

**PROYECTO DIPLOMADO EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
MODELACION TRIDIMENSIONAL DE LA AMENAZA VOLCANICA DEL
VOLCAN GALERAS**



AUTOR

ELIANA MARCELA PÁEZ PERDOMO

Trabajo de grado como requisito para optar al título de:

INGENIERIA CIVIL

Tutor proyecto de grado Diplomado SIG:

Geólogo. Esp. Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry. Mcs

Tutora trabajo opción de grado:

Ing. Esp. Diana Margarita Hernández Avilés.

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE ESTUDIOS A DISTANCIA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

BOGOTA, ABRIL DE 2021

TABLA DE CONTENIDO

1. PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. OBJETIVO GENERAL.....	10
3.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
4. MARCO REFERENCIAL	11
5. METODOLOGIA	19
6. RESULTADOS.....	22
6.1 MODELO CARTOGRÁFICO	22
6.1.1 Cartografía tomada y adaptada del Servicio Geológico Colombiano sobre amenaza del Volcán Galeras (proyección).....	22
6.1.2 Cartografía Volcán Galeras de EARTHDATA (NASA) ASF Data Search Vertex, Referencia ALPSRP071490010	25
6.1.3 Cartografía Volcán Galeras de SIG de Google SAT_WM (-8613907,137404) ...	30
7. PLANIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN	33
7.1 PRUEBAS.....	33
7.2 PLANOS	34
7.3 RESULTADOS PARA CADA EVENTO.....	35
7.4 MAPA	40
8. ANALISIS DE RESULTADOS.....	42
CONCLUSIONES.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

Índice de Figuras

Figura 1. Zonas de amenazas volcánicas del Volcán Galeras	12
Figura 2. Zona de amenaza alta	13
Figura 3. Metodología y datos. (Elaboración propia).....	21
Figura 4. Capa de Sombras y Capa de Curvas de Nivel	22
Figura 5. Capa de Elevación y Capa de Puntos Altos.....	23
Figura 6. Capa de líneas Suaves.....	24
Figura 7. Capa en 3D.....	24
Figura 8. Capa en Soft Lines.....	24
Figura 9. Plataforma EARTHDATA (NASA) Área Volcán Galeras – Nariño, Colombia.....	25
Figura 10. Capa Mapa DEM. EARTHDATA (NASA) Área Volcán Galeras – Nariño, Colombia.....	26
Figura 11. Capa de Pendientes y Capa de Reclasificación de Pendientes.....	26
Figura 12. Capa de Orientación.....	27
Figura 13. Capa de Curvatura y Capa de Sombras.....	27
Figura 14. Capa de Curvas de nivel a 5m en Escala 1:20.000 y en Escala 1:500.000.....	28
Figura 15. Capa de Curvas de Nivel a 50m.....	28
Figura 16. Capa de Elevación.....	29
Figura 17. Mapa en 3D.....	30
Figura 18. Cartografía Volcán Galeras de SIG de Google SAT_WM	30
Figura 19. Vista eje Z - Elevado.....	31
Figura 20. Vista eje Y - Elevado.....	31
Figura 21. Vista eje X - Elevado.....	32

Figura 22. Vista Perspectiva - Elevado.....	32
Figura 23. Vista volcán erupción – Prueba simulación.....	33
Figura 24. Vista pueblo erupción – Prueba simulación.....	34
Figura 25. Vista municipios y ciudades – Eje Z.....	35
Figura 26. Vista municipios y ciudades – Perspectiva.....	35
Figura 27. Cenizas - Simulación activación del Volcán Galeras.....	36
Figura 28. Lluvia de piroclastos - Simulación activación del Volcán Galeras.....	36
Figura 29. Flujo de piroclasto y Flujo de lodo - Simulación activación del Volcán Galeras.....	37
Figura 30. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Vista ciudad de Pasto.....	38
Figura 31. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Vista norte del Volcán.....	38
Figura 32. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Eje Z.....	39
Figura 33. Mapa Modelación Tridimensional “Volcán Galeras” – Elevación.....	40
Figura 34. Mapa Modelación Tridimensional “Volcán Galeras” – Amenaza Volcánica, Municipios y Eventos.....	41

Indice de Tablas

Tabla 1. Recopilación de investigaciones y estudios físico - matemáticos del Volcán Galeras...16

Tabla 2. Recopilación de simulaciones de modelados 3D y animaciones del Volcán Galeras.....18

MODELACION TRIDIMENSIONAL DE LA AMENAZA VOLCANICA DEL VOLCAN GALERAS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Volcán Galeras se encuentra ubicado en la cordillera de los Andes, exactamente en la Cordillera Central, en Colombia en el Departamento de Nariño y a 135,93 km al norte del Ecuador. Su lugar con exactitud es aproximadamente a 9 km al occidente de San Juan de Pasto (Generalidades Volcán Galeras, 2020), que es la capital de este departamento de Nariño, con unas coordenadas en latitud norte y longitud oeste, cercano a 7 municipios. Contando con dos carreteras parcialmente pavimentadas y un camino llamado Camino Real, estas 2 van desde la capital del departamento. Dentro de sus características se encuentra que este volcán tiene una altura de 4276 metros sobre el nivel del mar. Además de 20 kilómetros de diámetro en su base, 320 metros de diámetro en la cima y 80 metros de profundidad (Mapas de Amenazas Volcánicas , 2020), siendo áreas de relevancia las cuales pueden estar en riesgo ante una erupción volcánica.

Alrededor del Volcán Galeras se encuentra el Santuario de Flora y Fauna Galeras ecoturístico, el cual cuenta con una extensión de 8600 hectáreas, además de más de 300 especies de fauna silvestre y más de 622 variedades de vegetación de paramo, siendo las más afectada si el volcán presenta algún tipo de actividad, no obstante en la actualidad los gases producidos por el volcán han generado un impacto negativo, alcanzando alturas cercanas a 1000 metros del cráter del volcán y con un radio máximo de 10 km según informes históricos del Servicio Geológico Colombiano (Mapa de amenaza Volcán Galeras , 2020), teniendo en cuenta estudios realizados por el IDEAM en el 2017 para los años 2015 a 2016, el índice de calidad del aire (ICA) cerca al Volcán Galeras se encuentra en un índice amarillo que representa una calidad aceptable con un rango de 51-100. En un escenario donde ocurra una erupción menor, éste índice logra alcanzar un rango de 101 -150, catalogándolo como nivel naranja con el cual se puede dimensionar un problema grave de salud en los grupos que tengan alguna preexistencia respiratoria o cardiaca. Por otro lado, si el volcán erupciona en su totalidad, el aumento en el índice de la calidad del aire es considerable catalogado en color

marrón, lo cual puede ocasionar situaciones graves y peligrosas generando una advertencia sanitaria con rangos entre 301-500 ICA por el IDEAM (Subdirección de Estudios Ambientales, 2017). Bajo esta situación, no solo el parque natural sufriría de un impacto negativo, sino también, los municipios cercanos afectando su población, ya que los gases emitidos por un volcán tienen sustancias químicas como el dióxido de carbono, dióxido de azufre, arsénico, entre otras sustancias, que resultan ser peligrosas y tóxicas. Un ejemplo de esto es que los gases y las cenizas pueden traspasar la atmósfera generando temperaturas muy bajas de 0°C, teniendo en cuenta que las sustancias químicas emitidas por los gases tienen un efecto reflejo al llegar a la atmósfera, de ahí que la luz solar no pueda ser proyectada a las ciudades cercanas a un volcán en máxima actividad. (Gorvett, Z, 2017). Según estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano para el año 2015, la proyección de afectación más alta de una erupción volcánica se puede evidenciar en los 5 principales municipios que tienen como máxima distancia del cráter del volcán un total de 14 kilómetros aproximadamente.

Lo anterior puede compararse con erupciones volcánicas ocurridas en diferentes lugares del mundo. Datos históricos marcan como evidencia que los daños que podría generar una erupción total de un volcán que se encuentra en reposo o en actividad leve serían fatales, como sucedió con el Volcán Vesubio en el año 79 d.C., con la destrucción de las ciudades de Pompeya y Herculano, en las cuales habitaban entre 15000 y 20000 personas, falleciendo alrededor de 5000 personas calcinadas, algunas fenecieron por la concentración de cenizas y gases tóxicos en sus cuerpos, los gases y cenizas formaron una cortina de humo que traspasaba la atmósfera generando heladas llegando hasta países como Egipto y Siria, los flujos piroclásticos, flujos de lodo y flujos de lava fueron la destrucción total de más de 20 km de radio al cráter del volcán, esta información se sabe porque científicos italianos analizaron e investigaron la situación presentada en este desastre natural en el año 2018 (Lima, L, 2018). En el año 2002 se presentó una de las erupciones y destrucciones fatales más destacadas por la actividad del Volcán Nyiragongo ubicado en la República Democrática del Congo, a 10 km del cráter del volcán se encuentra la ciudad de Goma y el Lago Kivu los cuales cuentan con más de 670000 habitantes, este volcán tiene una elevación aproximada de 3470 msnm y un parque natural a su alrededor llamado el Parque Nacional Virunga aceptado por la UNESCO como Patrimonio de la Humanidad, el flujo piroclástico, flujo de

lodo y el flujo de lava llego más allá de los 20 km de radio destruyendo todo a su paso al norte de estas ciudades, donde fallecieron 250 personas calcinadas en menos de 30 minutos, el número es menor ya que acciones de los organismos de socorro permitieron la evacuación controlada de la población al país de Ruanda (BBC News Mundo, 2021).

Por otro lado, en Colombia la erupción que dio lugar a una destrucción ambiental y fatalidad en vidas en el año de 1985, en Armero al norte del departamento del Tolima a 50 km del cráter del volcán se presentó la erupción del Volcán Nevado del Ruiz, teniendo una inactividad durante 69 años, si bien los organismos de socorro realizaron la prevención necesaria e intento de evacuación antes de la tragedia de los 29000 habitantes para octubre del mismo año, los pobladores de la región fueron los que determinaron que no era necesario, ya que eventos similares de cenizas y gases se habían presentado antes sin ningún tipo de daño o efecto (Perdomo, 2021), sin embargo el 13 de noviembre empezaron a generarse además de desprendimiento de cenizas y gases, las lluvias piroclásticas, el flujo piroclástico y el flujo de lodo con un flujo de lava menor generando deshielo del 10% aproximadamente y avalancha de lodo, suelos y rocas a 80 km de radio, causando la muerte de 20000 personas, miles de desaparecidos y la destrucción total de Armero, pérdida de 3000 vidas en Villamaría y Chinchiná Caldas, afectando levemente municipios como Santa Isabel, Guayabal, Mariquita, Lérída, Murillo, Líbano, Venadillo y Ambalema por daños estructurales, Honda por inundación, Manizales por caída de ceniza, actualmente continúa siendo una amenaza calculando que las cenizas pueden alcanzar más de 100 km llegando hasta Bogotá la Capital del país (Páez, 2020).

Teniendo en cuenta la constante actividad del Volcán Galeras en su desprendimiento de cenizas, emisión de gases, ondas de choque y movimientos sísmicos entre 1.2 a 5 en la escala de Richter con epicentro en el volcán con rangos históricos tomados desde 1988 hasta 2020 para un radio de 6.5 km a 14 km aproximadamente (Boletines Volcán Galeras, 2020), hacen que se encuentre completamente monitoreado, pero aún no tiene una proyección exacta de sus daños puesto que el volcán jamás ha erupcionado en su totalidad ya que máximo ha presentado un flujo de lava menor desde 1866 en contraste con otros volcanes que han erupcionado ocasionando grandes tragedias y destrucciones como los mencionados anteriormente, con el paso del tiempo se hacen necesarios más estudios, ya que los domos

que servirían para mitigar los daños que llegaría a causar una erupción volcánica se están perdiendo por los diferentes movimientos que controlarían el volcán. No existe hasta la fecha ningún tipo de simulación animada en 3D que permita ver desde diferentes perspectivas las afectaciones que llegarían a generar la erupción y amenaza volcánica del Volcán Galeras y sus eventos.

2. JUSTIFICACIÓN

Desde 1866 el volcán presenta diferentes eventos volcánicos desde flujos de lava menores e incluso flujo piroclástico en años como 1932, 1936 y 1993, además cuenta con una reserva natural ecoturísticas desde el año 1985 llamada el Santuario de Flora y Fauna Galeras (Mapas de Amenazas Volcánicas , 2020). El constante movimiento del Volcán Galeras, generó que en el año 1990 fuera incluido en el proyecto Volcanes de la Década (Decade Volcanoes), de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (Mapas de Amenazas Volcánicas, 2020).

El propósito de este proyecto es identificar las potenciales afectaciones que repercutirían significativamente en la población del departamento de Nariño, al estar asentada en las zonas que eventualmente podrían sufrir el impacto de la erupción de este volcán, lo cual puede ser anticipado y proyectado mediante una modelación, animación y simulación en 3D en programas y herramientas tales como Autodesk Maya, Blender, ArcGIS, entre otros programas que facilitan la realización del producto final. Teniendo en cuenta la información recopilada sobre las características del volcán, ubicación, antecedentes y posibles eventos de erupciones en sus diferentes flujos, además de sus efectos, de igual forma es necesario precisar que esta simulación tiene como principal objetivo identificar los daños que se pueden presentar frente a una amenaza volcánica en municipios, como lo son: Genoy, Nariño, La Florida, San Juan de Pasto y Sandoná (Generalidades Volcán Galeras, 2020), siendo estos los más cercanos al área en la que se encuentra el cráter del Volcán Galeras con un radio entre 6.5 km y 14 km aproximadamente.

