



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Estudio para la definición de posibles áreas de explotación de materiales pétreos de sectores poblados de Santa Cruz, Galápagos”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

Luiggy Adrian Muzzio Aroca

Jonathan Ignacio Piedra Guerrero

GUAYAQUIL – ECUADOR

2018

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres por su sacrificio y amor incondicional durante toda mi vida, sus esfuerzos fueron necesarios para que yo cumpla mis metas.

A mi familia y amigos cercanos que hicieron todo este largo camino posible.

En especial a mi tío Galo Estupiñán, quién lamentablemente nos abandonó al inicio de este año pero que siempre creyó en mí y quiso verme graduado. Su ejemplo siempre estará conmigo y de seguro se sentiría orgulloso exclamando “¡Ese es mi sobrino!”.

Luiggy Muzzio A.

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis amigos cercanos: Adrián, Michel, Alejandra, Jessica y Denisse quiénes han sido un gran apoyo emocional.

A los miembros de mi familia: papá, mamá, abuela y tía, quienes sin cuestionar cada uno de mis pasos me han apoyado en todas y cada una de las decisiones que he tomado. A mi abuelo Carlos Piedra quien hubiese estado orgulloso de mi.

A Snatch, quien seguramente sigue cuidando de mí.

A Gary por su paciencia y ayuda.

Jonathan Piedra G.

AGRADECIMIENTOS

Ha sido un largo y cansado camino en el desarrollo de nuestro proyecto de tesis, la cual no hubiésemos podido finalizar sin ayuda de personas fundamentales y de las que estamos totalmente agradecidos como:

Nuestro tutor Maurizio Mulas que en su tiempo limitado siempre estuvo dispuesto a guiarnos, corregirnos y tener disponibilidad de ayudar durante todo el proceso.

Ing. Erwin Larreta e Ing. David Altamirano, los cuales aún sin tener ninguna obligación con nosotros, estuvieron dispuestos a ayudarnos en momentos de dudas, proporcionarnos información y posibles metodologías para el alcance de los objetivos planteados.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Luigy Adrian Muzzio Arroca* y *Jonathan Ignacio Piedra Guerrero* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Luigy Muzzio Aroca

Jonathan Piedra
Guerrero

EVALUADORES

Daniel Garcés León

PROFESOR DE LA MATERIA

Maurizio Mulas

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Galápagos está constituido del 96.7% de área protegida y 3.3% de zona colonizada. Las leyes que permiten la conservación del Patrimonio Natural de la Humanidad (PNH) dificultan la extracción de material pétreo e imposibilitan el transporte de materiales de construcción desde zonas continentales. Este problema genera la necesidad de buscar áreas dentro de las zonas pobladas, en las que se pueda explotar recursos de forma responsable, sin afectar drásticamente el ambiente y cumpliendo con el crecimiento de la demanda. El presente trabajo tiene como objetivo identificar posibles recursos de material pétreo en las zonas pobladas de la Isla Santa Cruz.

Los datos de entrada fueron curvas de nivel cada 20 m con el que se creó un DEM resolución 20x20. Los criterios y métodos fueron: pendientes de Mouginiis, caracterización geomorfológica de Rodríguez y Fernández, cálculo de volumen por tres software distintos (GIS, Surfer, AutoCAD Civil 3D).

Se obtuvo un mapa de pendientes, perfiles topográficos, volumen con margen de error de cada cono. Los resultados en conjunto generaron un mapa de recursos y un posible plan de explotación de los cinco conos más grandes.

Finalmente, se identificó 18 geofformas monogenéticas: 14 eran conos volcánicos con volúmenes entre 6 000,000 m³ y 16 000,000 m³, y errores relativos entre 0.31% y 2.27% en resolución 20x20. El error no varía significativamente al cambiar a resolución 10x10 en los cinco conos más grandes (0.51% a 2.68%) y al comparar las dos resoluciones la variabilidad de los datos se encontró entre 0.14% y 2.23%.

Palabras Clave: Conos, volumen, resolución, recurso.

ABSTRACT

Galápagos is constituted of 96.7% of protected area and 3.3% of colonized zone. Laws that allow the conservation of the Natural Heritage of Humanity (HNP) make difficult the extraction of stony material and make it impossible to transport construction materials from continental areas. This problem generates the need to look for areas within populated areas, in which resources can be exploited responsibly, without drastically affecting the environment and meeting the growth of demand. The objective of this work is to identify possible resources of stony material in the populated areas of Santa Cruz Island.

Input data was contour lines each 20 m with which it was created a 20x20 DEM resolution. The criteria and methods were: pending of Mouginis, geomorphological characterization of Rodríguez and Fernández, calculation of volume by three different software (GIS, Surfer, Civil 3D).

A slope map, topographic profiles, volume with margin of error of each cone was obtained. The results together generated a map of resources and a possible exploitation plan for the five largest cones.

Finally, 18 monogenetic geoforms were identified: 14 were volcanic cones with volumes between 6,000,000 m³ and 16,000,000 m³, and relative errors between 0.31% and 2.27% in 20x20 resolution. The error does not change significantly when changing to 10x10 resolution in the five largest cones (0.51% to 2.68%) and when comparing the two resolutions the variability of the data was found between 0.14% and 2.23%.

