Universidad de Nariño

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Física



Distribución de densidades bajo el edificio volcánico Galeras como insumo para tomografía por muones

TRABAJO DE GRADO

Para optar el título profesional de:

Física

Denis Torres Muñoz

San Juan de Pasto, Colombia 25 de Mayo de 2018

Universidad de Nariño

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Física

Distribución de densidades bajo el edificio volcánico Galeras como insumo para tomografía por muones

Denis Torres Muñoz

TRABAJO DE GRADO

Director:

Roberto Armando Torres Corredor

MSc. en Geociencias y Sismología

San Juan de Pasto, Colombia 25 de Mayo de 2018

©2018- Denis Torres Muñoz

Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de aceptación

MSc. Roberto Armando Torres Corredor Director

> MSc. Karla Reyes Sánchez Jurado

MSc. Jaime Alfredo Betancourt Jurado

San Juan de Pasto, 25 de Mayo de 2018

Agradecimientos

Agradezco a Dios por todo el amor que existe en mi vida. Agradezco a mi familia, sobre todo a mis padres por siempre darme la oportunidad de elegir, poder equivocarme y tener éxito aprendiendo con mis propias experiencias, por su comprensión y compañía durante toda mi vida, por su apoyo emocional, intelectual y espiritual, me siento muy afortunada de poder contar con ellos.

A David Dueñas por siempre creer en mí y ser un apoyo fundamental en los momentos más difíciles de mi carrera y de mi vida en estos años.

A la Universidad de Nariño por la oportunidad de estudiar y crecer personal y académicamente durante todos estos años, a todos mis profesores, compañeros y amigos que han sido parte de este proceso universitario.

Al Servicio Geológico Colombiano OVSP por la oportunidad de trabajar en un lugar donde he conocido personas maravillosas a nivel académico y humano, de todos he podido aprender algo. A mi director el ingeniero Roberto Torres y a la física Adriana Ortega por permitirme trabajar con sus datos en este trabajo.

Por último agradezco al PhD David Martinez por confiar en mi y abrirme las puertas al grupo de investigación de física experimental, por sus consejos y su apoyo.

"La ciencia es bella y es por esa belleza que debemos trabajar en ella, y quizás, algún día, un descubrimiento científico como el radio, puede ser un descubrimiento que beneficie a toda la humanidad." Marie Curie

Distribución de densidades bajo el edificio volcánico Galeras como insumo para tomografía por muones

Resumen

El volcán Galeras (VG) ha sido monitoreado durante varios años debido a que es un volcán activo y se encuentra rodeado de zonas habitadas. Con el paso del tiempo, muchas poblaciones han crecido y se han asentado en zonas de alta peligrosidad, esto ha hecho que se incremente los niveles de riesgo y la vulnerabilidad de estas poblaciones teniendo en cuenta que el VG presenta antecedentes de generación de flujos piroclásticos.

En este trabajo, se estudió las densidades en el Complejo Volcánico Galeras y sus variaciones mediante estudios geológicos y métodos geofísicos ya existentes para el VG, como son la tomografía sísmica de velocidades de la onda P [10] y la gravimetría [9]. En el primer método, se utilizan capas a profundidades desde los 4 hasta los -10 Km teniendo 0 Km como el nivel del mar y se obtuvo que la mayor variación de densidad se encuentra entre los 2 y 0 Km con valores entre los 2.16 y 2.43 g/cm³, que corresponde a un porcentaje máximo de variación de 9%. Se encontró que a mayor profundidad, mayor valores de densidad, lo cual concuerda tanto en las capas como en los perfiles topográficos obtenidos. Mediante el método de gravimetría, se obtuvo un mapa de distribución de densidades que varían entre los 2.16 y 2.72 g/cm³, en el mapa se observa gran cantidad de bajas densidades que pueden corresponder a cuerpos jóvenes, poco consolidados y poco compactados y hacia el suroeste de Galeras se encuentran densidades altas que pueden corresponder a cuerpos idvenes, poco consolidados de bajas obtenidos en este trabajo serán de utilidad como una entrada importante para las simulaciones del proyecto de tomografía por muones.

Densities distribution under the Galeras volcanic building as input for tomography by muons

Abstract

The Galeras Volcano (GV) has been monitored for several years because it is an active volcano and is surrounded by occupied areas. Over time, many populations have grown and settled in highly dangerous areas, this has increased the risk levels and vulnerability of these populations taking into account that the GV has a history of generation of pyroclastic flows. In this work, the densities in the Galeras Volcanic Complex and its variations were studied by geological studies and existing geophysical methods for the VG, such as the seismic tomography of the P wave velocities [10] and the gravimetry [9]. In the first method, layers are used at depths from 4 to -10 km taking 0 km as the sea level and it was obtained that the greatest density variation is between 2 and 0 Km with values between 2.16 and 2.43 g/cm^3 , which corresponds to a maximum variation percentage of 9%. It was found that the deeper, the higher the density values, which agrees both in the layers and in the topographic profiles obtained. Using the gravimetric method, a distribution map of densities ranging from 2.16 to 2.72 q/cm^3 was obtained, the map shows a large number of low densities that can correspond to young bodies, little consolidated and little compacted and southwest of Galeras are high densities that may correspond to older bodies with greater consolidation and compaction. The results obtained in this work will be useful as an important input for the simulations of the muon tomography project.

Índice general

	Títul	lo		I
	Títul	lo		Π
	Agra	adecimie	entos	v
	Dedi	icatoria		/I
	Resu	ımen	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Π
	Abst	ract	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Π
	Glos	ario		(I
1.	Intro	oducció	n	1
2.	Mar	co de re	eferencia	3
	2.1.	2.1 Ge	neralidades del Complejo Volcánico Galeras (CVG)	3
	2.2.	2.2 Ge	ología del CVG	4
	2.3.	2.3 An	tecedentes	8
		2.3.1.	2.3.1 Modelo 3-D del Volcán Galeras utilizando Tomografía Sísmica	8
		2.3.2.	2.3.2 Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regional y	
			locales del volcán Galeras, asociadas a su estado de actividad entre	
			junio 2008–abril de 2009	1
3.	Defi	nición d	lel problema 1	.3
	3.1.	3.1 Pla	nteamiento del problema 1	3
	3.2.	3.2 For	rmulación del problema	.4
	3.3.	3.3 Ob	jetivos	.4
		3.3.1.	3.3.1 Objetivo General	.4
		3.3.2.	3.3.2 Objetivos Específicos	.4
	3.4.	3.4 Jus	tificación	4
4.	Mar	co teóri	co 1	.5
	4.1.	4.1 Pro	ppiedades físicas de los materiales	5
	4.2.	4.2 To	mografía por muones	20
	4.3.	4.3 Tor	mografía sísmica	21
	4.4.	4.4 Gra	avimetría	25
		4.4.1.	4.4.1 Correcciones gravimétricas	:6
		4.4.2.	4.4.2 Cálculo de densidad de un terreno	:9

5. Procedimiento						
	5.1.	5.1 Software	31			
	5.2.	5.2 Métodos a utilizar	31			
		5.2.1. 5.2.1 Tomografía sísmica	32			
		5.2.2. 5.2.2 Gravimetría	34			
6.	Rest	ıltados y Análisis	35			
	6.1.	6.1 Resultados mediante Tomografía sísmica	35			
		6.1.1. 6.1.1 Secciones transversales	35			
		6.1.2. 6.1.2 Perfiles Topográficos	39			
		6.1.3. 6.1.3 Diferencias porcentuales entre capas	42			
	6.2.	6.2 Resultados mediante Gravimetría	44			
	6.3.	6.3 Análisis	45			
7.	Con	clusiones	54			
		APENDICES	56			
A.	Date	os de densidades a diferentes profundidades	56			
B.	Dato	os del perfil EW y sus respectivas densidades	61			
C.	Dato	os del perfil NS y sus respectivas densidades	65			
D.	D. Códigos de las gráficas realizadas en ROOT					
Bil	oliogr	afía	73			

Glosario

- Andesita: Es la roca volcánica más común de la Tierra, es una roca ígnea de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasa y varios otros minerales ferromagnésicos como piroxeno, biotita y hornblenda. También puede haber cantidades menores de sanidina y cuarzo.
- **Curvas de nivel:** Son líneas que conectan ubicaciones de igual valor en un conjunto de datos que representa fenómenos continuos como: elevación, temperatura, precipitación, contaminación o presión atmosférica. Las entidades de línea conectan celdas de valor constante en la entrada.
 - **Flujo de lavas:** Un flujo de lava es una corriente de roca fundida que se derrama desde el respiradero de un volcán en erupción. Esta sustancia puede entrar en erupción, ya sea durante una actividad explosiva o debido a un evento no explosivo.
 - **Flujo de lodos:** Los flujos de lodo o lahares, son un flujo de sedimento y agua que se moviliza desde las laderas de volcanes. Durante los últimos siglos, los lahares han destruido más propiedad pública o privada que cualquier proceso volcánico y han sido los causantes de la pérdidas de miles de vidas humanas.
 - **Intemperismo:** Es la desintegración o alteración de la roca en su estado natural o posición natural a través de procesos físicos, químicos o biológicos. Estos procesos son inducidos o modificados por el aire, el agua o el

clima.

- Litología: Es la parte de la geología que estudia las características de las rocas que aparecen constituyendo una determinada formación geológica, es decir una unidad litostratigráfica, en la superficie del territorio, o también la caracterización de las rocas de una muestra concreta.
- Mapa topográfico: Es una representación, generalmente parcial, del relieve de la superficie terrestre a una escala definida.
 - **Muones:** Es una partícula elemental masiva que pertenece a la segunda generación de leptones. Su espín es 1/2. Posee carga eléctrica negativa, como el electrón, aunque su masa es 200 veces mayor que la del electrón.
- **Perfil Topográfico:** Un perfil topográfico o corte topográfico es una representación del relieve del terreno que se obtiene cortando transversalmente las líneas de un mapa de curvas de nivel, o mapa topográfico.
 - **Piroclástos:** Son cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica. Los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica solidificados en algún momento de la erupción, más frecuentemente durante su recorrido aéreo.

- **Tomografía:** Es el procesamiento de imágenes por secciones. Un aparato usado en tomografía es llamado tomógrafo, mientras que la imagen producida es un tomograma. Este método es usado en medicina, arqueología, biología, geofísica, oceanografía, ciencia de los materiales y otras ciencias.
- **Topografía:** Es la ciencia que estudia el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie terrestre, con sus formas y detalles; tanto naturales como artificiales.

Capítulo 1

Introducción

El Volcán Galeras (VG) es un volcán activo que se ubica en el departamento de Nariño, aproximadamente a 9 km al occidente de la capital de San Juan de Pasto (Figura 2.1). En la zona de influencia del VG se encuentran 9 municipios y más de 7 corregimientos con una población aproximada de 500.000 habitantes (OVSP et al., 2013)[31].

El Galeras hace parte del denominado Complejo Volcánico de Galeras (CVG) que está compuesto por una sucesión de lavas masivas y depósitos piroclásticos de composición andesítica, emitidos en el último millón de años y distribuidos en seis etapas de actividad, intercaladas con depósitos de flujos de lodo secundarios y avalanchas de escombros. El principal rasgo estructural cartografiado en el área, lo constituye el Sistema de Fallas Romeral, donde el trazo principal pasa por el Volcán Galeras (Murcia y Cepeda, 1991; Calvache, 1995). [1, 2].

Desde 1989 el VG es monitoreado continuamente por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) antes Ingeominas. Para la vigilancia, resulta fundamental poder contar con estudios de la estructura interna del volcán y su evolución en el tiempo. Se han llevado a cabo algunos estudios conducentes a establecer un modelo de su estructura interna a partir de técnicas geológicas y geofísicas como las de Calvache (1995)[2] de estudios petrológicos, Torres (2012)[10] a partir de tomografía sísmica local, Ortega (2014)[9] por gravimetría y Narvaez (2014)[32] por magnetometría. Si bien estas técnicas permiten delinear algunos rasgos de la estructura interna hasta profundidades según el objeto de estudio, en ocasiones se sacrifica el nivel de detalle o de resolución.

Una técnica, que relativamente se ha comenzado a extender a los volcanes con el fin de

obtener un mayor detalle de las estructuras internas más superficiales es la tomografía de muones. Esta es una técnica no destructiva que se usa para crear imágenes del interior de la zona superior de los volcanes. Su fundamento está en el empleo de un dispositivo que permita medir el flujo de muones a través de distintos sectores del cuerpo en estudio, y que de acuerdo con los cambios de densidades, permite relacionar la existencia de distintas estructuras internas.

De esta manera, este estudio busca establecer una distribución de densidades debajo del edificio volcánico, que podría servir como un insumo para la ejecución de simulaciones para una tomografía muónica en el edificio de Galeras. El desarrollo del presente trabajo se realizará mediante el estudio de los modelos geofísicos pre-existentes desarrollados en el SGC.