Por lo que, el presente proyecto pretende determinar los eventos volcánicos como los son las cenizas, ondas de choque, lluvia piroclástica, flujo piroclástico, flujo de lodo, flujo de lava y

gases, los cuales llegarían a ocurrir ante una erupción volcánica y sus potenciales daños en el terreno, en su flora y fauna, de igual forma los daños estructurales que resultarían de vital importancia para la población ubicada en las zonas cercanas al Volcán Galeras (BOLETINCRUZROJA, 2016), ya que actualmente las diferentes investigaciones generan datos físico - matemáticos que son aproximados respecto a la expansión de las actividades del volcán, entre los cuales se encuentra por medio del código TITAN2D, el ángulo de expulsión del flujo piroclástico, con un impacto máximo de 210 segundos alcanzando un área de 6 km² (García et al., 2011), sin embargo no llegan a ser precisos y por ende no se tiene una proyección exacta de los daños que se pueden causar. Por otro lado, hasta la fecha no hay simulaciones de una amenaza volcánica del Volcán Galeras que cuente con diferentes capas de elevaciones para realizar una proyección más exacta en 3D, por lo tanto no existe una gráfica animada en tercera dimensión que permita evidenciar el alcance de un flujo de lava e incluso de cenizas, material de relevancia, no solo para estudios de erupciones volcánicas sino también para la educación en materia de prevención dirigida a la población y evitar a futuro cualquier tipo de riesgo que se puede presentar en los diferentes municipios y ciudades del departamento de Nariño. No obstante, es importante la recopilación de datos para generar una simulación realista del Volcán Galeras y sus eventos, además de realizar un modelado en 3D de los 5 principales municipios que se verían afectados, desde la mayor afectación hasta la de menor, ya que la mayoría de su población se encuentra ubicada en la zona rural del departamento.

3. OBJETIVO GENERAL

Generar una proyección a través de una simulación en 3D en la que se recrea la probable ocurrencia de la erupción volcánica del Volcán Galeras, para visibilizar las posibles consecuencias y afectaciones en el terreno, los daños estructurales y los riesgos en la población.

3.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Determinar los antecedentes y características inherentes al Volcán Galeras, dada la importancia de sus eventos, para efectuar una proyección digital lo más cercana a la realidad.
2. Proyectar un modelo digital de elevación del terreno por medio de capas y mapas que lleven a realizar un modelado en 3D de la zona y los 5 municipios más cercanos al cráter del volcán, teniendo en cuenta un estudio del Sistema de Información Geográfica.
3. Generar una animación y simulación del Volcán Galeras desde diferentes perspectivas, que trasciende a lo plasmado en simulaciones y estudios anteriores, con la finalidad de incluir los eventos producidos por una fuerte erupción del volcán.

4. MARCO REFERENCIAL

El Volcán Galeras tiene una edad aproximada de 4.500 años, según los estudios realizados se evidencia que desde el siglo XVI, se han presentado al menos 36 erupciones volcánicas confirmadas y 6 inciertas (Ardila L, 2018). Dichas erupciones se han caracterizado por ser moderadamente explosivas, catalogadas como Vulcanianas que han arrojado pequeños flujos de lava y lanzado gases, además de cenizas, así como flujos piroclásticos que se han depositado hasta 9.5 kilómetros de distancia del cráter del volcán.

Desde 1985, este volcán está en una reserva con un área aproximada de 8600 hectáreas comprendidas entre ciertos municipios como Catambuco, Yacuanquer, Consacá, Sandoná, La Florida, Nariño y Genoy, a su vez, cuenta con rica biodiversidad, que se caracteriza por tener topografía entre quebrada (terreno roto y cortado) y escarpada (diferentes pendientes altas, con alturas entre los 2200 y los 4276 msnm.), este lugar se denomina el Santuario de Flora y Fauna Galeras (Mapas de Amenazas Volcánicas , 2020).

Por otra parte, de las actividades y eventos volcánicos del Volcán Galeras más relevantes se encuentran: en el año 1866 se presentó un flujo menor de lava, en 1932 y 1936 un flujo piroclástico incluyendo lluvias piroclásticas y emisión de gases (Mapa de amenaza Volcán Galeras, 2020). Una de las más recordadas y trágicas fue la erupción que sucedió el 14 de enero de 1993 (BOLETINCRUZROJA, 2016), donde un grupo de científicos y sus guías recogían muestras de gases directamente en el cráter del volcán, en ese momento se presentó una erupción menor y murieron 9 personas que adelantaban esta investigación, entre ellos 6 vulcanólogos.

Desde entonces, el Volcán Galeras se encuentra en constante actividad, desprendiendo gases y cenizas, e incluso, se llegan a evidenciar movimientos sísmicos de 1.2 a 5 en la escala de Richter desde el año 1988 hasta 2020, por lo que se encuentra en constante monitoreo con un boletín semanal emitido por el Servicio Geológico Colombiano; para el periodo comprendido entre el 17 y 23 de noviembre del año 2020, se informa que la actividad sísmica está en niveles bajos, por lo que se clasifica en el NIVEL AMARILLO (Alerta roja en el volcán Galeras de Colombia por nueva erupción, 2009), pero se mantiene sismos asociados con fractura de roca, con una magnitud máxima de 1.6 en la escala de Richter (Boletines Volcán Galeras, 2020).

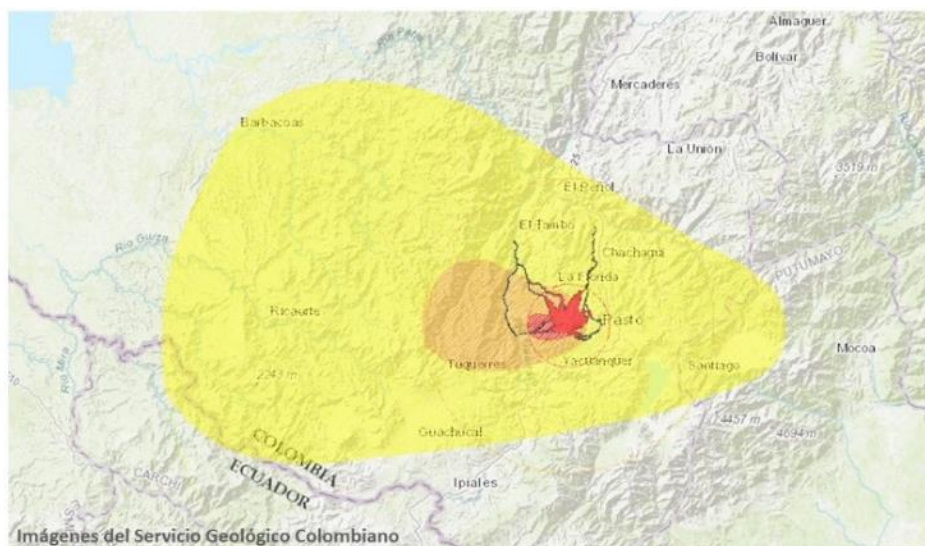


Figura 1. Zonas de amenazas volcánicas del Volcán Galeras (Mapa de amenaza Volcán Galeras , 2020)

A su vez, en cuanto al estudio de amenaza volcánica, resulta importante tener en cuenta la información del Servicio Geológico Colombiano y como se observa en la figura 1, se presentan los mapas de amenazas volcánicas, a través de los que se determina el estudio que se realizó para el año 2015 respecto a:



Figura 2. Zona de amenaza alta (Mapa de amenaza Volcán Galeras , 2020)

Zona de amenaza alta, es la zona enmarcada en color rojo como se evidencia en la figura 2, en la cual se pueden presentar diferentes eventos, como los son: flujos piroclásticos, flujos de lava, flujos de lodos y lluvia piroclástica, así como gases volcánicos, onda de choque y sismos volcánicos. La mayoría de estos fenómenos afectarían las partes altas del volcán y los cauces de los ríos, estos flujos podrían recorrer distancias de alrededor de 37 kilómetros. Mientras que la lluvia piroclástica alcanza 11 kilómetros, afectando algunas zonas rurales con un volumen mayor a 10 centímetros (Mapas de Amenazas Volcánicas, 2020).

La zona naranja indica la zona de amenaza media, donde el volumen de flujo piroclástico se encuentra entre 1 y 10 centímetros, en un radio de 40 kilómetros. El color amarillo delimita la zona de amenaza baja, en la cual la lluvia piroclástica tiene un volumen de 0.5 a 1 centímetros en un radio de 100 kilómetros.

Cada zona presenta ciertos eventos y actividades del volcán, por lo que dentro de los eventos volcánicos que suceden en los estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano e investigaciones vulcanológicas, es necesario identificar las características de cada uno, las cuales son:

- **Cenizas:** Cuando el volcán se encuentra en movimiento, se generan cenizas que son transportadas por el viento, produciendo problemas de contaminación, sin embargo se dice que estas cenizas con el tiempo son abono importante para los cultivos, los terrenos ubicados cerca a los volcanes son los más fértiles y productivos. (Mapas de Amenazas Volcánicas, 2020).
- **Ondas de choque:** Se ocasionan por los cambios de presión en el aire, al presentarse una explosión, causando daños materiales.
- **Lluvia de piroclásticos:** También denominada caída de piroclásticos es la expansión de elementos volcánicos, como lo son las cenizas, las rocas incandescentes de diferentes tamaños (menores a 2 milímetros, entre 2 y 64 milímetros y mayores a 64 milímetros), es importante resaltar que este evento puede causar incendios forestales.
- **Flujos piroclásticos:** Es considerado como el fenómeno más peligroso, ya que consigo lleva a la superficie gases y material incandescente de altas temperaturas, alcanzando los 1000 grados centígrados y una velocidad de 100 kilómetros por hora (provoca deshielo, como ocurrió en el nevado del Ruíz en 1985, en Armero), provocando la muerte de personas y animales por quemaduras e inhalación de ceniza caliente y gases (Mapa de amenaza Volcán Galeras, 2020). Por lo que la probabilidad de sobrevivir al impacto de un flujo piroclástico es realmente imposible.
- **Flujos de lodo:** Son de los elementos más destructores, ya que se produce por desprendimiento, este desprendimiento va acompañado de cenizas, suelos, vegetación y agua, puede alcanzar grandes velocidades y altas temperaturas, para posteriormente pasar a temperaturas muy bajas. Arrasando y destruyendo con todo lo que está en su paso desde vegetación, cultivos y estructuras, además de inundaciones,

enterramiento y aislamiento, es un fenómeno muy peligroso y la probabilidad de sobrevivir a su impacto directo es mínima.

- **Flujos de lava:** Son corrientes de roca fundida y gases, a pesar de su temperatura, es el evento menos peligroso, ya que la densidad del material es muy pesada y por lo tanto su velocidad es lenta, si bien destruye y quema todo a su paso, permite que las personas y animales puedan desplazarse a un lugar seguro. Este evento puede generar los flujos de lodo, flujos piroclásticos, e incluso los mismos gases tóxicos pueden acabar con muchas vidas. (Mapa de amenaza Volcán Galeras, 2020).
- **Gases:** Los gases son los últimos, y a su vez de suma importancia, ya que por la emisión de gases en las erupciones volcánicas, siempre hay víctimas mortales por su alta concentración de dióxido de carbono, dióxido de azufre, entre otros elementos. (Mapa de amenaza Volcán Galeras, 2020).

Los mencionados eventos volcánicos son objeto de estudio dentro de las investigaciones bajo diferentes cálculos y modelos físico - matemáticos, en universidades de Colombia y son presentados en ponencias y foros internacionales en países como Argentina y Perú. Es de real importancia resaltar que los estudios presentados por diferentes estudiantes e investigadores tienen como fin identificar los posibles eventos y amenazas volcánicas del Volcán Galeras, sin embargo, los cálculos generados si bien tienen un solo resultado, no son la respuesta absoluta a un evento de gran magnitud frente a una erupción volcánica, esto teniendo en cuenta que este volcán jamás a presentado actividad de gran magnitud, por esta razón su constante monitoreo. Dentro de los estudios realizados en simulaciones y cálculos matemáticos por medio diferentes softwares, se encuentra una recopilación de las principales investigaciones en la tabla 1, que se presenta continuación:

Tabla 1. Recopilación de investigaciones y estudios físico - matemáticos del Volcán Galeras.

