

**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN EL SECTOR DE LA
AVENIDA MIJITAYO DE PASTO ANTE LA AMENAZA DE FLUJOS DE LODO
PROVENIENTES DE LA QUEBRADA MIJITAYO**

**GABRIEL HUMBERTO ARTEAGA RAMIREZ
WILMER CAMILO ZAMBRANO OJEDA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2019**

**ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL EN EL SECTOR DE LA
AVENIDA MIJITAYO DE PASTO ANTE LA AMENAZA DE FLUJOS DE LODO
PROVENIENTES DE LA QUEBRADA MIJITAYO**

**GABRIEL HUMBERTO ARTEAGA RAMIREZ
WILMER CAMILO ZAMBRANO OJEDA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniería Civil**

**Director:
PhD. GUSTAVO CÓRDOBA GUERRERO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2019**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

“Las ideas y conclusiones aportadas en el Trabajo de Grado, son responsabilidad exclusiva de su autor”

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13 del Acuerdo No. 005 del 26 de Enero de 2010, emanado por el Honorable Consejo Académico de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios que facilitó el camino para poder estudiar la carrera de ingeniería civil, permitiendo superar una bonita etapa de la vida que prepara para asumir de forma responsable y ética cualquier reto profesional. También agradecer a los profesores que asumieron su papel de guías y educadores, en especial al ingeniero Gustavo Córdoba Guerrero PhD. por su perseverancia y paciencia al hacer este estudio junto al equipo de trabajo, obteniendo como resultado el presente trabajo de investigación. Por último, siendo lo más importante, gracias a nuestros padres, a nuestra familia y nuestros amigos que con ayuda de Dios nos apoyaron día a día para superar cada reto dentro de la carrera y también en la parte final para lograr la graduación. Muchas gracias a todos, valoramos a cada uno de ustedes por la importancia que representan para la vida.

DEDICATORIA

Éste trabajo de investigación es dedicado a las víctimas de desastres naturales causados por los flujos de lodos de cualquier origen, que no tuvieron la posibilidad de contar con una advertencia que pudo suministrar este estudio como primera instancia, porque junto al estudio de amenaza, habría dimensionado el riesgo al cual eran vulnerables; y de igual manera va dedicado a los que en próximas generaciones logran prevenir pérdidas materiales, y lo más importante, que puedan advertir el riesgo para sus vidas y las de sus seres queridos.

RESUMEN

Los lahares son una de las amenazas más destructivas asociadas a los peligros que representa un volcán cuando una población se encuentra dentro de su zona de influencia. Este proyecto determinó el nivel de vulnerabilidad estructural de las edificaciones del sector de la avenida Mijitayo al occidente de la ciudad de Pasto (Colombia), zona que se encuentra catalogada como amenaza alta por una posible erupción del volcán Galeras por el Servicio Geológico Colombiano, puesto que este sector se encuentra ubicado a lo largo de la cuenca de la quebrada Mijitayo. Para el desarrollo del proyecto se realizó una observación directa a las edificaciones en la avenida Mijitayo y sus alrededores, determinando así los materiales con que fueron construidas, los métodos de construcción utilizados y el sistema estructural que las sostienen, entre otras características. Se analizó cerca de 1400 edificaciones entre las que se encuentran usos residenciales, comerciales e institucionales y se estableció una relación con rangos de resistencia a la sobrepresión definidos por autores como G. Valentine, R. Spence y S.M. Petrazzuoli. Seguido a esto se hizo una georreferenciación de los puntos analizados para proceder a la ubicación de estos sobre un mapa donde también se indicó el nivel de vulnerabilidad estructural ante un posible flujo de lodos. Como resultado se obtuvo la información acerca del nivel de resistencia de cada una de las edificaciones ante posibles lahares y se concluye que un número considerable de edificaciones sufriría daño estructural, y un porcentaje muy alto de las construcciones sufriría pérdidas por ingreso de flujo hasta el interior de las edificaciones.

Palabras clave: Lahar, Amenaza, Sobrepresión, Georreferenciación, Vulnerabilidad estructural.

ABSTRACT

Lahars are flows with high destructive power made up of water and sediments. They are one of the most dangerous threats associated with volcano hazards when a population is within its influence area. This project aimed to determine the structural vulnerability level in buildings on Mijitayo avenue in the west of Pasto city (Colombia), an area that is classified as “high threat” by a possible eruption of Galeras volcano, according to the Colombian Geological Survey, since it is located along the Mijitayo creek basin. As part of the development of this project, a direct observation of the buildings on Mijitayo Avenue and surroundings was conducted in order to determine the materials, construction methods used and the structural system that supports them, among other characteristics. Around 1400 buildings were analyzed, including residential, commercial and institutional uses. Then, a relationship using overpressure resistance ranges, defined by authors such as G. Valentine, R. Spence and S.M. Petrazzuoli, was established. This was followed by a georeferentiation of the analyzed points. As a result, information on the resistance level of each building as a response to the overpressure was obtained, as well as the location of every analyzed point on a map where the structural vulnerability level is shown. Finally, the conclusion was that a considerable number of constructions would have structural damage and a very high percentage of these would suffer material losses because the mudflows can get inside each of the buildings.

Keywords: Lahar, Threats, Overpressure, Georeferentiation, Structural Vulnerability.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1 RESULTADOS.....	40
1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS.....	40
1.1.1 Tipo 1:.....	41
1.1.2 Tipo 2.....	42
1.1.3 Tipo 3.....	42
1.1.4 Tipo 4.....	43
1.2 GEOREFERENCIACION DE LAS EDIFICACIONES	44
1.3 VULNERABILIDAD POR ENTRADA DE FLUJOS.....	45
1.4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE LAS EDIFICACIONES	46
1.4.1 Ubicación y descripción tipo 1.....	47
1.4.2 Ubicación y descripción tipo 2.....	48
1.4.3 Ubicación y descripción tipo 3.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4.4 Ubicación y descripción tipo 4.....	49
1.5 VULNERABILIDAD ANTE ENTRADA DE FLUJOS POR OQUEDADES.	52
2. DISCUSIÓN	53
3. CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFIA	60

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Descripción de tipologías propuestas en esta investigación de acuerdo a sus oquedades en el primer nivel.	45
Tabla 2. Valores para los niveles de vulnerabilidad propuestos en esta investigación de acuerdo a los valores de sobrepresión de flujos dinámicos.	50
Tabla 3. Ejemplo de distribución probabilística de Weibull para validar niveles de vulnerabilidad propuestas en esta investigación (ver texto para explicación).	51
Tabla 4. Rangos para niveles de vulnerabilidad propuestas en esta investigación.	51

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Zonificación (amenaza alta) por lahares.	16
Figura 2. Mapa de Zona de Amenaza del Volcán Galeras	21
Figura 3. Zona de estudio en la ciudad de Pasto.....	21
Figura 4. Imágenes flujos de agua, lodos y piedras.	23
Figura 5. Imágenes flujos de agua, lodos y piedras.	24
Figura 6. Presión dinámica vs velocidad de flujo para diferentes concentraciones de partículas.	28
Figura 7. Estimación de la probabilidad de destrucción total en edificaciones de dos o tres pisos con estructura sencilla.	29
Figura 8. Rangos de sobrepresión obtenidos en diferentes investigaciones. .	30
Figura 9. Tipos de comportamiento de una estructura ante un impacto de sobrepresión estudiados por Petrazzuoli.	32
Figura 10. Límite de presión vs número de niveles en una edificación.....	33
Figura 11. Formato para la toma de datos de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo.	37
Figura 12. Identificación de tipologías de acuerdo a sus características cualitativas.	40
Figura 13. Foto de tipo 1.....	41
Figura 14. Foto de tipo 2.....	42
Figura 15. Foto de tipo 3.....	43
Figura 16. Foto de tipo 4.....	44
Figura 17. Mapa de tipologías en el sector de la avenida Mijitayo.....	44

Figura 18. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 3 Kpa.	47
Figura 19. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 4 Kpa.	48
Figura 20. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 8.0 Kpa.	49
Figura 21. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 25 Kpa.	50
Figura 22. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo.	52
Figura 23. Mapa de tipologías para oquedades en el sector de la avenida Mijitayo.....	53

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refirió a la vulnerabilidad estructural de las edificaciones ubicadas en el sector de la avenida Mijitayo que se encuentra en la zona de influencia del Volcan Galeras ante flujos de lodos o lahares, estos últimos definidos como la mezcla de agua proveniente de la lluvia, de alguna fuente hídrica o el derretimiento de glaciares y ceniza, depósitos de piroclastos o deslizamientos de terreno ^{1,2}. Los lahares descienden a través de las cuencas formadas alrededor del volcán que se comportan como los canales de conducción para que el lodo descienda a una velocidad considerable, envolviendo lo que encuentra a su paso, haciendo que el flujo alcance un alto poder destructivo.

La característica principal de la zona es la ubicación de un área altamente habitada en la parte baja del volcán donde los flujos de lodos llegan con más fuerza haciendo posible el daño a las edificaciones. El eventual daño ocasionado por una amenaza se conoce como vulnerabilidad y en general existen dos tipos de análisis para determinarla, un análisis cuantitativo cuando las consecuencias de un determinado evento se expresan en costos o valores numéricos y el análisis cualitativo donde los resultados se orientan en revelar las características o cualidades de los elementos evaluados.

En esta investigación se llevó a cabo un análisis cualitativo de vulnerabilidad y se usó una metodología de observación directa similar a como lo hizo Rosero ³ en su informe para evaluar la vulnerabilidad estructural sísmica en las construcciones de la zona de la avenida Mijitayo en el municipio de Pasto. De esta manera se realizó una exploración a cada edificación con el fin de conocer materiales, estado y sistema de construcción. Además, se analizó dos tipos de escenarios ante un eventual flujo de lodos, el primero cuando la edificación sufre una falla en su estructura (columnas, vigas, muros, etc.) por el impacto y el segundo es el caso en que el flujo de lodos entra a la edificación por el daño en los cristales en las oquedades (ventanas y puertas con vidrio) sin que falle su estructura.

La zona de influencia por un posible flujo de lodos se estableció aprovechando los datos obtenidos en la investigación realizada por Guerrero ⁴ a través del

¹ Araña, V. Volcanismo de las Islas Canarias. Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Cabildo de Lanzarote, Madrid, pp. 105-114.

² Cuny, F. Disasters and prevention. Oxford University Press. Nueva York. 1983

³ Rosero E. Consultoría para la descripción y evaluación estructural y de servicio, en edificaciones indispensables, [...] priorización de acuerdo al riesgo sísmico. Oficina de la Dirección para la Gestión del Riesgo y Desastre (DGRD), Pasto, Nariño, Colombia. (2014).

⁴ Guerrero A., Estimación de la amenaza por flujos de lodos de la quebrada Mijitayo de la ciudad de Pasto en el sector Tamasagra a través de un aplicativo ANDROID. Programa de Jóvenes Investigadores. Gobernación de Nariño. 2016

modelamiento computacional de flujos volcánicos en el software Titán dos fases (Titan2F), una herramienta capaz de simular un flujo de dos fases, una líquida y una sólida a través de una topografía dada. Con este software se logró representar una amenaza muy aproximada a la realidad y permitió establecer una zona de afectación con presencia de obras civiles, que es donde esta investigación centró su análisis.

El análisis individual de cada edificación se hizo para relacionar los materiales y sistemas estructurales encontrados, con datos de investigaciones realizadas alrededor del mundo sobre presión dinámica y sus efectos en las edificaciones, así finalmente se pudo obtener un mapa de tipologías donde se pueda observar el nivel de vulnerabilidad de cada construcción de la zona.

Cabe señalar que no se tomó en cuenta el enterramiento de las edificaciones que se podían presentar a causa de la sedimentación de materiales transportados por el flujo o la socavación en la base de las mismas.

Línea de Investigación: Riesgos, amenazas y medio ambiente

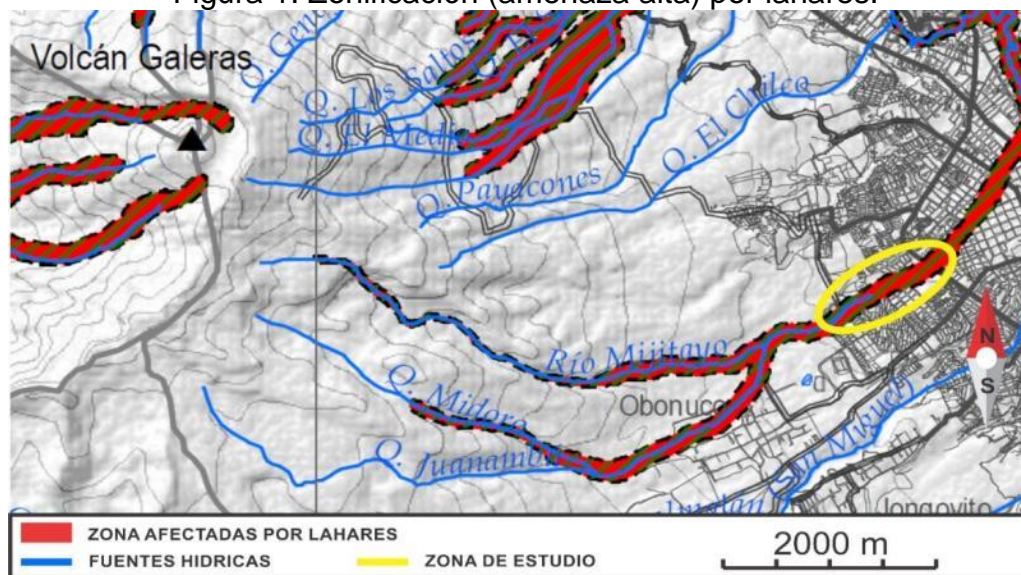
Justificación

El volcán Galeras (Urququina: del quechua “Urqu-nina”, que significa “Montaña de fuego”), ha tenido una actividad representativa en los últimos años, esta actividad ha sido seguida con mayor detalle desde 1989 por INGEOMINAS ahora Servicio Geológico Colombiano. Se ha observado que los eventos de las erupciones han tenido una frecuencia importante sobre todo desde 1992 hasta 2010.

Uno de los mayores eventos registrados se produjo el 2 de enero del 2010, la erupción incluyó caída de material piroclástico y en la zona objeto de estudio hubo precipitación de cenizas ⁵, también dentro de la actividad reciente del volcán se han registrado eventos sísmicos, ligados al edificio volcánico. (Ver figura 1)

⁵ INGEOMINAS, Resumen De La Actividad Eruptiva Del Volcán Galeras En El Periodo 2004 – 2009, Archivo Fotográfico Ingeominas. Pasto, Colombia. Disponible en la web <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Actividad-historica.aspx>.

Figura 1. Zonificación (amenaza alta) por lahares.



Fuente. Servicio Geológico Colombiano.