Keywords: Cones, volume, resolution, resource.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT..... | II |
| ÍNDICE GENERAL..... | III |
| ABREVIATURAS..... | V |
| SIMBOLOGÍA | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VII |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | VIII |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA | 3 |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... | 3 |
| 1.3. ZONA DE ESTUDIO..... | 4 |
| 1.4. OBJETIVOS..... | 6 |
| 1.4.1. <i>Objetivo General</i> | 6 |
| 1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> | 6 |
| 1.5. MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 1.5.1. <i>Tectónica y Geodinámica</i> | 7 |
| 1.5.2. <i>Geología de la Isla Santa Cruz</i> | 15 |
| 1.5.3. <i>Geomorfología</i> | 19 |
| 1.5.4. <i>Propiedades mecánicas</i> | 21 |
| 1.6. MARCO LEGAL..... | 22 |
| 1.6.1. <i>Constitución Política de la República del Ecuador</i> | 22 |
| 1.6.2. <i>Leyes</i> | 23 |
| 1.6.3. <i>Reglamentos</i> | 24 |
| CAPÍTULO 2..... | 25 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 26 |
| 2.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DE LOS CONOS | 26 |
| 2.2 CRITERIO PARA CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA | 28 |
| 2.3 CÁLCULO DE VOLUMEN | 28 |
| 2.3.1. <i>Surfer</i> | 29 |
| 2.3.2. <i>GIS</i> | 30 |
| 2.3.3. <i>AutoCAD Civil 3D</i> | 31 |
| CAPÍTULO 3 | 33 |
| 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 34 |
| 3.1 MAPA DE PENDIENTES..... | 34 |
| 3.2 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA..... | 35 |
| 3.3 CÁLCULO DE VOLÚMENES | 39 |
| 3.3.1. <i>Análisis de metodología y valores obtenidos</i> | 39 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.2. Valores de los volúmenes obtenidos | 41 |
| 3.3.3. Volúmenes obtenidos de las minas en funcionamiento | 49 |
| 3.3.4. Cálculo de volumen a una resolución 10x10 | 49 |
| CAPÍTULO 4 | 52 |
| 4. POSIBLE PLANIFICACIÓN DE EXPLOTACIÓN | 53 |
| CAPÍTULO 5 | 57 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 58 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 58 |
| 5.2. RECOMENDACIONES | 59 |
| BIBLIOGRAFÍA | 60 |