En el capítulo 2 se dan a conocer los antecedentes con los que se logró realizar este trabajo, además las generalidades del CVG y su geología, en el capítulo 3 se plantea el problema, los objetivos y la justificación de este estudio, el capítulo 4 consta de un marco teórico en donde se trata sobre la composición interna de la Tierra y las densidades de algunas rocas y minerales que pueden hallarse en el VG, en el capítulo 5 se encuentra el procedimiento que se utilizó para encontrar los resultados y el análisis que se muestran en el capítulo 6.

Capítulo 2

Marco de referencia

2.1 Generalidades del Complejo Volcánico Galeras (CVG)

El Volcán Galeras se localiza en Colombia, en el departamento de Nariño, con coordenadas 1°13'44" de latitud norte, 77°21'33" de longitud oeste y con altura de 4.276 m.s.n.m., aproximadamente a 9 km al occidente de la ciudad de San Juan de Pasto. En la figura 2.1 se puede observar un mapa de la ubicación del CVG teniendo en cuenta las poblaciones que se encuentran alrededor.



Figura 2.1: Mapa de localización del volcán Galeras. A la derecha una imagen tomada por el radar SIR-C/X-SAR de la NASA, a bordo del transbordador espacial Endevour, el 15 de abril de 1994 (Fuente: OVSP[31]).

El VG que se conoce hoy en día es el centro eruptivo más reciente y actualmente activo del denominado Complejo Volcánico Galeras (CVG), el cual posee una forma cónica con su edificio destruido en la parte occidental (OVSP et al., 2013)[31]. En la figura 2.2 se muestra el cono activo de Galeras, sus cráteres y campos fumarólicos desde el costado occidental.



Figura 2.2: Imagen aérea del cono activo de Galeras, 28 de septiembre de 2005 (Fuente: OVSP[31]).

2.2 Geología del CVG

A continuación se describe un modelo evolutivo de la actividad del Complejo Volcánico Galeras (CVG) según Calvache (1995) [2], Calvache y Cortés (1996) [5] y Calvache et al., (1997) [6].



Figura 2.3: Evolución geológica del CVG con su respectiva distribución geográfica por etapas de evolución. En color azul claro y en el centro del CVG se encuentra el Galeras actual (Calvache, 1995)[2].

El CVG se compone principalmente de depósitos de flujos de lavas, flujos y caídas piroclásticas, depósitos de flujo de lodo secundarios y avalanchas de escombros. La evolución de este complejo incluye formación de calderas, colapso de cima y erupciones lávicas y explosivas, dando como resultado un estratovolcán. Galeras corresponde al último estado de este complejo volcánico con una edad de 4500 años y su composición es dominantemente andesítica [7].

La composición global y las características petrográficas de los productos volcánicos son casi constantes. Los análisis químicos y petrográficos de los depósitos volcánicos indican la presencia de las siguientes variedades litológicas: andesitas (91%), andesitas basálticas (3,5%) y dacitas (5,5%). La composición química de los productos de la formación está caracterizada por andesitas calco-alcalinas, altas en silicio y medias en potasio. Las

variaciones observadas desde andesitas basálticas a dacitas han ocurrido durante etapas individuales de actividad del Complejo Volcánico del Galeras [5].

Cepeda (1985) [8] describe el proceso de formación del CVG, que es redefinido por Calvache [2]. En este proceso se distinguen seis etapas de actividad conformada por una sucesión de lavas masivas y depósitos piroclásticos emitidos durante el último millón de años, intercalados con depósitos de flujos de lodo secundarios y avalanchas de escombros.

Las etapas en orden de antigüedad son Cariaco, Pamba, Coba Negra, Jenoy, Urcunina y Galeras (Figura 2.3). El estado Cariaco con una edad de 1.1 Ma, tiene una composición andesítica con presencia de biotita, la presencia de pómez soportado con biotita indica que las primeras erupciones fueron más desarrolladas o explosivas. El estado Pamba con una edad mayor a 793 Ka, presenta una composición andesítica, flujo piroclástico de bloques y cenizas parcialmente endurecidas, seguido por depósitos de flujos de lava y flujos por colapso de lava, las lavas son andesitas de dos piroxenos con una pequeña proporción de magnetita e ilmenita. El estado Coba Negra con una edad de aproximadamente 793 \pm 20 Ka, presenta una actividad más explosiva caracterizada por erupciones de lava con depósitos de flujo de bloques y ceniza, con clastos de escoria altamente vesiculados y además los depósitos de flujos piroclásticos en la cima corresponden a secuencias de pequeños depósitos de caída de ceniza. El estado Jenoy con una edad de aproximadamente 159 \pm 21 Ka y se compone de flujos de lava y depósitos de flujo piroclástico, las lavas son andesitas de dos piroxenos con grandes cantidades de plagioclasa, anfíbol con fuertes bordes de reacción y magnetita e ilmenita como minerales accesorios. El estado Urcunina inició aproximadamente al mismo tiempo que la última glaciación entre 25 y 18 Ka, se compone de depósitos de flujos de colapso de lavas de composición andesíticas de dos piroxenos con anfíbol y olivino como fases accesorias. Por último se encuentra el estado actual Galeras que tiene una edad menor que 4.5 Ka, su actividad se caracteriza por erupciones de tipo vulcaniano con caídas piroclásticas, flujos piroclásticos, flujos de lava y flujos de lodo. La mayoría de los productos en este estadío son no juveniles correspondientes a roca con componentes

líticos, posteriormente los productos se vuelven más ricos en material juvenil, con depósitos enriquecidos con pómez.

A continuación en la Figura 2.4 se muestra un mapa geológico de la plancha 429, situada en el departamento de Nariño, y en la Figura 2.5 se puede observar su respectiva leyenda geológica.



Figura 2.4: Mapa geológico – Plancha 429 – Pasto. En el centro del mapa se resalta el perímetro del área del Complejo Volcánico de Galeras (CVG), compuesto por lavas, ocasionalmente intercaladas con piroclástos (Modificado de Murcia y Cepeda, 1991) [1].

Qcal	DEPÓSITOS COLUVIALES Y ALU VIALES Depósitos de coluvio y aluvio, exceptuando terrazas.	TQvic	LAVAS Y CENIZAS Generalmente se trata de lavas cubiertas y/o intercaladas con cenizas del tipo "ash fall" y muy pocas veces del tipo "ash flow".
Qt	TERRAZAS Depósitos aluviales aterrazados.	TQvsd	DEPÓSITOS VOLCÁNICOS SIN DIFERENCIAR Intercalaciones de lavas, pirociásticas, depósitos fluvio - glaciares y laha_ res en diferentes proporciones.
a	DEPÓSITOS LACUSTRES Sedimentos de origen ilmnico.	Th	ROCAS IGNEAS HIPOABISALES Pequeños stocks de portiritas daciticas y andesíticas.
Qsgf	DEPÓSITOS GLACIARES Y FLUVIOGLACIARES Se pueden distinguir: circos, valles, morrenas laterales y de recesión y depósitos tipo "out wash".	TMe	FORMACIÓN ESMITA Intercalaciones de limolitas violáceas, areniscas, areniscas congiomeráticas y congiomerados polimicticos.
Qvc	LLUVIAS DE CENIZA Cenizas del tipo "ash fali" que modelan la topografia actual. Gene_ ralmente se presentan varios niveles separados por paleosuelos.	Ku	ROCAS ULTRAMÁFICAS DEL CHACAGUAICO Pequeños alioramientos de dunitas serpertirizadas.
TQvI	LAHARES Y LAVAS Depósitos resultantes de flujos de lodo, con algunas coladas de lavas Intercaladas.	Ksv	FORMACIÓN QUEBRADAGRANDE Metasedimentos con intercalaciones de metabasatos y metapirociásti_ tas. Metamorfismo de las facies ceolitas y prehnita-pumpeliita.
TQVIp	LAHARES Y PIROCLASTOS Intercalaciones de lahares y cenizas del tipo "ash fail".		GRU PO DIABÁSICO
	CONJUNTO SEDIMENTARIO VOLCÂNICO - DE LA MAGDALENA	Kvs	Metabasallos y metapirociástitas, con metamorfismo de la facies prehnita-pumpellita.
TQsv	Degadas intercalaciones de alculacitas, innottas y areniscas de grano fino de colores claros, con restos de dialomeas, espículas de esponjas, conchas de moluscos laculstes, hojas, raíces y talos. Se presentan algunos flujos lávicos andesíticos hiercalados.	Kvd	Metabasallos, metapiroclástilas, y algunas intercalaciones de metapeli_ tas y variacions locales de metagabros a metadiabasas, con metamor_
TQsv	Degadas intercataciones de alculacitas, innotitas y areniscas de grando fino de colores claros, con restos de dilatomeas, espíciluss de esponjas, conchas de moluscos lacustres, hojas, raices y tallos. Se presentan algunos flujos lávicos andestiticos hiercalados. LAVAS Macizas, escortáceas y en bloques. Son cuarzo-latiandesitas, cuarzo_ andesitas, latiandesitas, andesitas y dacitas de la serie calcoalcalina. Sus edades varian entre el Micoeno Superior (7) y el presente.	Kvd	Metabasalios, metapirociástitas, y algunas infercalaciones de metapeli tas y variacions locales de metagabros a metadiabasas, con metamor_ fismo de las facies ceolitas a esquisto verde. Metabasalios y metasedimentos, con metamorfismo de las facies ceoli_ tas y prehnita-pumpelilita.
TQsv TQvi TQva	Degadas intercataciones de acimidentas, un dentas y areniscas de grando fino de colores claros, con restos de diatomeas, espículas de esponjas, conchas de moluscos lacustres, hojas, raíces y tallos. Se presentan algunos flujos lávicos andesíticos hiercalados. LAVAS Macizas, escortáceas y en bloques. Son cuarzo-latiandesitas, cuarzo_ andesitas, latiandesitas, andesítas y dacitas de la serie calcoalcalina. Sus edades varian entre el Miceno Superior (7) y el presente. AVALANCHAS ARDIENTES Y DE ESCOMBROS Tobas de lapilli y agiomenados productios a partir de emisiones volcá_ ricas, generalmente violentas, están compuestas dom hantemente por material generado a partir de maxima reciente.	Kvd Kv Kmsv	Metabasaitos, metapiroclástitas, y algunas infercalaciones de metapeli las y variacions locales de metagabros a metadiabasas, con metamor_ fismo de las facies ceolitas a esquisto verde. Metabasaitos y metasedimentos, con metamorfismo de las facies ceoli_ tas y prehnita-pumpellita. GRUPO DAGUA Metavolcanicas y metasedimentos hacia la base, con gradación a sedi_ mentos turtiditicos hacia el techo. Metamorfismo de las facies prehni_ ta-pumpellita y esquito verde.
	Degadas intercataciones de actionacias, aracinas de grando fino de colores claros, con restos de diatomeas, espículas de espónjas, conchas de moluscos lacustres, hojas, raíces y tallos. Se presentan algunos flujos távicos andestitos hiercalados. LAVAS Macizas, escortaceas y en bloques. Son cuarzo-latiandesitas, cuarzo_ andesitas, latiandesitas, andesitas y dacitas de la serie calcoalcalina. Sus edades varian entre el Micieno Superior (7) y el presente. AVALANCHAS ARD IENTES Y DE ESCOMBROS Tobas de lapilli y aglomendos producidos a partir de emisiones volcá_ nicas, generalmente violentas, están compuestas dom inantemente por material generado a partir de magma reciente. IGNIMBRITAS EUTAXÍTICAS Coladas tabuáres y soldadas, compuestas de cuarzo, blotita, homblen_ da y titociados en una matitz vítrica. Estan caracterizadas por el solda_ miento, las texturas de flujo y la presencia de "shards" pumáceos.	Kvd Kv Kmsv Pz7b	Metabasaltos, metapiroclástitas, y argunas intercalaciones de metapeli tas y variacions locales de metagabros a metadiabasas, con metamor_ fismo de las facies ceolitas a esquisio verde. Metabasaltos y metasedimentos, con metamorfismo de las facies ceoli_ tas y prehrita-pum pellita. GRUPO DAGUA Metavolcánicas y metasedimentos hacia la base, con gradación a sedi_ mentos turbidilicos hacia el techo. Metamorfismo de las facies prehri_ ta-pumpellita y esquito verde. SEC UENCIA METANÓRFICA DE BUE SACO Esquisios verdes y cuarzomicáceos, atravesados por venas de cuarzo y calalta. COMPLEJO MIGMATÍTICO DE LA COCHA- RÍO TELLEZ Nélses, anfibolitas, esquistos, granitoldes de anatexía y esporádicamen_ te flups básicos, con desarrolo de estructuras y texporádicamen_

Figura 2.5: Leyenda geológica de la Plancha 429 – Pasto. (Modificado de Murcia y Cepeda, 1991) [1].

2.3 Antecedentes

Existen algunos trabajos realizados para el CVG, los cuales dan información acerca de su estructura interna y densidad.