En el Cráter del Volcán Galeras se originan ríos y quebradas que surten las bocatomas de los acueductos y riegos de cultivos, obras civiles que benefician a las poblaciones asentadas en su zona de influencia, como se ve en la figura 1. Las quebradas Mitoró y Juanambú, y el río Mijitayo, afluentes del río Pasto, se encuentran ubicadas en el sector suroriental. En esta zona no son comunes las tormentas, pero si se dan eventos de aguaceros intensos o crecientes repentinas que descienden por gravedad a través de las cuencas formadas por las corrientes y que pueden afectar esta zona de la ciudad⁶.

Los lahares podrían desplazarse desde el río Mijitayo y la quebrada Mitoró hasta arribar al casco urbano de San Juan de Pasto, ubicando gran parte de la zona de estudio en el nivel más alto de amenaza, lo que se puede observar en la Figura 3 de la actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras. La Figura en mención tiene las áreas que podrían ser afectadas por el fenómeno de lahares o flujos de lodo asociado a la actividad del volcán Galeras. Se muestra encerrada en amarillo la zona de estudio para esta investigación en la ciudad de Pasto⁷.

En esta investigación se hizo el análisis de vulnerabilidad a dos tipos de escenarios, el primero cuando la edificación sufre un daño en su estructura (columnas, vigas, muros, etc.). El segundo es el caso en que un posible flujo de lodos impacta contra la edificación destruyendo los cristales en las oquedades (ventanas y puertas con vidrio) sin que falle su estructura. Como se ha mencionado, en este estudio no se tomó en cuenta el enterramiento de las edificaciones que se puede presentar a

⁶ Servicio Geológico Colombiano, Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras - En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. 2015, p. 09.

⁷ Ibid., p. 36.

causa de la sedimentación de materiales transportados por el flujo o la socavación en la base de las mismas.

Este estudio tuvo como objetivo analizar la vulnerabilidad ante la amenaza de flujo de lodos o lahares, para tener elementos con los cuales se pueda establecer el riesgo a que está expuesta la zona de estudio en una investigación complementaria. Se tuvieron en consideración factores como las condiciones físicas de la cuenca, el estado de las edificaciones, sus características constructivas y elementos que puedan ayudar a tomar decisiones, respecto a la zona de estudio en general y a nivel individual en cada tipo de edificación.

Se debió tener en cuenta el comportamiento de los flujos de lodo que se podían presentar en la zona según las amenazas que se han mencionado, por lo tanto, se debió hacer énfasis en el estudio de los flujos dinámicos los cuales tienen mayor probabilidad de ocurrir, esto de acuerdo a los antecedentes de la zona.

Objetivos

Objetivo general

“Análisis cualitativo de la vulnerabilidad estructural en las edificaciones del sector Mijitayo en la ciudad de Pasto”.

Objetivos específicos:

- Identificación y clasificación de las construcciones de acuerdo a su uso dentro del área de afectación.
- Establecimiento de la tipología de estructuras en el sector.
- Estudio cualitativo de los efectos de lodos en estructuras.
- Relacionar la capacidad de resistencia del tipo de estructuras ya clasificadas y la amenaza a la que están expuestas.
- Establecer el efecto en la vulnerabilidad de acuerdo a la presencia de oquedades en las estructuras.
- Sistematización de las tipologías de las construcciones dentro de un sistema de información geográfica.
- Establecer un mapa tipológico donde se observe el nivel de vulnerabilidad de las edificaciones ante los flujos de lodo en el sector Mijitayo.

Planteamiento del problema

Los espacios aptos para vivir han sido desde el principio de la humanidad una de las búsquedas más importantes para las personas, gran parte del bienestar de ellas se debe al lugar donde se decide habitar y una de las características más importantes que deben tener estas zonas es la seguridad para la vida. Con el pasar de los años la sociedad ha ido cambiando, pero aún es muy importante la búsqueda de un espacio seguro para vivir. En la actualidad al parecer es muy fácil encontrar dichos espacios, pero en ocasiones solamente se es indiferente ante algunas amenazas que rodean el ambiente en el que se está. Si el lugar donde se decide vivir está rodeado de varias amenazas, es arriesgado no tomar alguna consideración para minimizar esto que pone la vida en peligro.

Además, la mala planificación y distribución desorganizada de los territorios para los diferentes usos del suelo a lo largo de los años, generalmente no previene ni tiene en cuenta todos los factores de riesgo que intervienen sobre dichos espacios y las amenazas, solo toman importancia cuando se han ocasionado desastres en los lugares ocupados, al afectar la infraestructura del sector o causar daños a la población.

Los volcanes son una de las mayores amenazas a las que se exponen varias ciudades en el mundo, en algunos casos afectando directamente la seguridad de la población. Esta amenaza se puede manifestar en distintas formas como son los flujos piroclásticos, flujos de lava, o los flujos de lodos volcánicos conocidos como Lahares.

Por otra parte, las cuencas que se encuentran alrededor del volcán hacen de canales de conducción para que los flujos desciendan a una velocidad considerable, en el caso de los lahares conduciendo materiales que encuentra a su paso, haciendo que el flujo alcance un alto poder destructivo^{8, 9}.

Dadas las condiciones de la zona de estudio, la amenaza a la que estaba expuesta la población del sector ameritó un estudio, debido a que los depósitos de ceniza volcánica, flujos piroclásticos provenientes del volcán Galeras y las aguas provenientes de la quebrada Mijitayo o por precipitaciones de lluvia, componían el ambiente ideal para la generación de lodos dentro de la cuenca de la quebrada ¹⁰.

⁸ Thouret, J., and Lavigne, F. Lahars: occurrence, deposits and behaviour of volcanohydrologic flows. Volcaniclastic rocks from magma to sediments. Gordon and Breach Science Publishers, 2000, p. 151 – 174.

⁹ Jakob, M., Hungr, O., and Jakob, D. Debrisflow hazards and related phenomena. Springer, 2005, p. 411- 443.

¹⁰ Mothes, P., Hall, M. & Janda, R. Bull, Volcanol. The enormous Chilllos Valley Lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, 1998, Ecuador 59: 233. Disponible en la web: <https://doi.org/10.1007/s004450050188>

El lugar que se analizó en esta investigación estaba constituido por edificaciones muy variables, entre ellas se encontraban diferentes usos como menciona la norma NSR-10 de acuerdo a la importancia de la edificación, tales como el grupo III con edificios gubernamentales, el grupo II con zonas escolares y el grupo I con zonas comerciales y una zona residencial ¹¹.

La zona de estudio contaba con una densidad poblacional distintiva, debido a que contaba con 256 habitantes por hectárea en la comuna 6, que estaba por encima del promedio de 232 hab/Ha de las comunas en el municipio de Pasto ¹², por lo que era de vital importancia analizar los lugares específicos donde habitaba esta población. La seguridad de las personas ante un eventual flujo tan destructivo como son los lahares depende de que tanto pueden resistir las edificaciones que las protegen, al tener estos flujos un alcance de distancia tan variable ¹³ no es lo mismo estar rodeado de unas paredes de madera que estar dentro de una estructura con muros de concreto debido a las diferentes presiones que pueden soportar cada uno de estos materiales antes de llegar a su punto de falla.

Este proyecto buscó principalmente mostrar las zonas con mayor vulnerabilidad en el sector de la avenida Mijitayo ante un eventual flujo de lodos, este tipo de vulnerabilidad no había sido tomada en cuenta hasta el momento en el municipio de Pasto, únicamente se había hecho estudios de vulnerabilidad sísmica en construcciones importantes como los de uso gubernamental e instituciones educativas.

Localización

La ciudad de San Juan de Pasto es la capital del departamento de Nariño al sur de Colombia, la cabecera municipal está localizada aproximadamente a los 01°12'38" de latitud norte y 77°16'40" de longitud oeste, a una altura sobre el nivel del mar de 2.559 m ¹⁴.

Al occidente de la ciudad se puede observar el Volcán Galeras, que a partir de su reactivación en febrero de 1989 ha sido objeto de una especial atención debido al peligro que una eventual erupción representa para la población ubicada en el área de su influencia. El volcán había tenido desde entonces una actividad intermitente

¹¹ NSR-10. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, Comisión Asesora Permanente Para El Régimen De Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá D.C., Colombia, Enero de 2010. A-25, A-26

¹² Alcaldía de Pasto, PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL Pasto, Territorio Con-Sentido. Cuaderno Socio Cultural, 2012, p. 90.

¹³ Mothes, P., Hall, M. & Janda, R. Bull, Volcanol. Op. cit., p. 234.

¹⁴ Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Diccionario Geográfico de Colombia. Bogotá D.C., 2017, Colombia. Disponible en la web en www.igac.gov.co/digeo/app/index2.html

en los últimos años, siendo común entre su actividad eruptiva la emisión de ceniza y flujos piroclásticos ¹⁵.

En la red hídrica del volcán Galeras se da origen a varios afluentes de agua, entre los cuales encontramos uno de los principales que es la quebrada Mijitayo ¹⁶, que al descender del volcán se encuentra con la avenida que lleva el mismo nombre. La avenida se ubica a lo largo de la cuenca de la quebrada, está localizada dentro de la zona de influencia alta del volcán Galeras como lo indica la Figura 1, rodeada por los barrios Jerusalén, Tamasagra 1, el Bosque, Villa Sofía, Primavera, Mijitayo y Santa Isabel, también tiene lugar la estructura para una planta de bebidas gaseosas, la mayoría incluidas en el grupo de uso I, dentro de la zona se ubican ciertas edificaciones donde se puede aglomerar una cantidad considerable de personas como iglesias y salones que pertenecen al grupo de uso II. Estructuras como la Secretaría De Bienestar Social Del Municipio de Pasto, la escuela San José Bethlemitas y los colegios INEM, San Felipe Neri y Filipense y un CAI que se pueden tener en cuenta dentro del grupo de uso III, todos los grupos de uso que se mencionan anteriormente se incluyen dentro de la NSR-10 ¹⁷.

Esta investigación tomó como zona de estudio el área comprendida entre la calle 7A sur del barrio Jerusalén y la avenida Panamericana, abarcó una franja a lo largo de la avenida Mijitayo limitada por los datos obtenidos en las modelaciones de flujos dinámicos realizados por Guerrero A¹⁸ para el caso más crítico, el flujo modelado en la zona de estudio se puede observar en la Figura 3.

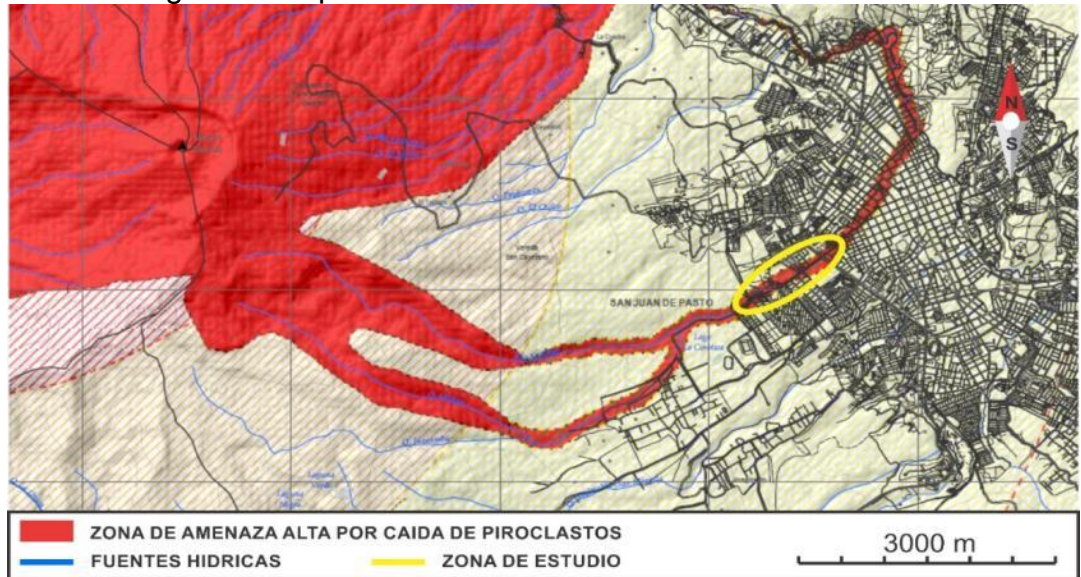
¹⁵ INGEOMINAS. Resumen De La Actividad Eruptiva Del Volcán Galeras En El Periodo 2004 – 2009, Archivo Fotográfico Ingeominas. Pasto, Colombia. 2010. Disponible en la web: <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Actividad-historica.aspx>

¹⁶ Rojas A. Pasto, ciudad y río. Una experiencia para el desarrollo metodológico. Bitácora Urbano-Territorial, 1999, Vol. 1, núm. 3. 29

¹⁷ NSR-10. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, Comisión Asesora Permanente Para El Régimen De Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá D.C., Colombia, Enero de 2010. A-25, A-26

¹⁸ Guerrero A., Estimación de la amenaza por flujos de lodos de la quebrada Mijitayo de la ciudad de Pasto en el sector Tamasagra a través de un aplicativo ANDROID. Programa de Jóvenes Investigadores. Gobernación de Nariño. 2016

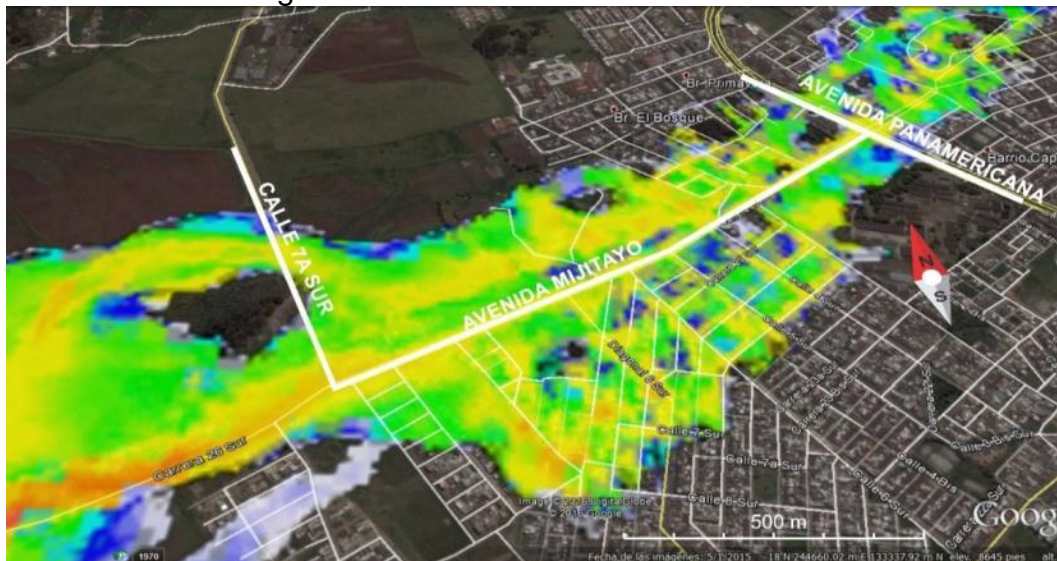
Figura 2. Mapa de Zona de Amenaza del Volcán Galeras



Fuente. Servicio Geológico Colombiano.