ABREVIATURAS

| | |
|--------|---|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| GADMSC | Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Santa Cruz |
| PNG | Parque Nacional Galápagos |
| PNH | Patrimonio Natural de la Humanidad |
| SIG | Sistemas de Información Geográfica |
| DEM | Modelo Digital del Terreno |
| PFZ | Zona de Fractura de Panamá |
| IFZ | Zona de Fractura Inca |
| N | Norte |
| S | Sur |
| E | Este |
| W | Oeste |
| SC | Spatter/Scoria Cone |
| TC | Tuff Cone |
| DE | Desviación Estándar |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------|-------------------------------|
| m.a. | Miles de años |
| M.a. | Millones de años |
| m | Metro |
| msnm | Metros sobre el nivel del mar |
| km | Kilómetro |
| cm | Centímetro |
| mm | Milímetro |
| He | Helio |
| Fe | Hierro |
| Ni | Níquel |
| Ca | Calcio |
| Mn | Manganeso |
| Sr | Estroncio |
| Nb | Niobio |
| ° | Grado Sexagesimal |
| °C | Grados Celsius |
| ± | Más - menos |
| ~ | Aproximadamente |
| art. | Artículo |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1.1: ZONA DE ESTUDIO..... | 5 |
| FIGURA 1.2: UBICACIÓN DE LAS MINAS GRANILLO ROJO Y GRANILLO NEGRO..... | 6 |
| FIGURA 1.3: INTERACCIÓN DE LAS PLACAS COCOS (1), NAZCA (2) Y PACÍFICO (3) EN GALÁPAGOS INDICANDO EL PUNTO DE UNIÓN TRIPLE. [GRIMALDI, 2017]..... | 8 |
| FIGURA 1.4: EVOLUCIÓN GEOTECTÓNICA DE GALÁPAGOS EN LOS ÚLTIMOS 20 MA. [SALLARÈS Y CHARVIS, 2003] | 10 |
| FIGURA 1.5: CREACIÓN DE VOLCANES POR HOTSPOT, EL CUAL PERMANECE FIJO. [BROWN, 2009]..... | 12 |
| FIGURA 1.6: ETAPA JUVENIL DE UN VOLCÁN DE GALÁPAGOS, UBICADO A UN BORDE DEL HOTSPOT. [GEIST Y OTROS, 2014]..... | 13 |
| FIGURA 1.7: ETAPA INTERMEDIA DE UN VOLCÁN RESPECTO A SU UBICACIÓN POR ENCIMA DEL HOTSPOT. [GEIST Y OTROS, 2014]..... | 14 |
| FIGURA 1.8: ETAPA DE MADUREZ O INACTIVIDAD DE UN VOLCÁN EN GALÁPAGOS. [GEIST Y OTROS, 2014] | 15 |
| FIGURA 1.9: VARIABILIDAD ISOTÓPICA EN SANTA CRUZ RESPECTO A MAGMA PRIMARIO. [VIDITO Y OTROS, 2013]..... | 16 |
| FIGURA 1.10: MAPA DE FUENTE LITOLÓGICA EN LA PLUMA DE GALÁPAGOS. [VIDITO Y OTROS, 2013]..... | 17 |
| FIGURA 1.11: EJEMPLOS DE CONOS MONOGENÉTICOS EN LA ISLA FLOREANA, GALÁPAGOS. [BERNARD, 2017]..... | 20 |
| FIGURA 1.12: VOLCÁN FERNANDINA COMO EJEMPLO DE VOLCÁN ESCUDO EN LAS ISLAS GALÁPAGOS. [PUTNEY, 2006] | 21 |
| FIGURA 2.1: DATOS DE ENTRADA Y DATOS DE SALIDA. | 27 |
| FIGURA 2.2. PRINCIPALES CONOS MONOGENÉTICOS. | 28 |
| FIGURA 2.3: POLÍGONO QUE DELIMITA LA BASE DE CÁLCULO DE VOLUMEN EN SURFER. | 30 |
| FIGURA 2.4: ELIMINACIÓN DE PUNTOS QUE NO SE CONSIDERAN PERTENECIENTES A LA SUPERFICIE, CIERRE DEL POLÍGONO E INTERPOLACIÓN EN FORMATO TIN. | 31 |
| FIGURA 2.5: REPRESENTACIÓN DE UN CONO EN AUTOCAD CIVIL 3D DONDE (1) SON LAS CURVAS DE NIVEL DEL CONO, (2) SUPERFICIE BASE, (3) SUPERFICIE TECHO Y (4) INTERPOLACIÓN QUE DA COMO RESULTADO UN MODELAMIENTO EN 3D. | 32 |
| FIGURA 3.1: CONOS QUE PERTENECEN A LA ZONA DE ESTUDIO. | 35 |
| FIGURA 3.2: MAPA DE POSIBLES RECURSOS..... | 48 |
| FIGURA 3.3: MAPA DE RELIEVE DE LA ZONA DE ESTUDIO: (A) DESDE UN DEM 20X20 Y (B) DESDE UN DEM 10X10. | 50 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1.1: COMPARACIÓN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE HORMIGÓN CON AGREGADOS VOLCÁNICOS Y HORMIGÓN CON AGREGADOS CONVENCIONALES. [REVELO, 2016]..... | 22 |
| TABLA 1.2: COMPARACIÓN DE DENSIDAD DE HORMIGÓN CON AGREGADOS VOLCÁNICOS Y HORMIGÓN CON AGREGADOS CONVENCIONALES. [REVELO, 2016] | 22 |
| TABLA 2.1: RANGOS DE PENDIENTES. [MOUGINIS Y OTROS, 1996]..... | 27 |
| TABLA 3.1: PERFILES TOPOGRÁFICOS ELEVACIÓN VS DISTANCIA Y SU CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA. | 37 |
| TABLA 3.2: VALORES EN SURFER CON BORDES Y SIN BORDES. | 40 |
| TABLA 3.3: VOLÚMENES ESTIMADOS DE LOS CONOS DE CENIZA DENTRO DE LA ZONA POBLADA DE SANTA CRUZ. EN AMARILLO ESTÁN SELECCIONADOS LOS 5 CONOS CON MAYOR VOLUMEN | 42 |
| TABLA 3.4: TABLA RESUMEN DE RESULTADOS. | 44 |
| TABLA 3.5: VOLÚMENES ESTIMADOS DE LAS MINAS DE GRANILLO ROJO Y NEGRO DENTRO DE LA ZONA PROTEGIDA DE SANTA CRUZ. | 49 |
| TABLA 3.6: VOLÚMENES ESTIMADOS DE LOS 5 CONOS MÁS GRANDES CON DEM 10X10M DENTRO DE LA ZONA POBLADA DE SANTA CRUZ. | 51 |
| TABLA 3.7: VARIABILIDAD DE LOS DATOS POR RESOLUCIONES DE DEM DISTINTAS. .. | 51 |
| TABLA 4.1: POSIBLE PLAN DE EXPLOTACIÓN DEL CONO 7..... | 54 |
| TABLA 4.2: POSIBLE PLAN DE EXPLOTACIÓN DEL CONO 9..... | 54 |
| TABLA 4.3: POSIBLE PLAN DE EXPLOTACIÓN DEL CONO 11..... | 55 |
| TABLA 4.4: POSIBLE PLAN DE EXPLOTACIÓN DEL CONO 12..... | 56 |
| TABLA 4.5: POSIBLE PLAN DE EXPLOTACIÓN DEL CONO 13..... | 56 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El archipiélago de Galápagos está constituido por 14 islas principales y se encuentra ~972 km al oeste de la costa de Ecuador. Es una región que cuenta con grupos de volcanes activos, donde las rocas datan la edad geológica de Pleistoceno y edades específicas (estudios de relación de isotopos $^3\text{He}/^4\text{He}$ en muestras de rocas) de 0.1 a 580 m.a. (Kurz y Geist, 1999). Las islas son producto de actividad volcánica originariamente submarina. Los volcanes se los clasifica en tres tipologías, de acuerdo con parámetros petrográficos relacionados al contenido de magnesio y presencia de plagioclasa en fenocristales:

Grupo I: Se trata de islas grandes constituidas de lavas toleíticas. La mayoría de los volcanes presentan caldera y se encuentran al oeste del archipiélago.

Grupo II: Se encuentra compuesto por dos subcategorías:

- A. Islas al noreste del archipiélago, donde la composición geoquímica de las rocas es de basalto alcalino empobrecido en magnesio y rico en fenocristales de plagioclasa.
- B. Islas al sur del archipiélago, donde las rocas tienen composición de basalto alcalino rico en magnesio.