INVESTIGACIONES Y SIMULACIONES FISICO-MATEMATICAS DEL VOLCAN GALERAS			
AUTORES	AÑO DE ESTUDIO	OBJETIVO DE ESTUDIO	RESULTADOS
Gómez, Diego M. Torres, Roberto A. Laverde, Carlos A. Cadena, Oscar E. Mier, Richard A. Monsalve, María L. Cortés, Gloria P. Calvache, Marta L.	2009	Estudio de la actividad volcánica del Volcán Galeras, teniendo en cuenta antecedentes presentados en su constante actividad desde 2004. (Gómez et al., 2009)	En este estudio se determinó que las actividades sísmicas presentadas desde el año 1991 hasta el 2009 son similares, sin embargo, es posible que después de la destrucción del domo que cubría la parte del volcán quedo expuesta a la liberación de gases y un nivel eruptivo crítico. Por lo que se debe mantener en constante monitoreo, ya que es difícil anticipar una erupción volcánica del Volcán Galeras. (Gómez et al., 2009)
García, Ana M. Murcia, Hugo F. Cortés, Gloria P. Laverde, Carlos A.	2011	Evaluar la distribución y alcance de posibles flujos piroclásticos en las futuras erupciones volcánicas del Volcán Galeras por medio del código TITAN2D. (García et al., 2011)	Se obtuvo una representación gráfica-matemática que indica por medio del código TITAN2D, dependiendo del ángulo de expulsión del flujo piroclástico, así mismo será su impacto, donde se establece que en un máximo de 210 segundos se alcanza un área de 6 km ² . (García et al., 2011)

Dueñas, David Rodríguez, Jairo Betancourt, Jaime Tapia, Alex Martínez, David	2015	Por medio del programa CORSIKA, se implementa una simulación de lluvias atmosféricas para Tomografía Muonica del Volcán Galeras de la ciudad de Pasto en una simulación EAS y MLD. (Dueñas et al., 2015)	Después de simular 200 lluvias, se determinó que el impacto mayor se generará en la atmosfera de la ciudad de Pasto, dependiendo del ángulo de incidencia presentando el máximo número de muones y carga energética de protones primarios. (Dueñas et al., 2015)
SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO	2015	Actualización más reciente del mapa de amenaza volcánica del Volcán Galeras. (SGC - Dirección de Geoamenazas, 2015)	Como resultado se obtiene una actualización de la zona y los posibles daños que se pueden presentar entre una erupción volcánica, de igual forma se crea un registro histórico que demuestra el estado del volcán y sus repercusiones dentro de un evento volcánico, a su vez la reclasificación de las áreas afectadas clasificadas en amenaza alta, media y baja. (SGC - Dirección de Geoamenazas, 2015)
Patiño, Carlos A. Córdoba, Gustavo Guerrero, Alejandra	2018	Determinar por medio de un modelo matemático la estimación de una amenaza volcánica del Volcán Galeras por una onda de choque. (Patiño et al., 2018)	Por medio de un modelado físico y matemático, los resultados que se encontraron fueron una redimensión de los datos otorgados por el Servicio Geológico Colombiano, donde se establece que la onda de presión generada en la ciudad de Pasto a 9km de tiene una explosión de 2MPa. (Patiño et al., 2018)

Teniendo en cuenta la anterior tabla y la recopilación de los datos es posible determinar que no existe un valor absoluto dentro de una inminente erupción volcánica, de igual forma estos

estudios determinan variaciones en los datos proporcionados por el Servicio Geológico Colombiano que presentó su actualización en el año 2015, dando cumplimiento a la Sentencia T-269 del 2015 de la Corte Constitucional, esto por lo cual genera para este proyecto la identificación del máximo nivel dentro de una amenaza volcánica para la zona de amenaza roja, ya que el flujo de lava del Volcán Galeras puede pasar el límite de la zonas aledañas al mencionado volcán. Por otro lado, existen diferentes simulaciones por medio de modelos en 3D y videos recreados con imágenes y sonidos donde se evidencia la posible amenaza volcánica del Volcán Galeras, esto solo para fines informativos y educativos, la recopilación de estos se presenta en la tabla 2:

Tabla 2. Recopilación de simulaciones de modelados 3D y animaciones del Volcán Galeras.

SIMULACIONES (MODELADOS 3D Y ANIMACIONES)			
AUTORES	AÑO PUBLICADO	TITULO DE LA PUBLICACION	OBJETIVO
Nossa, Andrés (GeoGeeks-Semillero Innovación Geográfica)	2015	Creando escenas 3D con ArcGIS Online (Amenaza por erupción del volcán Galeras) - YouTube.	Realizar un modelado en 3D del Volcán Galeras por medio de la herramienta ArcGIS Online con la finalidad de enseñar al público como crear escenas 3D con ArcGIS. (Nossa, A, 2015)
Mera, Alejandra	2020	Simulación de una Erupción del Volcán Galeras – Facebook.	Simulación en 3D por medio de un video e imágenes en movimiento con el fin de identificar la fuerza de la erupción volcánica del Volcán Galeras en la ciudad de Pasto. (Mera, A, 2020)

Esta tabla 2 indica, que si bien las investigaciones realizadas para establecer las amenazas volcánicas del Volcán Galeras son amplias y matemáticamente estables e incluso se pueden establecer los eventos que sucederán dentro de esta actividad, las simulaciones por medio de

modelados y planos en 3D son mínimas, por lo que es necesario realizar una aproximación de una simulación de la erupción del volcán por medio de un estudio de suelo, planos y mapas, a su vez es necesario identificar los diferentes programas que pueden llevar a una simulación realista por medio de un Sistema de Información Geográfica.

Para el estudio del proyecto acerca de las amenazas del Volcán Galeras se hace necesario realizar una investigación sobre el material cartográfico, identificando variables como las coordenadas del volcán, nivel de terreno, elevación, tipo de suelo y pendientes, proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano, la plataforma EARTHDATA (NASA) y un SIG de Google SAT_WM, desarrollado por una serie de capas y mapas. Esto para ser trabajado bajo programas o software como ArcGIS, ArcScene, Blender y Autodesk Maya, sin embargo en dado caso que se presente algún inconveniente en el renderizado de la simulación, es importante trabajar el resultado final cuadro a cuadro por una serie de fotogramas en programas como Adobe Premier Pro y Adobe After Effects.

5. METODOLOGIA

El presente proyecto tiene un enfoque metodológico mixto, puesto que se abordan características de la investigación cuantitativa y cualitativa, por lo que se describe e interpreta una realidad intersubjetiva, y simultáneamente es factible incorporar la lógica deductiva respecto a los datos y mediciones relacionadas con el objeto de estudio e investigación, en la figura 3 es posible identificar los datos para cada una, lo que posibilita analizar teóricamente el fenómeno volcánico, en aras de obtener información progresiva, generando resultados emergentes de índole reflexivo (Hernández et al., 2014), a través de un estudio de tipo descriptivo, que permite identificar los antecedentes, elementos, características, (Mendez, C., 2011), del Volcán Galeras y su contextualización real.

Teniendo en cuenta la metodología de investigación definida, se emplean técnicas de recolección de datos e información cuantitativa y cualitativa, como fuentes primarias de investigación, que posibilitan la estructuración de un esquema conceptual, que incorpora la exploración, descripción del mencionado fenómeno natural; así mismo, la revisión documental de artículos científicos, además de material sobre prevención y gestión del riesgo

en desastres. Adicionalmente, las unidades de análisis digitales como fuentes secundarias conducen a la revisión, verificación y confirmación eficaz y eficiente de información que se encuentra al alcance de la autora del presente proyecto.

Desde el mencionado enfoque, se empleó el servicio de búsqueda cartográfica de amenaza volcánica, específicamente del Volcán Galeras, este archivo contiene la información cartográfica de sombras, curvas de nivel, nodos, superficies de municipios, cuencas hidrográficas, divisiones por niveles de amenazas, siendo la roja alta y amarilla baja.

A su vez, las capas que se tomaron para la realización del primer estudio cartográfico fueron la de sombras y la de curvas de nivel; inicialmente por medio de las curvas de nivel, se creó el plano de elevación, en este mapa se pueden observar los diferentes niveles de elevación a través de la activación de colores, siendo blanco el pico más alto de elevación, lo que equivale a un máximo de 4.200 m.

Con el modelo de curvas de nivel, cuencas hidrográficas y nodos es factible crear un mapa digital del terreno mediante formato Raster, este formato se hace en una modelación de una red de triángulos irregulares (TIN), que se proyectará en ArcGIS Scene.

En EARTHDATA (NASA), se descargó el plano más cercano del Volcán Galeras y los municipios aledaños, en un DEM, del cual se halló las pendientes, y la reclasificación de pendientes, el mapa de orientación, mapa de curvatura y el mapa de curvas de nivel, esto para crear el modelo de elevación y posteriormente el DTM.

Y, para el modelo tridimensional en la simulación se obtuvo la modelación de un SIG de Google SAT_WM (-8613907,137404), con una elevación de 2.400 y posteriormente 1.200 en Blender, que incluye la modelación del volcán y de los municipios aledaños.

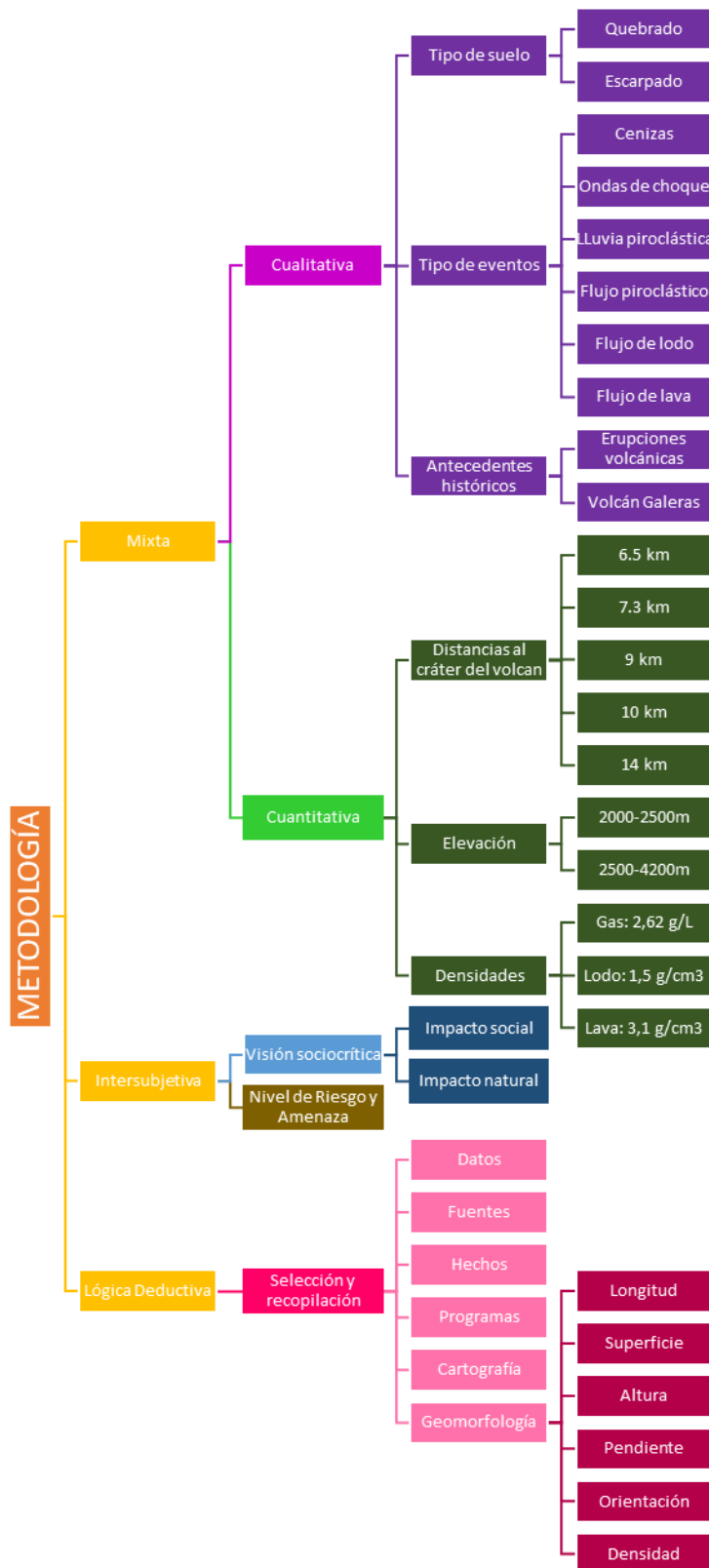


Figura 3. Metodología y datos. (Elaboración propia)

6. RESULTADOS

6.1 MODELO CARTOGRÁFICO

6.1.1 Cartografía tomada y adaptada del Servicio Geológico Colombiano sobre amenaza del Volcán Galeras (proyección)

Desde la cartografía tomada del Servicio Geológico Colombiano fue posible observar las diferentes capas ya identificadas por medio de archivos de uso libre para estudios e investigaciones, cada capa tiene características diferentes, sin embargo aunque cada capa está comprendida para un estudio especializado, se necesita de un cierto orden para realizar una proyección en 3D. La primera capa necesaria para la primera proyección en 3D es la capa de sombras, esta capa es dada por el Servicio Geológico Colombiano dentro de la cartografía de mapas de amenazas volcánicas al igual que la capa de curvas de nivel, en la figura 3 se puede observar la capa de sombras, la cual permite identificar el nivel del lugar, por medio de un relieve, donde se evidencian las zonas bajas y las zonas altas en escalas de grises, a su vez, la capa de curvas de nivel la cual es una de las capas más importantes, porque por medio de ella se puede establecer el nivel del terreno, esta capa empieza el estudio del modelado en alzado, tiene con ella las cuencas hidrográficas y nodos que permiten ver los contornos, polilíneas en las que cada una de ellas muestra una altura constante sobre el nivel del mar y las sombras por un modelo TIN.