La figura 2 corresponde al mapa de la zona de amenaza del Volcán Galeras desarrollado por Servicio geológico colombiano. Se muestra encerrada en amarillo la zona de estudio en la ciudad de Pasto, sector de la avenida Mijitayo. Figura que se encuentra dentro del reporte dado a conocer por el Servicio Geológico Colombiano ¹⁹.

Figura 3. Zona de estudio en la ciudad de Pasto.



Fuente. Modificado de Guerrero.

¹⁹ Servicio Geológico Colombiano, Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras - En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. 2015, p. 36.

En la Figura 3 se muestra el flujo modelado con el software titán 2 fases resultado de la investigación hecha por Guerrero ²⁰. La zona está limitada por el alcance de este flujo desde la calle 7A sur hasta la avenida panamericana resaltadas en color blanco.

²⁰ Guerrero A., Estimación de la amenaza por flujos de lodos de la quebrada Mijitayo de la ciudad de Pasto en el sector Tamasagra a través de un aplicativo ANDROID. Programa de Jóvenes Investigadores. Gobernación de Nariño. 2016

Marco teórico

Antecedentes

La cuenca de la Quebrada Mijitayo tiene varios afluentes y también presenta avenidas torrenciales ocasionales como ya se ha dicho en referencias anteriores. Siendo más visibles con la presencia de mayores medios de prensa, digitales y documentación propia de la ciudadanía.

Se destacó eventos donde se involucraron daños a obras civiles, en vías, edificaciones y vehículos. En la zona de estudio se han presentado varios casos, de los cuales uno de los más importantes que incluyó daños importantes a varios inmuebles, uno de ellos fue pérdida total debido a los materiales de construcción, ocurrió en el año de 1999, reportado por la Oficina de la Dirección para la Gestión del Riesgo y Desastre (DGRD) ²¹. En el 2010 hubo otro caso en el cual se vieron afectadas viviendas y vías, en especial en el sector de la avenida Mijitayo y la avenida Panamericana ²², como se observa en la figura 4.

Figura 4. Imágenes flujos de agua, lodos y piedras.



Fuente. Registro fotográfico D.G.R.D. Paz et. al.

En 2017 hubo un fuerte aguacero que provocó el cierre de vías en el sector de Mijitayo, afectando a los habitantes, estudiantes y propietarios de vehículos, estos últimos afectados por las corrientes provenientes de la quebrada que transportaban material de arrastre como piedras y lodos a lo largo de su recorrido, algunas de las imágenes registradas se destacan en la figura 5.

²¹ Castro Maria y Marcillo Juan. Diseño De Sistema Para Monitoreo Y Alerta Temprana Ante Riesgos Por Inundación En La Ciudad De Pasto. Universidad de Nariño. Pasto. 2014. Pp. 06.

²² Paz Liceth y Tenganan Johana. Formulación del plan de contingencia ante el fenómeno flujos de lodo en la zona de amenaza volcánica media, quebrada mijitayo, municipio de pasto. Universidad de Nariño. Colombia. 2014. Pp. 93-96.

Figura 5. Imágenes flujos de agua, lodos y piedras.



Fuente. Caza Noticias Colombia, Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=wX3OldC-aoc>²³.

Como antecedentes de estudios en la zona se podía mencionar los realizados por el fondo nacional de calamidades y la corporación OSSO²⁴ que estudiaron la vulnerabilidad física y funcional en la zona de amenaza del volcán Galeras, en el caso de edificaciones se centraron en la vulnerabilidad de las cubiertas ante la amenaza por caída de ceniza.

También en lo que respecta a vulnerabilidad estructural para edificaciones, se tenía un estudio realizado por el ingeniero Rosero²⁵ quien hizo un análisis cualitativo de vulnerabilidad estructural y estableció una metodología similar a la que se dió en ésta investigación, pero se hizo un enfoque a la vulnerabilidad sísmica con sus respectivos coeficientes de diseño y estimación de servicio en edificios de mayor importancia como gubernamentales o de los grupos de uso III y IV en referencia a la norma sismo resistente²⁶.

Además, se encontró la tesis realizada por Dawn²⁷ quien estudió la vulnerabilidad en la planta de tratamiento de agua de Empopasto ante un posible flujo de lodos asociado a actividad del volcán Galeras, dicha planta se encuentra ubicada algunos metros antes del inicio del área de estudio de esta investigación. Desde el área

²³ Caza Noticias Colombia. INUNDACIONES EN PASTO 09 de Abril 2017 Torrencial Aguacero. YouTube. 2017. Disponible en la web: <https://www.youtube.com/watch?v=wX3OldC-aoc>

²⁴ OSSO Corporación, Fondo nacional de Calamidades. Estudio de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán Galeras. Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 Fondo Nacional de Calamidades - Corporación OSSO. Dirección de Gestión de Riesgos – Proceso Galeras, 2009.

²⁵ Rosero E. Consultoría para la descripción y evaluación estructural y de servicio, en edificaciones indispensables, [...] priorización de acuerdo al riesgo sísmico. Oficina de la Dirección para la Gestión del Riesgo y Desastre (DGRD), Pasto, Nariño, Colombia. 2014.

²⁶ NSR-10. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, Comisión Asesora Permanente Para El Régimen De Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá D.C., Colombia, enero de 2010. A-25, A-26

²⁷ Dawn, M. Vulnerability assessment for the Mijitayo creek water treatment facility. New York, United States of America: University at Buffalo, 2010.

mencionada por Dawn, Rosero et al.²⁸ hizo un análisis matemático del comportamiento de los flujos respecto a una topografía sin tomar en cuenta los bloques generados por las viviendas a lo largo de la cuenca, tema importante a tratar y que se abordó en la presente investigación.

Para el estudio de la vulnerabilidad de forma cualitativa se habían realizado varios estudios dentro del Grupo de Investigación GRAMA, de los cuales se destacaban los realizados por Rodríguez et. al.²⁹, Córdoba et. al.³⁰ que abordaban un tema importante de vulnerabilidad y su costo, y el de Moriano et. al.³¹.

Presión dinámica

Cuando los fluidos se mueven en un conducto o en un canal abierto, la inercia del movimiento produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la velocidad y la densidad, y es conocida como presión dinámica³². La aproximación matemática de la presión dinámica se expresa como se mira en la Ecuación 1:

$$P_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

P_{dyn} = presión dinámica

ρ = densidad del flujo

V = velocidad del flujo

Los flujos dinámicos como compuesto de una parte líquida y una sólida, tienen la densidad como factor importante en la presión que pueda ejercer el flujo. La parte

²⁸ Rosero Natalia, Narváez Catalina. Modelamiento Del Control Topográfico Ejercido Por El Valle De Attriz Sobre Los Flujos De Lodo Provenientes De La Quebrada Mijitayo. Pregrado. Pasto. Universidad de Nariño. 2005.

²⁹ Rodríguez Diana, Córdoba Gustavo. Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro: el caso de estudio del pueblo de Panan, Nariño, Colombia Hazard and risk mapping – The Arequipa–El Misti case and other threatened cities Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Série n° 1, 2018, p. 87-92.

³⁰ Córdoba Gustavo, Paredes Paola, Rodríguez Diana, Otero Ruth, Jurado Anderson, Universidad de Nariño. Documento técnico Evaluación de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos asociados A la actividad volcánica del volcán galeras en el municipio de la Florida (Nariño). Colombia. 2018. En prensa.

³¹ Moriano E., Paredes P., Córdoba G., Delgado H. Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). Pasto, Colombia, UNAM, México. 2016. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 69, núm. 1, 2011, p. 223 – 241.

³² Munson, B., Young, D., Okiishi, T.. Fundamentals of Fluid Mechanics (5 edition), John Wiley & Sons. Inc., 2006. p 816.

solididad se da a partir de materiales de diferente origen como elementos de la cuenca y escombros.

La densidad de flujo (ρ) depende de la concentración de sedimentos ^{33, 34}. La aproximación matemática de la densidad se expresa en la Ecuación 2:

$$\rho = \rho_s * \phi_s + \rho_w * (1 - \phi_s) \text{ Ec. (2)}$$

Dónde:

ρ = densidad del flujo

ρ_w = densidad del agua

ρ_s = densidad de los sólidos

ϕ_s = fracción volumétrica de sólidos

Flujos de lodo

Los flujos de lodo son producidos por la mezcla de ceniza, depósitos de piroclastos o deslizamientos de terreno, con agua proveniente de la lluvia o de alguna fuente hídrica generalmente naciente en la misma montaña o el derretimiento de glaciares ^{35, 36, 37}.

Estos flujos se forman con partículas finas y livianas que hacen que aumenten su miscibilidad con el agua para luego convertirse en flujos hiperconcentrados que llevan gran cantidad de escombros. La formación de un flujo de escombros requiere una fuente de agua significativa (cubierta de hielo / nieve, lluvia intensa, lago de cráter, quebradas, etc.). El volumen del flujo está influenciado por los factores anteriores y pendientes pronunciadas que se encuentra en su recorrido hacia abajo de la montaña. Estos flujos son capaces de recorrer largas distancias sin sufrir mayor variación en su composición lo que hace que su poder destructivo se

³³ Streeter, V., Wylie, E., and Bedford, K.. Mecánica de los fluidos (Vol. 9): Santafé de Bogotá, McGrawHill, 2000. 740 pp.

³⁴ Jenkins, F., Phillips, C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P., Hadmoko, D., and Bélizal, E. Developing building damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia. Bulletin of Volcanology, 77(9), 2015. Pp. 1 - 17.

³⁵ Scott, W., Pierson, T., Schilling, S., Costa, J., Gardner, C., Vallance, J., and Major, J. Volcano hazards in the Mount Hood region, Oregon: US Department of the Interior. US Geological Survey, Report, 1997. 16 pp.

³⁶ Samaniego P., Ordóñez J., Schilling S. y Mothes P. Las potenciales zonas de inundación por lahares en el volcán Cotopaxi. IG, ISGS, IRD. 2013. Disponible en la web: <http://www.cotopaxinoticias.com/images/noticias/adjuntos/Lahares%20del%20Cotopaxi.compressed.pdf>

³⁷ Jenkins, F., Phillips, C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P., Hadmoko, D., and Bélizal, E. Developing building damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia. 2015. Bulletin of Volcanology, 77(9), Pp. 1 - 17.

mantenga por varios kilómetros, algunos han llegado a recorrer más de 300 km
38.

Vulnerabilidad

En general la vulnerabilidad se define como el grado de pérdida de uno o varios elementos, como resultado de la probable ocurrencia de un suceso desastroso o como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ^{39, 40}. Cuny ⁴¹ define la vulnerabilidad como la condición en la cual los asentamientos humanos o los edificios se encuentran en peligro en virtud de su proximidad a una amenaza, la calidad de la construcción o ambos factores.

La ley 1523 de 2012 define la vulnerabilidad como la 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 ⁴².

En la actualidad la vulnerabilidad de una estructura ante el impacto de un flujo de lodo es difícil de establecer pues no se cuenta con las suficientes referencias para proponer una escala definitiva de afectación ^{43, 44}. No obstante, se encontraron algunos autores con investigaciones acerca de los efectos de la presión dinámica sobre las estructuras, teniendo en cuenta la resistencia de los materiales comúnmente usados en la construcción de edificaciones, estableciendo valores numéricos de sobrepresión ante el cuales, los diferentes componentes de las construcciones pueden sufrir daño ^{45, 46}. Estos autores analizaron los flujos

³⁸ Mothes, P., Hall, M. & Janda, R. Bull Volcanol. The enormous Chillón Valley Lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador 59. 1998. 233. <https://doi.org/10.1007/s004450050188>.

³⁹ Sandi, H. Earthquake risk and earthquake preparedness: some qualitative aspects and quantification possibility. UNDP/UNESCO/UNDRO Project for Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region. 1983. En Proceedings of the Seminar on Earthquake Preparedness (pp. 79-93).

⁴⁰ UNDRO. United Nations Disaster Relief Organization, Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners. 1991.

⁴¹ Cuny, F. Disasters and prevention. Oxford University Press. Nueva York. 1983.

⁴² Congreso de la Republica de Colombia, Ley 152324 de abril de 2012. Bogotá, Colombia, 2012.

⁴³ Ortíz, R. Riesgo volcánico. Servicio de publicaciones del Excmo, Cabildo Insular de Lanzarote, Serie Casa de los Volcanes Vol (5), 1996. 329 pp.

⁴⁴ Araña, V. (2001). Volcanismo de las Islas Canarias. En Astiz, M. & García, A. (Ed.): Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Cabildo de Lanzarote, Madrid, pp. 105-114.

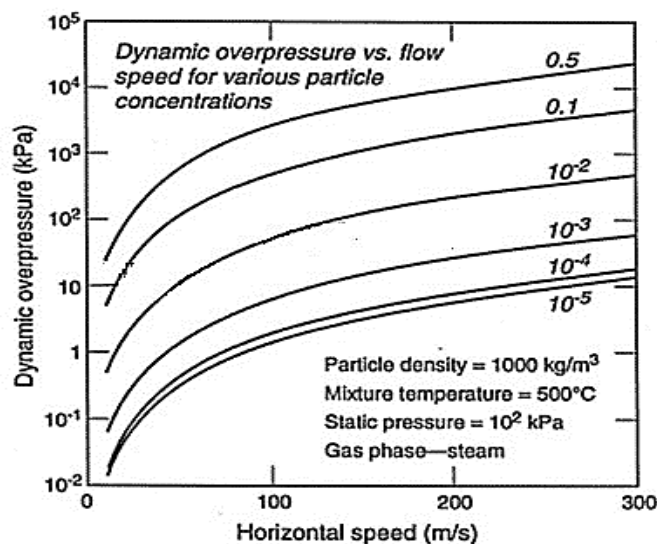
⁴⁵ Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. Journal of Volcanology and Geothermal, Research 87. 117–140.

⁴⁶ Spence, R., Baxter, P., 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. 2004. 321-343.

piroclásticos como flujos dinámicos y relacionaron las sobrepresiones generadas con los daños que estas ocasionarían en una edificación ^{47, 48, 49, 50}.

El daño que se presenta en una edificación ante el impacto de un flujo de lodo, depende de la presión dinámica que a su vez depende de la velocidad y la concentración de las partículas de dicho flujo (ecuación 1) por lo cual se puede establecer que a mayor velocidad y mayor concentración de partículas resulta una mayor intensidad ⁵¹, elevando la probabilidad de destrucción en la edificación. En la Figura 6 se muestra este comportamiento encontrado de manera experimental por Valentine ⁵².

Figura 6. Presión dinámica vs velocidad de flujo para diferentes concentraciones de partículas.



Fuente. Modificado de Valentine ⁵³.

En la gráfica se observa como la velocidad del flujo y la presión ejercida por el mismo son proporcionales.

⁴⁷ Valentine, G.A. Op. Cit.