Grupo III: Son las islas al centro-norte. Las rocas tienen composición geoquímica variada y, por lo tanto, poseen historia geológica más compleja. (McBirney y Williams, 1969; Munro y Rowland, 1996)

El material basáltico de estos volcanes proviene de plumas del manto generándose hotspots o puntos calientes. (Hoernle y otros, 2000). Los hotspots se encuentran ligados a la tectónica y geodinámica de su entorno y en el caso de las Islas Galápagos se trata del límite de convergencia Cocos-Nazca. (Gripp y Gordon, 2002).

Los productos volcánicos de las islas son de gran interés para la actividad minera porque podrían facilitar un desarrollo sustentable de la población. Sin embargo, este tipo de actividad se encuentra actualmente limitada y restringida debido a que en Galápagos también habitan diversidad y singularidad de especies. La variedad en flora y fauna es una característica que convierte en parque nacional a las Galápagos. Por este motivo, el Parque Nacional Galápagos (PNG) ha declarado ciertas zonas como protegidas de acuerdo con el art. 14 de la Ley Orgánica de Régimen Especial para la Conservación y Desarrollo Sustentable de la Provincia de Galápagos.

En el presente trabajo de tesis se reconocerán puntos de posible explotación de productos volcánicos mediante la aplicación de herramientas espaciales de Sistemas de Información Geográfica (SIG's) y que se encuentren fuera del límite de las zonas protegidas del PNG.

1.1. Descripción del problema

El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Santa Cruz (GADMSC) necesita definir posibles áreas de explotación de granillo rojo y granillo negro (escoria volcánica comúnmente nombrada material pétreo) mediante la caracterización y sucesiva cuantificación volumétrica de los conos de escoria presentes en el área de estudio, teniendo en cuenta las leyes que protegen la biodiversidad de la zona. Es decir, todos los conos que se encuentren en zona protegida son considerados patrimonio natural y su material no puede ser extraído bajo ningún concepto.

Por otro lado, los conos que se encuentran dentro de zonas pobladas son objeto de estudio debido a que podría ser factible su explotación, siendo de gran interés, para utilizarlos como material de construcción. Por lo tanto, es necesario determinar el volumen de cada cono que se encuentre en las zonas pobladas.

1.2. Justificación del problema

Las rocas basálticas y los pequeños conos volcánicos se han tornado en uno de los ejes más importantes para el desarrollo sustentable de la vida en las Islas Galápagos. En Santa Cruz, el material producto de erupciones volcánicas monogenéticas se emplea para fabricación de bloques, construcción de viviendas y para mantenimiento de vías (privadas o públicas). El material volcánico ha sido nombrado localmente de acuerdo con su color y textura como *granillo rojo* y *granillo negro*. Antes de ser empleados como materia prima para construcciones, los habitantes utilizaban arena de playa. La arena de playa ha sido prohibida para usos antropogénicos, no solo por su calidad relativamente mala, sino por la presencia de vida bacteriana que sirve de alimento para especies endémicas y desde el terremoto acontecido el 16 de abril del 2016, en este tipo de eventos las construcciones con agregados de arena de playa fueron las más afectadas (Cañizares, 2016).

En el Estatuto Galápagos existen artículos como el art. 14 que exige “la convivencia equilibrada entre la población y la naturaleza”. El aumento de la población en las Islas ha generado una creciente demanda de materiales pétreos tanto para la comunidad como para entidades públicas y privadas, las cuales se encontrarían entre los sujetos beneficiados del estudio. Por esta razón es necesario encontrar sitios donde se pueda explotar material pétreo para poder satisfacer las futuras demandas sin afectar la biodiversidad.

Todas las islas en general sufren las dificultades con respecto al acceso al campo y limitados datos de referencia tales como topografía, geofísica y geología en general. Entonces, ¿Es posible definir áreas de posible explotación de materiales pétreos en los sectores poblados de la Isla Santa Cruz? De darse el caso, ¿cuánto es el volumen de estos materiales que se encuentran fuera de zonas de protección de la biodiversidad?

1.3. Zona de estudio

El estudio se centra en los sectores poblados de la Isla Santa Cruz como se muestra en la Figura 1.1. La Isla Santa Cruz es una de las islas más importantes por ser la más poblada del archipiélago, con alrededor de 15.701 habitantes (INEC, 2016). La isla Santa Cruz tiene una geometría en forma semicircular con ~986 km² de superficie y 864 msnm como altitud máxima. El PNG posee el 70% de su territorio (Eliasson, 1984).