2.3.1 Modelo 3-D del Volcán Galeras utilizando Tomografía Sísmica

En este trabajo se realizó una estimación de la estructura tridimensional de velocidades de la onda P debajo del volcán Galeras hasta unos 8 km de profundidad respecto a la cima. Se utilizaron 7668 tiempos de primeros arribos de onda P de 1183 sismos volcano-tectónicos

(VT) seleccionados entre 1989 y 2009. Se definieron dos zonas de bajas velocidades y dos zonas de altas velocidades. Se encontró que hacia el NWW y SE del VG, se localizan velocidades bajas asociadas con regiones anómalas de calor, sin suficiente fragilidad para generar fracturas, debido al carácter superficial de estas zonas se sugiere que ellas podrían obedecer a sistemas hidrotermales o a remanentes de un magma no solidificados [10].

En general, el edificio volcánico está compuesto por materiales de bajas velocidades que se correlacionan con depósitos relativamente jóvenes sin consolidar y materiales volcánicos más antiguos altamente fracturados o alterados.

En este proyecto también se menciona un modelo de velocidades 1-D denominado Nariño Modificado (NM), que consiste de 5 capas planas y un semiespacio. Para las dos capas ubicadas en los 4 *Km* por encima del nivel del mar, las velocidades de propagación de la onda P, se infirieron con base en la información geológica de la plancha 429 [1] (Figura 2.5), y en resultados de velocidades medidas en materiales similares. Para las capas restantes y sus respectivas velocidades, desde el nivel del mar hasta la probable discontinuidad de Mohorovicik, se tomaron los resultados del proyecto Nariño [3] en el cual se tienen datos de un perfil gravimétrico correspondiente al trazo Malpelo-Tumaco-La Cocha y además se realizó un estudio de refracción sísmica a diferentes profundidades. En la Figura 2.6, se puede observar que aunque el perfil es próximo a la zona del CVG, no la atraviesa.

La Tabla 2.1 resume los valores de las velocidades de la onda P, las densidades y los materiales correspondientes que caracterizan cada capa del modelo NM. Las primeras capas (más superficiales) son de menor espesor. La referencia se ubicó en 4200 msnm y se asumió un valor para la relación vp/vs de 1.78, muy cercano a valores típicos para materiales en regiones volcánicas [1].



Figura 2.6: Resultados del perfil Malpelo – Tumaco (Tu) – La Cocha (Co) del Proyecto Nariño (modificado de Meissner et al., 1977)[3]. La franja roja ilustra el segmento que se utilizó para establecer el modelo 1-D de Galeras con las profundidades respectivas, sin incluir valores por encima del nivel del mar, que se derivaron conforme a la geología superficial.

Profundidad(Km)	$V_p(\text{Km/s})$	$\rho(g/cm^3)$	Tipo de material
0-2	3.50	2,32*	Depósitos volcánicos sin diferenciar
2-4	3.70	$2,35^{*}$	Lavas masivas y algunas escoriáceas sin diferenciar
4-8	4.00	2.49	Rocas graníticas, metamórficas y sedimentos
8-26	6.00	2.72	Rocas graníticas
26-44	6.80	2.91	Grupos Dagua y Diabásico
>44	8.00	3.29	Techo del manto superior

Cuadro 2.1: Modelo de velocidades 1-D de la onda P para Galeras (NM). Los valores con * representan las densidades estimadas por Torres (1990)[21] a partir de la relación V_p y de Nafe y Drake (1957)[14]. Las profundidades son respecto a la cima del volcán, 4200 m.

2.3.2 Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regional y locales del volcán Galeras, asociadas a su estado de actividad entre junio 2008–abril de 2009

Mediante una red de 9 bases y 286 estaciones se obtuvo datos gravimétricos y de GPS, con los cuales se obtuvo un modelo de anomalía gravimétrica regional y local para el CVG. Se evaluó la densidad de Bouguer en 2.4 g/cm^3 mediante el método de Nettleton. El mapa de Anomalía Completa de Bouguer (ACB) destaca la zona de bajo gravimétrico hacia el cráter de Galeras, que concuerda con las manifestaciones volcánicas del mismo periodo, cuando se evidenció la extrusión de un domo de lava en el fondo del cráter. Se destaca también la zona de alto gravimétrico hacia el NE del cráter, que coincide con un área de alta velocidad de ondas P (Torres, 2012)[10].

De los bajos gravimétricos se destaca el de la zona del cráter que concuerda con la actividad volcánica, entre 2008 y 2009, asociada con un proceso de ascenso de material magmático a temperatura por encima de los 550 °C; y que en los modelos 2D se representa por bloques de baja densidad, de alrededor de $1.4 \ g/cm^3$. De los altos gravimétricos se destaca que la mayoría están ubicados en la zona de los estadios volcánicos más antiguos como Cariaco, Pamba y Cobanegra. Se resalta el alto del NE que se asocia con un intrusivo en la zona de urcunina y se le asignó un valor de densidad $2.8 \ g/cm^3$, asociado con una zona de alta velocidad de ondas P. En los modelos se identificó una capa superficial de depósitos volcánicos poco consolidados, con densidad de $2 \ g/cm^3$. Zonas de intrusivos, asociados con la cámara magmática y con depósitos poco consolidados, con densidad entre $1.4 \ y 1.9 \ g/cm^3$, y basamento con densidad entre $2.7 \ y 2.9 \ g/cm^3$.

Con base en estos perfiles y en el método de Talwani, utilizado por el software de Geosoft, se elaboraron mapas de distribución de densidad en profundidad, los cuales permitieron hacer una correlación con la geología de la zona. En la Figura 2.6 se puede observar un mapa de distribución de densidad local para el VG.



Figura 2.7: Mapa de distribución de densidad derivado a partir del mapa de anomalías gravimétricas residuales. Las líneas amarillas corresponden a la periferia de los seis estadios de formación del complejo volcánico Galeras. La cruz ubica el cráter volcánico (Ortega, 2014) [9].

Capítulo 3

Definición del problema

3.1 Planteamiento del problema

El volcán Galeras ha sido monitoreado durante varios años debido a que es un volcán activo y se encuentra rodeado de zonas habitadas. Con el transcurrir del tiempo, muchas poblaciones han crecido y se han asentado en zonas de alta peligrosidad, esto ha hecho que se incremente los niveles de riesgo y la vulnerabilidad de estas poblaciones teniendo en cuenta que el VG presenta antecedentes de generación de flujos piroclásticos.

Por otra parte existe un macro proyecto que está en curso, en el cual se propone realizar una tomografía por muones del volcán Galeras con la intención de conocer más acerca de su estructura interna y de esta manera poder hacer una detección temprana de una posible erupción. Con el fin de realizar esta tomografía se están haciendo simulaciones mediante el programa GEANT4 [11] y se puede observar que la densidad es una variable importante para que el experimento sea más exacto, por lo cual una parte significativa dentro del proyecto es conocer las densidades del VG.

De esta manera, en un futuro se podrá instalar con mayor precisión los detectores de muones alrededor del volcán.

3.2 Formulación del problema

Se quiere saber si es posible encontrar similitudes entre las densidades calculadas mediante la tomografía sísmica de velocidades y la gravimetría.

3.3 Objetivos

3.3.1 Objetivo General

Caracterizar las densidades bajo el edificio volcánico de Galeras con base en estudios geofísicos ya existentes.

3.3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las densidades del volcán Galeras con base en un modelo Tomográfico.
- Estudiar las densidades del volcán Galeras con base en un modelo gravimétrico.
- Estudiar las densidades del volcán Galeras con base en estudios geológicos.
- Realizar una caracterización de las densidades bajo el edificio volcánico Galeras.

3.4 Justificación

Se estudia las densidades en el CVG mediante diferentes métodos, ya que los resultados que se obtengan en este trabajo serán de utilidad como una entrada importante para las simulaciones del proyecto de tomografía por muones.

Al conocer las densidades del terreno del volcán se puede hacer una estimación más aproximada de la tomografía en tiempo real. Al no contar con esta información, tanto la simulación como el desarrollo y ubicación del detector o detectores en el volcán, no serían tan eficientes y no se tendría una buena correlación entre la teoría y experimento para ser válido.

Capítulo 4

Marco teórico

4.1 Propiedades físicas de los materiales

Las propiedades de los materiales nos permiten identificar y diferenciar un material de otro ya sea por su composición, estructura o comportamiento ante algún efecto físico o químico y se pueden clasificar en dos grandes grupos: generales y específicas.

Las propiedades generales son las que presenta todo cuerpo material sin excepción y al margen de su estado físico como lo son la masa, el volumen, el peso, la divisibilidad, la porosidad, la inercia, la impenetrabilidad, la movilidad entre otros. Por otra parte, las propiedades específicas son propiedades peculiares que caracterizan a cada sustancia, permiten su diferenciación con otra y su identificación por ejemplo la densidad, el peso específico, la maleabilidad, la dureza, la elasticidad entre otros. Pueden ser químicas o físicas dependiendo si se manifiestan con alteración o sin ella en su composición interna o molecular.

Las propiedades físicas son aquellas que impresionan nuestros sentidos sin alterar su composición interna o molecular. Por ejemplo, la densidad, estado físico (sólido, líquido, gaseoso), propiedades organolépticas (color, olor, sabor), temperatura de ebullición, punto de fusión, solubilidad, dureza, conductividad eléctrica, conductividad calorífica, calor latente de fusión, etc. A su vez las propiedades físicas pueden ser extensivas o intensivas. El valor medido de las propiedades extensivas depende de la masa, por ejemplo: inercia, peso, área, volumen, presión de gas, calor ganado y perdido, etc., mientras que el valor medido de las propiedades intensivas no depende de la masa, por ejemplo: densidad, temperatura de ebullición, color, olor, sabor, calor latente de fusión, reactividad, energía de ionización,

electronegatividad, molécula gramo, átomo gramo, equivalente gramo, etc.

Específicamente, la densidad es una magnitud escalar que se refiere a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia, en cierto modo mide qué tan concentrada es la masa de un cuerpo. La densidad se expresa por las unidades del sistema internacional: g/cm^3 , g/ml, Kg/m^3 , kg/L.

En la estructura interna de la Tierra se tienen diferentes densidades, siendo característico el aumento de éstas con la profundidad. En la corteza que es la capa más externa, se tienen densidades medias de 2.67 q/cm^3 en la que predominan silicatos ligeros de aluminio, carbonatos y óxidos (corteza continental o granítica) y 3.0 q/cm^3 en la constituida por silicatos de magnesio con contenidos de hierro (corteza oceánica o basáltica). La corteza continental es más gruesa y domina en las zonas de continentales y la oceánica es más delgada dominando en los pisos oceánicos. La corteza es una zona geológicamente muy activa debido a que se manifiestan procesos internos a causa del calor terrestre y también se dan procesos externos como son la erosión, transporte y sedimentación causada por la energía solar y la fuerza de gravedad. Subyaciendo se encuentra el manto, cuyas densidades varían entre los 3.5 q/cm^3 en el manto superior donde predominan silicatos más pesados con relación a la corteza y 5.6 q/cm^3 en el manto inferior conformada por silicatos más pesados. Es una capa muy activa debido a la ocurrencia de corrientes convectivas como consecuencia de la diferencia térmica entre los materiales calientes vecinos al núcleo terrestre que por diferencia de densidades asciende hacia la parte superior del manto donde los materiales tienen menor temperatura redistribuyendo el calor; y cuando los materiales se enfrían tienden a hundirse de nuevo hacia el interior. Como consecuencia de esta dinámica, al moverse estos materiales producen el desplazamiento de los continentes y todo lo que esto lleva asociado como por ejemplo terremotos, vulcanismo, creación de islas y cordilleras, etc. En la parte más interna de la Tierra, se encuentra el núcleo formado por metales pesados como hierro y níquel. El núcleo está formado por metales como el hierro y el níquel, y se reconocen el núcleo externo donde los materiales están fundidos debido a la presencia de materiales

azufrados que bajan el punto de fusión con una densidad de 9.9 g/cm^3 , y el núcleo interno en estado sólido con una densidad de 13.0 g/cm^3 [15]. En la Figura 4.1 se puede apreciar un modelo de estructura interna destacando las principales capas con sus espesores.



Figura 4.1: Estructura interna de la tierra (corteza, manto y núcleo) con sus respectivas profundidades [25].

En la tierra hay rocas y minerales, los cuales tienen densidades que se expresan normalmente como gravedad específica, que es la densidad de la roca en relación con la densidad del agua.

Generalmente, los minerales no metálicos tienen bajas densidades mientras que los minerales metálicos tienen altas densidades. La mayoría de los principales minerales formadores de rocas en la corteza terrestre, como el cuarzo, el feldespato y la calcita, tienen densidades muy similares que están alrededor de los 2.5 a los 2.7 g/cm^3 . Algunos de los minerales metálicos más pesados, como el iridio y el platino, pueden tener densidades superiores a 20 g/cm^3 [16].

La densidad de las rocas es muy sensible a los minerales que componen un tipo de roca en particular, por ejemplo las rocas sedimentarias (y granito), que son ricas en cuarzo y feldespato, tienden a ser menos densas que las rocas volcánicas. Cuanto más máfica (rica en magnesio y hierro) es una roca, mayor es su densidad. Las rocas aun siendo del mismo tipo pueden tener un rango de densidades y se debe a que diferentes rocas del mismo tipo pueden contener diferentes proporciones de minerales. Este rango de densidades se puede atribuir también a la porosidad de una roca, o la cantidad de espacio abierto entre los granos minerales.