⁴⁸ Spence, R. et al. Op. Cit.

⁴⁹ Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M., Leoni, F., and Santacroce, R. (2002). Characteristics of May 5–6, 1998 volcaniclastic 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.

⁵⁰ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367

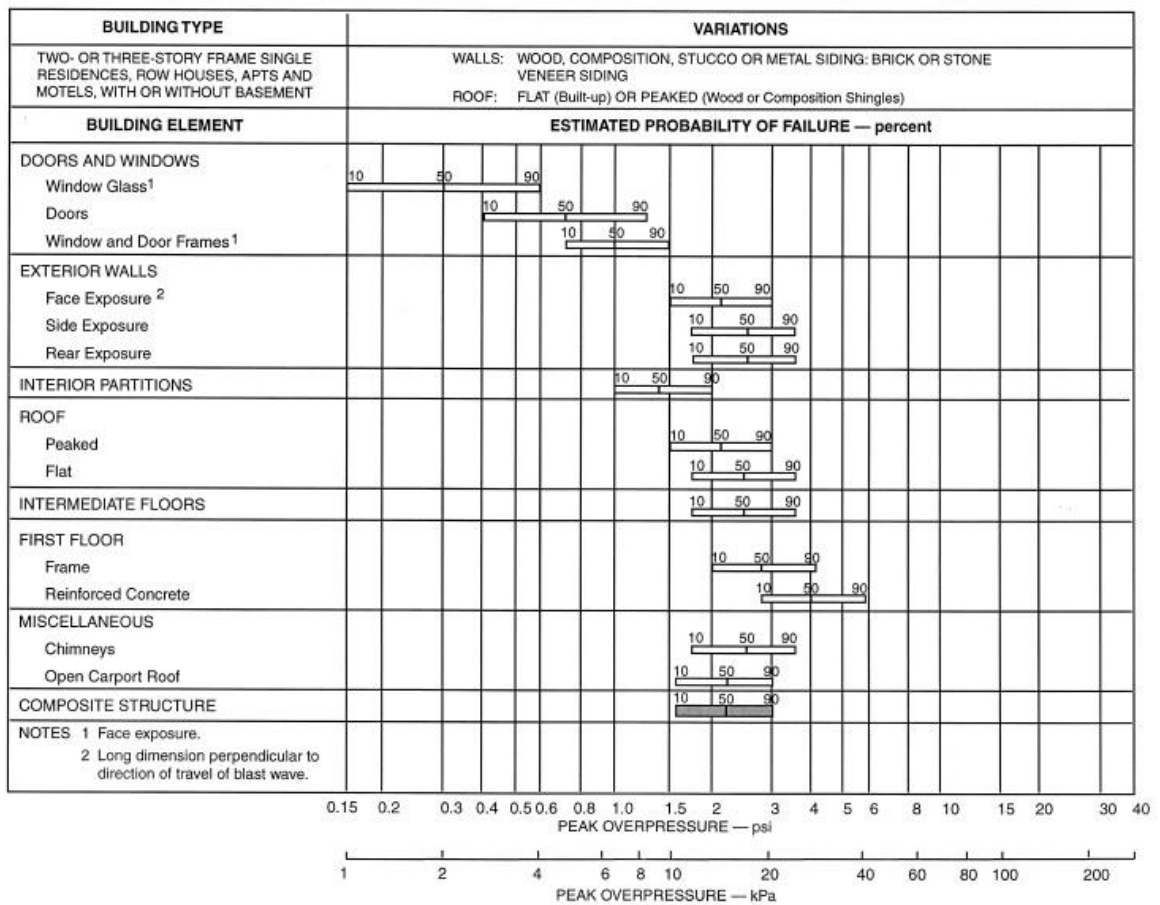
⁵¹ Smith, G., and Fritz, W. Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17(4). 1989. Pp. 375-376.

⁵² Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 117–140

⁵³ Ibid.

La vulnerabilidad de una edificación depende de los materiales con los cuales fue construida. El rango de sobrepresión que puede soportar una edificación antes de empezar a sufrir daños considerables es bastante amplio, esto se debe a que los materiales tienen gran diferencia en la capacidad de resistir un impacto, por ejemplo, las ventanas generalmente están constituidas por un marco de madera, acero o aluminio que pueden ofrecer una resistencia considerable ante el impacto de flujos, pero la placa de vidrio no resistiría de igual manera.

Figura 7. Estimación de la probabilidad de destrucción total en edificaciones de dos o tres pisos con estructura sencilla.



Fuente. Tomado de Valentine.⁵⁴


Continuando con el estudio de Valentine, se observó que hay varias tipologías de edificaciones basadas en ciertas características relacionadas con la capacidad que estas tenían para soportar un impacto de una sobrepresión. Como resultado obtuvo la probabilidad de que estas edificaciones sufran daño total. En su investigación

⁵⁴ Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 87. 117–140

mostró desde edificaciones con estructura no aporticada, sostenida solo por mampostería débil o muros de madera, en el rango más bajo de resistencia, hasta edificaciones con una estructura metálica capaces de resistir fuertes impactos. En la figura 7 se observa un ejemplo de uno de los seis tipos de edificaciones que clasificó, la probabilidad de destrucción total de algunos de sus componentes y de toda la edificación.

Observando el estudio de Spence ⁵⁵ en su investigación llevó a cabo un análisis de la vulnerabilidad de las edificaciones que se encontraban en el área de afectación del volcán Vesubio ante una amenaza de flujo piroclástico, aunque la amenaza son los flujos piroclásticos, se analizó los impactos de sobrepresión que podían soportar los diferentes componentes en las edificaciones, por lo cual, se tuvo en cuenta esto para la presente investigación. Uno de los resultados del estudio fue la consolidación de unos valores y rangos de sobrepresión en el que se esperó una falla en algunos componentes de las construcciones (columnas, muros, ventanas, entre otros). (Ver figura 8)

Figura 8. Rangos de sobrepresión obtenidos en diferentes investigaciones.



Building Elements	Spence ('04)	Valentine ('98)	Glasstone Dolan ('80)
Window glass of ordinary buildings	< 1.5	1-4	3.4-6.9
aluminium window in bad condition	1.5		
aluminium window in good condition	3.0	7-17	
old wooden door	3.5	4-9	2.8-9
Yellow tuff masonry wall	4.2-7.4	15-28	10.3-38
old wooden window	5.0	7-17	6.9-13.8
Weak non aseismic r.c. blds. (1 to 3 storeys)	4.5-8		
Terra cotta tile in-fill panel without window	5.5	10-40	
Strong non aseismic r.c. blds. (4 to 7 storeys)	5-9		
Yellow tuff masonry wall (length 4m; tickn. 40 cm)	6.8-9	15-28	10.3-38
Terra cotta tile in-fill panel with window	7.6-8.9	15-60	
Weak aseismic r.c. blds. (multi-storey)	5-10		
Yellow tuff masonry wall (length 4m; thickness. 60 cm)	10-13	15-28	10.3-38
Strong aseismic r.c. blds. (multi-storey)	6-14		
Volcanic masonry wall (length 4m; thickness. 60 cm)	20-26		10.3-38

Fuente. Tomado de Spence.⁵⁵

⁵⁵ Spence, R., Baxter, P., 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. 2004. 321-343.

En la figura 8 se observa una comparación entre los resultados de los estudios de Spence et. al.⁵⁶, Valentine⁵⁷ y Glasstone et al.⁵⁸. En esta comparación se puede observar los rangos de sobrepresión de los componentes que comúnmente hacen parte de una edificación, estos valores indican hasta donde pueden soportar para llegar a su condición de destrucción. Obsérvese que los valores obtenidos por Spence et. al. son más bajos debido a que el tiempo de impacto considerado por él es mayor al de las otras investigaciones que analizan los efectos producidos por una explosión nuclear.

Baxter et. al.⁵⁹ hizo un estudio de la zona de impacto de flujos piroclásticos que ocurrió en Soufrière Hills de Montserrat, con base en las observaciones hechas en campo encontraron áreas de acuerdo a las sobrepresiones a lo largo del recorrido del flujo, observaron la resistencia de las edificaciones en esas áreas y establecieron unos valores de inicio de daño, lo que correspondió a la vulnerabilidad de las edificaciones. Los valores en los resultados del estudio en mención concuerdan con algunos que están en el estudio de Spence⁶⁰.

Un estudio más detallado acerca de las estructuras en concreto reforzado y la resistencia ante un impacto de un flujo dinámico fue presentado por Petrazzuoli et al.⁶¹, donde se realizó un análisis a edificaciones con una estructura aporticada con columnas en concreto reforzado, en este estudio se estableció como resultado un rango de sobrepresiones que podía soportar una edificación con estas características, dependiendo del número de niveles, el acero de refuerzo y las dimensiones de las columnas que sostienen la edificación.

Continuando con el estudio de Petrazzuoli, se observó que se analiza el Limite de Presión Horizontal que podía soportar una estructura aporticada, para esto tuvo en cuenta la calidad de los materiales, la calidad del concreto, la cantidad de acero de refuerzo, secciones de columnas, si en su construcción se implementó o no un

⁵⁶ Spence, R., Baxter, P., 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. 2004. 321-343.

⁵⁷ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 1998. 117–140

⁵⁸ Glasstone, S, and Dolan, P J. *The Effects of Nuclear Weapons*. Third edition. United States: N. p., 1977. Disponible en la Web. <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/liang2/docs/glasstone-dolan-1977.pdf>.

⁵⁹ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

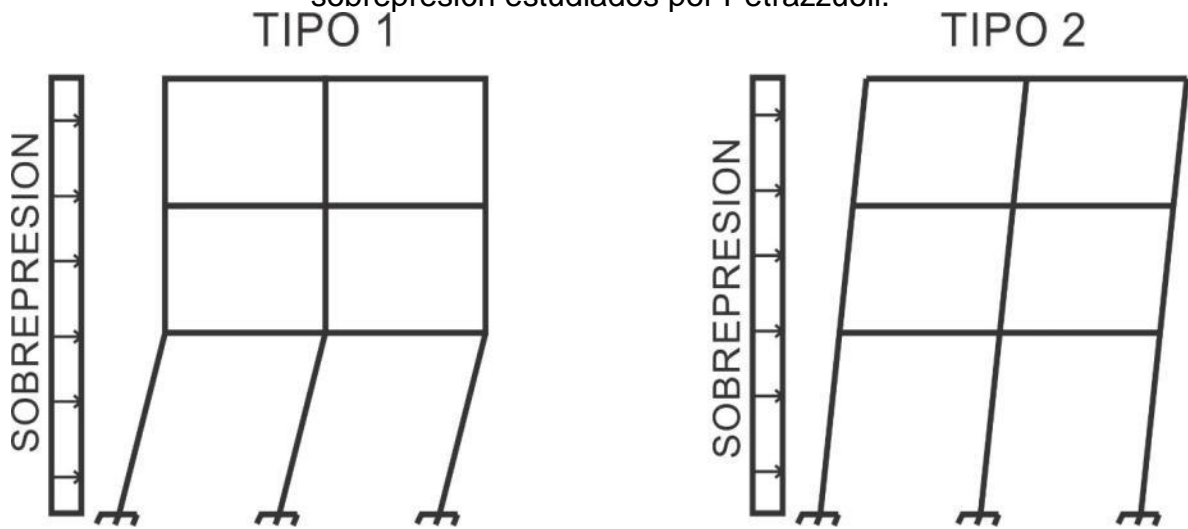
⁶⁰ Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

⁶¹ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

código y la forma de la estructura. Consideró estructuras con columnas de 30*30 cm (primer piso) como dimensión mínima incrementando esas medidas con un coeficiente de acuerdo al aumento de número de pisos, adicional a esto se clasificó las estructuras en sismo-resistentes y no sismo-resistentes teniendo en cuenta la aplicación o no del código de construcción para la zona, que resultó en una diferencia entre ellas por el aumento de la cantidad de acero de refuerzo.

Para establecer los resultados Petrazzuoli et al., hizo una simulación aplicando una fuerza horizontal a un pórtico en concreto reforzado en dos escenarios diferentes con dos mecanismos de falla en su estructura, el tipo 1 donde el flujo golpea y dobla las columnas que reciben el impacto principalmente en el nodo del nivel 1 y en su base, debido a que las columnas son débiles, manteniendo casi intactos los niveles superiores. En el tipo 2 las columnas son más resistentes lo que hace que la fuerza se transmita a los demás nodos existentes (ver Figura 9). En la investigación se tomó en cuenta la fuerza cortante y los momentos que resultaban por la aplicación de la presión lateral, así se obtuvieron los rangos de sobrepresiones que podía resistir la estructura (ver Figura 10).

Figura 9. Tipos de comportamiento de una estructura ante un impacto de sobrepresión estudiados por Petrazzuoli.



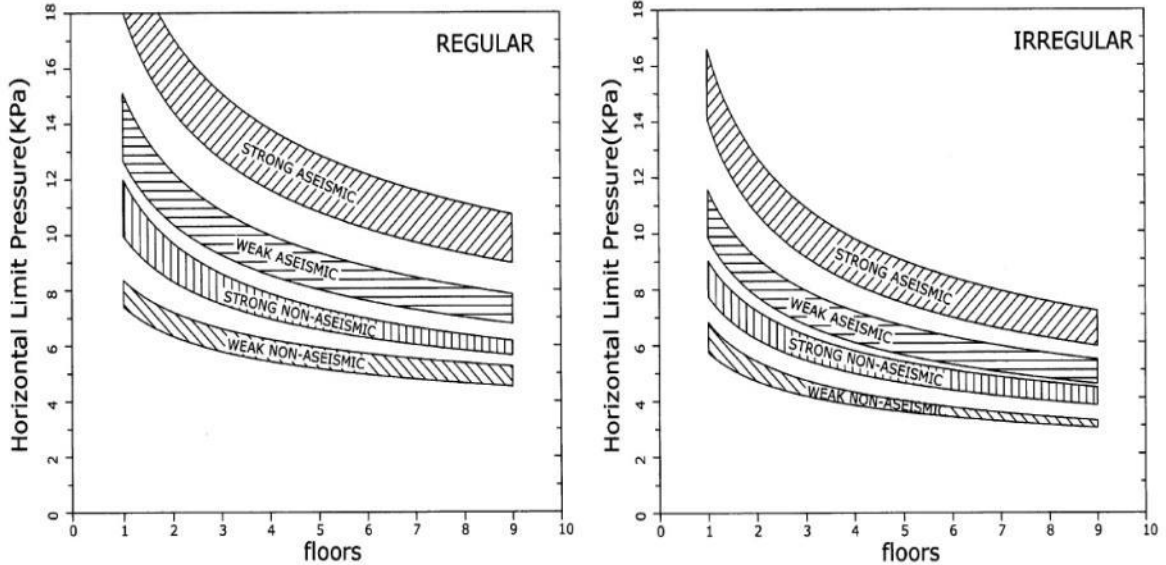
Fuente. Tomado de Petrazzuoli et. al. ⁶²

Se observó que el estudio mencionado es muy completo en el análisis de las estructuras de concreto reforzado lo que se pudo tener en cuenta para el presente estudio de vulnerabilidad, pero dadas las características de la zona de estudio su aplicación fue limitada debido a la variedad en la matriz de materiales y además no

⁶² Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. Journal of Volcanology and Geothermal Research 133. 2004. Pp. 353-367.

se tuvo la posibilidad de hacer una patología más profunda que pudo tener mejores resultados respecto a materiales y estructura.

