-45. U. S. Geological Survey.

Matala, A. (2008). *Sample Size Requirement for Monte Carlo simulations using Latin Hypercube Sampling. Independent Research Projects in Applied Mathematics*. Retrieved from http://www.sal.tkk.fi/vanhat_sivut/Opinnot/Mat-2.4108/pdf-files/emat08.pdf

MASKREY, A. (1993). Los desastres no son naturales. La Red Lima, 140p.

Marti, A., Folch, A., Jorba, O., & Janjic, Z. (2017). Volcanic ash modeling with the online NMMB-MONARCH-ASH v1 . 0 model : model description , case simulation , and evaluation. *Atmos. Chem. Phys.*, 4005–4030. <https://doi.org/10.5194/acp-17-4005-2017>

Marzocchi, W., & Woo, G. (2009). Principles of volcanic risk metrics: Theory and the case study of Mount Vesuvius and Campi Flegrei, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 114(B3), B03213. <https://doi.org/10.1029/2008JB005908>

Mazumder, S. (2006). Numerical methods for partial differential equations: finite difference and finite volume methods. Elsevier Inc., pp 277-382.

Medici, E. F., Allen, J. S., & Waite, G. P. (2013). Modeling shock waves generated by explosive volcanic, 414–421. <https://doi.org/10.1002/2013GL058340>.Received

Mercx, W., Weerheijm J., and Verhagen, T. (1991). Some considerations on the damage criteria and safety distances for industrial explosions, IChemE Symposium series no. 124, 255-275.

Mckay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42, 55–61.

McCLUNG DM. Superelevation of flowing avalanches around curved channel bends. *Journal of Geophysical Research*. 106(B8): p. 16489-16498, 2001.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2015). Decreto 1077. Diario Oficial 49.523 del martes 26 de mayo de 2015.

Moriano Tello, D. E., Paredes Ruiz, P. A., Córdoba Guerrero, G., & Delgado Granados, H. (2017). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitlitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 223–241.

Morrissey, M., Chouet, B. (1997). Burst conditions of explosive volcanic eruptions recorded on microbarographs. *Science*, 275(5304), 1290-1293.

Murcia, A., Cepeda, H. (2012). Mapa Geología de la Plancha 429 Pasto. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. Esc. 1:100.000.Plancha 4

Murcia, H. E., Sheridan, M. F., Macías, J. L., & Cortés, G. P. (2010). TITAN2D simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín Volcano, Colombia: Hazard implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.005>

Naranjo, J. L., Sigurdsson, H., Carey, S. N., & Fritz W. J. (1986). Eruption of the Nevado Del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233 (4767), 961–963.

Newhall, G., & Self, S. (2014). The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism The Volcanic Explosivity Index (VEI)' An Estimate of Explosive Magnitude for Historical Volcanism. *Research Gate*, 87(December), 1231–1238. <https://doi.org/10.1029/JC087iC02p01231>

NEWHALL, C., and PALLISTER, J. (2015). Using Multiple Data Sets to Populate Probabilistic Volcanic Event Trees. In SHRODER, J. and PAPAIE, P., *Volcanic Hazards, Risks, and Disasters*, (pp 203- 232), Elsevier.

Ogburn, S., Berger, J., Calder, E., Lopes, D., Patra, A., Pitman, E. B., Wolpert, R. (2016). Pooling strength amongst limited datasets using hierarchical Bayesian analysis, with application to pyroclastic density current mobility metrics. *Statistics in Volcanology*, 2(January), 1–26. <https://doi.org/10.5038/2163-338X.2.1>

Ogburn, S., & Calder, E. S. (2017). The relative effectiveness of empirical and physical models for simulating the dense undercurrent of pyroclastic flows under different emplacement conditions. *Frontiers in Earth Science*, 5, 1–23. <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00083>

Organización Panamericana de la Salud. (2002). *Los volcanes y la protección de la salud*.

Ortiz, R. (1996). *Riesgo volcánico. Servicio de publicaciones del Excmo, Cabildo Insular de Lanzarote*.

Pabón-Caicedo, J. D., & Eslava-Ramírez, J. A. (2001). Generalidades De La Distribución Espacial Y Temporal De La Temperatura Del Aire Y De La Precipitación En Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47–59. <https://doi.org/ISSN-0124-6984>

Papathoma-Köhle, M., Totschnig, R., Keiler, M., & Glade, T. (2012). A new vulnerability function for debris flow - The importance of physical vulnerability assessment in Alpine areas. In 12th Congress Interpraevent (pp. 1033–1043).