La porosidad se mide como un decimal entre 0 y 1 o como un porcentaje. En rocas cristalinas como el granito, que tienen granos minerales apretados y entrelazados, la porosidad es normalmente bastante baja (menos del 1 %). En el otro extremo del espectro está la arenisca, con sus grandes granos de arena individuales. Su porosidad puede alcanzar 30 %. En la Tabla 4.1, se muestran las densidades de algunos minerales y de algunas rocas [17].

Roca/Mineral	Densidad g/cm^3		
Apatito	3.1-3.2		
Andesita	2.2-2.8		
Biotita Mica	2.8-3.4		
Calcita	2.71		
Clorita	2.6-3.3		
Cobre	8.9		
Feldespato	2.55-2.76		
Grafito	2.23		
Yeso	2.3-2.4		
Fluorita	3.18		
Granate	3.5-4.3		
Oro	19.32		
Hálito	2.16		
Magnetita	5.18		
Olivino	3.27-4.27		
Pirita	5.02		
Cuarzo	2.65		
Esfalerita	3.9-4.1		
Talco	2.7-2.8		
Turmalina	3.02-3.2		
Hematites	5.26		
Hornblenda	2.9-3.4		
Caolinita	2.6		
Basalto	2.7-2.9		

Cuadro 4.1: Densidades de algunas rocas y minerales[17]

4.2 Tomografía por muones

La tomografía por muones o muongrafía es una técnica que utiliza los rayos cósmicos para generar imágenes tridimensionales de volúmenes usando información contenida en la dispersión de Coulomb de los muones, por lo tanto se puede usar para crear imágenes del interior de la zona superior de los volcanes y de esta manera determinar su estructura delineando conductos por donde puede intruir el magma así como la presencia de cuerpos fundidos total o parcialmente. Esta información resulta crucial en el conocimiento de los peligros asociados con la actividad volcánica.

Los muones son las partículas energéticas más numerosas que llegan al nivel del mar, el flujo de muones en la superficie de la Tierra es tal que un solo muón pasa a través de un área del tamaño de una mano humana por segundo. El principio físico de la tomografía por muones aplicada a volcanes es el mismo que el de las radiografías con base en rayos-X, solo que en lugar de fotones se utilizan muones. A partir de un flujo conocido de estas partículas se mide la atenuación del flujo, luego se calcula la opacidad del material al paso de los muones y entonces puede inferirse la trayectoria del muón teniendo en cuenta la densidad como un parámetro de entrada. Con base en los cambios en las densidades estimadas es posible inferir la existencia de distintas estructuras internas [18].

La pérdida de energía en los muones usualmente se da debido a la ionización la cual depende débilmente de la energía y es dominante en muones que estén por debajo de los 500GeV. Para muones que penetran cuerpos profundamente (son capaces de penetrar la roca varios metros antes de detenerse), los procesos radiactivos comienzan a ser importantes en la perdida de energía.

La pérdida de energía de los muones que pasan a través de cualquier material, es proporcional a la densidad y a la distancia que atraviesan.

El valor medio para el potencial de frenado de los muones en los materiales está dado por la siguiente ecuación [19]:

$$\frac{dE}{dX} = \rho \frac{Z_{nucl}}{A_r} (0.307 \frac{M_{eV} cm^2}{g}) \frac{Z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta)}{2} \right]$$
(4.1)

Donde $\frac{dE}{dX}$ es la pérdida de energía de la partícula por unidad de longitud, Z es la carga de la partícula dividida por la carga del protón, c la velocidad de la luz, $\beta\gamma$ son parámetros relativistas, ρ la densidad del material, Z_{nucl} las cargas dimensionales del núcleo, A_r el peso atómico relativo, I la energía de excitación promedio en eV, Tmax es la energía máxima de transferencia al electrón y $\delta(\beta)$ es un término de densidad dependiente que atenúa el crecimiento logarítmico de la sección transversal a muy alta energía.

4.3 Tomografía sísmica

Dentro de la sismología existe la tomografía sísmica, que es una técnica empleada para explorar estructuras complejas y heterogéneas debajo de la superficie terrestre mediante la construcción de imágenes empleando los registros sísmicos de fuentes activas o pasivas. La propagación de una onda sísmica está principalmente influenciada por la densidad y las propiedades elastomecánicas del medio que se reflejan en las velocidades sísmicas de propagación y en la atenuación de la misma onda que viaja a través del medio. Algunas tomografías del campo de velocidades se elaboran a partir de la inversión conjunta de hipocentros y velocidades con base en los tiempos de llegada de las ondas P o S a diferentes estaciones sísmicas.

El siguiente desarrollo está basado en (Torres, 2006)[35]. El tiempo de viaje de las ondas sísmicas T_j desde una fuente hasta una estación sísmica se expresa utilizando la teoría de rayos como una integral de camino a lo largo del trayecto j de la siguiente manera:

$$T_j = \int_{rayo_j} \frac{1}{V(X_k)} dl \therefore k = 1, 2, 3$$
(4.2)

Donde $V(X_k)$ es el campo de velocidades y dl es un elemento de longitud del camino. La velocidad de propagación de la onda depende de propiedades elásticas del medio y de la densidad del mismo.

Cuando ocurre un sismo, un sólido se somete a perturbaciones elásticas de cambio de volumen sin cambios de forma que se asocian con la acción de ondas longitudinales (ondas P) que se propagan con velocidad V_p y a cambios de forma sin cambios de volumen que se asocian con la acción de ondas transversales (ondas S) que se propagan con velocidad V_s . Las ondas P y S reciben el nombre de ondas internas u ondas de cuerpo.

Las perturbaciones elásticas longitudinales y transversales (de cizalla o corte) están representadas por las ecuaciones diferenciales de onda (4.3) y (4.4) respectivamente.

$$\nabla^2 \Delta = \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} \tag{4.3}$$

$$\nabla^2 \,\omega = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \tag{4.4}$$

La ecuación (4.3) corresponde a la onda de cuerpo P y la ecuación (4.4) a la onda de cuerpo S y sus soluciones representan estos dos tipos de ondas que se propagan con distinta velocidad V_p y V_s . De la ecuación (4.3), Δ corresponde a la dilatación cúbica.

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{u}$$
(4.5)

Donde ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , y ϵ_{zz} corresponden a desplazamientos normales en x, y y z respectivamente Y de la ecuación (4.3) ω representa el vector de rotación.

$$\vec{\omega} = \vec{\omega_x} - \vec{\omega_y} + \vec{\omega_z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \hat{x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \hat{y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \hat{z} = \nabla \times \vec{u}$$
(4.6)

Donde u_x , u_y y u_z corresponden a desplazamientos en x, y y z respectivamente. Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas dependen de la densidad y las propiedades elásticas del medio por el cual se transmiten:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{4.7}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{4.8}$$

Siendo ρ la densidad del medio, λ y μ las constantes de elásticas de Lamé. Generalmente μ se conoce como el módulo de rigidez al cortante. En un sólido de Poisson, $\lambda = \mu$ y por tanto la relación de sus velocidades es $\sqrt{3}$ o sea que las ondas longitudinales son la primeras en llegar a un determinado sitio o estación de registro.

Las ondas sísmicas y la densidad son propiedades fundamentales de los materiales de la tierra. Estas propiedades se han medido en miles de experimentos de campo y de laboratorio para, por ejemplo, inferir la geometría subsuperficial de las unidades geológicas y el espesor promedio y la composición química de la corteza terrestre (por ejemplo, Christensen y Mooney, 1995)[22]. Y por lo tanto, a partir de las velocidades de las ondas sísmicas y sus parámetros elásticos es posible establecer las densidades del medio.

Como la tomografía sísmica y los estudios de refracción por lo general solo dan información de V_p , una relación directa entre V_p y V_s es altamente deseable. Aunque V_p/V_s versus V_p ha sido reportado para una variedad de rocas sedimentarias (Mavko et al., 1998)[23] y para las rocas volcánicas, ígneas y metamórficas (Christensen, 1996)[24], nunca se ha reportado una relación Vs versus Vp única y continua para el conjunto completo de unidades geológicas
que componen la corteza terrestre.

Existen algunas relaciones empíricas entre V_p , V_s y la densidad ρ que pueden usarse para inferir V_s o la densidad para toda la corteza terrestre desde cualquier V_p . Estas relaciones empíricas propuestas, por lo tanto, pretenden proporcionar un ajuste promedio útil entre Vs y Vp, de la misma manera que la curva Nafe-Drake (Ludwig et al., 1970)[20] proporciona un ajuste promedio entre ρ y V_p . Para este trabajo en particular, la ecuación (4.9) se tendrá en cuenta ya que mediante ella se puede calcular la densidad, lo cual se explica en el capítulo 5, en la sección 5.2.1.



Figura 4.2: Comparación de la densidad versus relaciones Vp utilizadas en el artículo de Brocher 2005 [12]. Los círculos rellenos muestran valores seleccionados a mano de la curva publicada por Ludwig et al. (1970)[20]. La línea continua (ecuación 4.9), la curva de Nafe-Drake muestra una regresión polinómica a estas selecciones y es la relación de densidad preferida frente a Vp. Otras líneas etiquetadas muestran las relaciones discutidas en el artículo de Brocher.

$$V_p(\frac{Km}{s}) = 39,128\rho - 63,064\rho^2 + 37,083\rho^3 - 9,1819\rho^4 + 0,8228\rho^5$$
(4.10)

$$V_s(\frac{Km}{s}) = 0,7858 - 1,2344V_p + 0,7949_p^2 - 0,1238V_p^3 - 0,0064V_p^4$$
(4.11)

Donde las ecuaciones (4.10) y (4.11) son las relaciones de Vp como función de la densidad y Vs como función de Vp respetivamente.

4.4 Gravimetría

Adicionalmente, la gravimetría es otra de las técnicas para conocer más acerca de la estructura interna de un volcán.

En principio, es un hecho que todos los cuerpos tienden a caer sobre la superficie terrestre y que este fenómeno se debe a la atracción que la Tierra ejerce sobre los cuerpos próximos a su superficie y que recibe el nombre de fuerza gravitatoria o peso. La aceleración con que caen los cuerpos se llama aceleración de la gravedad o simplemente gravedad, g.

De la primera y segunda ley de Newton, se puede expresar la aceleración de la gravedad g, causada por la atracción de la masa de la Tierra como:

$$g = G\frac{M}{R^2} = G\frac{\rho V}{R^2}$$
(4.12)

Donde G es la constante de gravitación universal, M, V, R y ρ son la masa, el volumen, el radio medio y la densidad media de la Tierra respectivamente.

Con base en la ecuación (4.12), el valor de g es función de la forma de la Tierra y por lo tanto depende de la latitud. Es posible establecer un valor teórico esperado en una determinada latitud y reducido al nivel del mar, por ejemplo mediante la fórmula internacional de la gravedad utilizada para el esferoide, la cual data de 1930:

$$g = 978,049 \left(1 + 0,0052884 \sin^2 \phi - 0,0000059 \sin^2 2\phi\right) \frac{cm}{s^2}$$
(4.13)

Donde ϕ es la latitud al nivel del mar.

Con base en la ecuación (4.13) se puede calcular el valor teórico de la gravedad en cualquier latitud por lo cual se sabe que se va a obtener variaciones gravimétricas dependiendo del valor de la latitud. Esto hace pensar que existen anomalías gravimétricas que son la diferencia entre el valor real de la gravedad y el valor teórico por un modelo particular del subsuelo. Estas anomalías se determinan mediante correcciones gravimétricas, ya que la gravedad observada está influenciada por efectos sobre el punto de observación como la latitud, altitud, topografía alrededor del punto de observación, mareas terrestres, así como cambios laterales en la distribución de la densidad.

4.4.1 Correcciones gravimétricas

Corrección por latitud: la Tierra se define como una figura matemática o elipse de rotación, con superficie equipotencial, pero está deformada por la distribución de masas hacia los polos, lo que genera incremento de gravedad con el incremento en latitud. Por ello, la corrección se suma cuando el punto de observación se dirige al Ecuador. La ecuación para esta superficie, adoptada por la asociación Internacional de Geodesia en 1967, estima el valor de g para todos los puntos del esferoide, y al diferenciar la ecuación se obtiene la corrección por latitud (ecuación 4.14): (Telford, 1976; Nettleton, 1976))[26, 27].

$$\frac{\mathrm{d}g_L}{\mathrm{d}s} = \frac{1}{R_e} \frac{\mathrm{d}g_L}{\mathrm{d}\phi} \approx \frac{1}{R_{eg}} \frac{\mathrm{d}g_L}{\mathrm{d}\phi} \approx 0.8122(\sin 2\phi) \frac{mgal}{Km}$$
(4.14)

Donde d_s corresponde a la distancia horizontal norte-sur; R_e el radio de la Tierra a la latitud ϕ y R_{eq} el radio en el Ecuador.