Figura 10. Límite de presión vs número de niveles en una edificación.



Fuente. Tomado de Petrazzuoli ⁶³.

En la gráfica se observa la presión que puede soportar una edificación dependiendo del número de niveles que la conforman.

Para establecer cuáles serían los rangos con los que se iban a diferenciar los valores de vulnerabilidad, se usó la distribución probabilística tipo Weibull ⁶⁴ acotada con exponente $n=1$ como lo muestra la ecuación 3, usada para ajustar los datos de probabilidad del fenómeno estudiado y que es típica para fenómenos volcánicos ⁶⁵, ⁶⁶.

⁶³ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁶⁴ Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J Appl Mech* 1951;(September):293-7

⁶⁵ 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>

⁶⁶ 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>

Debido a que es limitada, permite flexibilidad de forma y proporciona pronósticos razonables con muestreos pequeños ⁶⁷, ⁶⁸. La ecuación 3 muestra la distribución

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

Dónde:

k = es un factor de forma =1

λ = la media de los valores de sobrepresión de flujos

x = valor de sobrepresión de flujos

x_{min} = el valor mínimo de x .

En el caso particular de lahares, x es la presión dinámica.

⁶⁷ Quinn, J.B. & Quinn, G.D. A practical and systematic review of Weibull statistics for reporting strengths of dental materials. Elsevier. 2010. Dental Materials, 26, 135-147

⁶⁸ Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. J Appl Mech 1951;(September):293-7

Metodología

Para poder desarrollar este estudio se inició con la limitación de la posible área de influencia y comportamiento de los flujos de lodos, también de la zona de mayor impacto visto a partir del número de edificaciones y de la posible población afectada, todo bajo la Línea de Investigación: Riesgos, amenazas y medio ambiente. Como se observó en la figura 2 de este estudio se definen las zonas de afectación, con lo cual se procedió a iniciar el trabajo de campo.

Se hizo una observación individual de las edificaciones en la zona definida anteriormente, a diferencia de lo que realizó Thouret et al. ⁶⁹ en su estudio en Arequipa - Perú, que hizo una agrupación de viviendas homogéneas en bloques o manzanas. Aunque aún era complejo manejar cada uno de los parámetros analizados por Petrazzuoli et al. ⁷⁰, su metodología podría ser utilizada en casos de edificaciones clasificadas dentro de los grupos de uso III y IV de la norma sismorresistente NSR-10 que requieren un análisis más detallado.

Algo en común que tienen las anteriores investigaciones es que establecieron una relación entre la sobrepresión y el daño que generan al impactar contra una edificación. La sobrepresión se da por flujos dinámicos que han sido estudiados por varios investigadores como los que ya se ha dado a conocer anteriormente en este trabajo, mencionando a Glasstone et al. ⁷¹ que estudió los efectos de un impacto nuclear, Valentine que hizo una deducción entre las sobrepresiones producidas por impactos nucleares y las sobrepresiones producidas por flujos de origen geológico, Spence et al. ⁷², Petrazzuoli et al. ⁷³ y Baxter et. al. ⁷⁴ que analizaron sobrepresiones producidas por flujos piroclásticos.

⁶⁹ Thouret J.-C., Enjolras G., Martelli K., Santoni O., Luque J. A., Nagata M., Arguedas A., and Macedo L. Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. 2013. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 339–360, 2013. 355-356.

⁷⁰ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁷¹ Glasstone, S, and Dolan, P J. *The Effects of Nuclear Weapons*. Third edition. United States: N. p., 1977. Disponible en la Web. <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/liang2/docs/glasstone-dolan-1977.pdf>.

⁷² Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

⁷³ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁷⁴ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 67. 2005. Pp. 292–313.

Teóricamente las sobrepresiones generadas por diferentes clases de flujos tienen el mismo comportamiento, una de las diferencias más relevantes es la densidad, tomando en cuenta esto se asumió en esta investigación que los resultados mencionados se pueden aplicar al flujo de lodos al igual que lo hicieron Moriano et. al.⁷⁵, Rodríguez et. al.⁷⁶ y Córdoba et. al.⁷⁷.

Recopilación de información sobre las edificaciones

La toma de datos sobre las edificaciones se realizó aplicando el método de observación directa. Bajo los criterios aprendidos de la ingeniería civil se detalló cada una de las edificaciones del sector, registrando en el formato mostrado en la figura 11 los datos a tener en cuenta en esta investigación.

Las principales características observadas fueron el tipo de estructura, los materiales en muros, el sistema constructivo utilizado, el año de construcción y la cantidad de oquedades, entre otros. Además de estos datos se obtuvo información basada en los testimonios de los propietarios y considerando técnicas empíricas comúnmente usadas en la construcción, esto debido a la inexistencia de planos y la imposibilidad de hacer un estudio patológico a profundidad en los elementos estructurales como columnas y vigas de cada edificación.

⁷⁵ Moriano E., Paredes P., Córdoba G., Delgado H.. Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). Pasto, Colombia, UNAM, México. 2016. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 69, núm. 1, 2011, p. 223 – 241.

⁷⁶ Rodríguez Diana, Córdoba Gustavo. Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro: el caso de estudio del pueblo de Panan, Nariño, Colombia Hazard and risk mapping – The Arequipa–El Misti case and other threatened cities Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Série n° 1, 2018, p. 87-92.

⁷⁷ Córdoba Gustavo, Paredes Paola, Rodríguez Diana, Otero Ruth, Jurado Anderson, Universidad de Nariño. Documento técnico Evaluación de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos asociados a la actividad volcánica del volcán galeras en el municipio de la Florida (Nariño). Colombia. 2018. En prensa.

Figura 11. Formato para la toma de datos de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO			
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL			
MUNICIPIO DE PASTO			
ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL POR AMENAZA DE LAHARES EN EL SECTOR DE LA AVENIDA MIJITAYO			
FICHA DE CAMPO			
DEPARTAMENTO	NARIÑO	FECHA	
MUNICIPIO	PASTO	PROPIETARIO	
SECTOR	AVENIDA MIJITAYO	CEDULA	
BARRIO		TIPO PROPIEDAD	
DIRECCION			
TIPOLOGÍA VIVIENDA			
USO	Residencial:	Comercial:	
	Institucional:	Otro:	
CUBIERTA	Asbesto cemento:	Plástica:	
	Losa en concreto:	Otra:	
TIPO DE ESTRUCTURA	Aporticada:	Mampostería:	Otra:
	Muro estructural:	Tapia:	
PISO	Concreto:	Cerámica:	Otra:
	Ladrillo:	Afirmado:	
No. NIVELES			
PUERTAS (Primer piso)	Grandes:	Medianas:	
	Pequeñas:		
VENTANAS (Primer piso)	Grandes:	Medianas:	
	Pequeñas:		
OBSERVACIONES			
UBICACIÓN GPS			
PTO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD

Fuente. Elaboración propia.

El análisis se llevó a cabo con cada una de las edificaciones por observación directa.

Clasificación de las edificaciones

Según la toma de datos que se hizo en campo, una observación importante fue la presencia de materiales menos resistentes en zonas de más antigüedad que se encontraron sobre la avenida Mijitayo, y en los barrios Tamasagra y El Bosque, las urbanizaciones más recientes tenían en su mayoría estructuras reforzadas siendo los casos de los barrios Jerusalén, El Bosque, Primavera y Villa Sofía, construcciones que pertenecen al grupo de uso I de la NSR-10, colegios y construcciones de gran aglomeración de personas como instalaciones gubernamentales, iglesias o salones comunales que pertenecen a los grupos de uso II y III.

A lo largo del sector se encontró gran variedad en los materiales usados en la construcción de las edificaciones, se observó muros construidos en mampostería, pero también viviendas encerradas solamente por madera o laminas galvanizadas de zinc, que también es un material usado para cubiertas. Algunas construcciones no contaban con estructura de pórtico en concreto reforzado, tal es el caso de las viviendas hechas en tapia y adobe o las que eran sostenidas por muros de mampostería común. También se encontraron las edificaciones con estructura aporticada en concreto reforzado, siendo este tipo de estructura el más común en

el sector. Además de estas se observó algunos establecimientos comerciales con estructura metálica con muros de cerramiento en mampostería, con estructura metálica y malla, que tenían grandes superficies laterales de cristal.

Teniendo en cuenta lo anterior se agrupó las edificaciones según sus cualidades constructivas y se hizo una clasificación de tipos de construcciones de acuerdo a la resistencia de los materiales que la componían, ya que al ser la vulnerabilidad un aspecto difícil de evaluar, se buscó establecerla dentro de conjuntos determinando así una menor o mayor vulnerabilidad de un grupo de edificaciones con características semejantes. Para la clasificación se tuvieron en cuenta los grupos de uso mencionados en la NSR-10 para una identificación estructural de acuerdo a los criterios de la ingeniería civil, sirviendo para identificar características que diferenciaban los tipos de edificaciones encontrados en la zona de estudio.

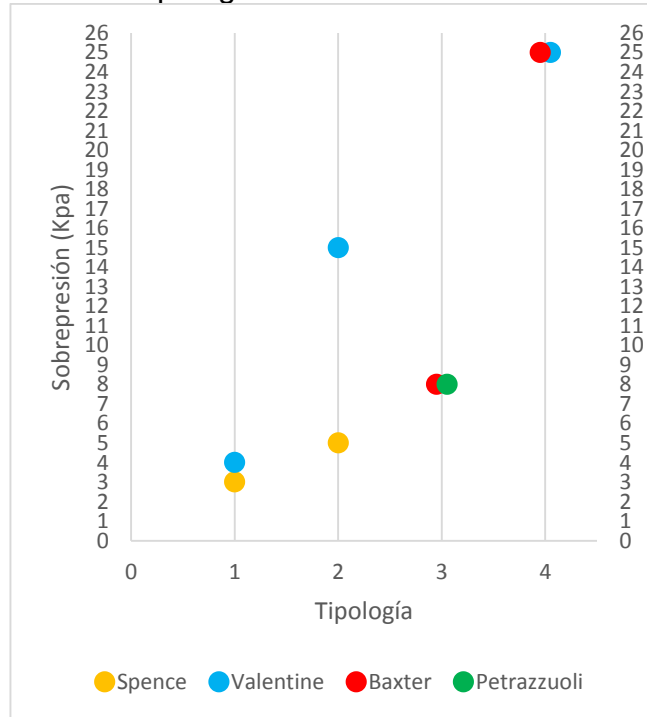
Vulnerabilidad de las edificaciones

Para saber la vulnerabilidad de las edificaciones se tuvo en cuenta la clasificación descrita en el numeral 1.1, en ella se observan los materiales y elementos de la estructura, teniendo como base su resistencia a la sobrepresión y el estado físico, se hizo la diferenciación de cada tipología y con ello su vulnerabilidad. También se encontró las posibles zonas afectadas ante varios casos de sobrepresiones mostrando como las edificaciones pueden afectarse ante los valores de sobrepresión. Utilizando la distribución probabilística de Weibull ya mencionada, se obtuvieron los valores de los rangos respectivos del grado de vulnerabilidad desde alta a baja.

1. RESULTADOS

1.1 DESCRIPCIÓN DE LAS TIPOLOGÍAS

Figura 12. Identificación de tipologías de acuerdo a sus características cualitativas.



Fuente. Elaboración propia.

Se clasificaron cuatro tipos de construcciones, donde se utilizaron los criterios de la norma sismorresistente NSR-10, las características observadas en los estudios de Valentine et. al.⁷⁸, Petrazzuoli et. al.⁷⁹, Spence et. al.⁸⁰ y Baxter et. al.⁸¹ y además los valores de sobrepresión de los flujos dinámicos que tienen los autores mencionados en los resultados de los estudios. Las características y valores que se observaron en cada tipología. A continuación, se presenta una descripción general donde fueron clasificadas las mil cuatrocientos cuarenta y una (1441) edificaciones según su tipo estructural:

⁷⁸ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 87. 1998. 117–140.

⁷⁹ Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

⁸⁰ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁸¹ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 67. 2005. Pp. 292–313.

1.1.1 Tipo 1.

Figura 13. Foto de tipo 1.



Fuente. Registro fotográfico propio.

De acuerdo al tipo de construcción se observa una estructura con materiales de baja resistencia generalmente con sistema de poste y viga o carente de sistema estructural. Son construcciones por lo general para cierres de lotes o provisionales con estructura en madera o zinc y guadua tipo campamento de obra, como muestra la figura 13. también tienen cierre en malla metálica con tubos de soporte que no tienen un buen anclaje como zapatas o concreto en su base. Son por lo general cierres de lotes para posterior construcción de vivienda, para uso comercial como parqueaderos o complementos de servicios de locales comerciales. Se define el valor aproximado de sobrepresión para este tipo a partir de los rangos en los estudios de Valentine ⁸² y Spence et. al. ⁸³, siendo el más bajo el de este último con 3 Kpa.

⁸² Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 117–140

⁸³ Spence, R., Baxter, P., 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. 2004. 321-343.

1.1.2 Tipo 2. Presenta una estructura simple con soportes en muros de tapia, adobe o mampostería con cimentación sin presencia de elementos portantes como columnas o vigas aéreas. Generalmente son de uso residencial con locales comerciales, como talleres, tiendas o supermercados. Una característica importante de estas construcciones es que tienen la cubierta soportada en la estructura, por ello en caso de falla de los muros por flujos, puede haber un desplome de la cubierta lo que aumenta su vulnerabilidad, un ejemplo es la figura 14. De acuerdo al estado de los muros en adobe o tapia y los efectos que se pueden producir por un flujo dinámico, se estableció que su tipo debería ser bajo a pesar de ser una estructura fuerte. También se incluyen algunos muros de cerramientos dada su condición física en regular y mal estado. Se define el valor de sobrepresión para este tipo a partir de los rangos en los estudios de Valentine 84 y Spence et. al. 85, siendo el más bajo el de este último con 4 Kpa.

Figura 14. Foto de tipo 2.



Fuente. Registro fotográfico propio.

1.1.3 Tipo 3. Con características de estructuras portantes o con pórtico estructural y sus componentes esenciales como son cimentación, columnas y vigas aéreas, como ejemplo se tiene la figura 15. Las columnas tienen secciones desde 20*20cm hasta de 60*40cm o muros estructurales vistos en edificios de apartamentos o residencias de más de 4 niveles. Mampostería en sus muros frontales y algunos de división interna, otras de las divisiones se presentan en bloque farol o dry Wall. Su uso por lo general es residencial con locales comerciales, se incluyen de acuerdo a su estructura colegios, centros de entidades de gobierno y centros de aglomeración

⁸⁴ Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 117–140.⁸⁴

⁸⁵ Spence, R., Baxter, P., 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. 2004. 321-343.

como iglesias o salones. Se define el valor de sobrepresión para este tipo a partir de los valores en los estudios de Petrazzuoli et. al.⁸⁶ y Baxter et. al.⁸⁷, se toma el valor de 8 Kpa de acuerdo a los estudios de los dos últimos.