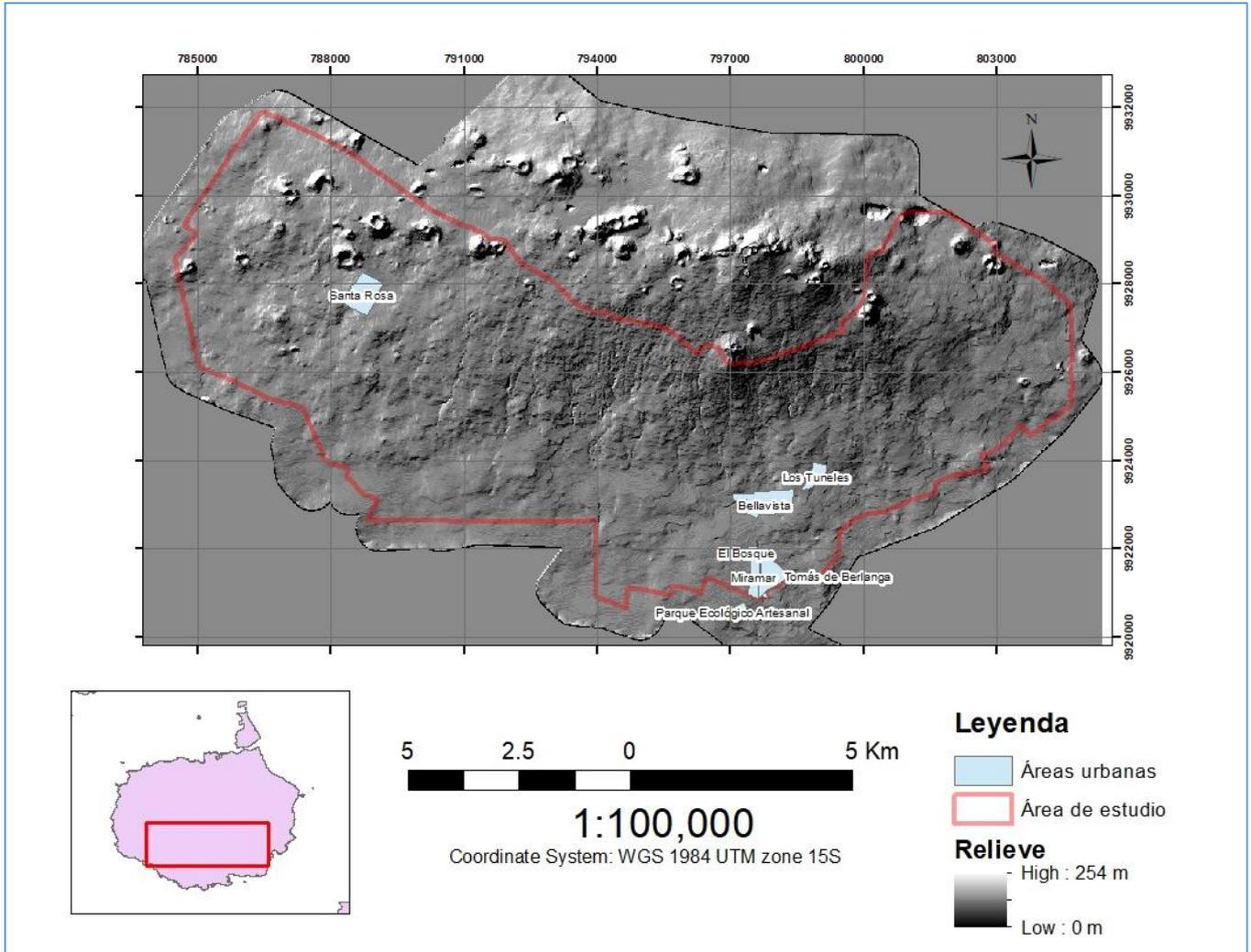


Figura 1.1: Zona de Estudio.

Adicional, también se va a considerar las minas Granillo Rojo y Granillo Negro como objeto de estudio. Las cuales se encuentran actualmente en etapa de explotación, la Figura 1.2 muestra la ubicación de las minas.