Corrección por deriva instrumental: El gravímetro, como todo instrumento de precisión, da lugar a lo que se denomina deriva instrumental o variación con el tiempo de la lectura de una estación; es decir, que al efectuar una medida sobre una misma estación a diversos intervalos de tiempo se obtiene valores ligeramente distintos. Esta deriva es resultado principalmente por la fatiga del sistema de muelles, o por variaciones de temperatura, etc.

La corrección se realiza para anular las variaciones por efectos térmicos y mecánicos que afectan al sensor del gravímetro, y por ende eliminar las variaciones en sus lecturas con el paso del tiempo. La curva de gravedad diaria observada permite identificar la variación que se debe repartir entre todas las lecturas realizadas en el día (Dobrin, 1976; Telford, 1976; Reynolds, 1997; Seigel, 1995)[28, 26, 29, 30].

Corrección por mareas terrestres: Las atracciones gravitacionales del Sol y de la Luna causan el efecto de las mareas que depende de la posición astronómica de ambos y de la latitud, siendo variable con el tiempo; estas fuerzas producen una pequeña deformación de la superficie marina. Este efecto influye también en los gravímetros y da lugar al efecto luni-solar o de las mareas. Su amplitud máxima puede llegar en total a 0.3 *miligales*, pero su variación máxima es solamente de unos 0.05 *mgal/hora*. Como el efecto de estas mareas sobre las mediciones gravimétricas es muy lento, usualmente se compensan con la corrección por deriva instrumental.

$$\delta g = -4.83 + 15.73 \sin^2 \phi - 1.59 \sin^4 \phi \tag{4.15}$$

Corrección de Aire Libre: calcula la disminución de la gravedad a medida que aumenta la distancia al centro de la Tierra, sin tener en cuenta la masa ubicada entre las estaciones de referencia y de medida. Esta corrección requiere valores de altura de alta precisión (ecuación 4.16). Este valor se suma cuando el punto de observación está por encima de la referencia y, en el caso contrario se resta (Nettleton, 1976; Dobrin, 1976; Telford, 1976)[27, 28, 26].

$$C^{AL} = \delta g = \pm (0.3086\delta_z) mgal \tag{4.16}$$

Donde δ_z es la variación de altura entre dos puntos, sus unidades son en metros.

Corrección de Bouguer: Bouguer fue un célebre geodesta francés del siglo XVIII que aplicó por primera vez esta corrección. Se calcula hallando el efecto gravimétrico del terreno comprendido entre el nivel de la estación de observación y el nivel del mar, o sea suponiendo que la estación se ha hecho en un plano topográfico horizontal. Esta corrección no tiene en cuenta los valles y montañas ya que son como aplanados con la aplicación de la placa. Puede expresarse matemáticamente como el producto de la densidad de la roca, la altura respecto del nivel del mar u otra referencia, y una constante, en unidades de mGal:

$$\delta_a \beta = 2\pi G \rho h = 0.4193 \rho h \tag{4.17}$$

Donde $\delta_g \beta$ es la corrección de Bouguer, ρ es la densidad media entre el nivel de la estación y el nivel del mar en kg/m^3 , h la diferencia de altura entre dos posiciones en metros y G la constante gravitacional (6,67384 × 10⁻¹¹ m^3/kgs^2).

Es muy común utilizar $\rho = 2.67g/cm^3$ para la placa de Bouguer. Lo ideal sería conocer la densidad a partir de muestras de laboratorio, pero cuando el área de estudio es muy grande, se requieren muchas muestras, y aun así no serán muy representativas si la altura sobre el nivel del mar es grande.

4.4.2 Cálculo de densidad de un terreno

Para el cálculo de la densidad en un terreno, se puede observar que en las correcciones gravimétricas entra un factor desconocido que es la densidad. Aunque el valor de densidad que se utiliza para la corrección de Bouguer en estricto rigor sería diferente del de la corrección topográfica, sin embargo, por lo general se adopta el mismo valor de la densidad para ambas correcciones.

El problema es calcular la densidad ρ a adoptar, ya que esta densidad nunca se conoce exactamente pero se sabe que oscila generalmente entre $\rho = 2.3g/cm^3$ (densidad media de los terrenos sedimentarios) y $\rho = 2.67q/cm^3$ (densidad media de la corteza terrestre). Existen varios métodos directos para determinar la densidad, por ejemplo uno de ellos sería recoger muestras en superficie y hallar una media de la densidad de todas ellas; el procedimiento, lo cual aparte de ser muy pesado por el gran número de muestras que habría que tomar, es inexacto ya que la densidad de estas rocas superficiales está alterada debido a los agentes atmosféricos y además la densidad de las rocas superficiales no corresponde generalmente a la de las rocas que incluye la corrección de Bouguer. Dado que estos métodos directos presentan inconvenientes, se han ideado métodos indirectos de medir la densidad, uno de los más conocidos es el método empleado por Nettleton [27], el cual consiste en considerar un perfil gravimétrico trazado sobre un accidente morfológico pronunciado en el área de interés como una colina o un valle pequeño. Para cada estación de observación a lo largo del perfil se calcula la gravedad corregida insertando distintos valores de densidad en las formulas, que corrigen el efecto topográfico y el efecto de las masas ubicadas entre el nivel de referencia y el nivel de observación (Figura 4.3). El valor de densidad, que genera el perfil gravimétrico de menor correlación con el perfil morfológico, es el valor más apropiado y el que se acerca lo más posible al valor real.



Figura 4.3: Serie de perfiles para obtener la densidad por medio del método de Nettleton[27]. Se está considerando un perfil gravimétrico y distintos valores de densidad (en este caso σ) que corrigen el efecto topográfico en cada una de las gravedades encontradas en unidades de miligales.

Capítulo 5

Procedimiento

5.1 Software

Se manejó Surfer versión 15.1.285 [13], que es un software de mapeo de superficies en 3-D que se ejecuta en Microsoft Windows y se pueden realizar modelos tridimensionales más sofisticados del paisaje a partir de datos digitales del terreno, estructuras metálicas 3-D, vectores, imágenes, relieves, sombreados, etc.

También se utilizó el programa computacional Geosoft versión 3.0 [33], el cual posee un poderoso procesamiento de datos que se enfoca en la exploración y las ciencias de la Tierra y es posible hacer mapeos de superficie, gridaje 3D, digitalización de interpretaciones geológicas, entre otros.

Por último, se usó el software orientado a objetos ROOT [34] versión 6.10, que proporciona todas las funcionalidades necesarias para tratar el procesamiento de big data, el análisis estadístico, la visualización y el almacenamiento.

5.2 Métodos a utilizar

En este trabajo se utilizaron datos del modelo 3-D del VG utilizando tomografía sísmica (Torres 2012) [10] y del modelo de fuentes de anomalías gravimétricas del VG (Ortega 2014) [9] con el fin de hacer comparaciones entre las densidades obtenidas para estos dos modelos y de esta manera poder caracterizar los materiales que se encuentran a diferentes

profundidades del edificio volcánico Galeras.

Para el respectivo análisis se contó con los trabajos geológicos que se han realizado para el Volcán Galeras según Calvache (1995) [2], Calvache y Cortés (1996) [5], Calvache et al., (1997) [6] y Cepeda (1985)[8].

5.2.1 Tomografía sísmica

En primer lugar, se tiene el conocimiento de que el modelo 3-D del VG [10] proporciona información de velocidades de la onda P debajo del volcán Galeras hasta 10 Km de profundidad con respecto a la cima distinguiendo siete capas desde los 4 Km hasta los - 10 Km, sabiendo que el nivel del mar se encuentra en los 0 Km.

Utilizando la ecuación (4.9) que es un ajuste de regresión dado 2005 por Brocher [12], se calculó las densidades para cada una de las capas mencionadas anteriormente.

Por ejemplo para la capa de 4 Km con el primer dato de velocidad $V_p = 3,10 Km/s$:

$$\rho(\frac{g}{cm^3}) = 1,661(3,10) - 0,4721(3,10)^2 + 0,0671(3,10)^3 - 0,0043(3,10)^4 + 0,000106(3,10)^5 = 2,255$$
(5.1)

Esta operación se repite para cada uno de los datos en la capa con sus respectivas latitudes y longitudes y de esta manera se obtuvo un mapa de densidades para cada una de las capas del VG.

Introduciendo en Surfer [13] los datos obtenidos, se obtuvieron las gráficas para las capas teniendo en cuenta que "x" corresponde a la longitud, "y" a la latitud, y por último "z" corresponde a la densidad ρ en g/cm^3 .

Un perfil topográfico es una práctica útil para poder entender lo que representan los mapas topográficos ya que es una representación del relieve del terreno que se obtiene cortando transversalmente las líneas de un mapa de curvas de nivel, cada curva de nivel se puede definir como una línea cerrada que une puntos del relieve situados a igual altura sobre el nivel del mar. Por lo tanto, se hicieron dos perfiles topográficos (perfil NS y perfil EW), para ello se realizaron dos cortes que pasan por el cráter del volcán Galeras, uno de los cortes va de norte(N) a sur(S) y otro de este(E) a oeste(W) como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Mapa de curvas de nivel con el que se realizó los perfiles topográficos (Perfil NS y Perfil EW). Las lineas que pasan de NS y EW se intersectan en el cráter del VG. Los datos que se encuentran en estas regiones trazadas con las lineas se obtienen mediante el programa Surfer [13] y se utilizan para observar más detalladamente los datos en esas regiones.

Posteriormente se utilizaron las densidades encontradas en los perfiles NS y EW para calcular

una diferencia porcentual del perfil con respecto al promedio de densidad de cada una de las capas y de esta manera poder saber dónde se encuentra la mayor variabilidad de densidades en el cráter del VG.

Por último se utilizó ROOT [34] para encontrar la diferencia porcentual de densidad que existe entre capa y capa, y de esta manera saber en qué capa se encuentra la mayor variación de densidad.

5.2.2 Gravimetría

En el caso de la gravimetría, se utilizó el mapa de distribución de densidad derivado a partir del mapa de anomalías gravimétricas residuales (Figura 2.7), el cual se intodujo en Geosoft [33] y se realizó una interpolación entre los puntos mediante la exportación de un gridaje XYZ, se obtuvo datos de coordenadas planas XY para la latitud y la longitud y datos de densidad para cada una de esas coordenadas.

Seguidamente se realizó la conversión de las coordenadas planas de Gauss-Krüger al sistema de coordenadas geográficas mundial WGS84 (World Geodetic System 1984) que es un estándar en geodesia, cartografía, y navegación. Este sistema permite localizar cualquier punto de la Tierra, es en la que se basa el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Se basa en un patrón matemático de tres dimensiones que representa la Tierra por medio de un elipsoide, un cuerpo geométrico más regular que la Tierra, que se denomina WGS 84. Esta conversión se hizo debido a que en el método de tomografía sísmica se utiliza este sistema de coordenadas, y de esta manera se podrá hacer las respectivas comparaciones de densidades.

Capítulo 6

Resultados y Análisis

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos mediante lo explicado en el capítulo previo, y graficados en Surfer [13] y ROOT[34].

6.1 Resultados mediante Tomografía sísmica

6.1.1 Secciones transversales

Mediante el programa Surfer [13] se graficaron las densidades que se encuentran en cada una de las secciones transversales o capas que se nombraron en el capítulo 5. La Figura 6.1 corresponde a la primera capa, es decir a los 4 Km, la Figura 6.2 a los 2 Km, la Figura 6.3 a los 0 Km, la Figura 6.4 a los -2 Km y la Figura 6.5 a los -4 Km. Considerando el modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10], no se tiene en cuenta las gráficas de los -6 Kmhasta los -10 Km debido a que no brindan la resolución y confiabilidad esperada.



Figura 6.1: Mapa de distribución de densidades para la sección transversal a 4 Km con respecto al nivel del mar, obtenido mediante los datos del modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10].



Figura 6.2: Mapa de distribución de densidades para la sección transversal a 2 Km con respecto al nivel del mar, obtenido mediante los datos del modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10].



Figura 6.3: Mapa de distribución de densidades para la sección transversal a 0 Km, obtenido mediante los datos del modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10].



Figura 6.4: Mapa de distribución de densidades para la sección transversal a -2 Km con respecto al nivel del mar, obtenido mediante los datos del modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10].



Figura 6.5: Mapa de distribución de densidades para la sección transversal a -4 *Km* con respecto al nivel del mar, obtenido mediante los datos del modelo 3-D de la tomografía sísmica del VG [10].

6.1.2 Perfiles Topográficos

Mediante la Figura 5.1 y las densidades que se calcularon para estos puntos, se obtuvo los siguientes perfiles topográficos.

En las Figuras 6.6 y 6.7, se muestran los perfiles topográficos que pasan por el cráter del VG en dirección EW y NS respectivamente.

Posteriormente en la Figura 6.8 y la Figura 6.9, se muestran los porcentajes de perturbación de los perfiles de densidad con respecto a cada una de las capas desde 4 hasta -10 Km que se mencionaron anteriormente.



Figura 6.6: Corte que atraviesa por el cráter del VG en dirección este (E) a oeste (W) obtenido mediante el mapa de curvas de nivel de la Figura 5.1.