Figura 15. Foto de tipo 3.



Fuente. Registro fotográfico propio.

1.1.4 Tipo 4. Que presenta una estructura aporticada metálica con diferentes anclajes y uniones en soldadura o mecánicas con tornillos o pernos. Secciones metálicas en perfiles I, C en cajón o sencillo, y L de acuerdo al diseño y solicitaciones vistas. Sus muros frontales por lo general son en cristal o acrílico con espesores variables, los divisorios son en dry Wall y cristal. El uso es comercial y presentan grandes áreas para concentración de personas, equipos u otros, como se ve en la figura 16. Se define el valor a partir de los rangos en los estudios de Valentine⁸⁸ y Baxter et. al.⁸⁹, con un valor de 25 Kpa.

⁸⁶ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁸⁷ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

⁸⁸ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 1998. 117–140.

⁸⁹ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

Figura 16. Foto de tipo 4.

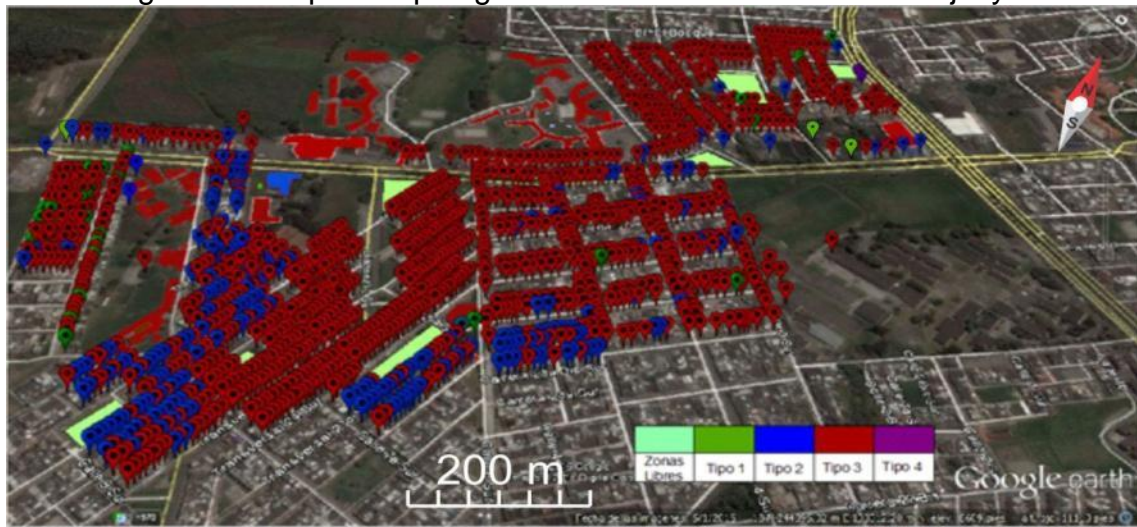


Fuente. Registro fotográfico propio.

1.2 GEOREFERENCIACION DE LAS EDIFICACIONES

Para la elaboración de un mapa de vulnerabilidad del sector fue necesario tener una referencia geográfica de cada punto analizado. En el análisis inicial se obtuvo las coordenadas de cada una de las construcciones por medio de GPS con una precisión entre 2 y 3 metros dependiendo de las condiciones en la hora de la toma, con estos datos se utilizó la herramienta GRASS-GIS, que permitió la ubicación de las viviendas tomadas como puntos y ubicarlas en un mapa, después de esto se procedió a hacer las correcciones utilizando la herramienta Google Earth. En la Figura 17 se muestra una fotografía satelital del sector donde se observa la georeferenciación de las edificaciones analizadas y clasificadas de acuerdo a tipología estructural.

Figura 17. Mapa de tipologías en el sector de la avenida Mijitayo.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.⁹⁰

⁹⁰ Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>

La imagen muestra la clasificación de las edificaciones de acuerdo al tipo de estructura.

1.3 VULNERABILIDAD POR ENTRADA DE FLUJOS

Adicionalmente a la información orientada a lo estructural, esta investigación analizó las oquedades que las edificaciones presentaban en el primer nivel, dado que este era el que tenía mayor probabilidad de sufrir el impacto de un posible flujo de lodos.

En el análisis se observó que cada edificación analizada contaba con al menos una ventana y una puerta generalmente sostenidas por un marco metálico o de madera, oquedades que estaban compuestas además del marco por una o varias laminas o placas de cristal entre 3mm y 4mm de espesor. El cristal comúnmente usado en las oquedades de las edificaciones es un material bastante vulnerable. Según las investigaciones de Valentine ⁹¹ en las edificaciones residenciales de uno o varios pisos el cristal puede soportar apenas una sobrepresión entre 1 y 4 kilopascales (Kpa) para una probabilidad de destrucción de 10% y 90% respectivamente, Spence et al ⁹² también indica un rango similar entre 0.8 y 3 kpa para la misma probabilidad de destrucción.

Tabla 1. Descripción de tipologías propuestas en esta investigación de acuerdo a sus oquedades en el primer nivel.

Características	
Tipología	Descripción: Viviendas familiares, instituciones educativas, edificios gubernamentales, locales comerciales e industriales, con o sin presencia de sótano en la base.
A	Puertas: Presencia de una o más puertas en el primer nivel con placas de cristal sostenida por marcos de hierro o madera. Ventanas: Presencia de una o más ventanas en el primer nivel con placas de cristal sostenida por marcos de hierro o madera.
B	Puertas: Presencia de una o más puertas en el primer nivel sin placas de cristal o protegidas por cortinas metálicas Ventanas: Presencia de una o más ventanas en el primer nivel sin placas de cristal o protegidas por cortinas metálicas.

Fuente. Elaboración propia.

En el sector se encontraron algunas excepciones, en algunas puertas los cristales fueron reemplazados por láminas de metal y algunas ventanas contaban con

⁹¹ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal, Research* 87. 1998. 117–140.

⁹² Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

cortinas metálicas como protección, estas condiciones hacían a la edificación menos vulnerable ante un posible impacto.

Después de analizar los datos se realizó una segunda clasificación de las edificaciones, según sus oquedades en dos tipos, aquellas en las que la probabilidad de que el flujo de lodos destruía los cristales y llegue hasta el interior de la edificación, y las que tenían una baja probabilidad de que su interior fuera afectado debido a la destrucción total en los cristales. La clasificación se puede observar con su descripción en la tabla 1.

Por fuera de estas clasificaciones se encontraron zonas libres (civiles) que tenían diferentes usos como parques, canchas múltiples, donde se podían aglomerar las personas, y como lo indicaba la señalización observada en campo, algunas de ellas funcionaban como áreas de evacuación. Por lo general tenían estructuras de cerramiento en malla metálica o un pequeño muro de cerramiento en mampostería con una altura que no superaba los 60 cm. con terminado en malla metálica, permitiendo que los flujos sigan su curso debido a las muchas oquedades, para los casos en los cuales había cerramiento podían convertirse en depósitos de los posibles flujos que se presenten.

Quedaron fuera del alcance de esta investigación los daños que se podían presentar por enterramiento parcial o total o inundaciones internas de las construcciones.

1.4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE LAS EDIFICACIONES

De acuerdo a la información de las tipologías clasificadas, se realizó el análisis de vulnerabilidad a los dos escenarios a tener en cuenta en esta investigación: el primero cuando la edificación sufría una falla en su estructura como tal (columnas, vigas, muros, etc.) y el segundo es el caso en que un posible flujo de lodos impactaba contra la edificación abriéndose paso a través de las oquedades (ventanas y puertas con vidrio) hacia el interior de la edificación. Para ello se relacionó los valores de resistencia a la sobrepresión de los materiales encontrados en la literatura estudiada con el tipo de estructura y tipo de oquedades que tenía cada edificación. Como resultado se obtuvieron dos mapas donde se observa las zonas más vulnerables, el primero indica la vulnerabilidad estructural y el segundo indica la vulnerabilidad por oquedades.

En la investigación se determinó 4 tipos de vulnerabilidad a nivel estructural (Figura 13): Alta para las edificaciones que podían soportar sobrepresiones de hasta 3 Kpa. Media Alta hasta 4 Kpa, Media hasta 8 Kpa y baja hasta 25 Kpa. Es de notar que ésta clasificación se estableció relacionando los valores de sobrepresión más

críticos obtenidos en las investigaciones de Valentine ⁹³, Spence et. al. ⁹⁴, Baxter et. al. ⁹⁵ y Petrazzuoli et. al. ⁹⁶, con las cuatro tipologías encontradas en campo y descritas en el numeral 1.1 de este trabajo. La clasificación que se mencionó antes se refiere a la sobrepresión que resiste la estructura de la que fue hecha, sin tomar en cuenta que varias de las construcciones tienen una matriz de varios elementos con la cual fue elaborada, por lo tanto, cada material involucrado en la edificación tiene varios valores de daño.

1.4.1 Ubicación y descripción tipo 1. Siendo más específicos en una estructura

Figura 18. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 3 Kpa.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.⁹⁷

⁹³ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 87. 1998. 117–140.

⁹⁴ Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

⁹⁵ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

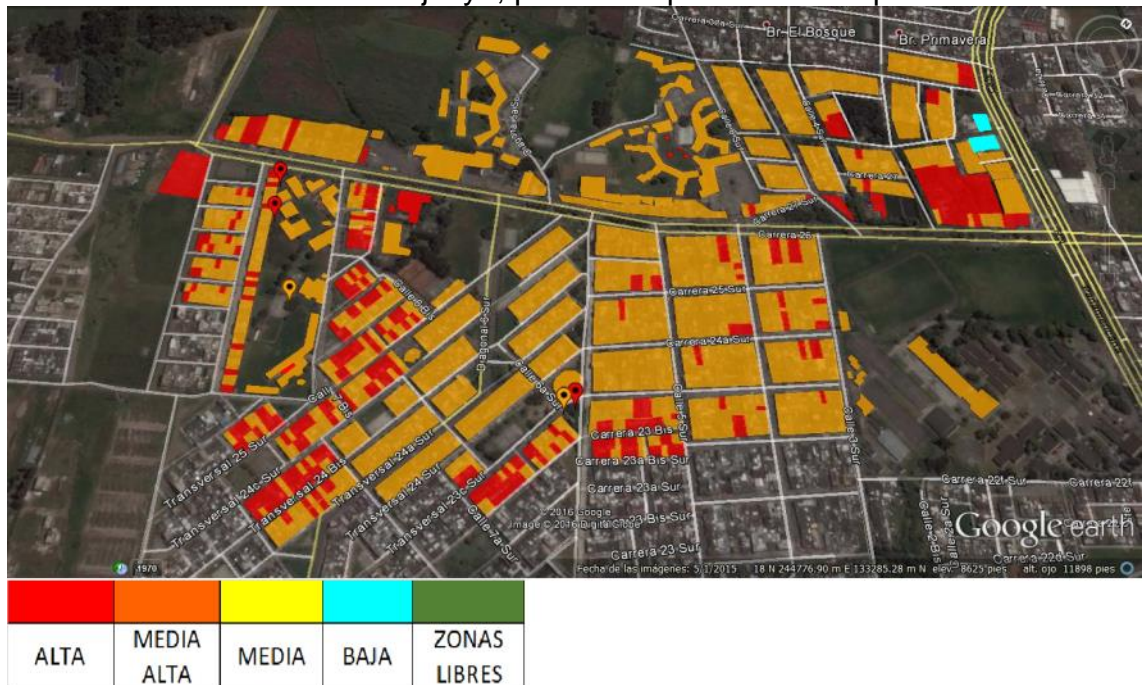
⁹⁶ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

⁹⁷ Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>

como la tipo 1 en la cual los muros son de baja resistencia, si tenía un elemento de ventana con vidrio, sería más vulnerable. En la figura 18 se observa las estructuras que fallarían, además, el comportamiento de las otras tipologías ante el valor de sobrepresión de 3 Kpa.

1.4.2 Ubicación y descripción tipo 2. Para la estructura de tipo 2, se observó unos muros más resistentes pero que tenían ventanas y puertas con vidrio, se puede decir que tenían vulnerabilidad baja en su estructura, pero por sus oquedades quedaría propensa a la entrada de flujos.

Figura 19. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 4 Kpa.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.⁹⁸

1.4.3 Ubicación y descripción tipo 3. El mismo análisis se puede hacer para el tipo 3 en el cual había una estructura fuerte compuesta de pórticos en concreto reforzado que tenía una resistencia importante y que la hacía menos vulnerable ante un flujo, lo que se puede ver en la diferencia de valores de sobrepresión que maneja. Entonces se tenía que entrar a analizar la estructura completa, es ahí donde se miró presencia de muros en mampostería lo que aumentó su vulnerabilidad, además, presentaba oquedades, en muchos casos con áreas grandes, por lo que era susceptible a que los flujos pudieran entrar en la edificación.

⁹⁸ Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>

Figura 21. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo, para sobrepresión de 25 Kpa.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.¹⁰⁰

Tabla 2. Valores para los niveles de vulnerabilidad propuestos en esta investigación de acuerdo a los valores de sobrepresión de flujos dinámicos.

Edificaciones	Vulnerabilidad	Valor de Sobrepresión (Kpa)	Valor asignado por vulnerabilidad	Resultado Ec. 3 *10 ³
Tipo 1	Alta	3	4	117
Tipo 2	Media Alta	4	3	91
Tipo 3	Media	8	2	48
Tipo 4	Baja	25	1	8

Fuente. Elaboración propia.

Para validar la escala de la tabla 2, se usó la metodología de Weibull como se ve en la tabla 3 con la que se puede encontrar valores que puedan definir el nivel de la vulnerabilidad.

¹⁰⁰ Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>

En la tabla 3 se observan cuatro ejemplos para edificaciones de cada tipo en la zona de estudio, con esto se pudo obtener rangos para saber a qué nivel de vulnerabilidad correspondían.

Tabla 3. Ejemplo de distribución probabilística de Weibull para validar niveles de vulnerabilidad propuestas en esta investigación (ver texto para explicación).

Edificaciones	Resultado Ec. (3) *10 ³ (E)	Sobrepresión (Kpa)				Sumatoria (E*V)
		3	4	8	25	
Tipo 1	117	4	4	4	4	1,058.88
Tipo 2	91	3	4	4	4	941.69
Tipo 3	48	2	3	4	4	733.46
Tipo 4	8	1	1	2	4	337.64
		Vulnerabilidad (V)				

Fuente. Elaboración propia.