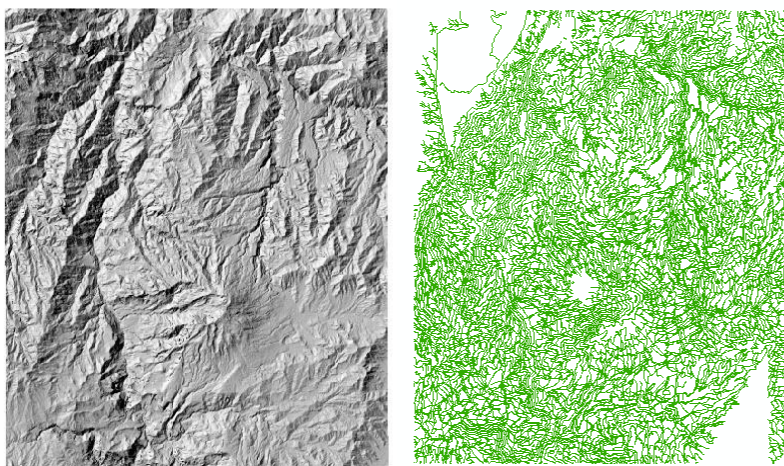


Figura 4. Capa de Sombras y Capa de Curvas de Nivel. (Mapas de Amenazas Volcánicas , 2020)

Los siguientes pasos como se evidencia en la figura 4, al identificar las dos capas anteriores es determinar por medio de un TIN en 2D con la unión de puntos generando una capa de elevación, esta capa permite identificar el tipo de suelo en diferentes niveles, para tener claro cada nivel se necesita de una triangulación de caras del terreno para finalmente llegar la última capa, esta capa permite evidenciar los puntos altos del terreno en el cual se encuentra como pico más alto el Volcán Galeras en color rojo, esta capa permite realizar el modelo en 3D con elevaciones del terreno más aproximadas, los datos de elevación del terreno se encuentran compilados en el mapa presentado en la figura 32.

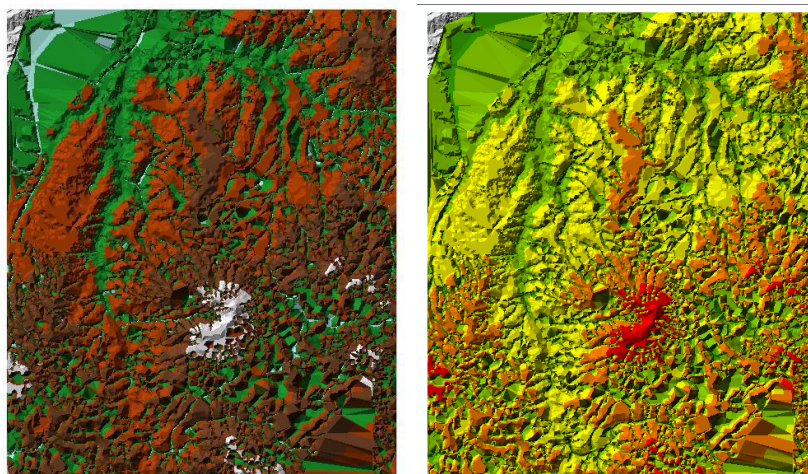


Figura 5. Capa de Elevación y Capa de Puntos Altos. (Elaboración propia)

Para finalmente llegar a una última capa, esta capa es la que se presenta en alzado y se hace necesario crear una capa de líneas suaves como se evidencia en la figura 5, puesto que estas líneas permiten generar un terreno sin algún tipo de porosidad, sin embargo con las líneas sin suavizar se puede realizar un modelo en 3D pero con bordes más marcados como se evidencia en la figura 6 y modelo en 3D en líneas suaves en la figura 7, no obstante este modelo tiene un nivel de detalle menor y es posible que se pierdan datos importantes en el renderizado del modelo de elevación digital del terreno.

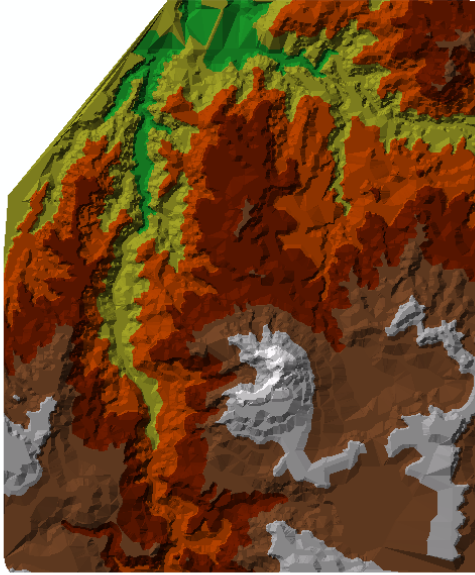


Figura 6. Capa de líneas Suaves. (Elaboración propia)

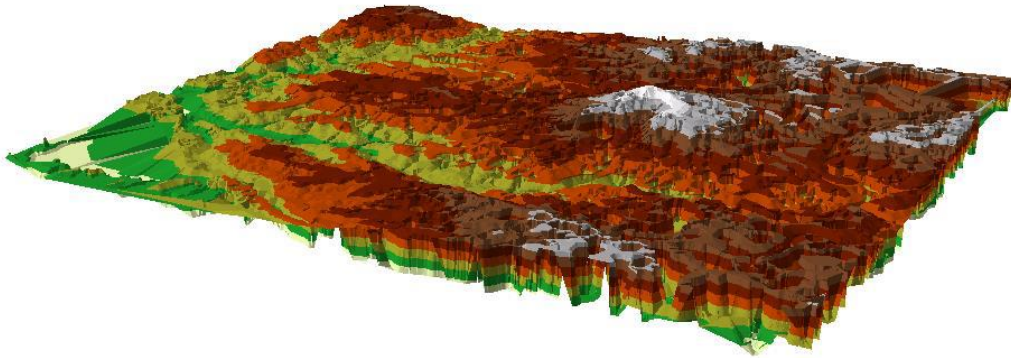


Figura 7. Capa en 3D. (Elaboración propia)

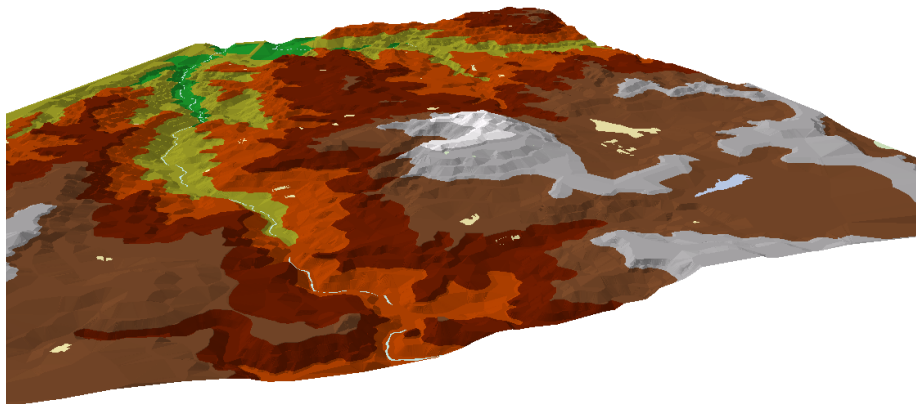


Figura 8. Capa en Soft Lines. (Elaboración propia)

Al concluir el modelo en 3D se puede observar que no tiene todos los datos y capas necesarias para realizar una simulación completa del volcán, además que hace falta en el modelo más a detalle, por lo que se hace necesario realizar otro estudio cartográfico desde otras coordenadas.

6.1.2 Cartografía Volcán Galeras de EARTHDATA (NASA) ASF Data Search Vertex, Referencia ALPSRP071490010

Para el segundo estudio cartográfico se hizo necesario tomar la zona más cercana del Volcán Galeras además de verificar que el mapa elegido no tendría nubes ya que el mapa debe ser un DEM, este mapa es un modelo digital de elevación y para hallar este tipo de cartografía se debe ingresar a la plataforma de NASA de EARTHDATA e identificar la zona requerida en este caso la Zona en Nariño - Colombia del Volcán Galeras contaba con más de 97 opciones de mapas como se puede observar en la figura 8, de estas opciones se elige la mejor, además de necesaria para trabajar y llegar a un modelo en tercera dimensión.

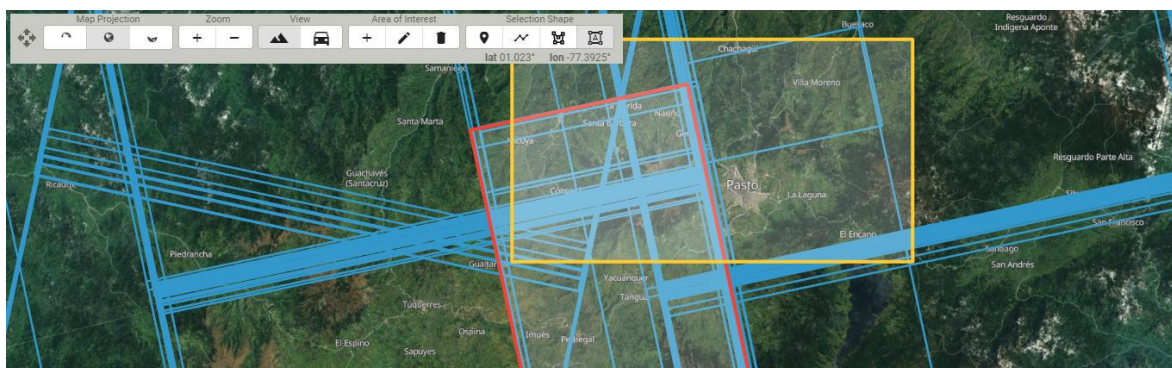


Figura 9. Plataforma EARTHDATA (NASA) Área Volcán Galeras – Nariño, Colombia.

Al descargar la cartografía deseada se obtiene el mapa DEM el cual se había mencionado anteriormente, para este proyecto se obtuvo el mapa DEM que se presenta en la figura 9, de esta capa por medio del programa ArcGIS es posible determinar la capa de pendientes la cual se obtiene de la inclinación del desnivel del suelo desde el cambio máximo de la elevación sobre la distancia del terreno.

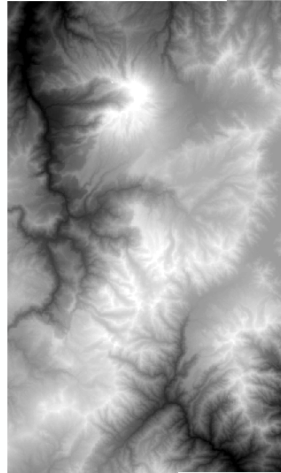


Figura 10. Capa Mapa DEM. EARTHDATA (NASA) Área Volcán Galeras – Nariño, Colombia.

La capa de pendientes permite generar un mapa del modelo digital derivado del terreno, para llegar a la exactitud del modelo, se requiere realizar una reclasificación de pendientes como se observa en la figura 10, esta reclasificación permite establecer con precisión la inclinación del terreno en los diferentes puntos, de tal modo que en la distancia de la horizontal permite crear en porcentaje la elevación del terreno.

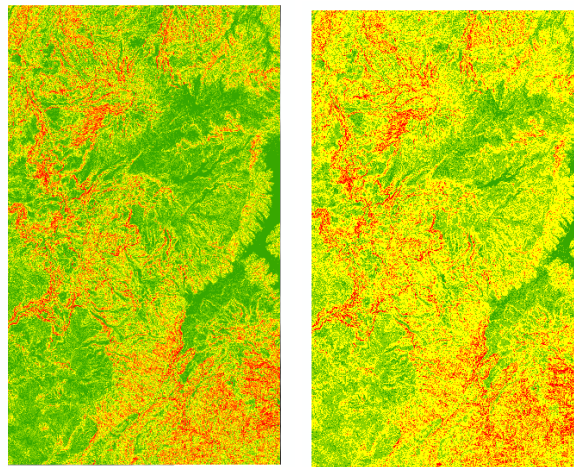


Figura 11. Capa de Pendientes y Capa de Reclasificación de Pendientes. (Elaboración propia)

De la capa anterior por medio del software trabajado ArcGIS es posible determinar la capa de orientación del terreno en la cartografía, para esta capa se realizó un Raster de la dirección de los polígonos, determinando por una variedad de colores la trayectoria donde se encuentran las pendientes de acuerdo con su máximo valor, como se observa en la figura 11.

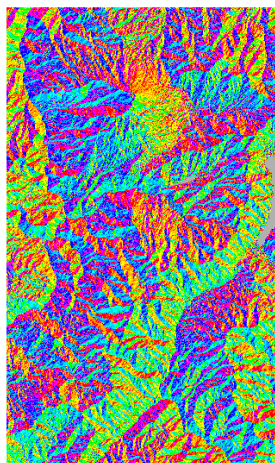


Figura 12. Capa de Orientación. (Elaboración propia)

Por medio de las capas antes halladas es posible empezar a crear las capas que van a permitir el alzado del terreno para esto se obtiene la capa o mapa de curvatura que permite evidenciar la tasa de cambio de la pendiente relacionada a las pendientes de los puntos cercanos en cada nivel del terreno y la capa de sombras en escala de grises para obtener el relieve de la zona como se muestra en la figura 13, la cual permite obtener un mapa del relieve con una iluminación de la superficie, que simulará la altura y el ángulo de inclinación del sol, de esta forma es posible ver las sombras en el terreno para un modelo digital de elevación y establecer su punto más alto de luminosidad.