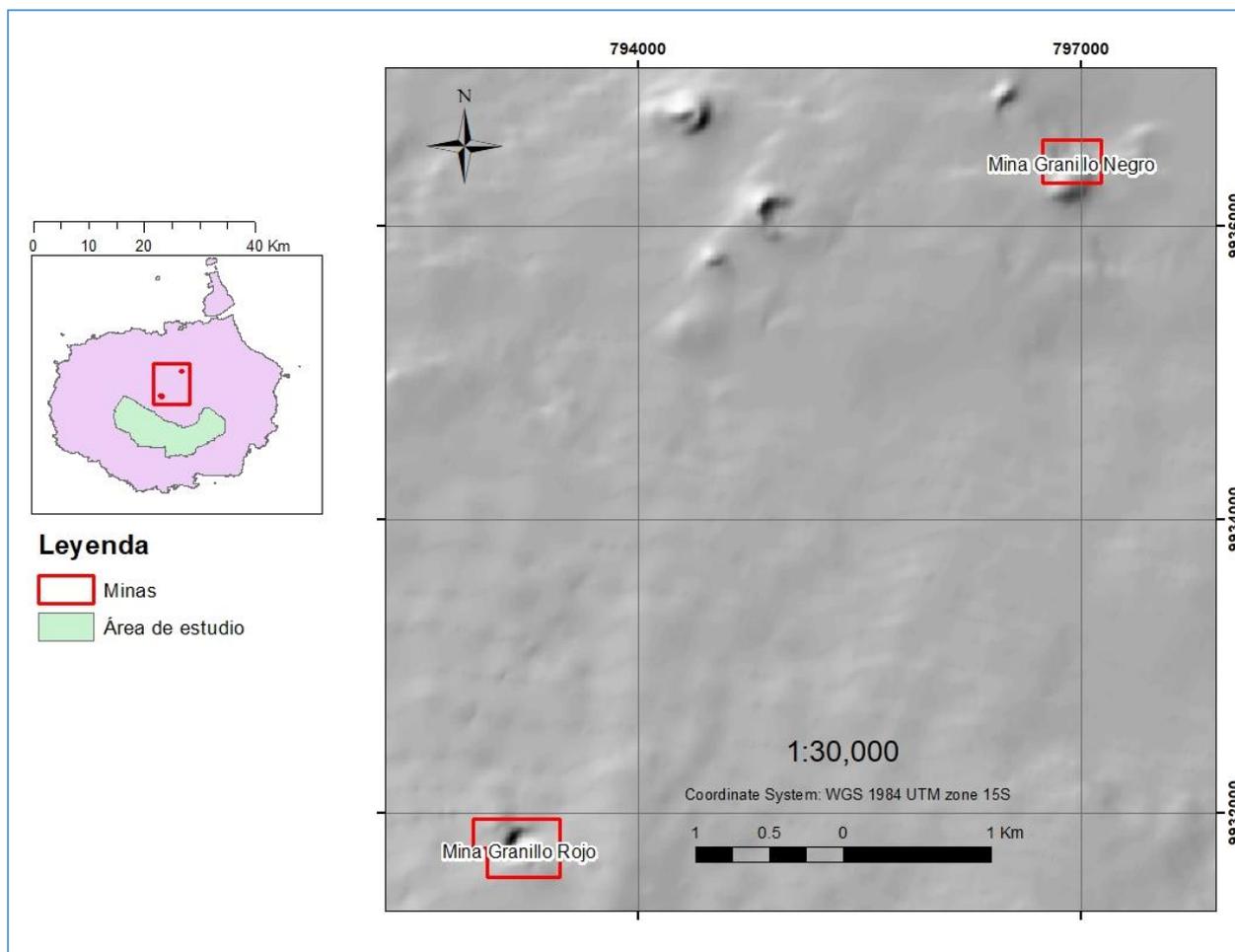


Figura 1.2: Ubicación de las minas Granillo Rojo y Granillo Negro.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Identificar futuros recursos de material pétreo dentro los sectores poblados de la isla Santa Cruz mediante la aplicación de herramientas de software geológico para la creación de un mapa de recursos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- I. Delimitar los conos de escoria ubicados en zonas pobladas para caracterizarlos geomorfológicamente como recurso potencial mediante el empleo de un modelo digital del terreno.
- II. Determinar valor estimado de volumen de las minas y conos de escoria utilizando herramientas espaciales para indicar su margen de error.

- III. Presentar primera propuesta de plan de explotación de los conos de mayor volumen utilizando información bibliográfica de la demanda anual de material para la estimación de factibilidad de extracción.

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Tectónica y Geodinámica

La litosfera terrestre se encuentra particionada en placas tectónicas, las cuales se mueven una con respecto a la otra de acuerdo con la teoría de tectónica de placas. Éstas pueden ocasionar esfuerzos de compresión, tensión, cizallamiento o unión de dos componentes al interactuar entre sí. El origen volcánico de las Islas Galápagos se debe al ascenso de material fundido desde zonas muy profundas de la Tierra, fenómeno conocido como hotspot. Existen dos teorías sobre su génesis, la teoría de plumas que se basa en que el material asciende por corrientes de convección desde el interior de la Tierra (Holmes, 1929) específicamente la zona de transición entre el manto y el núcleo; siendo esta teoría la más aceptada. También existe la teoría de extensión, esta se basa en el ascenso de materia por interacción de placas tectónicas, es decir, por separación de extensos cuerpos rocosos o placas tectónicas o divergencia (Morgan, 1972). El material migra hacia zonas de menor presión y temperatura; y el magma asciende por las plumas del manto a través de un diámetro ~100 km (Kurtz y Geist, 1999; Villagómez y otros, 2007) con una velocidad de ascenso de ~10 cm/año (Kerr and Mériaux, 2004). Este magma es capaz de abrirse paso hacia la superficie provocando erupciones volcánicas. Las erupciones al irse dando de manera sucesiva acumulan materia y pueden formar conos de material escoriáceo. Sin embargo, el grosor de la corteza por encima de la astenosfera juega un papel importante en la composición de los materiales en la superficie. En Galápagos existe una zona de fractura importante y que expone claramente las diversas composiciones minerales de material basáltico. Se trata de una falla transformante de 91°W (Hey, 1977; McBirney y Williams, 1969) que no solo resulta en la diferencia de grosor debajo de la superficie, sino también en una diferencia de edades de 3-5 M.a. entre la litosfera del oeste y la mitad de la litosfera este del archipiélago (Geist y otros, 1998).