Paredes, P., & Moriano, E. (2018). Quantitative risk analysis for lahar hazard applied to the case of Xalitzintla , NE flank of Popocatepetl volcano , Mexico, 83–86.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2005). *Plan De Manejo 2006-2010 Santuario De Flora Y Fauna Galeras*.

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2015). Plan de Manejo Santuario de Flora y Fauna Galeras, 67 (Agosto 2014), 217.

Patra, A. K., Bauer, A. C., Nichita, C. C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., & Renschler, C. S. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 1–21.

Pierson, T. C. (1980). Erosion and deposition by debris flows at Mt. North Canterbury, New Zeland. *Earth Surface Processes*, 5, 227–247.

Pierson, T. C., & Scott, K. M. (1985). Downstream Dilution of a Lahar: Transition From Debris Flow to Hyperconcentrated Streamflow. *Water Resources Research*, 21(10), 1511–1524. <https://doi.org/10.1029/WR021i010p01511>

Pierson, T.C., Janda, R.J., Umbal, J.V., and Daag, A.S. (1992). Immediate and long-term hazards from lahars and excess sedimentation in rivers draining Mount Pinatubo, Philippines: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 92-4039, 35 p.

Pickering, E., Bockholt, J. (1971). Probabilistic air blast failure criteria for urban structures: U.S.A., Stanford Research Inst Menlo Park Ca, reporte técnico, 110 p.

Pilger, G. G., Costa, J. F., & Koppe, J. (2008). The benefits of Latin Hypercube Sampling in sequential simulation algorithms for geostatistical applications. *Applied Earth Science: Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, Section B*, 117(4), 160–174. <https://doi.org/10.1179/174327508X387483>

Pulgarín, B. & Córdoba, G. (2017). Intercambio y socialización de información sobre el reconocimiento geológico preliminar del valle del río Barranco. Acta de Comité o Reunión F-DIR-CDT-002. Servicio Geológico Colombiano. Pasto.

Quan Luna, B., Blahut, J., Westen, C. J. van, Sterlacchini, S., Asch, T. W. J. van, & Akbas, S. O. (2011). The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1-2011>

Quinn, J.B. & Quinn, G.D., (2010). A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. Elsevier. *Dental Materials*, 26, 135-147

Richards, S., Zhang, X., Chen, X., & Nelson, P. (2004). The evaluation of non-reflecting boundary conditions for duct acoustic computation. *Journal of Sound and Vibration*, 270(539–557).

Rodríguez, D. M. (2016). Estudio del riesgo por lahares en los corregimientos de Chiles y Panan. Pasto, Colombia.

Rodríguez, D. M., Córdoba, G., & Delgado-Granados, H. (2017). Evaluación probabilística del peligro por lahares en el flanco NE del Volcán Popocatepetl. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(1), 243–260.

Saito, T., Kitamura, T., Takayama, K., Fujii, H., Taniguchi, H. (1994). Numerical simulation of blast wave propagation induced by eruptions of volcanoes. *Shock Waves. Proceedings of the 19 ISSW vol. III*, pp. 385-390.

Ruiz-Bueno A. (2008). La mostra: alguns elements per a la seva confecció. REIRE. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 1(1): p. 75-88.

Saito, T., Eguchi, T., Takayama, K., & Taniguchi, H. (2001). Hazard predictions for volcanic explosions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106, 35–51.

Saito, T., & Takayama, K. (2005). Applying shock-wave research to volcanology. *Computing in Science and Engineering*, 7, 30–35.

Saito, T., Yamamoto, H., Oshima, H. (2009). Numerical simulations of explosive volcanic eruption: blast waves and pyroclastic flows. *International journal of aerospace innovations*, 1(2), 81-88.

Sandri, L., Costa, A., Selva, J., Tonini, R., Macedonio, G., Folch, A., & Sulpizio, R. (2016). Beyond eruptive scenarios: Assessing tephra fallout hazard from Neapolitan volcanoes. *Scientific Reports*, 6(March), 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep24271>

Sandri, L., Jolly, G., Lindsay, J., Howe, T., & Marzocchi, W. (2012). Combining long- and short-term probabilistic volcanic hazard assessment with cost-benefit analysis to support decision making in a volcanic crisis from the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 74(3), 705–723. <https://doi.org/10.1007/s00445-011-0556-y>

Savage, S. B., & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mechanics*, 199, 177–215.

Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Actualización Del Mapa De Amenaza Volcánica Del Volcán Galeras – Colombia*. Pasto, Colombia. Retrieved from https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapa_Amenaza_Volcanica_Volcan_Galeras_2015.pdf

Sheridan, M. F. (1980). Pyroclastic block flow from the September, 1976, eruption of La Soufrière volcano, Guadeloupe. *Bulletin Volcanologique*, 43(2), 397–402. <https://doi.org/10.1007/BF02598040>

Sheridan, M. F., Hubbard, B., Carrasco-Nunez, G., & Siebe, C. (2004). Pyroclastic flow hazard at Volcan Citlaltepeltl. *Natural Hazards*, 33(2), 209–221. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000037028.89829.d1>

Sheridan, M. F., & Macias, J. L. (1995). Estimation of risk probability for gravity – driven pyroclastic flows at Volcan Colima, Mexico. *J. Volc. Geoth. Research*, 66, 251–256.

Sheridan, M. F., Patra, A. K., Dalbey, K., & Hubbard, B. (2010). Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D. In G. Groppelli & L. Viereck-Goette (Eds.), *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*. Geological Society of America. Retrieved from [https://doi.org/10.1130/2010.2464\(14\)](https://doi.org/10.1130/2010.2464(14))

Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, A., & Nichita, C. C. (2005). Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139(1–2), 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.011>

Smith, G. A., & Fritz W. J. (1989). Volcanic influences in terrestrial sedimentation. *Geology, Boulder*.

Solow, A. R. (2001). An Empirical Bayes Analysis of Volcanic Eruptions. *Mathematical Geology*, 33(1), 95–102. <https://doi.org/10.1023/A:1007514410745>

Sparks, R. S. J., Bursik, M. I., Carey, S. N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H., & Woods, A. W. (1997). *Volcanic Plumes*. New York: John Wiley and Sons LTD.

Sparks, S. (2009). Assessment of volcanic hazards , vulnerability , risk and uncertainty, (August).

Spence, R., Baxter, P. J., & Zuccaro, G. (2004). Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow, a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133(1), 321–343.

Spence, R. J. S., Kelman, I., Baxter, P. J., Zuccaro, G., & Petrazzuoli, S. (2005). Residential building and occupant vulnerability to tephra fall. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5(4), 477–494. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-477-2005>

Stefanescu, E. R., Bursik, M., Cordoba, G., Dalbey, K., Jones, M. D., Patra, A. K., Sheridan, M. F. (2012a). Digital elevation model uncertainty and hazard analysis using a geophysical flow model. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 468(2142), 1543–1563. <https://doi.org/10.1098/rspa.2011.0711>

Stefanescu, E. R., Patra, A. K., Sheridan, M. F., & Cordoba, G. (2012b). Estimating conditional probability of volcanic flows for forecasting event distribution and making evacuation decisions (Vol. 14). Viena: Geophysical Research Abstracts.

Stein, M. (1987). Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. *Technometrics*, 29(2), 143–151.

Stinton, A. J., Sheridan, M. F., Patra, A. K., Dalbey, K., & Namikawa, L. M. (2004). Integrating variable bed friction into Titan2D mass-flow model: application to the Little Tahoma Peak avalanches, Washington. *Acta Vulcanol.*, 25, 153–163.

Stix J, Calvache M, Williams S (1997). Galeras volcano, Colombia. Interdisciplinary study of a Decade Volcano. *J Volcanol Geoth Res* 77:1–4

Swiler, L. P., Wyss, G. D., Mead, S. R., Magill, C., Lemiale, V., Thouret, J.-C., and Gertisser, R. (2016). Examining the impact of lahars on buildings using numerical modelling. *SAND Report, 541*(September), 88. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.03.002>

Pierson, T.C., Janda, R.J., Umbal, J.V. and Daag, J.S. (1992). *Immediate and long term hazards from lahars and excess sedimentation in rivers draining Mt. Pinatubo, Philippines*. U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations. Report 92-4039

Thouret, J. C., Ettinger, S., Guitton, M., Santorni, O., Magill, C., & Martelli, K. (2014). Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Natural Hazards, 73*(3), 1771–1815.

Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Sulpizio, R., Zaccarelli, L., Vito, M. A. Di, & Marzocchi, W. (2016). Uncertainty Assessment of Pyroclastic Density Currents at Mount Vesuvius (Italy) Simulated Through the Energy Cone Model. *Natural Hazard Uncertainty Assessment: Modeling and Decision Support*, 125–145. <https://doi.org/10.1002/9781119028116.ch9>

Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Zaccarelli, L., Di Vito, M. A., Sulpizio, R., & Marzocchi, W. (2016). Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy). *Bulletin of Volcanology, 78*(11). <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1073-9>

Thouret, J. C., Ettinger, S., Guitton, M., Santorni, O., Magill, C., & Martelli, K. (2014). Assessing physical vulnerability in large cities exposed to flash floods and debris flows: the case of Arequipa (Peru). *Natural Hazards, 73*(3), 1771–1815.

Thouret, J. C., Ramírez, J. C., Gibert-Malengreau, B., Vargas, C. A., Naranjo, J. L., Vandemeulebrouck, J., Funk, M. (2007). Volcano-glacier interactions on composite cones and lahar generation: Nevado del Ruiz, Colombia, case study. *Annals of Glaciology, 45*, 115–127. <https://doi.org/10.3189/172756407782282589>

Torres-Corredor, R. A., Ponce-Villarreal, P., & Gómez-Martínez, D. M. (2017). Vulnerabilidad física de cubiertas de edificaciones de uso de ocupación normal ante caídas de ceniza en la zona de influencia del volcán Galeras. *Revista Boletín de Geología, UIS, 39*(2), 67–82. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017005>

Thywissen, K. (2006). Components of Risk. A Comparative Glossary. UNU-EHS Publications, Germany. <https://doi.org/10.1093/iclqaj/24.3.577>

Trydal, J., 2015. CFD analysis of temperature development due to flow restriction in pipeline. Master's thesis in Mechanical and Structural and Materials Science, University of Stavanger, Noruega.

UNDRO. (1990). *Mitigating Natural Disasters*. New York: Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator.

UNISDR. (2009). Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. Retrieved from http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

UNISDR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 - 2030. Third World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 14-18 March 2015*. <https://doi.org/A/CONF.224/CRP.1>

UNISDR. (2017). *National Disaster Risk Assessment*. (U. N. O. for D. R. Reduction., Ed.). Geneva: United Nations.

UNGRD. (2013). Plan nacional para la gestion del riesgo de desastres. Bogota, Colombia.

Valentine, G. A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 87(1–4), 117–140. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00094-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00094-8)

Villarosa, G., & Guerrero, A. (2018). Probabilistic lahar hazard assesment by modeling : the case of Villa La Angostura , provincia de Neuquén , Argentina, 79–82.

Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1–2), 151–188. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(90\)90075-Q](https://doi.org/10.1016/0377-0273(90)90075-Q)

Voinovich, P., Timofeev, E., Takayama, K., Saito, T., Galyukov, A. (1998). 3-D Unstructured Adaptive Supercomputing for Transient Problems of Volcanic Blast Waves, AIAA paper 98-0540.

Ye, K. Q. (1998). Orthogonal Column Latin Hypercubes and Their Application in Computer Experiments. *Journal of the American Statistical Association*, 93(444), 1430–1439. <https://doi.org/10.2307/2670057>

Weibull W. (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech* 1951;(September):293–7

Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I., & Cole, J. W. (2014). Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148–182. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.030>

Williams, G. T. (2016). THE VULNERABILITY OF AUCKLAND CITY' S BUILDINGS TO TEPHRA HAZARDS.

Williams, G. T., Kennedy, B. M., Wilson, T. M., Fitzgerald, R. H., Tsunematsu, K., & Teissier, A. (2017). Buildings vs. ballistics: Quantifying the vulnerability of buildings to volcanic ballistic impacts using field studies and pneumatic cannon experiments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343(July), 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.06.026>

Witham, C. S. (2005). Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148(3–4), 191–233. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.04.017>

White, F. M. (1999). *Fluid mechanics*. Boston, Mass: WCB/McGraw-Hill.

Woo, G. (2008). Probabilistic criteria for volcano evacuation decisions. *Natural Hazards*, 45(1), 87–97. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9171-9>

Wüthrich, B. (2007). Simulation and validation of compressible flow in nozzle geometries and validation of OpenFOAM for this application. Master's thesis in Computational Science, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland.

Yokoo, A., Ishihara, K. (2007). Analysis of pressure wave observed in Sakurajima eruption movies, *Earth Planets and Space*, 59(3), 177-181.

Zancheta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M., Leoni, F., & Santacroce, R. (2004). Characteristics of May 5–6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133 (1), 377–393.

Zicanov, O. (2015). *Essential computational fluid dynamics*. John Wiley & Sons, New Jersey, pp 1–295.

Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R.J.S., Baxter, P.J. (2008). Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 178, pp. 416–453.