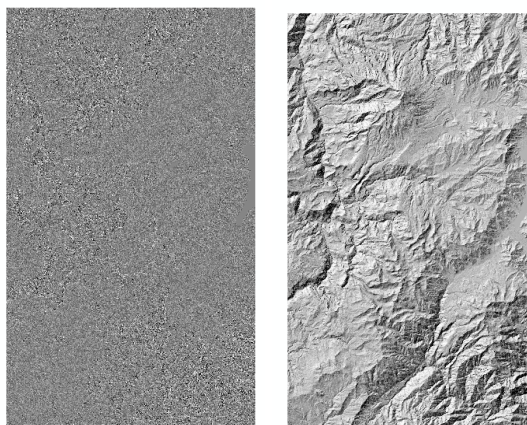


Figura 13. Capa de Curvatura y Capa de Sombras. (Elaboración propia)

La siguiente capa es la capa más importante para el modelado en tercera dimensión ya que la capa de curvas de nivel permiten por medio de un proceso en formato Raster que presenta

una Quadrees con datos en formas de matrices con una estructura jerárquica, el nivel de detalle dependerá solo de los metros a los que se desee dibujar esas curvas, por lo tanto a menor distancia por metros mayor será el nivel de detalle, por el contrario a mayor distancia menor detalle, esto también repercute en la RAM ya que el renderizado para cada uno necesita más RAM para trabajar, por lo que si se trabaja con un alto nivel de detalle el proceso de renderizado es tardío, el primer nivel de detalle alcanzado para este proyecto fue de 5 metros cada curva, como se evidencia en la figura 13, la cual evidencia el mapa en una escala de 1:20.000 y en escala de 1:500.000, sin embargo como se mencionó anteriormente, por razones prácticas y RAM, fue necesario reducir el valor de la distancia entre curvas a 50 metros como se observa en la figura 14.

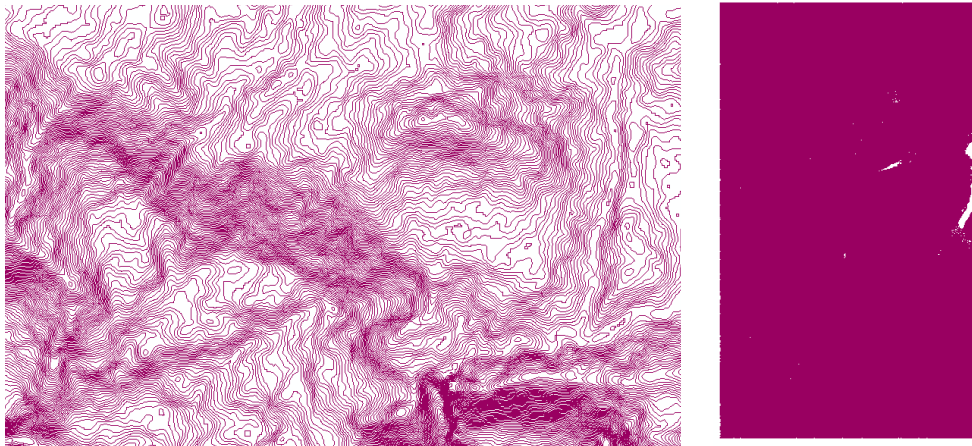


Figura 14. Capa de Curvas de nivel a 5m en Escala 1:20.000 y en Escala 1:500.000. (Elaboración propia)

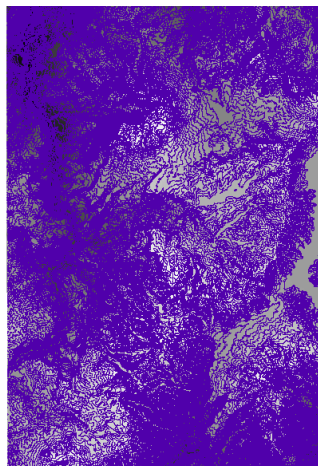


Figura 15. Capa de Curvas de Nivel a 50m. (Elaboración propia)

Aunque al cambiar el valor de distancia por curva reduce el nivel de detalle, para razones prácticas del proyecto funciona bien, sin embargo esto permite determinar que quizás este no sea el camino adecuado para realizar la simulación con el software que se venía trabajando y cartografía seleccionada, pero es necesario seguir para llegar al modelo 3D final y poder dar una última opinión acerca del modelo en la simulación de la amenaza volcánica, para esto se halla la capa de elevación como se puede observar en la figura 15, logrando ver los puntos más altos en color blanco y el relieve en colores RGB, los datos de elevación del terreno no difieren de los hallados en la cartografía anterior.

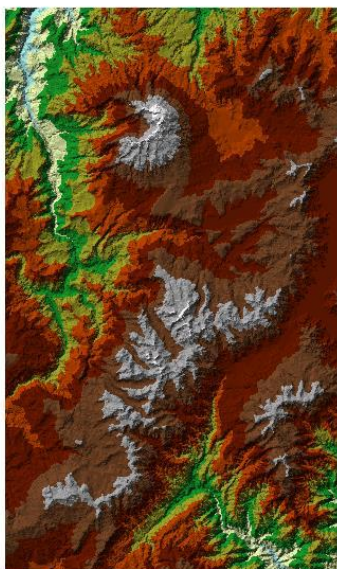


Figura 16. Capa de Elevación. (Elaboración propia)

En esta capa al igual que en la cartografía anterior es posible por medio de programa ArcScene llevar las capas de curvas de nivel y de elevaciones para crear el modelo en 3D en soft lines como se evidencia en la figura 16, aunque el nivel de detalle permite observar los diferentes niveles, puntos altos y bajos del terreno, definitivamente no es el modelo con el que se pueda trabajar en una simulación con detalles más realistas, pero es un modelo DTM que se puede tener en cuenta para la simulación final.

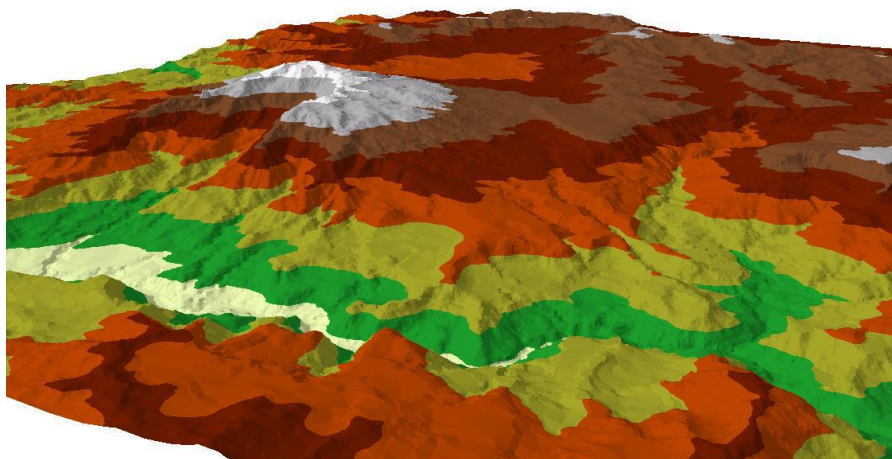


Figura 17. Mapa en 3D. (Elaboración propia)

6.1.3 Cartografía Volcán Galeras de SIG de Google SAT_WM (-8613907,137404)

Teniendo en cuenta los anteriores datos y las cartografías trabajadas, se hace necesario buscar otro tipo de soluciones para realizar el modelado 3D y su respectiva simulación por medio de los diferentes eventos que se presentan en una erupción volcánica, para esto se realiza el proceso de obtención de cartografía por medio del programa Blender el cual permite conseguir un mapa del terreno a trabajar en su herramienta SIG de Google SAT_WM en las coordenadas -8613907,137404 que se puede observar en la figura 17, donde se encuentra el Volcán Galeras y sus municipios aledaños, necesarios para la simulación de afectación del terreno, población y estructura.

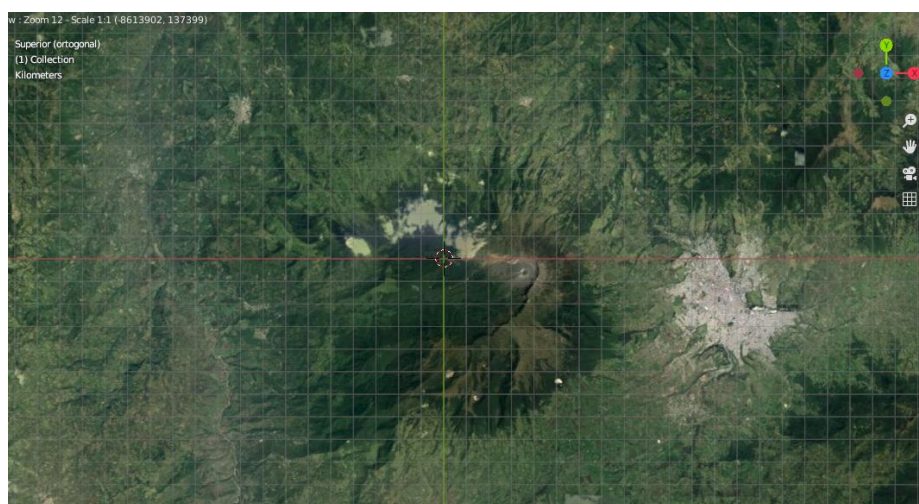


Figura 18. Cartografía Volcán Galeras de SIG de Google SAT_WM

De esta cartografía se realiza una elevación del terreno, la elevación del terreno para un renderizado máximo con una elevación de 2.400 y posteriormente 1.200 por razones prácticas de RAM y renderizado como se puede observar el cambio del terreno a un alzado en la figura 18, el eje Z que hace las veces del eje X en representaciones 2D, en la figura 19 se observa el eje Y donde se evidencia las elevaciones y sus niveles, y por último, la figura 20 que permite evidenciar el plano desde el eje X, el cual determina el valor de un modelado 3D.

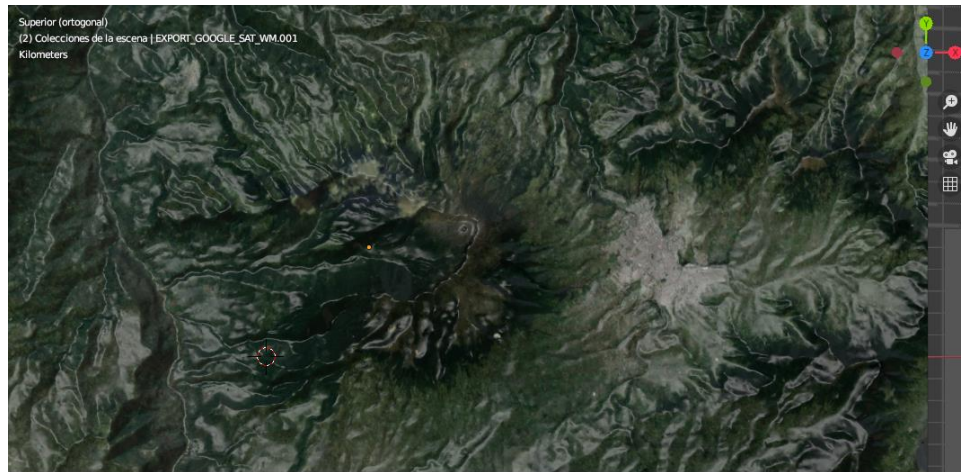


Figura 19. Vista eje Z - Elevado. (Elaboración propia)

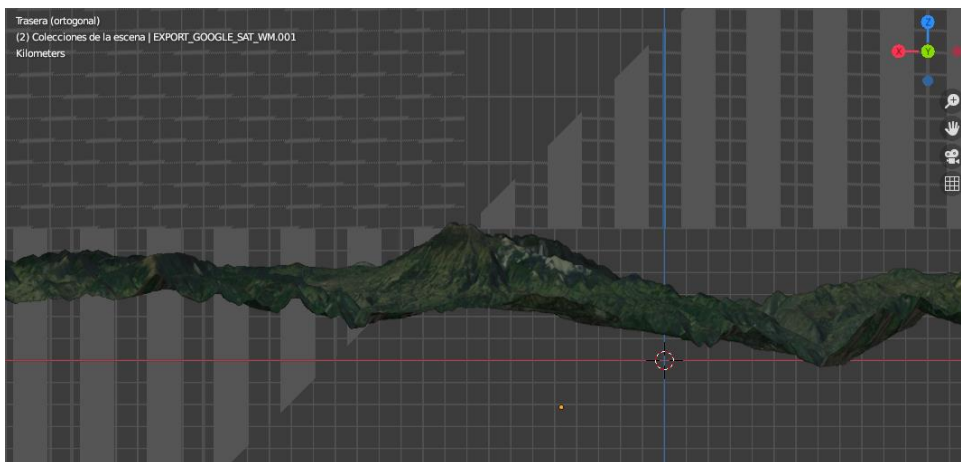


Figura 20. Vista eje Y - Elevado. (Elaboración propia)

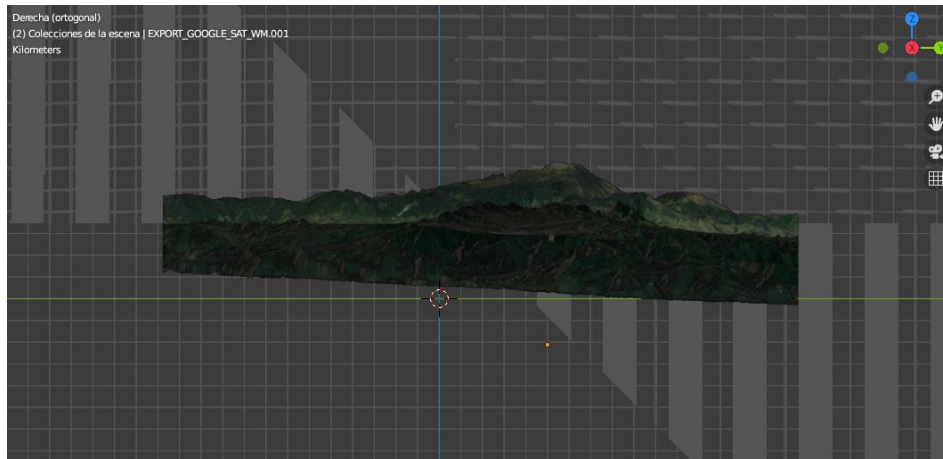


Figura 21. Vista eje X - Elevado. (Elaboración propia)

Los niveles de detalle garantizan un excelente modelado en 3D, se pueden verificar al cambiar la vista a una perspectiva de elevación diferente, es importante resaltar que cada nivel se debe revisar minuciosamente, para establecer si es posible ver el área y terreno de los municipios aledaños, al igual que las ciudades en las cuales se puede generar alguna afectación durante la erupción volcánica del Volcán Galeras, como se observa en la figura 21.