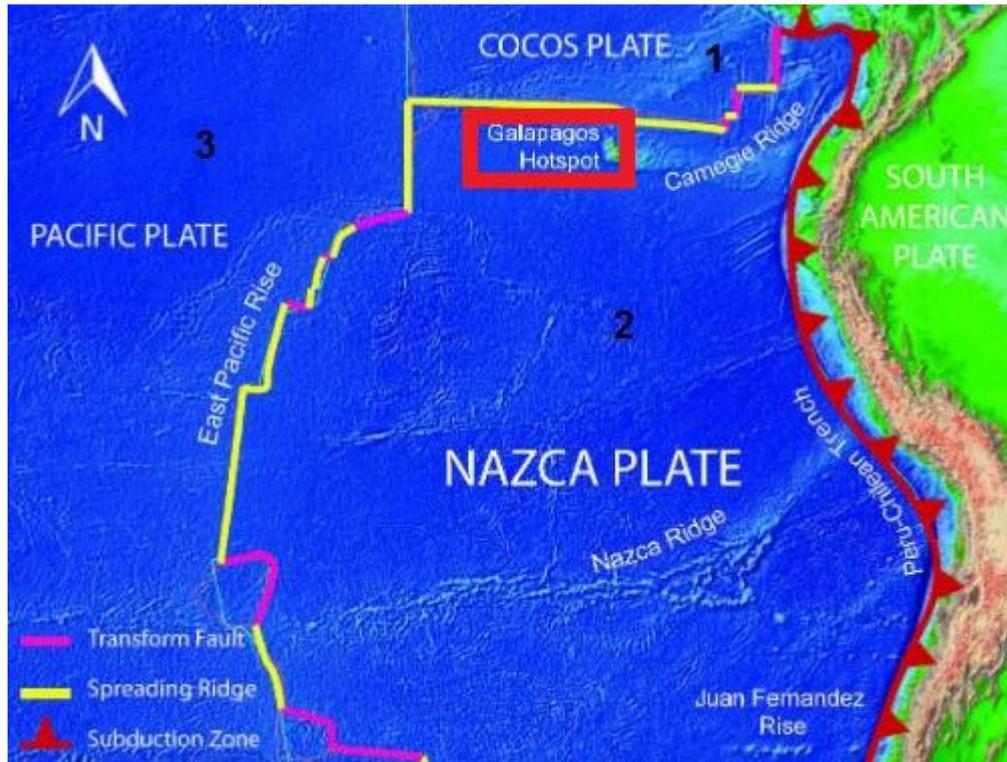


Figura 1.3: Interacción de las placas Cocos (1), Nazca (2) y Pacífico (3) en Galápagos indicando el punto de unión triple. [Grimaldi, 2017]

Esta falla transformante es debida a la interacción entre las placas Cocos y Nazca. Una de las características principales de las zonas de subducción es que por lo general se encuentran asociadas a cordilleras y a cadenas de volcanes. La correlación entre datos geofísicos (conversión de Ondas S a temperatura) con datos geoquímicos (variación de isotopos de Sr y Nb en basaltos) arrojan como resultado que las islas ubicadas al noreste (Genovesa, Santiago, Santa Cruz) cuentan con espesor de corteza de ~45 km mientras que las islas ubicadas al suroeste cuentan con un mayor espesor de la litosfera ~60 km (Fernandina e Isabela), siendo la litosfera de mayor espesor junto con la deflexión lateral de las plumas, la responsable por el volcanismo activo de Galápagos. (Gibson y Geist, 2010) La tectónica actual de Galápagos está relacionada a la interacción de tres placas: Cocos, Nazca y Pacífico (Lonsdale, 1988) como en la Figura 1.3. Estas tres placas se mueven en diferentes direcciones. La placa de Cocos se mueve en dirección noreste respecto al centro de expansión de Galápagos y subduce a la placa del Caribe. La placa de Nazca se mueve en dirección sureste respecto al centro de expansión de Galápagos y subduce a la placa Sudamericana provocando volcanismo en los Andes. Por último, la

placa del Pacífico siendo la más grande del planeta converge con Nazca y Cocos. (Klein y otros, 2005).

Debido a la interacción Cocos-Nazca se produce ascenso de magma desde el centro de expansión de Galápagos añadiendo material rocoso y creando volcanes dentro de las placas. (Claussen, 2015). La formación de las Islas Galápagos ha sido un proceso que ha tomado ~20 millones años y se encuentra dividido en las siguientes fases, tomando en cuenta una velocidad de propagación del centro de expansión de 26 km/Ma. (Sallarès y Charvis, 2003):

- A. Una etapa temprana (~20 Ma.) donde el hotspot se encontraba por encima de una joven cordillera (Carnegie y Malpelo). Las anomalías magnéticas de las rocas más antiguas muestran que la velocidad de expansión era mucho mayor a la actual y el eje de expansión tenía una orientación ~N75°E, lo cual resulto en la creación de corteza oceánica. La interacción Cocos-Nazca permitía la migración de corteza hacia el norte respecto al hotspot.
- B. Una segunda fase (~15 Ma.) donde se evidencia la presencia de la zona de fractura Inca (IFZ) que probablemente fue la causante de la configuración actual de las cordilleras. El material de las plumas se sigue acumulando y empieza a separarse por expansión del suelo oceánico. Un evento importante dentro de esta fase (~12 M.a.) ocurre cuando la IFZ migra por encima del hotspot en sentido E-W. Se sabe que a futuro se trataría de la cordillera de Cocos separándose de Carnegie.
- C. Una tercera fase (~10 Ma.) en la que la subducción entre Cocos y América Central (placa del Caribe) dan origen a la zona de fractura de Panamá (PFZ) mientras el material se sigue acumulando y la expansión del suelo oceánico no cesa. Esta fractura dextral provocaría la separación entre Malpelo y Cocos, mientras que la IFZ se ubicaría por debajo del hotspot al continuar la migración del material hacia el norte.
- D. Una cuarta fase (~5 Ma.) donde la IFZ vuelve a ubicarse por encima del hotspot y Malpelo está totalmente separada de Cocos debido a la acción de la PFZ. Carnegie y Malpelo han migrado al sur y al norte del hotspot, respectivamente y en Cocos continua la acumulación de material
- E. Se muestra la configuración actual de la provincia volcánica de Galápagos producto de la interacción entre la geodinámica Cocos-Nazca, zonas de fractura

y el hotspot. Siendo la subducción entre la cordillera de Carnegie y América Central el evento más reciente, con una velocidad de subducción de 70 ± 14 km/Ma. con una orientación de subducción de Cocos hacia América Central de $N44^\circ E \pm 11^\circ$.

En la Figura 1.4 se observa de manera gráfica todos los eventos principales que dieron como resultado la configuración tectónica actual de Galápagos desde su inicio hace aproximadamente 20 Ma. al presente (Sallarès y Charvis, 2003).