Figura 6.7: Corte que atraviesa por el cráter del VG en dirección norte (N) a sur (S) obtenido mediante el mapa de curvas de nivel de la Figura 5.1.



Figura 6.8: Porcentajes de perturbación para el Perfil EW. Para realizar este mapa se utilizó una diferencia porcentual de este perfil con respecto al promedio de densidad de cada capa.



Figura 6.9: Porcentajes de perturbación para el Perfil NS. Para realizar este mapa se utilizó una diferencia porcentual de este perfil con respecto al promedio de densidad de cada capa.

6.1.3 Diferencias porcentuales entre capas

A continuación se muestra las diferencias porcentuales entre capa y capa, es decir la Figura 6.10 muestra la diferencia porcentual entre la capa de 4 Km y la capa de 2 Km, así sucesivamente para las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13. Estas imágenes se las graficó en ROOT [34].



Figura 6.10: Diferencia porcentual entre la capa de 4Km y la capa de 2Km.



Figura 6.11: Diferencia porcentual entre la capa de 2Km y la capa de 0Km.



Figura 6.12: Diferencia porcentual entre la capa de 0Km y la capa de -2Km.



Figura 6.13: Diferencia porcentual entre la capa de -2Km y la capa de -4Km.

6.2 Resultados mediante Gravimetría

Mediante los datos de densidades obtenidos de la Figura 2.7 [9] con el programa Geosoft [33] y las coordenadas geográficas para cada uno de los puntos, se obtuvo la Figura 6.14 que muestra el mapa de distribución de densidad para la misma región con la que se trabajó para las figuras anteriores.



Figura 6.14: Mapa de distribución de densidad derivado a partir del mapa de anomalías gravimétricas residuales del VG. La cruz en el mapa indica el cráter del VG.

6.3 Análisis

A continuación, en la Tabla 6.1 se muestran los rangos de densidades encontrados para cada una de las elevaciones del VG mediante el método de tomografía sísmica [10] y para el mapa de densidades obtenido mediante el método gravimétrico [10].

	Densidad	Densidad	Densidad	
Zonas	(Límite inferior)	(Límite superior)	promedio de la capa	
	g/cm^3	g/cm^3	g/cm^3	
En la capa de 4 Km	2.19	2.32	2.26	
En la capa de 2 Km	2.16	2.28	2.24	
En la capa de 0 Km	2.32	2.44	2.37	
En la capa de -2 Km	2.42	2.45	2.44	
En la capa de -4 Km	2.49	2.52	2.50	
Mapa con gravimetría residual	2.16	2.72	2.39	

Cuadro 6.1: Densidades límites y promedios que se obtuvieron en la zona de análisis del VG observadas en las Figuras 6.1 hasta 6.14.

De la capa con elevación de 4 Km se observa que en la zona del cráter predomina una densidad promedio de 2.26 g/cm^3 que puede deberse a materiales poco consolidados y con cierto grado de fracturamiento y alteración debido a los gases a los que están expuestos. Esta primera capa de la cual hace parte el cráter del VG, tiene un espacio muy reducido y obedece más a una distribución de anomalías debido a que en esta capa se presentan fracturamientos, además cuando hay erupciones se presenta caída de materiales que pueden alterar la densidad en esta zona.

En la capa de 2 Km hay una mayor diferencia de densidades que va desde 2.16 hasta 2.28 g/cm^3 . Dentro de esta capa, la zona de más bajas densidades se encuentra hacia el NW (Noreste), y hay una zona de más altas densidades hacia el E (Este). En la zona del cráter se sigue observando una densidad promedio de 2.3 g/cm^3 aproximadamente.

En la capa de 0 Km se observa que las densidades son mayores que en las capas anteriores. Hacia el NE (Noreste) se ve una zona de altas densidades y hacia el S (Sur) una zona con densidades más bajas. La diferencia de densidades en la capa de $-2 \ Km$ es menor que en las anteriores, pero presenta densidades más altas. Dentro de esta capa, las densidades más altas se encuentran en la zona del cráter y el NE del mapa, y densidades un poco más bajas en una zona al SE (Sureste) y otra zona al NW (Noroeste).

La diferencia más pequeña de densidades en comparación con las anteriores capas, se encuentra a los -4 Km. En esta capa hay una zona de altas densidades hacia el S y densidades un poco más bajas hacia el E. En general, en esta capa se tiene densidades altas.

A medida que se avanza a profundidad en las capas, se observa que la diferencia de densidades dentro de la capa es menor, pero también se puede apreciar que a mayor profundidad, las densidades son más altas. Una posible explicación es que a mayor profundidades se encuentran mayormente compactados y consolidados debido a que la carga litostática sobreyaciente. Adicionalmente los materiales están menos expuestos a fenómenos de intemperismo o meteorización teniendo menor grado de alteración debido a que esta capa presenta una dinámica más compleja debido a los procesos de intemperismo y está la región del cráter que es el foco de erupciones por lo cual las densidades en esta zona están altamente perturbadas.

De acuerdo con las densidades mínima y máxima obtenidas y comparando con los valores de las tablas 4.1 y 4.2, se puede apreciar que existen varios minerales y rocas que se encuentran en el mismo rango como lo son el grafito, el yeso, hálito, caolinita, clorita, cuarzo, feldespato, andesita, calcita, basalto y talco. Teniendo en cuenta que el volcán Galeras es andesítico, algunos de estos minerales y rocas no corresponden al ambiente que se está estudiando, los que si están dentro del ambiente volcánico del VG son el feldespato que es un silicato de alumino y es el mineral más abundante en la corteza terrestre, el cuarzo que destaca por su dureza y resistencia a la meteorización en la superficie terrestre, la andesita que contiene de 52 a 66 % de sílice en el caso de Galeras, el basalto que está estrechamente relacionado

con las andesitas y conectado a ellas por formas de transición y son rocas volcánicas muy corrientes formadas por la cristalización rápida de corrientes de lava másica.

Mediante el método de gravimetría se tiene que las densidades varían de 2.16 hasta 2.72 g/cm^3 , con una densidad promedio de 2.39 g/cm^3 . La densidad mínima por medio de este método concuerda con la encontrada en la tomografía sísmica, y la densidad máxima es mayor en el mapa de densidades obtenidas por gravimetría, lo cual puede ser debido a la manera de la toma de datos de este método que consiste en recorrer todo el terreno. Por otra parte se puede observar que en este mapa predominan las densidades bajas que ocupan la mayor parte de la zona de estudio, esto puede deberse a que existan cuerpos jóvenes geológicamente hablando, alterados y poco consolidados.

Si se considera el apilamiento de las secciones que muestran la distribución de densidades y se compara con el mapa de distribución de densidades derivado a partir del mapa de anomalías gravimétricas residuales del VG que se muestra en la Figura 6.15, se observa una cierta correspondencia que permite validar los modelos de gravimetría y tomografía sísmica con las densidades encontradas. En el mapa obtenido con el método gravimétrico (Figura a), se identifica bajas densidades hacia el N, NW y SE del cráter del volcán Galeras que podría estar en concordancia con las bajas densidades observadas hacia el NW en los niveles de 2 y -2 Km, al S en el nivel de 0 Km y al SE en el nivel de -2 Km. Por otra parte en dirección SW con respecto al cráter, se presentan dos zonas con altas densidades que podría corresponderse con las regiones de altas densidades observada en esa dirección en el nivel de los -2 Km.



Figura 6.15: Comparación entre el mapa de densidades obtenido por medio del método de gravimetría y las densidades de las capas 2, 0 y -2 Km derivadas de la tomografía de velocidades de onda P.

En el perfil EW que pasa por el cráter (Figura 6.6), se puede apreciar que la densidad aumenta a medida que se avanza en profundidad del VG, lo cual es coherente con respecto a las capas mencionadas anteriormente. En la zona de los 2 Km se observan las densidades bajas hacia el W, siendo las menores densidades encontradas en el VG. Además, en la zona de los 0 Km,

se puede ver hacia el E densidades más altas. Lo anterior concuerdan con las densidades que se encuentan en las capas mencionadas. En general en este perfil EW, cada capa tiene densidades casi constantes, exceptuando los primeros kilómetros donde se ven más cambios en las densidades.

El perfil NS que pasa por el cráter (Figura 6.7), es coherente con el perfil EW ya que nuevamente a medida que se avanza en profundidad, la densidad aumenta. En las capas, la densidad se mantiene casi constante, excepto que a los 2 Km hacia el N se ven las densidades más bajas lo cual corresponde a las densidades bajas observadas en esta capa.

Por otra parte, los porcentajes de perturbación, se realizaron con respecto a la densidad promedio de cada una de las capas. En la gráfica de porcentajes del perfil EW (Figura 6.8), se observan cambios más significativos en las zonas de 2 Km y 0 Km, que es lo mismo que se puede observar en cada una de estas capas. En la zona del cráter a los 4 Km también se pueden apreciar diferencias porcentuales pero se debe tener en cuenta que en esta capa se tiene muy poca información.

En los porcentajes de perturbación para el perfil NS (Figura 6.9), solamente es posible observar pequeños cambios porcentuales en la zona de los 2 Km. En ambas gráficas de los porcentajes de los perfiles que pasan por el cráter, se ven grandes espacios sin información, esto se debe a que no hay un detallado más fino y hay ausencia de empalme.



Figura 6.16: Comparación entre los porcentajes de perturbación obtenidos en el perfil EW y las densidades de las capas 2, 0 y -2 *Km* derivadas de la tomografía de velocidades de onda P.



Figura 6.17: Comparación entre los porcentajes de perturbación obtenidos en el perfil NS y las densidades de las capas 2, 0 y -2 *Km* derivadas de la tomografía de velocidades de onda P.

En las gráficas de diferencias porcentuales entre capas(Figuras 6.10 hasta 6.13), se puede ver que las diferencias de densidad más marcadas se encuentran en el área que está entre los 2Km y los 0 Km, ya que su diferencia porcentual máxima es de 9%. En este resultado también puede influir el hecho de que estas son las zonas más comparables dentro de las

regiones tomadas en la tomografía sísmica de Galeras debido a su ubicación y a que hay una mayor concentración de sismicidad, lo que hace que haya más cantidad de información.

Por otra parte, el área de 4 Km es un área muy reducida, por lo cual en esta zona, la solución tomográfica puede restringir una diferenciación marcada de densidades.

Desde las capa de 0 Km hacia abajo, existe un mayor grado de aislamiento de la superficie, en estas capas los fenómenos acuíferos tienen un tiempo diferente que el que se presenta en las capas superiores. A medida que se avanza en profundidad, existe un mayor grado de compactación y consolidación. Además, la resolución en profundidad, cada vez es menor debido a que la solución tomográfica a partir de la información sísmica no tiene muchos sismos en profundidades grandes.

Capítulo 7

Conclusiones

Se realizó un estudio de las densidades presentes en el CVG mediante estudios geológicos y datos ya existentes de dos métodos geofísicos como lo son la tomografía sísmica y la gravimetría realizados por en el Servicio Geológico Colombiano para el volcán Galeras [10, 9]. Esto dió una idea de cómo es el comportamiento de las densidades del VG a sus diferentes profundidades.

Se encontró mediante los datos proporcionados por el método de la tomografía sísmica, que las densidades varían entre 2.16 y 2.6 g/cm^3 y mediante los datos analizados por gravimetría, las densidades varían entre 2.16 y 2.7 g/cm^3 .En los resultados obtenidos se encontró que en general, el VG presenta densidades bajas que se relacionan con cuerpos relativamente jóvenes poco consolidados y compactados. A medida que se avanza en profundidad, se observa que las densidades son mayores, que pueden corresponder con depósitos volcánicos más antiguos, con mayor compactación y consolidación. Lo anterior concuerda con lo encontrado en los trabajos de tomografía sísmica y gravimetría donde se tiene en general bajas velocidades y bajos gravimétricos respectivamente que corresponden a bajas densidades.

Al considerar el apilamiento de las secciones que muestran la distribución de densidades y se compara con el mapa de distribución de densidades derivado a partir del mapa de anomalías gravimétricas residuales del VG que se muestra en la Figura 6.15, se observa una cierta correspondencia que permite validar los modelos de gravimetría y tomografía sísmica con las densidades encontradas.

Además se encontró que el mayor porcentaje de variación de densidades se encuentra entre

las capas de 2 y 0 Km teniendo una variación porcentual máxima del 9% en esta zona, lo cual puede ser información relevante para la tomografía por muones. Por otra parte, el área de 4 Km es un área muy reducida, por lo cual en esta zona, la solución tomográfica se puede restringir y no verse una diferenciación marcada de densidades. Desde las capa de 0 Km hacia abajo, existe un mayor grado de aislamiento de la superficie y en estas capas los fenómenos acuíferos manejan un tiempo diferente que en las capas superiores por lo cual en esta zona, los materiales tienen un mayor grado de compactación y consolidación. Además, la resolución en profundidad, cada vez es menor debido a que la solución tomográfica a partir de la información sísmica presenta menor sismicidad a profundidades grandes.

Apéndice A

Datos de densidades a diferentes profundidades

A continuación se muestran las densidades calculadas mediante las velocidades de onda P que proporciona la tomografía sísmica del VG [10], desde los 4Km hasta los -4Km de elevación.