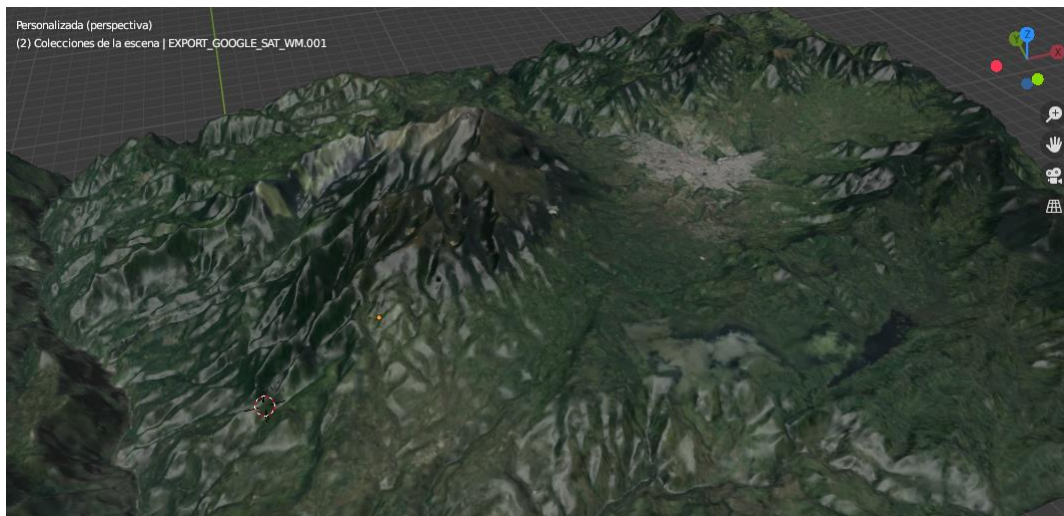


Figura 22. Vista Perspectiva - Elevado. (Elaboración propia)

Teniendo todas las capas, modelados 3D, 2D, elevaciones por niveles y recopilación de la información del volcán, entonces es posible realizar una simulación más realista sobre la

amenaza volcánica del Volcán Galeras, además de realizar pruebas y resaltar cada evento producido ante una erupción volcánica.

7. PLANIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

7.1 PRUEBAS

Pruebas de modelados, texturas, animaciones y tiempos en Autodesk Maya.

Las primeras pruebas elaboradas para generar la simulación, consisten en realizar un modelado 3D desde cero y una animación de 24 frames por segundo en el programa Autodesk Maya, donde se evidencia un modelado por cubos, renderizado de texturas rocosas y sólidas, iluminación natural para generar sombras fuertes y una luz puntual en el centro del cráter del volcán, además de una combinación de fluidos dinámicos en caída libre con diferentes densidades y tamaños como se evidencia en la figura 22.



Figura 23. Vista volcán erupción – Prueba simulación. (Elaboración propia)

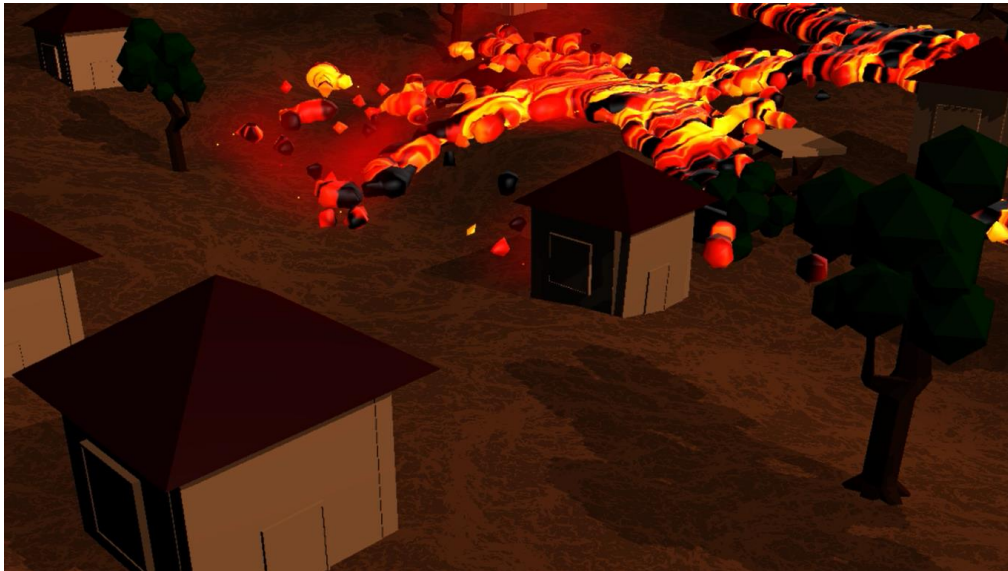


Figura 24. Vista pueblo erupción – Prueba simulación. (Elaboración propia)

Es importante resaltar que para realizar esta prueba y animación que fue inspirada en el videojuego Minecraft para una modelación de bordes fuertes y renderizado quemado, se determinó el impacto que tendría el flujo de lava y la destrucción que se presentaría frente a una erupción volcánica en lugares como Genoy y La Florida, estas pruebas se observan en la figura 23. De esta forma es posible dar paso a la animación y simulación en Blender.

7.2 PLANOS

Plano en alzado con la ubicación de los municipios y ciudades cercanas

Dentro de la cartografía y modelados realizados en 3D, se hace necesario elaborar una proyección de los municipios aledaños y una proyección de elevación de los mismos, por lo que se realizan solo tomas aéreas por medio del SIG de Blender de cada municipio y ciudad, los cuales serían objeto de estudio por estar a pocos kilómetros del Volcán Galeras, los municipios y ciudades son: San Juan de Pasto, Genoy, Nariño, La Florida y Sandoná cada una se identifica en el modelado con diferentes colores para ser diferenciados en la simulación como se observa en la figura 24 y figura 25 desde diferentes ángulos, ejes y perspectivas.

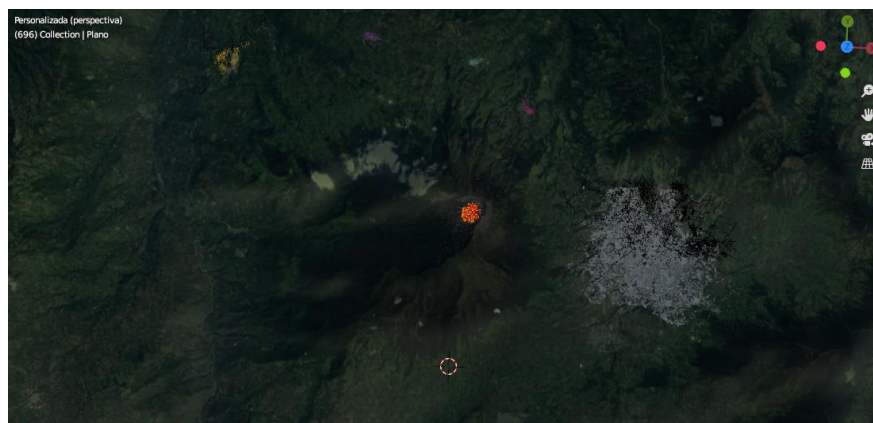


Figura 25. Vista municipios y ciudades – Eje Z. (Elaboración propia)



Figura 26. Vista municipios y ciudades – Perspectiva. (Elaboración propia)

7.3 RESULTADOS PARA CADA EVENTO

Activación de cenizas

Teniendo en cuenta las pruebas en Autodesk Maya y los modelados en 3D en Blender, se realiza una simulación de cada evento, por lo que en la figura 26 se observa la activación de cenizas del Volcán Galeras, siendo el primer evento aunque no menos peligroso, este evento alcanza rangos más altos que lo proyectado en el modelo por la fuerza del viento, teniendo en cuenta que las partículas pueden llegar a otros departamentos cercanos e incluso a Ecuador (Páez, 2020).



Figura 27. Cenizas - Simulación activación del Volcán Galeras. (Elaboración propia)

Lluvia de piroclastos

El segundo evento presentado por el Volcán Galeras y simulado es el que se evidencia en la figura 27, una lluvia de piroclásticos la cual como se mencionaba anteriormente se produce con altos niveles de cenizas y rocas incandescentes de diferentes tamaños que pueden alcanzar más de 14 kilómetros de distancia desde el cráter del volcán, esto teniendo en cuenta los datos que presenta el Servicio Geológico Colombiano.

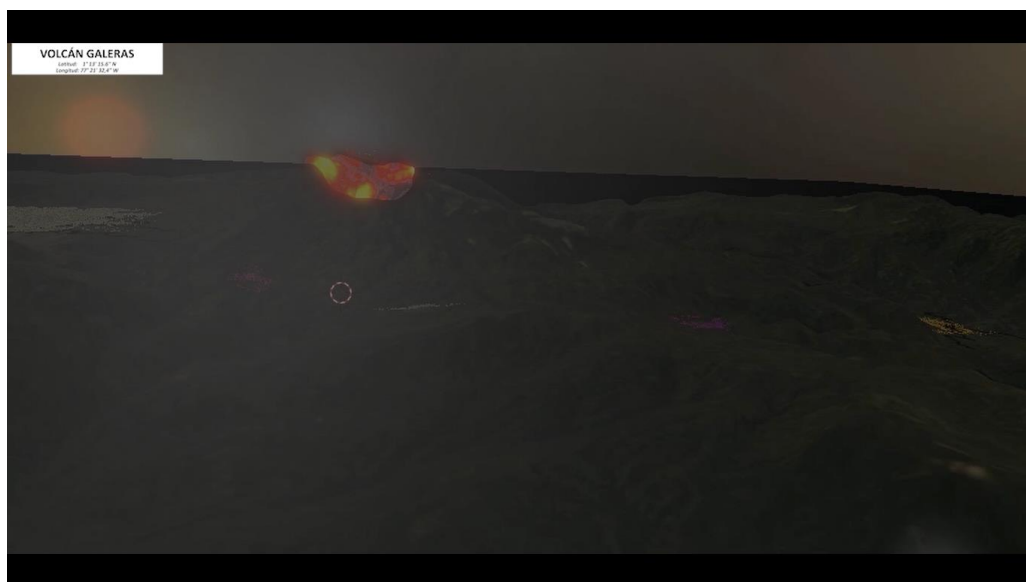


Figura 28. Lluvia de piroclastos - Simulación activación del Volcán Galeras. (Elaboración propia)

Flujo de piroclastos y Flujo de lodo

El siguiente evento del volcán es el flujo de piroclastos y el flujo de lodo, generalmente estos 2 siempre se evidencian en una erupción volcánica al mismo tiempo, ya que la gravedad en daños es igual de peligrosa, este evento se observa en la figura 28, donde si bien, se presentan una serie de datos estudiados con proyección a futuro, es muy difícil determinar la distancia que puede alcanzar un volcán que jamás ha erupcionado en su totalidad, por este motivo la simulación presentada llegará a los municipios como Genoy, La Florida, parte de la Zona rural de San Juan de Pasto, Nariño y Sandoná, uno de los municipios con gran afectación en este evento también es Santa Bárbara, simulando una distancia máxima de 10 kilómetros y teniendo en cuenta que las pendientes del terreno pueden generar una fluidez más activa de este evento o por el contrario detenerse en ciertos puntos del relieve.