El resultado de la ecuación Weibull (Ec. 3) (E) se multiplica por el nivel de la vulnerabilidad (V) dado de acuerdo a la sobrepresión que afecta al tipo de edificación. Observando la vulnerabilidad, si el nivel es alto su valor será 4, si su nivel es medio alto el valor será 3, si es medio el valor será 2 y si es bajo el valor será 1. El resultado de la multiplicación (E)*(V) se considera para saber el nivel de vulnerabilidad, que se distribuye de acuerdo a la tabla 4.

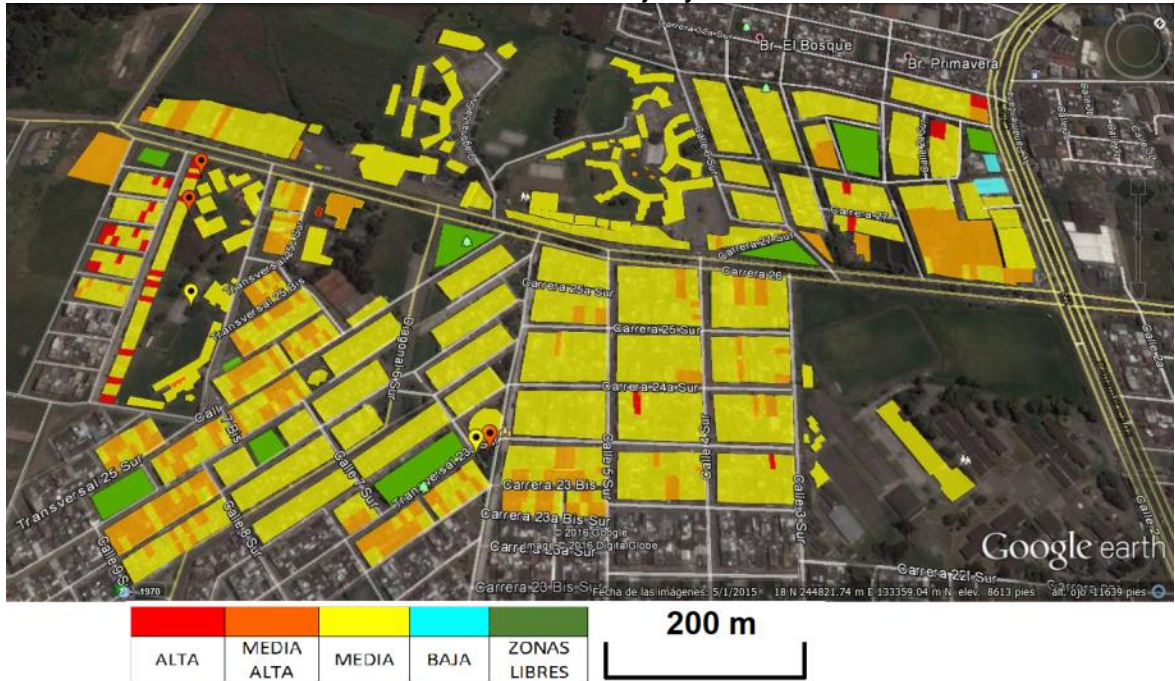
Tabla 4. Rangos para niveles de vulnerabilidad propuestas en esta investigación.

Edificaciones	Valor de Sobrepresión (Kpa)	Valor distribución probabilística de Weibull	Rangos de definición	Nivel de Vulnerabilidad
Tipo 1	3	1,058.88	> 1000	Alta
Tipo 2	4	941.69	800 - 1000	Media Alta
Tipo 3	8	733.46	500 - < 800	Media
Tipo 4	25	337.64	< 500	Baja

Fuente. Elaboración propia.

Una vez definidos los niveles de vulnerabilidad estructural hecha en la tabla 4, se pudo hacer la clasificación de forma gráfica. En la figura 22 se puede observar cómo se distribuyen las construcciones con los niveles de vulnerabilidad a lo largo de la zona de estudio.

Figura 22. Mapa de vulnerabilidad estructural de las edificaciones en el sector de la avenida Mijitayo.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.¹⁰¹

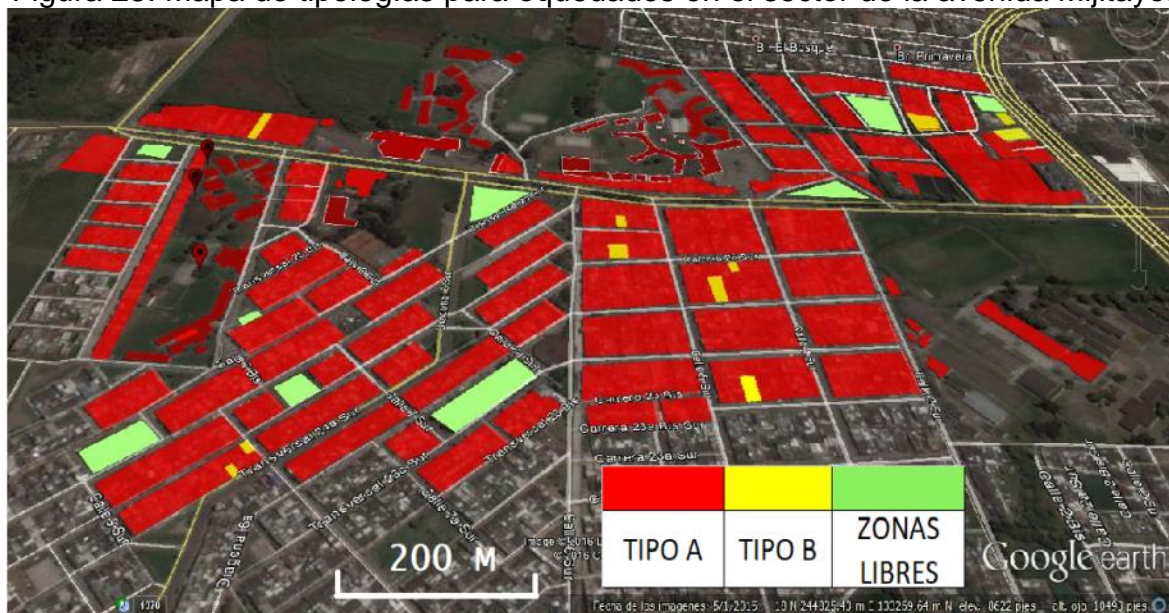
Además, se estableció dos tipos de vulnerabilidad por oquedades (Figura 17): Alta para edificaciones con ventanas y puertas de madera o metal con cristal y áreas grandes de cristal para ventanas o vitrinas, lo que podía permitir el ingreso de los flujos (Tipo A). Baja para edificaciones con ventanas y puertas con superficies de metal sin cristal o con protección de cortinas metálicas (Tipo B).

1.5 VULNERABILIDAD ANTE ENTRADA DE FLUJOS POR OQUEDADES.

El presente estudio consideró una afectación por la penetración del flujo al interior de la construcción, en la figura 23 se pueden ver el tipo B, que eran construcciones que tenían alguna protección en sus oquedades con baja probabilidad de entrada de flujos haciendo que su vulnerabilidad sea baja. El tipo A eran edificaciones que tenían áreas grandes de oquedades sin protección o con materiales de baja resistencia como cristales o muros en drywall, materiales que son propensos a una falla con una baja sobrepresión, esto aumenta la probabilidad de entrada de flujos, lo que hacía que su vulnerabilidad sea alta.

¹⁰¹ Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>

Figura 23. Mapa de tipologías para oquedades en el sector de la avenida Mijitayo.



Fuente. Modificado de Google Earth <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,Or>.¹⁰²

¹⁰² Google. (s.f.). [Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth]. Recuperado el 9 de octubre, 2018, de: <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,Or>

2. DISCUSIÓN

El área de estudio se delimitó a partir de los resultados de la modelación de flujos hecha en Titán Dos Fases por Guerrero A.¹⁰³ donde se mostró la zona de posible afectación para el escenario más crítico. El análisis se llevó a cabo desde la observación directa de las características necesarias para identificar la vulnerabilidad de las estructuras. Para establecer qué estructuras se encontraban dentro de las tipologías propuestas, se tuvo en cuenta además de las características de cada edificio, su estado funcional o de operación aplicando los criterios ingenieriles, por ello casos como construcciones de madera, zinc y malla metálica se agruparon en el tipo 1 por ser más vulnerables, estructuras en mampostería con las de tapia de resistencia considerable pero que de acuerdo a su estado no conservaban sus propiedades ideales iniciales, en el tipo 2. Para el tipo 3 se observaban características de mayor resistencia como estructuras aperticadas, concreto reforzado o sistemas estructurales más resistentes y también mejora en materiales, aunque se veían ciertas falencias o carencias que en algunos casos podían comprometer la resistencia de las estructuras, lo que se podría ver en un análisis puntual si se hace necesario. Para el tipo 4 se veía una estructura bastante resistente a una sobrepresión bastante alta, lo que era muy bueno, aunque presentaba materiales complementarios en su fachada que no eran tan resistentes a la hora de soportar un flujo con baja sobrepresión.

Ya que el análisis se hizo a partir de un reconocimiento visual, las técnicas de construcción, la calidad del concreto y el acero de refuerzo en áreas no visibles como es el interior de las vigas y columnas se asumió teniendo en cuenta la época de construcción, formulas empíricas comúnmente usadas en la construcción e información provista por los propietarios de las edificaciones. En algunos casos se contó con los planos de construcción. Así se pudo establecer el estado de cada edificación, haciendo una comparación con observaciones y metodologías a edificaciones similares a las que se tenían en estudios como el de Petrazzuoli et.al.¹⁰⁴ y Baxter et. al.¹⁰⁵

¹⁰³ Guerrero A., Estimación de la amenaza por flujos de lodos de la quebrada Mijitayo de la ciudad de Pasto en el sector Tamasagra a través de un aplicativo ANDROID. Programa de Jóvenes Investigadores. Gobernación de Nariño. 2016

¹⁰⁴ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367

¹⁰⁵ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

La vulnerabilidad encontrada en este estudio partió del inicio de daño con valores de sobrepresión considerados por varios autores como Valentine ¹⁰⁶, Spence et al. ¹⁰⁷, Petrazzuoli et al. ¹⁰⁸ y Baxter et. al. ¹⁰⁹, aunque tomaron la probabilidad de destrucción total. En este estudio se usó una metodología similar a Rodríguez et. al. ¹¹⁰, Córdoba et. al. ¹¹¹ y moriano et. al. ¹¹², a pesar que estos últimos se basaron en la probabilidad de destrucción total, en este estudio se adaptó esta idea para aproximar el inicio de daño en la probabilidad más baja de los valores en los estudios de Valentine ¹¹³, Spence et al. ¹¹⁴, Petrazzuoli et al. ¹¹⁵ y Baxter et. al. ¹¹⁶. De los valores de sobrepresión para inicio de daño de estos estudios se tomaron los más bajos, siempre se tuvo en cuenta un factor de seguridad alto en procura de la prevención. Por lo anterior, el valor de sobrepresión para inicio de daño que se tomó para la tipología 1 es de 3 Kpa, para la tipología 2 es de 4 Kpa, para la tipología 3 es de 8 Kpa y para la tipología 4 es de 25 Kpa. Para el caso de presencia de oquedades que permitían el ingreso de flujos a las edificaciones, los valores que se consideraron para la destrucción de los cristales en puertas y ventanas fue 1 Kpa.

A medida que aumenta la sobrepresión se esperó que aumente el nivel de daño y también se esperó que inicialmente se afecten algunos elementos de la matriz de materiales que la componían como puertas y ventanas, en cuyo caso se consideró que se pudiera recuperar la edificación. Sin embargo para sobrepresiones mayores se podía llegar a afectar la estructura llegando a ser inhabitable e incluso

¹⁰⁶ Valentine, G.A. Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 87. 1998. 117–140

¹⁰⁷ Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. 321-343.

¹⁰⁸ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

¹⁰⁹ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *Bull Volcanol.* 2005. 67. Pp. 292–313.

¹¹⁰ Rodríguez Diana, Córdoba Gustavo. Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro: el caso de estudio del pueblo de Panan, Nariño, Colombia Hazard and risk mapping – The Arequipa–El Misti case and other threatened cities Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Série n° 1, 2018, p. 87-92.

¹¹¹ Córdoba Gustavo, Paredes Paola, Rodríguez Diana, Otero Ruth, Jurado Anderson, Universidad de Nariño. Documento técnico Evaluación de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos asociados A la actividad volcánica del volcán galeras en el municipio de la Florida (Nariño). Colombia. 2018. En prensa.

¹¹² Moriano E., Paredes P., Córdoba G., Delgado H.. Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). Pasto, Colombia, UNAM, México. 2016. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 69, núm. 1, 2011, p. 223 – 241.

¹¹³ Valentine, G.A. Op. cit.

¹¹⁴ Spence, R., Baxter, P., Zuccaro, G. Op. cit.

¹¹⁵ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Op. cit.

¹¹⁶ Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. Op. cit.

irreparable, como ejemplo, si en una estructura tipo 3 se afectaron los muros de mampostería, se podía hacer la reposición de ellos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el análisis se hizo para cada tipo de edificación, por eso para el tipo 1 como un caso generalizado, conservó estructuras con muros de baja resistencia, eran de una planta y con oquedades con elementos en cristal. Dado que la matriz de elementos que la componían era la más débil, con una baja sobrepresión se podía destruir toda la estructura. Por la entrada de flujos al interior, para el ocupante, la preservación de su vida y de sus enseres se dificultaba mucho haciendo que sea muy vulnerable.

Cuando se hizo el mismo análisis de la conformación de las tipologías, se tuvo para el tipo 2, una estructura de muros como el adobe y la tapia, materiales bastante resistentes ante golpes o eventos sísmicos, pero que tenían una baja respuesta ante la erosión de los flujos que se podían presentar, esto también visto en su estado, que no era el adecuado, por lo cual su vulnerabilidad aumentó y se les incluyó en este tipo. También habían presentes edificaciones con muros en mampostería, de acuerdo a los valores de resistencia del material se podían agrupar con el adobe y la tapia para la parte estructural. Se observó la cantidad y tipo de oquedades que se presentaban en las edificaciones, las cuales en general eran en ventanas y puertas. Eran muy pocas las edificaciones que tenían protegidas sus oquedades con materiales resistentes, por lo cual su vulnerabilidad aumentaba porque el valor de sobrepresión del cristal era el más bajo dentro de los valores analizados. Si se tomaba en cuenta a los ocupantes y sus posesiones, al no tener una posibilidad de protección más efectiva y tampoco tener una forma de escape, se consideraba muy vulnerable.