Coordenadas geográficas (°)		Dei	Densidades $ ho$ en g/cm^3 para cada capa			apa
Longitud	Latitud	4 Km	2 Km	0 Km	-2 Km	-4 Km
-77.44886	1.31142	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43089	1.31143	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41292	1.31143	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.39495	1.31143	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.37698	1.31143	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.35901	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.34104	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.32307	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.30510	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28713	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26916	1.31144	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44886	1.29334	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43089	1.29334	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41292	1.29334	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.39495	1.29334	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186

-77.37698	1.29335	2.25515	2.24505	2.36765	2.43402	2.50186
-77.35901	1.29335	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.34104	1.29335	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.32307	1.29335	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.30510	1.29335	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28712	1.29336	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26915	1.29336	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44886	1.27525	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43089	1.27525	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41292	1.27525	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.39495	1.27526	2.25515	2.24505	2.36837	2.43470	2.50186
-77.37698	1.27526	2.25515	2.25307	2.37342	2.43539	2.50114
-77.35901	1.27526	2.25515	2.24505	2.36698	2.43263	2.50186
-77.34104	1.27526	2.25515	2.24505	2.36767	2.43541	2.50186
-77.32306	1.27526	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50259
-77.30509	1.27527	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28712	1.27527	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26915	1.27527	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44886	1.25716	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43088	1.25717	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41291	1.25717	2.25515	2.24606	2.36837	2.43470	2.50114
-77.39494	1.25717	2.25610	2.24395	2.35738	2.42789	2.50257
-77.37697	1.25717	2.28636	2.27611	2.34755	2.43470	2.50257
-77.35900	1.25717	2.26685	2.27821	2.37429	2.43043	2.50331
-77.34103	1.25718	2.24104	2.22182	2.36776	2.43331	2.49596
-77.32306	1.25718	2.24816	2.24086	2.36104	2.43543	2.50116
-77.30509	1.25718	2.25515	2.24505	2.36543	2.43053	2.50186
-77.28712	1.25718	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186

-77.26915	1.25718	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44885	1.23908	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43088	1.23908	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41291	1.23908	2.25515	2.24606	2.37199	2.43533	2.49893
-77.39494	1.23908	2.25613	2.24606	2.36475	2.42783	2.49824
-77.37697	1.23909	2.23484	2.20521	2.35367	2.42789	2.50257
-77.35900	1.23909	2.19070	2.21056	2.37453	2.43741	2.49969
-77.34103	1.23909	2.25225	2.27473	2.43194	2.44973	2.50188
-77.32306	1.23909	2.24921	2.24098	2.37075	2.43886	2.50772
-77.30509	1.23909	2.25515	2.26671	2.36989	2.43333	2.50186
-77.28712	1.23909	2.25515	2.24810	2.36911	2.43539	2.50186
-77.26915	1.23910	2.25515	2.24609	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44885	1.22099	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50112
-77.43088	1.22099	2.25515	2.24505	2.36765	2.43331	2.50184
-77.41291	1.22099	2.25515	2.24505	2.36689	2.43668	2.50619
-77.39494	1.22100	2.24810	2.22918	2.35947	2.43192	2.49537
-77.37697	1.22100	2.26503	2.16321	2.37050	2.44575	2.50118
-77.35900	1.22100	2.31339	2.26584	2.36471	2.45103	2.50700
-77.34103	1.22100	2.25318	2.22949	2.42335	2.44432	2.50849
-77.32306	1.22100	2.25515	2.26084	2.40424	2.42851	2.50262
-77.30509	1.22101	2.25515	2.26951	2.36763	2.43124	2.50038
-77.28712	1.22101	2.25515	2.24813	2.36691	2.43400	2.50186
-77.26915	1.22101	2.25515	2.24712	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44885	1.20290	2.25515	2.24505	2.36839	2.43608	2.50259
-77.43088	1.20290	2.25515	2.24609	2.36839	2.43608	2.50479
-77.41291	1.20291	2.25515	2.24505	2.36691	2.43608	2.49746
-77.39494	1.20291	2.25515	2.24810	2.37777	2.44297	2.50116
-77.37697	1.20291	2.27244	2.26579	2.36258	2.43132	2.50112

-77.35900	1.20291	2.26593	2.25222	2.32083	2.44091	2.51438
-77.34103	1.20291	2.25515	2.23992	2.35945	2.42980	2.49967
-77.32306	1.20292	2.25515	2.24401	2.36178	2.42371	2.50268
-77.30509	1.20292	2.25515	2.24505	2.36545	2.43194	2.50186
-77.28712	1.20292	2.25515	2.24505	2.36765	2.43400	2.50186
-77.26915	1.20292	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44885	1.18482	2.25616	2.25021	2.37281	2.44025	2.50704
-77.43088	1.18482	2.25716	2.25327	2.37136	2.43608	2.50186
-77.41291	1.18482	2.25515	2.24712	2.36839	2.43608	2.50777
-77.39494	1.18482	2.25515	2.24505	2.37567	2.43956	2.51740
-77.37697	1.18482	2.25515	2.24398	2.36691	2.43483	2.49673
-77.35900	1.18483	2.25015	2.19892	2.37490	2.44232	2.49677
-77.34103	1.18483	2.25515	2.23141	2.36901	2.43335	2.49971
-77.32306	1.18483	2.25515	2.24505	2.36837	2.43468	2.50259
-77.30509	1.18483	2.25515	2.24505	2.36765	2.43402	2.50112
-77.28712	1.18483	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26915	1.18483	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44884	1.16673	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50112
-77.43087	1.16673	2.25515	2.24505	2.36617	2.42984	2.49525
-77.41290	1.16673	2.25515	2.24505	2.36320	2.42845	2.50112
-77.39493	1.16674	2.25515	2.24712	2.36913	2.42984	2.49383
-77.37696	1.16674	2.25515	2.24609	2.37063	2.43329	2.49967
-77.35899	1.16674	2.25315	2.24913	2.37706	2.44295	2.50405
-77.34102	1.16674	2.25515	2.24606	2.36983	2.43535	2.50333
-77.32305	1.16674	2.25515	2.24505	2.36765	2.43539	2.50407
-77.30509	1.16674	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28712	1.16675	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26915	1.16675	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44884	1.14864	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-----------	---------	---------	---------	---------	---------	---------
-77.43087	1.14864	2.25515	2.24505	2.36765	2.43400	2.49965
-77.41290	1.14865	2.25515	2.24401	2.36394	2.43261	2.50186
-77.39493	1.14865	2.25515	2.23874	2.36245	2.43331	2.49598
-77.37696	1.14865	2.25515	2.24505	2.36691	2.43400	2.50481
-77.35899	1.14865	2.25515	2.24505	2.36765	2.43539	2.50407
-77.34102	1.14865	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.32305	1.14866	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50259
-77.30508	1.14866	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28711	1.14866	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26914	1.14866	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.44884	1.13055	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.43087	1.13056	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.41290	1.13056	2.25515	2.24505	2.36765	2.43539	2.50407
-77.39493	1.13056	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.37696	1.13056	2.25515	2.24505	2.36765	2.43400	2.50188
-77.35899	1.13056	2.25515	2.24505	2.36767	2.43541	2.50114
-77.34102	1.13057	2.25515	2.24921	2.37283	2.43678	2.50038
-77.32305	1.13057	2.25515	2.24505	2.36765	2.43608	2.50186
-77.30508	1.13057	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.28711	1.13057	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186
-77.26914	1.13057	2.25515	2.24505	2.36765	2.43470	2.50186

Cuadro A.1: Densidades para diferentes elevaciones del VG.

Apéndice B

Datos del perfil EW y sus respectivas densidades

A continuación se muestran los datos obtenidos en el perfil EW que atraviesa el cráter del VG, con una latitud constante de 1.2211°.

Perfil EW					
Longitud (°)	Profundidad (Km)	$ ho (g/cm^3)$	Porcentaje de perturbación		
-77.4489	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.4309	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.4129	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.3949	4.0000	2.2481	-0.3176		
-77.3770	4.0000	2.2650	0.4333		
-77.3590	4.0000	2.3134	2.5777		
-77.3410	4.0000	2.2532	-0.0921		
-77.3231	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.3051	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.2871	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.2691	4.0000	2.2552	-0.0049		
-77.4489	2.0000	2.2450	0.0139		
-77.4309	2.0000	2.2450	0.0139		
-77.4129	2.0000	2.2450	0.0139		
-77.3949	2.0000	2.2292	-0.6932		

-77.3770	2.0000	2.1632	-3.6321
-77.3590	2.0000	2.2658	0.9403
-77.3410	2.0000	2.2295	-0.6794
-77.3231	2.0000	2.2608	0.7174
-77.3051	2.0000	2.2695	1.1035
-77.2871	2.0000	2.2481	0.1511
-77.2691	2.0000	2.2471	0.1064
-77.4489	0.0000	2.3677	-0.0337
-77.4309	0.0000	2.3677	-0.0337
-77.4129	0.0000	2.3669	-0.0658
-77.3949	0.0000	2.3595	-0.3792
-77.3770	0.0000	2.3705	0.0866
-77.3590	0.0000	2.3647	-0.1581
-77.3410	0.0000	2.4234	2.3180
-77.3231	0.0000	2.4042	1.5112
-77.3051	0.0000	2.3676	-0.0345
-77.2871	0.0000	2.3669	-0.0649
-77.2691	0.0000	2.3677	-0.0337
-77.4489	-2.0000	2.4347	-0.0077
-77.4309	-2.0000	2.4333	-0.0647
-77.4129	-2.0000	2.4367	0.0738
-77.3949	-2.0000	2.4319	-0.1217
-77.3770	-2.0000	2.4458	0.4465
-77.3590	-2.0000	2.4510	0.6632
-77.3410	-2.0000	2.4443	0.3877
-77.3231	-2.0000	2.4285	-0.2618
-77.3051	-2.0000	2.4312	-0.1494
-77.2871	-2.0000	2.4340	-0.0362

-77.2691	-2.0000	2.4347	-0.0077
-77.4489	-4.0000	2.5011	-0.0327
-77.4309	-4.0000	2.5018	-0.0041
-77.4129	-4.0000	2.5062	0.1701
-77.3949	-4.0000	2.4954	-0.2624
-77.3770	-4.0000	2.5012	-0.0302
-77.3590	-4.0000	2.5070	0.2024
-77.3410	-4.0000	2.5085	0.2619
-77.3231	-4.0000	2.5026	0.0271
-77.3051	-4.0000	2.5004	-0.0621
-77.2871	-4.0000	2.5019	-0.0032
-77.2691	-4.0000	2.5019	-0.0032
-77.4489	-6.0000	2.5019	-0.0028
-77.4309	-6.0000	2.5011	-0.0331
-77.4129	-6.0000	2.4997	-0.0903
-77.3949	-6.0000	2.5019	-0.0011
-77.3770	-6.0000	2.5041	0.0858
-77.3590	-6.0000	2.5033	0.0563
-77.3410	-6.0000	2.5033	0.0563
-77.3231	-6.0000	2.5019	-0.0028
-77.3051	-6.0000	2.5018	-0.0036
-77.2871	-6.0000	2.5019	-0.0028
-77.2691	-6.0000	2.5019	-0.0028
-77.4489	-8.0000	2.5822	-0.0349
-77.4309	-8.0000	2.5805	-0.1010
-77.4129	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.3949	-8.0000	2.5840	0.0315
-77.3770	-8.0000	2.5840	0.0315

-77.3590	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.3410	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.3231	-8.0000	2.5823	-0.0339
-77.3051	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.2871	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.2691	-8.0000	2.5831	-0.0017
-77.4489	-10.0000	2.5822	-0.0343
-77.4309	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.4129	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3949	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3770	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3590	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3410	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3231	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.3051	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.2871	-10.0000	2.5831	-0.0011
-77.2691	-10.0000	2.5822	-0.0343

Cuadro B.1: Datos del perfil EW con sus respectivas densidades y porcentajes de perturbación.

Apéndice C

Datos del perfil NS y sus respectivas densidades

A continuación se muestran los datos obtenidos en el perfil NS que atraviesa el cráter del VG, con una longitud constante de -77.3583°.