Figura 29. Flujo de piroclasto y Flujo de lodo - Simulación activación del Volcán Galeras. (Elaboración propia)

Flujo de lava

Este evento es generado por un flujo con gran densidad pero que alcanza una destrucción total de lo que se lleve a su paso, es importante tener en cuenta que este flujo puede ser menor o mayor según las proyecciones e investigaciones que se han realizado, sin embargo llevando una simulación a un nivel máximo de destrucción alcanzando más de 8 km desde el cráter del volcán, incluso llevándolo a niveles similares al del flujo de lodo, puede alcanzar una

destrucción total de 10 km de radio. También en este evento se tiene en cuenta cuanto podría llegar a tardar en caer todo el flujo, presentando incendios forestales o quedándose en puntos de menor elevación y pendientes según las características del terreno. En la figura 29 es posible observar este evento al iniciar desde la ciudad de San Juan de Pasto, posteriormente en la figura 30 se puede ver el evento en su nivel máximo desde la zona norte del volcán en perspectiva, en la figura 31 se observa desde eje Z el alcance del flujo de lava en una posible erupción volcánica del Volcán Galeras.



Figura 30. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Vista ciudad de Pasto. (Elaboración propia)

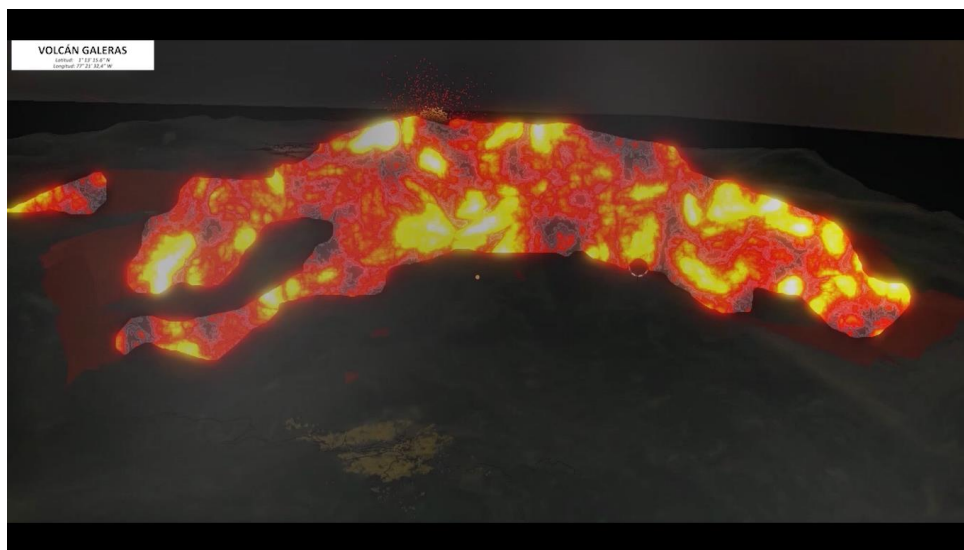


Figura 31. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Vista norte del Volcán. (Elaboración propia)

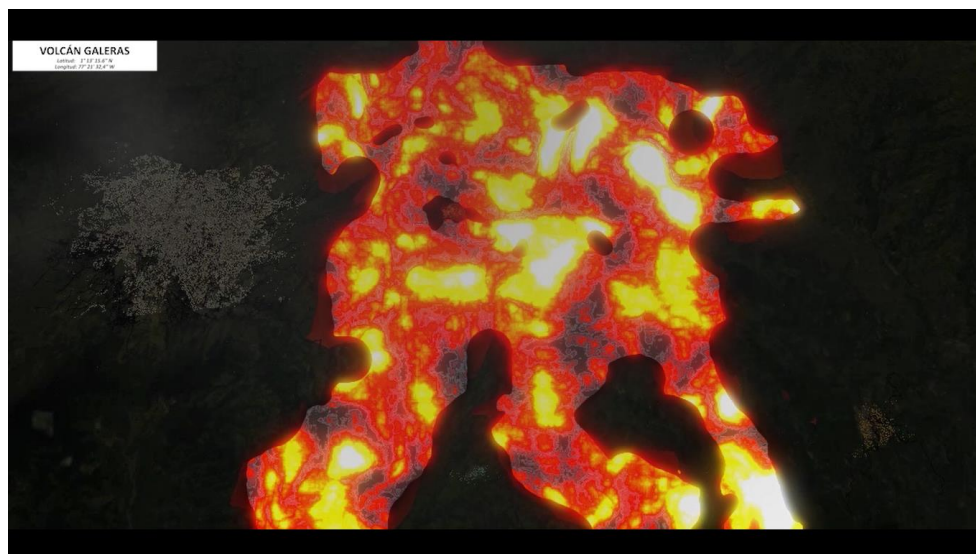


Figura 32. Flujo de lava - Simulación activación del Volcán Galeras – Eje Z. (Elaboración propia)

De lo anterior se puede evidenciar en la figura 31 que se presenta una afectación total del Santuario de Flora y Fauna Galeras que está ubicado alrededor del Volcán Galeras, además de la pérdida de vidas humanas en los municipios más afectados, como lo son: Genoy, La Florida, Santa Bárbara por posible flujo de lava, flujo de lodo y flujo piroclástico en un radio aproximado de 9 km. A su vez San Juan de Pasto presenta una grave afectación de infraestructura que no cuenta con una adecuada estructura sismo resistente, se considera que cerca del 15% de la población se puede ver afectada por daños estructurales, teniendo en cuenta que al presentarse la activación del volcán empezará una onda de choque que alcanzará el rango máximo de la zona que es de 4.5 a 5 grados en la escala de Richter y 6 en la escala de Mercalli (Páez, 2020), teniendo en cuenta el rango máximo en eventos de sismicidad histórica a 20 kilómetros de profundidad con epicentro en el Volcán Galeras de acuerdo a información del Servicio Geológico Colombiano.

7.4 MAPA

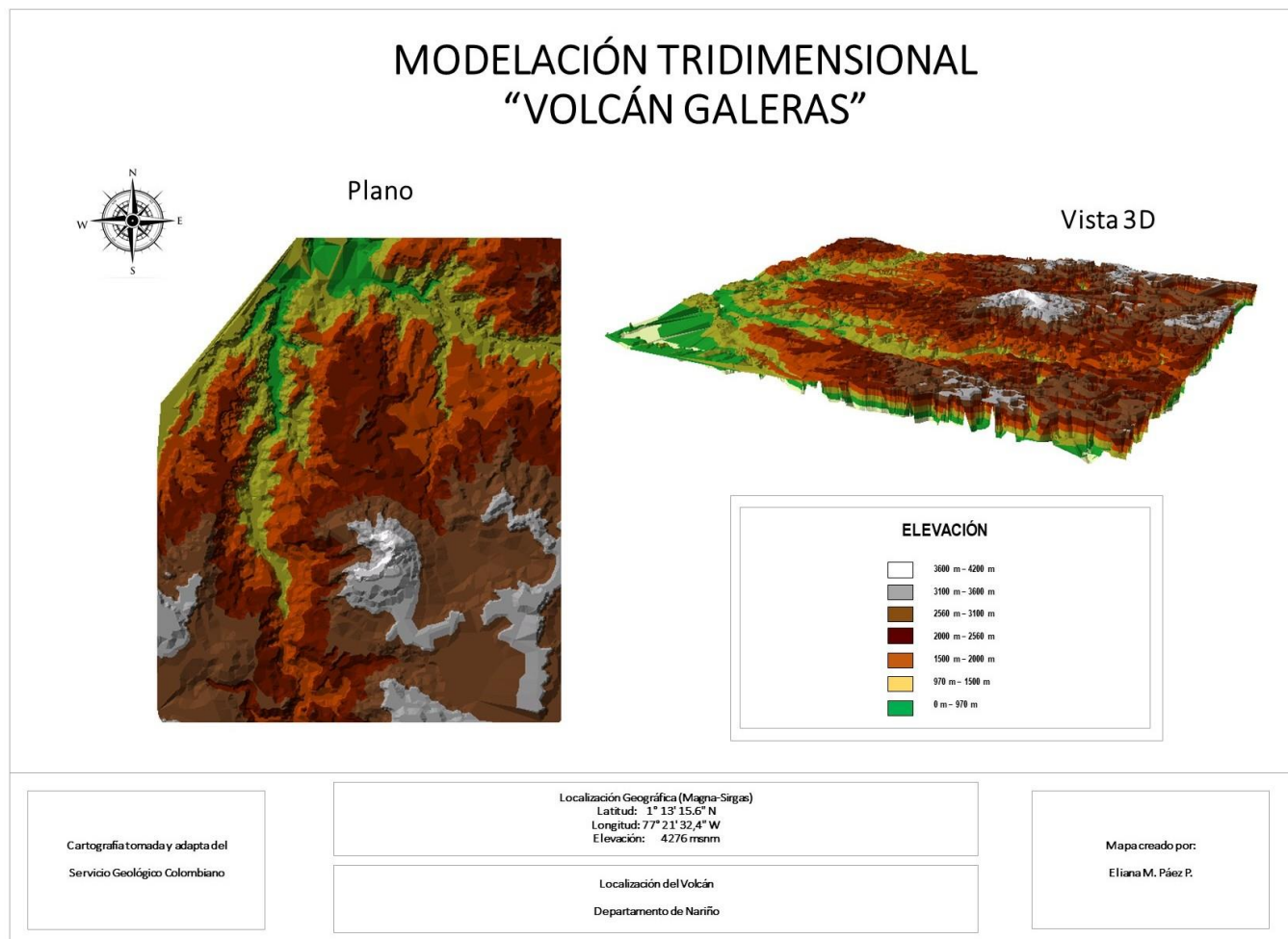


Figura 33. Mapa Modelación Tridimensional “Volcán Galeras” – Elevación. (Elaboración propia)

MODELACIÓN TRIDIMENSIONAL “VOLCÁN GALERAS”

Vista 3D



Cenizas



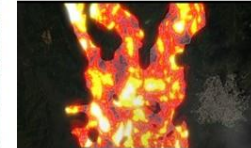
Lluvia de piroclásticos



Flujo piroclástico y Flujo de lodo



Flujo de lava



Municipios / Ciudades

- San Juan de Pasto
- Genoy
- Nariño
- La Florida
- Sandoná

Cartografía tomada y adapta del
GOOGLESAT_WM

Localización Geográfica
(-8613907,137404)

Localización del Volcán
Departamento de Nariño

Mapa creado por:
Eliana M. Pérez P.

Figura 34. Mapa Modelación Tridimensional “Volcán Galerás” – Amenaza Volcánica, Municipios y Eventos. (Elaboración propia)

8. ANALISIS DE RESULTADOS

La determinación de los antecedentes y las características inherentes al Volcán Galeras, dada la importancia de sus eventos, posibilitó la generación de una proyección digital lo más cercana a la realidad, en aras de producir sensibilización respecto a las afectaciones potenciales en el terreno, la vegetación, y por ende en el Santuario de Flora y Fauna Galeras, cuya protección es necesaria ya que es una zona ecoturística, que cuenta con fauna silvestre como zorros, conejos, venados, armadillos, puerco espines, entre otras especies, de igual forma se encuentran más de 135 variedades de aves, entre ellas diferentes tipos de colibrís, teniendo en cuenta que este santuario está ubicado en un páramo su vegetación es igualmente variada, dentro de las cuales se encuentran más de 622 especies como lo son los frailejones, puya clava-herculis, asteraceae ericaceae, entre otras, (Villalobos, E, 2019). Esta sería la mayor afectación a nivel ecológico ante una amenaza volcánica, además fuentes fluviales que se encuentra en este santuario y pasan por diferentes municipios que podrían ser las causas de los más grandes daños y avalanchas, por los flujos piroclásticos y flujos de lodo.

Las afectaciones que se presentan en la simulación teniendo en cuenta el mapa de la última actualización del Servicio Geológico Colombiano y de los 5 municipios trabajados en este proyecto tienen los siguientes números de habitantes y distancias al cráter del volcán objeto de estudio:

- San Juan de Pasto: 440.000 habitantes a 9 km del Volcán Galeras.
- Genoy: 4.000 habitantes a 6,5 km del Volcán Galeras.
- Nariño: 4.900 habitantes a 7,3 km del Volcán Galeras.
- La Florida: 9.600 habitantes a 10 km del Volcán Galeras.
- Sandoná: 25.700 habitantes a 14 km del Volcán Galeras.

Por lo que en la modelación, animación y simulación del Volcán Galeras, genera una anticipación y proyección mediante una modelación, animación y simulación en 3D, que optimiza las posibilidades de reducción de la afectación a la población en riesgo, debido a que se estudian y analizan las variables relacionadas con la distancia que lograría alcanzar la erupción en los diferentes eventos, como se mencionaba dentro de los resultados, el terreno

cuenta con una serie de elevaciones que se recopilaron en un mapa final presentado en la figura 32 y que determina que ciertos lugares como los cercanos a la capital del departamento de Nariño, San Juan de Pasto presentan una elevación mayor y permite la desviación de los flujos hacia municipios como Genoy, La Florida y Santa Barbara, por otro lado municipios como Nariño y Sandoná presenta una elevación de terreno y una afectación menor frente a un flujo de lava, como se puede observar en la recopilación de la información en la figura 33.