Para las edificaciones del tipo 3 se mostraban como una matriz de elementos, se analizó la presencia de las oquedades, siendo que en la mayoría había presencia de ellas y en una gran área, lo que las hacía muy vulnerables a la entrada de flujos al bajar el valor de sobrepresión correspondiente al de los cristales. Se pudo observar que hay varios sistemas constructivos, muchos de ellos empíricos en los cuales se pudo notar una falta de estrictos controles de calidad, además de fallas en el cumplimiento de lineamientos como dilataciones, espesores mínimos de mortero de pega y repello de mampostería, y también irregularidades en medidas de elementos estructurales como columnas y vigas. Las edificaciones en este tipo 3 tenían en su mayoría muros en mampostería, provocando que en caso de un flujo con sobrepresión de valor similar al de falla del tipo 2, dejaría ingresar los flujos a la edificación. Para el tipo 3 de las tipologías observadas, se tenían casos con una sola planta, que se asemejaba al tipo 2 al tener entrada de flujos y hacer vulnerables a las personas y sus posesiones. También tenían 2 o más plantas, por lo cual, las personas podían conservar su vida al subir al nivel donde no las alcance los flujos y también podían alcanzar a proteger algunos de sus enseres o por lo menos los más vitales que se considerarían. Se observó una edificación con una estructura aporcada en concreto reforzado que la hacía más resistente que las tipologías

descritas anteriormente, al tener un valor de sobrepresión superior y que dependiendo del caso podía estar cerca al valor de las estructuras de acero que se mencionaban en el tipo 4, por eso se la consideró de vulnerabilidad media.

Dentro de la zona de estudio se tenían unas estructuras muy particulares, al ser de acero, eran las estructuras con la mayor resistencia que incluso sobrepasaban por mucho a las otras tipologías ubicándose dentro del tipo 4, ya que su estructura era la de más baja vulnerabilidad. La particularidad, además de su alta resistencia a la sobrepresión de flujos, era que estaban rodeadas por vitrinas en cristales con el valor de resistencia más bajo encontrado, además, tenían muros en drywall. Por lo descrito anteriormente, se observó una estructura muy fuerte con la menor vulnerabilidad, pero que en caso de un flujo de baja sobrepresión podía entrar a toda la edificación, aumentando su vulnerabilidad. En el tipo cuatro se tenían 2 plantas lo que podía significar una semejanza con el tipo 3, porque, aunque la primera planta tenía entrada de flujos, aún había posibilidad de subir a la planta superior para salvaguardar vidas y algunas de las posesiones.

Se pudo destacar de los tipos 3 y 4, que su capacidad de recuperación era mayor que la de otros tipos, dado que después de una adecuada evaluación de la conservación de resistencia, su estructura podía ser apta para una recuperación funcional de la edificación después de que un flujo ocasionó daños en los elementos de material menos resistente o de que entró el flujo, además de que haya permitido salvar vidas y algunos enseres.

Debido a que esta investigación manejó una metodología aplicada a una población de estudio amplia, no se profundizó en el estudio de algunos factores como el daño causado por enterramiento debido a la sedimentación de materiales transportados por el flujo, o el análisis estructural detallado que presentó Petrazzuoli et. al.¹¹⁷ en su investigación, por esta misma razón se manejó un factor de seguridad alto, lo que permitió asumir los rangos de probabilidad de falla presentados por los autores, como rangos de inicio de daño y de destrucción total.

¹¹⁷ Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

3. CONCLUSIONES

La aplicación de avances tecnológicos en modelación de flujos como el software Titán 2 fases, permitió saber el posible recorrido de un flujo entre otros, esto hizo que los estudios se enfocaran en las áreas que podían ser afectadas. Por otra parte, la observación directa permitió conocer el estado real de las edificaciones, por ejemplo, algunas construcciones, aunque poseían estructura en mampostería, debido a su estado fueron catalogadas en una de las tipologías más débiles de esta investigación.

Al observar los rangos críticos que se tomaron en esta investigación y la importancia de la zona, la densidad de población y la localización de instituciones educativas y gubernamentales, se notó que un alto porcentaje de las edificaciones en el sector presentaban alta vulnerabilidad estructural ante una posible amenaza por flujos de lodos, estos datos deberían tenerse en cuenta para la regulación de viejas construcciones con materiales como madera, tapia y mampostería sin estructura con pórtico.

Por otra parte el nivel de afectación por entrada de flujo a las edificaciones dependía del área vulnerable de acuerdo a las oquedades que se tenían como ventanas o puertas con presencia de cristales, teniendo en cuenta esto se observó que la sola presencia de una ventana o una puerta con cristal hacía a la edificación vulnerable a flujos, pero esta vulnerabilidad disminuía considerablemente protegiendo con cortinas o superficies metálicas en sus áreas vulnerables, por esto se observó casos de edificaciones con alta resistencia estructural pero con baja protección de oquedades lo que la hacía muy vulnerable. Aún más preocupante era el porcentaje tan alto de edificaciones vulnerables por oquedades, el 99% de edificaciones podía sufrir daños por la penetración de flujos dentro de sus instalaciones, y daños aún más grandes las que tenían sótanos que servían como depósitos de sedimentos.

En barrios como Primavera, Villa Sofía y El Bosque se observaron viviendas de alto valor comercial, una de sus características comunes era las grandes ventanas en sus fachadas, esto aumentaba mucho la probabilidad de pérdidas materiales para sus propietarios. En las edificaciones del sector debería implementarse como norma el uso de protección en puertas y ventanas como las cortinas metálicas antes mencionadas o la utilización de vidrios especiales.

Se hace necesario que se vuelva a analizar el tema de zonas de evacuación en la zona de estudio dado que, por los resultados obtenidos en esta investigación, se tenía que muchas de ellas eran muy vulnerables a la entrada o paso de flujos de lodo o flujos dinámicos.

La metodología empleó en esta investigación se presenta como alternativa para el cálculo de la vulnerabilidad, que, combinado con un estudio probabilístico de la amenaza por lahares, hace posible una cuantificación del riesgo, lo cual permitiría

llegar a definir niveles aceptables de este, que faciliten el establecimiento de políticas por parte de los tomadores de decisiones. Cabe recalcar que el riesgo como tal es el factor determinante para la toma de decisiones y que la vulnerabilidad junto con la amenaza son estudios previos para llegar a definirlo.

En procura de la seguridad de los sectores más vulnerables, esta investigación sirve como modelo aplicable a lugares de características geográficas similares, de esta forma se puede analizar la vulnerabilidad de una población expuesta a una posible amenaza de lahares, abriendo paso para un estudio de riesgo de igual manera como se propone en este caso.

4. RECOMENDACIONES

Por prevención se debería tener una remodelación que aumente la resistencia de las edificaciones o el reemplazo por una estructura nueva que haga posible la reducción de su alta vulnerabilidad. Para las nuevas construcciones en barrios que aún se estaban levantando como es el caso de Jerusalén, o como en el barrio Tamasagra que al ser un barrio relativamente antiguo muchas de sus edificaciones eran reemplazadas por nuevas, se debería fortalecer el control a diseños estructurales, materiales usados y métodos de construcción, que permitan obtener una buena calidad de elaboración de concretos reforzados o estructuras metálicas. Estas recomendaciones contribuirían a reducir la vulnerabilidad, sin embargo, en un estudio de gestión de riesgo donde se consideren sobrepresiones más altas que las asociadas a las tipologías catalogadas como más vulnerables se deberían considerar otro tipo de medidas más rigurosas. Además de lo anterior también se debe tener en cuenta que no se tomó en consideración el fenómeno de enterramiento, lo cual podía aumentar la vulnerabilidad de las edificaciones.

BIBLIOGRAFIA

Araña, V. (2001). Volcanismo de las Islas Canarias. En Astiz, M. & García, A. (Ed.): Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Cabildo de Lanzarote, Madrid, pp. 105-114.

Baxter Peter, Boyle Robin, Cole Paul, Neri Augusto, Spence Robin, Zuccaro Giulio. The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufriere Hills volcano, Montserrat. Bull Volcanol. 2005. 67. Pp. 292–313.

Castro Maria y Marcillo Juan. Diseño De Sistema Para Monitoreo Y Alerta Temprana Ante Riesgos Por Inundación En La Ciudad De Pasto. Universidad de Nariño. Pasto. 2014. Pp. 06.

Caza Noticias Colombia. INUNDACIONES EN PASTO 09 de Abril 2017 Torrencial Aguacero. YouTube. 2017. Disponible en la web: <https://www.youtube.com/watch?v=wX3OldC-aoc>

Córdoba Gustavo, Paredes Paola, Rodríguez Diana, Otero Ruth, Jurado Anderson, Universidad de Nariño. Documento técnico Evaluación de la vulnerabilidad estructural ante fenómenos asociados a la actividad volcánica del volcán galeras en el municipio de la Florida (Nariño). Colombia. 2018. En prensa.

Cuny, F. (1983). Disasters and prevention. Oxford University Press. Nueva York.

Dawn, M. (2010). Vulnerability assessment for the Mijitayo creek water treatment facility. New York, Unite States of America: University at Buffalo.

Google (s.f.). Avenida Mijitayo, Pasto, Nariño, Colombia en Google earth. Recuperado de <https://earth.google.com/web/@1.2075367,-77.2916977,2608.73268442a,1056.27893472d,35y,0h,45t,0r>.

Guerrero A., (2016). Estimación de la amenaza por flujos de lodos de la quebrada Mijitayo de la ciudad de Pasto en el sector Tamasagra a través de un aplicativo ANDROID. Programa de Jóvenes Investigadores. Gobernación de Nariño. 2016.

INGEOMINAS (2005), Actividad Histórica, Volcán Galeras. Pasto, Colombia. Recuperado de http://www2.sgc.gov.co/getattachment/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Actividad-historica/Actividad_historica_galeras.pdf.aspx.

INGEOMINAS (2010), Resumen De La Actividad Eruptiva Del Volcán Galeras En El Periodo 2004 – 2009, Archivo Fotográfico Ingeominas. Pasto, Colombia. Recuperado de <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Actividad-historica.aspx>.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2017). Diccionario Geográfico de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. Disponible en la web en www.igac.gov.co/digeo/app/index2.html

Jakob, M., Hungr, O., and Jakob, D. (2005). Debrisflow hazards and related phenomena. Springer, 411- 443.

Jenkins, F., Phillips, C., Price, R., Feloy, K., Baxter, P., Hadmoko, D., and Bélizal, E. (2015). Developing building damage scales for lahars: application to Merapi volcano, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 77(9), 1 - 1

Ley 1523. Congreso de la Republica de Colombia, Bogotá, Colombia, 24 de abril de 2012.

Moriano E., Paredes P., Córdoba G., Delgado H. (2016). Evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones ante la génesis de lahares: Caso de estudio en la población de Santiago Xalitzintla, en el flanco NE del volcán Popocatepetl (México). Pasto, Colombia, UNAM, México. En prensa.

Mothes, P., Hall, M. & Janda, R. *Bull Volcanol*. The enormous Chillos Valley Lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi Volcano, Ecuador, 1998, 59: 233. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s004450050188>.

Munson, B., Young, D., Okiishi, T. (2006). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (5 edition), John Wiley & Sons. Inc., p 816 .

NSR-10, (2010). Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente, Comisión Asesora Permanente Para El Régimen De Construcciones Sismo Resistentes. Bogotá D.C., Colombia, Enero de 2010. A-25, A-26.

Ortiz, R. (1996). Riesgo volcánico. Servicio de publicaciones del Exmo, Cabildo Insular de Lanzarote, Serie Casa de los Volcanes Vol (5), 329 pp.

OSSO Corporación, Fondo nacional de Calamidades, (2009). Estudio de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán Galeras. (2009). Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 Fondo Nacional de Calamidades - Corporación OSSO. Dirección de Gestión de Riesgos – Proceso Galeras, 2009.

Paz Liceth y Tenganan Johana. Formulación del plan de contingencia ante el fenómeno flujos de lodo en la zona de amenaza volcánica media, quebrada mijitayo, municipio de pasto. Universidad de Nariño. Colombia. 2014. Pp. 93-96.

Petrazzuoli S.M., Zuccaro G. Structural resistance of reinforced concrete buildings under pyroclastic flows: a study of the Vesuvian area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133. 2004. Pp. 353-367.

Rodriguez Diana, Córdoba Gustavo. Evaluación del riesgo por lahares del complejo volcánico Chiles-Cerro Negro: el caso de estudio del pueblo de Panan, Nariño. *Colombia Hazard and risk mapping – The Arequipa–El Misti case and other threatened cities* Presses Universitaires Blaise Pascal, Territoires, Hors Série n° 1, 2018, p. 87-92.

Rojas A., (1999). Pasto, ciudad y río. Una experiencia para el desarrollo metodológico. *Bitácora Urbano-Territorial*, Vol. 1, núm. 3. 29.

Rosero E., (2014). Consultoría para la descripción y evaluación estructural y de servicio, en edificaciones indispensables, edificaciones de atención a la comunidad y estructuras de ocupación especial en la ciudad de Pasto y su priorización de acuerdo al riesgo sísmico. Oficina de la Dirección para la Gestión del Riesgo y Desastre (DGRD), Pasto, Nariño, Colombia.

Rosero Natalia, Narváez Catalina. Modelamiento Del Control Topográfico Ejercido Por El Valle De Atriz Sobre Los Flujos De Lodo Provenientes De La Quebrada Mijitayo. Pregrado. Pasto. Universidad de Nariño. 2005.

Sandi, H. (1983). Earthquake risk and earthquake preparedness: some qualitative aspects and quantification possibility. UNDP/UNESCO/UNDRO Project for Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region. En *Proceedings of the Seminar on Earthquake Preparedness* (pp. 79-93).

Scott, W., Pierson, T., Schilling, S., Costa, J., Gardner, C., Vallance, J., and Major, J. (1997). *Volcano hazards in the Mount Hood region, Oregon*: US Department of the Interior. US Geological Survey, Report, 16 pp.

SGC, (2015). (Servicio Geológico Colombiano), Actualización del mapa de amenaza volcánica del volcán Galeras - En cumplimiento a la Sentencia de la Corte Constitucional T-269 de 2015. 2015. 2 pp.

Smith, G., and Fritz, W. (1989). Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17(4), 375-376.

Spence, R., Baxter, P., 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 (2004) 321-343.

Streeter, V., Wylie, E., and Bedford, K. (2000). *Mecánica de los fluidos* (Vol. 9): Santafé de Bogotá, McGrawHill, 740 pp.

Thouret J.-C., Enjolras G., Martelli K., Santoni O., Luque J. A., Nagata M., Arguedas A., and Macedo L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 339–360, 2013. 355-356.

Thouret, J., and Lavigne, F. (2000). Lahars: occurrence, deposits and behaviour of volcanohydrologic flows. *Volcaniclastic rocks from magma to sediments*. Gordon and Breach Science Publishers, 151 - 174.

UNDRO, (1991). United Nations Disaster Relief Organization, *Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options: A Manual for Policy Makers and Planners*.

Valentine, G.A. (1998). Damage to structures by pyroclastic flows and surges, inferred from nuclear weapons effects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 87. 117–140.

Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M., Leoni, F., and Santacroce, R. (2002). Characteristics of May 5–6, 1998 volcaniclastic 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.

Zúccaro, G., Santo, A., Cacace, F., Gregorio, D., and Crescenzo, G. (2012). Building vulnerability assessment under landslides actions. Castellammare di Stabia case study, Italia. *Online report of Italian Geological Society*, 21, 470 - 472.