Perfil NS					
Latitud (°)	Profundidad (Km)	$ ho (g/cm^3)$	Porcentaje de perturbación		
1.3114	4.0000	2.2552	-0.0049		
1.2934	4.0000	2.2552	-0.0049		
1.2753	4.0000	2.2552	-0.0049		
1.2572	4.0000	2.2668	0.5137		
1.2391	4.0000	2.1907	-2.8628		
1.2210	4.0000	2.3134	2.5777		
1.2029	4.0000	2.2659	0.4729		
1.1848	4.0000	2.2502	-0.2265		
1.1667	4.0000	2.2532	-0.0934		
1.1486	4.0000	2.2552	-0.0049		
1.1306	4.0000	2.2552	-0.0049		
1.3114	2.0000	2.2450	0.0139		
1.2934	2.0000	2.2450	0.0139		
1.2753	2.0000	2.2450	0.0139		
1.2572	2.0000	2.2782	1.4914		

1.2391	2.0000	2.2106	-1.5224
1.2210	2.0000	2.2658	0.9403
1.2029	2.0000	2.2522	0.3336
1.1848	2.0000	2.1989	-2.0411
1.1667	2.0000	2.2491	0.1956
1.1486	2.0000	2.2450	0.0139
1.1306	2.0000	2.2450	0.0139
1.3114	0.0000	2.3677	-0.0337
1.2934	0.0000	2.3677	-0.0337
1.2753	0.0000	2.3670	-0.0623
1.2572	0.0000	2.3743	0.2466
1.2391	0.0000	2.3745	0.2565
1.2210	0.0000	2.3647	-0.1581
1.2029	0.0000	2.3208	-2.0105
1.1848	0.0000	2.3749	0.2722
1.1667	0.0000	2.3771	0.3637
1.1486	0.0000	2.3677	-0.0337
1.1306	0.0000	2.3677	-0.0328
1.3114	-2.0000	2.4347	-0.0077
1.2934	-2.0000	2.4347	-0.0077
1.2753	-2.0000	2.4326	-0.0924
1.2572	-2.0000	2.4304	-0.1827
1.2391	-2.0000	2.4374	0.1039
1.2210	-2.0000	2.4510	0.6632
1.2029	-2.0000	2.4409	0.2474
1.1848	-2.0000	2.4423	0.3053
1.1667	-2.0000	2.4430	0.3314
1.1486	-2.0000	2.4354	0.0208

1.1306	-2.0000	2.4354	0.0216
1.3114	-4.0000	2.5019	-0.0032
1.2934	-4.0000	2.5019	-0.0032
1.2753	-4.0000	2.5019	-0.0032
1.2572	-4.0000	2.5033	0.0550
1.2391	-4.0000	2.4997	-0.0899
1.2210	-4.0000	2.5070	0.2024
1.2029	-4.0000	2.5144	0.4973
1.1848	-4.0000	2.4968	-0.2064
1.1667	-4.0000	2.5041	0.0846
1.1486	-4.0000	2.5041	0.0854
1.1306	-4.0000	2.5011	-0.0319
1.3114	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.2934	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.2753	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.2572	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.2391	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.2210	-6.0000	2.5033	0.0563
1.2029	-6.0000	2.5048	0.1129
1.1848	-6.0000	2.5041	0.0850
1.1667	-6.0000	2.5004	-0.0617
1.1486	-6.0000	2.5026	0.0267
1.1306	-6.0000	2.5019	-0.0028
1.3114	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.2934	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.2753	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.2572	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.2391	-8.0000	2.5831	-0.0017

1.2210	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.2029	-8.0000	2.5839	0.0305
1.1848	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.1667	-8.0000	2.5840	0.0315
1.1486	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.1306	-8.0000	2.5831	-0.0017
1.3114	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2934	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2753	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2572	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2391	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2210	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.2029	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.1848	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.1667	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.1486	-10.0000	2.5831	-0.0011
1.1306	-10.0000	2.5831	-0.0011

Cuadro C.1: Datos del perfil NS con sus respectivas densidades y porcentajes de perturbación.

Apéndice D

Códigos de las gráficas realizadas en ROOT

```
// * GNU LESSER GENERAL PUBLIC LICENSE
// * Version 2.1, February 1999
// * Copyright (C) 1991, 1999 Free Software Foundation, Inc.
// * 51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA
// * Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies
// * of this license document, but changing it is not allowed.
// * [This is the first released version of the Lesser GPL.
// * It also counts as the successor of the GNU Library Public
// * License, version 2, hence the version number 2.1.]
//by Denis Torres
11
#include <string>
#include <fstream>
#include <iomanip>
#include <vector>
#include <map>
#include <algorithm>
#include <functional>
#include <cmath>
#include <iostream>
#include <sstream>
#include <utility>
#include <cstddef>
#include <limits>
#include <getopt.h>
using namespace std;
int main(int argc, char** argv)
{
 //string str2 (".dat");
if(argc == 1) {
  cout << "\n Usage: ./dataop [arguments] \n" << endl;</pre>
  exit(1);
 } /// End if()
```

```
for (int i = 1; i < argc-1; ++i)</pre>
{
double x, x1, y, y1, rho, rho1, difrho, rrho;
/*
ostringstream in;
ostringstream in1;
in "infile" << i;
in1 "infile" << i+1;</pre>
string infile = in.str();
string infile1 = in1.str();
*/
ifstream infile;
ifstream infile1;
infile.open (string(argv[i]));
infile1.open (string(argv[i+1]));
size_t found = string(argv[i]).find_last_of("."); //encuentra el ultimo "." de la cadena
size_t found1 = string(argv[i+1]).find_last_of("."); //encuentra el ultimo "." de la cadena
string g = string(argv[i]).substr(0,found); //elimina texto desde ultimo "." de la cadena
string gg = string(argv[i+1]).substr(0,found1); //elimina texto desde ultimo "." de la cadena
ostringstream s;
s << "(" << g << ")" << "-" << "(" << gg << ")" << ".dat";</pre>
string output = s.str();
//cout << found << "\t"<< g << "\t" << found1<< "\t"<< gg << endl;
cout << output << endl;</pre>
ofstream fs(output);
    while(!infile.eof()) // To get you all the lines.
    {
       infile >> x >> y >> rho; //poner todas las columnas del archivo a operar
       infile1 >> x1 >> y1 >> rho1;
       rrho= abs((rho - rho1));
       difrho= abs((rho - rho1)/rho)*100;
       if(!infile.eof())
            fs << x << "\t\t" << y << "\t\t" << difrho << "\t\t" << endl;
       }
infile.close();
infile1.close();
fs.close();
}
```

```
return 0;
}
```

```
// * GNU LESSER GENERAL PUBLIC LICENSE
// * Version 2.1, February 1999
// * Copyright (C) 1991, 1999 Free Software Foundation, Inc.
// * 51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA
// * Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies
// * of this license document, but changing it is not allowed.
// \ast [This is the first released version of the Lesser GPL.
// * It also counts as the successor of the GNU Library Public
// * License, version 2, hence the version number 2.1.]
//by Denis Torres
11
#include "Riostream.h"
#include <string>
#include <fstream>
#include <iostream>
#include <sstream>
using namespace std;
#include "TF1.h"
#include "TH1D.h"
#include "TH2D.h"
#include "TFile.h"
#include "TGraph2D.h"
#include "TCanvas.h"
#include "TLegend.h"
#include "TProfile.h"
int main(int argc, char **argv) {
if(argc == 1) {
  cout << "\n Usage: ./basic [arguments] \n" << endl;</pre>
  exit(1);
  }
  TGraph2D *difden[argc];
  TGraph2D *pden[argc];
  TH2D *h[argc];
  TH2D *h1[argc];
 for (int i = 1; i < argc; ++i)
   {
   ifstream infile;
   infile.open (string(argv[i]));
   size_t found = string(argv[i]).find_last_of("."); //encuentra el ultimo "." de la cadena
```

```
string g = string(argv[i]).substr(0,found); //elimina texto desde ultimo "." de la cadena
   difden[i] = new TGraph2D(Form("%s",string(argv[i]).c_str()),"%lg %lg %lg %lg");
   h[i] = difden[i]->GetHistogram();
  h[i]->SetContour(86);
  h[i]->SetTitle(Form("difden_%s",g.c_str()));
   h[i]->Draw("cont4z");
   gPad->SaveAs(Form("difden_%.pdf",g.c_str()));
   pden[i] = new TGraph2D(Form("%",string(argv[i]).c_str()),"%lg %lg %lg %lg");
   h1[i] = pden[i]->GetHistogram();
  h1[i]->SetContour(86);
  h1[i]->SetTitle(Form("pden_%",g.c_str()));
  h1[i]->Draw("cont4z");
   gPad->SaveAs(Form("pden_%.pdf",g.c_str()));
  infile.close();
}
}
```

Bibliografía

- Murcia, A., y Cepeda, H. 1991b. Mapa geológico de la Plancha 429 Pasto; Escala 1:100.000. INGEOMINAS.
- [2] Calvache, V., M.L. 1995. The geological evolution of Galeras Volcanic Complex. Ph.D. Dissertation. Arizona State. University. 144p.
- [3] Meissner, R., 1977. Dinámica del límite de placas activo en el SW de Colombia, de acuerdo a recientes mediciones geofísicas. En: proyecto Corporativo Internacional Nariño, "La transición océano –continente en el suroeste de Colombia", p 169- 199.
- [4] Hurukawa, N., 2009. Local Earthquake analysis. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute. 3-9.
- [5] CALVACHE, M. L.; CORTES, G. P. 1996. Estratigrafía del Complejo Volcánico del Galeras. 7 Congr. Col. Geol. Bogotá
- [6] Calvache, M. L.; Cortés, G. P.; Williams, S. N. 1997. Stratigraphy and chronology of the Galeras Volcanic Complex, Colombia. Jour. Volc. Geotherm. Research, 77:5-19.
- [7] Calvache, V., M.L. 1990. Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras volcano, Colombia. Ms.S. Louisiana State University. Arizona. 171p.
- [8] Cepeda, H. 1985. Anotaciones acerca de la geología del volcán Galeras, Colombia, S.A.6 Congr. Latinoame. Geol., (1):339-383. Bogotá.
- [9] Ortega, A.M. 2014. Modelo de fuentes de anomalías gravimétricas regionales y locales del Volcán Galeras. Tesis de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia.
- [10] Torres, R. 2012. Modelo 3-D del Volcán Galeras utilizando Tomografía Sísmica. Tesis de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia.

- [11] Geant4 Developments and Applications, J. ALLISON ET AL, IEEE Transactions on Nuclear Science 53 No. 1, (2006) 270-278.
- [12] Brocher, T., 2005. Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust. Bull. Seism. Soc. Amer., 95, No.6, 2081–2092
- [13] SURFER, Golden Software, Surfer versión 15.1.285, http://www.goldensoftware.com/products/surfer/
- [14] Nafe, J.E. and Drake, C.L., 1957. Variation with depth in shallow and deep water marine sediments of porosity density and the velocities of compressional and shear waves: Geophysics, v. 22
- [15] Mc Donald, L., 2010. Th estructure of earth, prime science.
- [16] Reynolds, S., Johnson, J., 2016, Exploring Earth Science. 2nd ed. Needham, Massachusetts
- [17] Densidades de rocas comunes y minerales, https://www.thoughtco.com/densities-ofcommon-rocks-and-minerals-1439119
- [18] Muongrafía, http://halley.uis.edu.co/fuego/que-es-la-muongrafia/
- [19] Tavernier, S., Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics, cap 2
- [20] Ludwig, W.J., Nafe, J.E. and Drake, C.L., 1970. Seismic Refraction, the Sea. Vol. 4 (Part 1), Wiley-Interscience, New York
- [21] Torres C., R.A., 1990. Parámetros cinemáticos de sismos de Alta Frecuencia en el Volcán Galeras. Informe interno, INGEOMINAS, Pasto, 24 p.
- [22] Christensen, N. I., and W. D. Mooney (1995), Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view, J. Geophys. Res., 100, 9761-9788.
- [23] Nur, A., Mavko, G. and Galmudi, D., 1998. Critical porosity: A key to relating physical properties to porosity in rocks. The Leading Edge: 357-362.

- [24] Christensen, N. I., Elasticity of ultrabasic rocks, Journal of Geophysical Research, 71, 5921 - 5931, 1966.
- [25] Estructura interna de la tierra, https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Planeta/Geologia-Fisica.html
- [26] Telford, W., Geldart, L, P., Sheriff, R., Keys. 1976. Applied Geophysics. Cambridge University Pres, Gran Bretaña. Segunda Edición. P, 6-100.
- [27] Nettleton, L. L., 1976. Gravity and Magnetics in Oil Prospecting. McGraw Hill, International Series in The Earth and Planetary Sciences. 453 p
- [28] Dobrin, M. 1976. Introduction to geophysical prospecting. McGraw-Hill Book Company. United Stated of American. 630 p.
- [29] Reynolds, J. M. 1997. An Introduction to applied environmental geophysics. Jhon Wiley and Sons Ltda. England. 796 p.
- [30] Seigel, H. O. 1995. A guide to a high precision land gravimeter survey. Scintex Limited. Canada. 122 p.
- [31] Servicio Geológico Colombiano- OVSP, https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/geoamenazas/Paginas/OVS-Pasto.aspx
- [32] Narvaez, L. 2014. Modelo de fuentes de anomalías Geomagnéticas de Campo Total asociadas al estado de la cámara magmática del volcán Galeras. Tesis de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia.
- [33] Software Geosoft, http://www.geosoft.com/
- [34] Rene Brun and Fons Rademakers, ROOT An Object Oriented Data Analysis Framework, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res.A 389 (1997) 81-86. http://root.cern.ch/.

[35] Torres, R. 2006. Parámetros elastomecánicos a partir de la propagación de ondas sísmicas de eventos volcanotectónicos en la región del Volcán Galeras. Trabajo de Maestría en Geofísica. Universidad Nacional de Colombia.