Lo anterior, es complementado por las consecuencias ambientales digitalizadas que conllevan los eventos que se presentarían frente a una fuerte erupción del volcán, en pro de suscitar la prevención y la mitigación de la vulnerabilidad estructural de las edificaciones ubicadas en las zonas aledañas, ya que no solo los eventos simulados son los que marcarían esta gran amenaza volcánica sino también la destrucción por fuertes sismos, en este caso el sismo de mayor rango presentado dentro del historial sísmico tiene una magnitud de 5 grados en la escala de Richter y una afectación estructural de 6 en la escala de Mercalli, con epicentro en el Volcán Galeras, esto permite evidenciar la destrucción en la zona rural de lugares como Pasto que pertenece al 15% de la población de la capital según datos del censo para el año 2019 (Páez, 2020), Sandoná y Nariño entre otros municipios y la destrucción total de Genoy, La Florida y Santa Barbara, esta última no está dentro del modelado 3D y simulación pero por geografía al realizar la simulación de los diferentes eventos se determina que si pasaría por este municipio el evento de flujo de lava y se destruiría completamente. Para la atenuación de las pérdidas de vidas humanas, se han implementado diferentes acciones preventivas como alarmas (Rychtarcikova P, s.f.) y simulacros controlados que permiten la toma de consciencia sobre los riesgos de los habitantes que se encuentran en cercanías de este volcán.

El proyecto se consolidó en un trabajo multimedial del Volcán Galeras, ante posibles eventos que pueden suceder en la erupción del volcán, y la amenaza del mismo, para lo cual se ubicaron tres cámaras en el modelo, una cámara en donde se encuentra la población de riesgo más cercana, la segunda cámara está cerca al cráter del volcán y la tercera cámara arriba del volcán, también se realizó un mapa en alzado para determinar las afectaciones en el terreno, vegetación, estructura y población, además de la distancia que lograría alcanzar la erupción

en los diferentes eventos. De igual forma fue posible realizar por medio de dinámicas la simulación de las cenizas y lluvia piroclástica, la edición de este proyecto por problemas de renderización de RAM no pudo ser lograda en Blender, por lo que fue necesario cambiar los datos de elevación del terreno e iniciar los efectos de lava por medio de fotogramas obteniendo 160 por segundo para reducirlo en 25 por segundo en Adobe After Effects y comprimirlo en Adobe Premier pro.

De este último archivo, se logró obtener la simulación 3D final con efectos de fuego, quema, humo y cenizas, el flujo de lodo y flujo piroclástico se realizó desde el proceso de modelado demarcado por una zona delimitada entre la zona roja de 9.000 hectáreas aproximadamente y la zona naranja de 29.000 hectáreas aproximadamente como máximo en concordancia con la información del Servicio Geológico Colombiano (Mesías, O, 2010). Teniendo en cuenta lo enunciado en varias ocasiones en el presente documento no es posible determinar la extensión del flujo exacto dependiendo del evento, puesto que las proyecciones cambian según los cálculos que se realicen, además el Volcán Galeras nunca ha erupcionado en su totalidad.

CONCLUSIONES

Por medio de la plataforma web EARTHDATA (NASA) y un archivo de Sistemas de Información Geográfica de Google SAT_WM en Blender, se genera una proyección de capas y mapas elaborados a través de ArcGIS y una elevación 3D de un DTM en ArcScene, alzado en Blender, lo que permite generar un renderizado de la simulación en la que es posible materializar los eventos que se presentan ante una amenaza volcánica en el Volcán Galeras y su entorno inmediato, lo cual configura una herramienta no solo de naturaleza académica, sino con fines prácticos e informativos para la gestión y prevención de una eventual amenaza volcánica.

Al considerar que el Volcán Galeras no ha presentado una máxima erupción en por lo menos 4.500 años aproximadamente, reviste complejidad establecer con exactitud la magnitud de sus probables eventos, no obstante se han efectuado múltiples estudios respecto a cálculos aproximados referentes a la cantidad de flujo de lava y flujo piroclástico que podría emerger en una eventual actividad volcánica, por lo que la proyección a través de una simulación en 3D lo más cercana a la realidad, facilita dimensionar las potenciales afectaciones en el terreno así como en la vegetación, e incluso los daños estructurales que repercutirían significativamente en la población.

La investigación sobre el material cartográfico conlleva a la identificación de variables y capas como curvas de nivel, sombreados, pendientes, orientación, nivel de terreno, elevación de 0 a 4200 msnm y tipo de suelo, lo que posibilita dilucidar que este fenómeno natural configura una amenaza con alto nivel de peligrosidad en los municipios de Genoy, La Florida, Santa Bárbara, hacia al norte geográfico, producidos por flujos de lava, flujo de lodo y flujo piroclástico.

El valor agregado que tiene este proyecto consiste en consolidar una visión dinámica y moderna en diferentes softwares de los eventos producidos por una fuerte erupción volcánica, lo cual requiere de pruebas de modelación y animación en 3D permitiendo crear por medio de sólidos y renderizados quemados inspirados en el videojuego Minecraft, además de agregarle dinámicas a las partículas para generar el flujo de lava, humo, lluvia piroclástica y

cenizas, ubicando 3 cámaras desde diferentes perspectivas, lo cual trasciende a lo recopilado mediante simulaciones y estudios anteriores sobre el mencionado fenómeno natural.

Finalmente, las pérdidas de información en las capas de elevación y curvas de nivel, además del trabajo dependiendo de la RAM generan que los datos no logren crear el modelo en 3D con un alto nivel de detalle, lo que constituye una oportunidad de mejora continua en posteriores estudios y proyectos afines con el presente, teniendo en cuenta que se requiere un modelo más realista para este tipo de simulación, sin embargo todo modelo DTM resulta relevante para la realización de la animación del volcán y sus eventos por esta razón se deben hallar todos los datos y capas necesarias para realizar una simulación completa del volcán, con el propósito de propender por la sensibilización y difusión de información aproximada a un contexto real, de utilidad en lo concerniente a la gestión y prevención de una eventual amenaza volcánica a largo plazo.

RETOS FUTUROS

El resultado final del presente proyecto corresponde a un modelo que se destaca por ser muy completo, respecto a los proyectos elaborados actualmente, no obstante, resulta relevante sugerir que a mediano y largo plazo en los próximos estudios vinculados con la evaluación de diversos escenarios de erupción en el Volcán Galeras, se incorporen como punto de partida los resultados de este trabajo para futuras modelaciones, en las que se proyecte no solo un modelo topográfico, sino también, que se incluyan las características físicas, mecánicas y químicas del suelo, además de la dinámica o hidráulica de los corredores fluviales que podrían intervenir en el flujo de lava y otros materiales causados por la erupción.

El proyecto tuvo limitaciones al solo contar con información secundaria, por lo cual como sugerencia adicional, para mejorar la precisión del modelo es importante realizar un trabajo de campo que permita medir la porosidad del suelo, magnitud de energía, caudales de fuentes fluviales, espesores, velocidades, ángulos y coeficientes de fricción, volumen de cada evento reacciones ante sustancias químicas y tiempos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alerta roja en el volcán Galeras de Colombia por nueva erupción.* (2009). Obtenido de Infobae el 23 de noviembre de 2020: <https://www.infobae.com/2009/11/21/485582-alerta-roja-el-volcán-galeras-colombia-nueva-erupcion/>
- Ardila L. (2018). *¿Qué pasaría si hay una erupción del volcán Galeras?* Obtenido de EL TIEMPO el 23 de noviembre de 2020: <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/que-pasa-si-el-volcán-galeras-hace-erupcion-230196>
- BBC News Mundo. (2021). *Nyiragongo: las impactantes imágenes de la repentina erupción del volcán en la República Democrática del Congo.* Obtenido de BBC News el 14 de Junio de 2021: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-57241330>
- BOLETINCRUZROJA. (2016). *Historias CRC...Erupción Galeras – enero 14 de 1993.* Obtenido de Todos Somos Cruz Roja el 23 de noviembre de 2020: <https://todossomoscruzroja.wordpress.com/2016/02/11/historias-crc-erupcion-galeras-enero-14-de-1993/>
- Boletines Volcán Galeras.* (2020). Obtenido de Servicio Geológico Colombiano el 06 de diciembre de 2020: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcánes/VolcánGaleras/Paginas/Boletines-Volcán-Galeras.aspx>
- Dueñas, D., Rodriguez, J., Betancourt, J., Tapia, A. y Martinez, D. (2015). *Simulación de Lluvias Atmosféricas para Tomografía Muónica del Volcán Galeras de la Ciudad de Pasto. In: IV Uniandes Particle Physics School.* Obtenido de Universidad de Nariño el 25 de marzo de 2021: <http://sired.udenar.edu.co/id/eprint/6029>
- García, A., Murcia, H., Cortés, G. y Laverde, C. (2011.). *Simulación de flujos piróclásticos en el volcán galeras con el código titan2d.* Departamento de Geociencias. Obtenido del Repositorio de la UNAL el el 25 de marzo de 2021: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/35133>

Generalidades Volcán Galeras. (2020). Obtenido de Servicio Geológico Colombiano el 23 de noviembre de 2020:

<https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/Paginas/generalidades-volcan-galeras.aspx>

Gómez, D., Torres, R., Laverde, C., Cadena, O., Mier, R., Monsalve, M., Cortés, G., y Calvache, M. (2009). Una síntesis del estado actual de actividad del volcán Galeras, Colombia, 2009. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 9(2), 24-30. Obtenido el 25 de marzo de 2021:

https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/article/view/904

Gorvett, Z. (2017). *El misterioso volcán que produjo la erupción más grande en siete siglos y que nadie puede encontrar*. Obtenido de BBC Future el 14 de Julio de 2021:

<https://www.bbc.com/mundo/vert-fut-40576511>

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGRA W-HILL/ INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

Lima, L. (2018). *Cómo murieron los habitantes de Pompeya y Herculano tras la erupción del Vesubio*. Obtenido de BBC News 14 de Julio de 2021:

<https://www.bbc.com/mundo/noticias-45792867>

Mapa de amenaza Volcán Galeras . (2020). Obtenido de Servicio Geológico Colombiano el 23 de noviembre de 2020:

<https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/Paginas/Mapa-de-amenaza.aspx>

Mapas de Amenazas Volcánicas . (2020). Obtenido de Servicio Geologico Colombiano el 23 de noviembre de 2020:

https://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza_volcanica_JS/index.html?itemid=d749a30e99eb46d69b20f908db9ccda9

Méndez, C. (2011). *Metodología. Diseño y desarrollos del proceso de investigación con énfasis en ciencias empresariales*. México, D.F.: LIMUSA, S.A. DE C.V.

- Mera, A. (2020). *Simulación de una Erupción del Volcán Galeras*. Obtenido de Esto es Pasto - Facebook el 25 de marzo de 2021:
<https://www.facebook.com/EstoEsPasto/videos/683634632213236/>
- Mesías, O. (2010). *Planificación de las áreas liberadas en el proceso de reasentamiento del Volcan Galeras*. Obtenido de Maestría en habitad - Universidad Nacional de Colombia (ENID) el 25 de marzo de 2021:
<https://www.slideshare.net/omesiar/proceso-galeras-enid>.
- Nossa, A. (2015). *Creando escenas 3D con ArcGIS Online (Amenaza por erupción del volcán Galeras)*. Obtenido de GeoGeeks - Semillero Innovación Geográfica - YouTube el 25 de marzo de 2021: https://youtu.be/C4-6R_BJqFw
- Páez, W. (2020). Riesgos y efectos ante una amenaza volcánica del Volcán Galeras con el Capitán (B). William R. Páez Sánchez - Ex.Comandante de Bomberos Bogotá - Instructor OFDA "CPI-EDAN" - Instructor de Primera Categoría Defensa Civil Colombiana. (E. Páez, Entrevistador)
- Patiño, C., Córdoba, G. y Guerrero, A. (2018). *Estimación probabilística de la amenaza por onda de choque*. Obtenido de Universidad de Nariño - Foro Internacional: Los volcanes y su impacto el 25 de marzo de 2021:
<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/FIVI-2018-47.pdf>
- Perdomo, J. (2021). ¿Qué ocurrió en Armero? con la Ex-Funcionaria de la Defensa Civil Colombiana Janneth Perdomo (E. Páez, Entrevistador)
- Rychtarcikova P. (s.f.). *Instalación de un sistema de alerta por parte de las comunidades de Florida en Colombia debido a una posible erupción del volcán Galeras*. Obtenido de Telegrafía el 23 de noviembre de 2020:
<http://www.sirenaselectronicas.com/instalacion-de-un-sistema-de-alerta-por-parte-de-las-comunidades-de-florida-en-colombia-debido-a-una-posible-erupcion-del-volcan-galeras/>
- SGC - Dirección de Geoamenazas. (2015). *ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA VOLCÁNICA DEL VOLCÁN*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano el 06 de

diciembre de 2020:

https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanGaleras/PDF/Memoria_Actualizacion_Mapas_Amenaza_Volcanica_Volcan_Galeras_2015.pdf

Subdirección de Estudios Ambientales. (2017). *República de Colombia - Índice de Calidad del Aire (ICA)* . Obtenido de IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales el 14 de Julio de 2021:

<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/641368/2.01+HM+Indice+calidad+aire.pdf/5130ffb3-a1bf-4d23-a663-b4c51327cc05>

Villalobos, E. (2019). *Descubre la riqueza natural que rodea al Volcàn Galeras en Pasto, Nariño*. Obtenido de RedBus el 25 de marzo de 2021:

<https://blog.redbus.co/naturaleza/volcan-galeras-pasto-narino/>