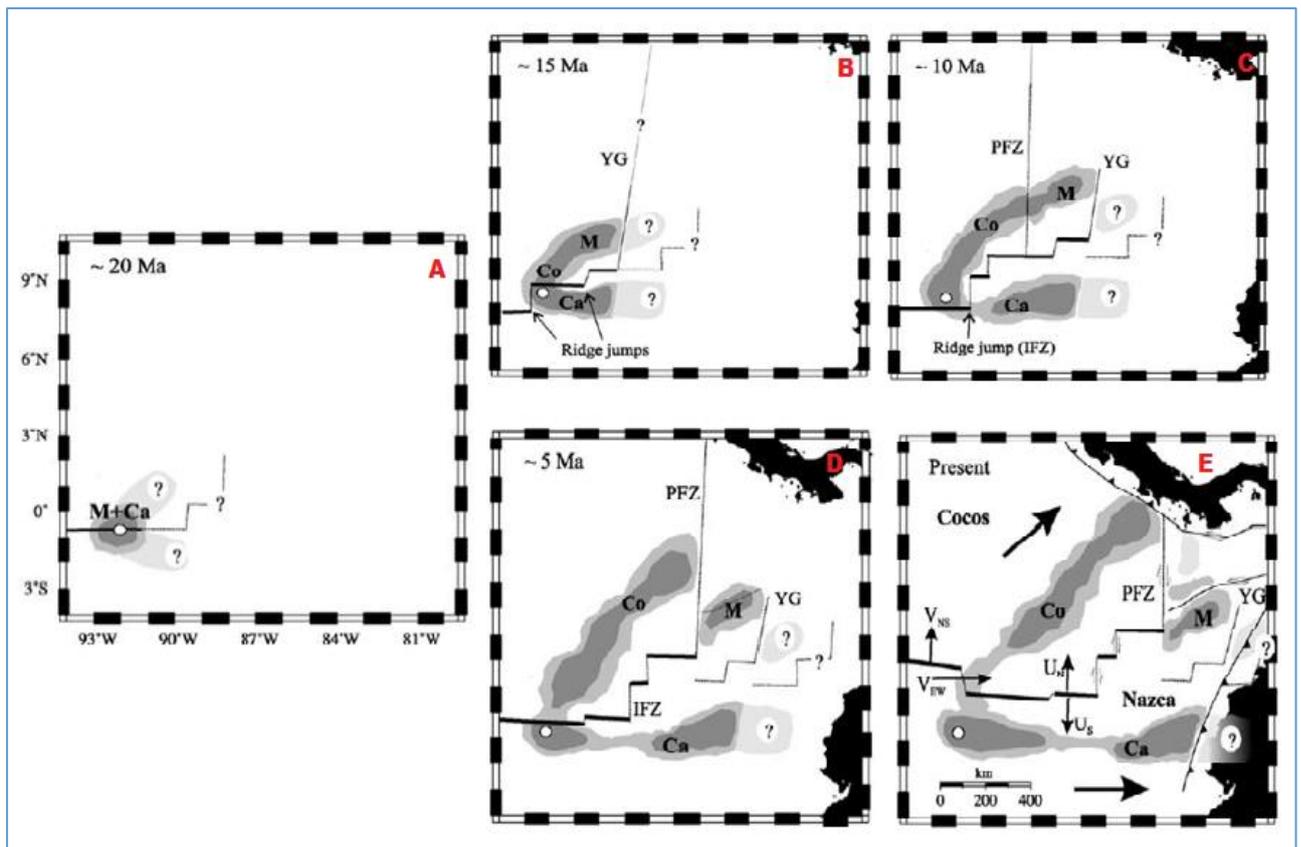


Figura 1.4: Evolución geotectónica de Galápagos en los últimos 20 Ma. [Sallarès y Charvis, 2003]

El origen de las Islas Galápagos y actividad volcánica es similar al de otras islas oceánicas (por ejemplo, Hawái) y es el producto de subida de magma desde plumas del manto (White y otros, 1993; Geist y otros, 2005; Villagómez, 2007). Las plumas del manto son columnas de material rocoso a altas temperaturas que asciende desde la profundidad de la Tierra hasta la superficie. Sin embargo, la profundidad desde la cual el material asciende es considerada como tema de debate o hipótesis que no han sido probadas o aceptadas en su totalidad. La teoría más aceptada se trata de una interacción entre el núcleo externo y el manto, donde la transición entre estas dos zonas de la Tierra

es conocida como capa D" (~2900km) y es producto de la diferencia de temperatura y presión existentes (Lay y otros, 1998). Desde la capa D" asciende material hasta zonas relativamente más frías, sólidas y densas como lo es la litosfera, generándose así el fenómeno conocido como *hotspot* (Figura 1.5). La litosfera se forma cuando la zona subyacente o astenosfera comienza a enfriarse. En zonas oceánicas la corteza llega hasta ~100 km de profundidad y en los continentes hasta ~200 km. En el caso de Galápagos, la litosfera es relativamente joven y, por lo tanto, de poco espesor aproximado de 45-60 km (Gibson y Geist, 2010). El engrosamiento de la corteza por ascenso de magma y la geodinámica de las placas Cocos y Nazca dan origen a la plataforma oceánica sobre la que se asientan las Islas Galápagos. (Sallarès y otros, 2005) Aparte de los agentes geotectónicos que han intervenido en los procesos de formación y evolución de las Islas Galápagos, también se torna importante el conocimiento del agente externo predominante en las islas, es decir, el volcanismo de Galápagos. Los volcanes de la región insular son producto del hotspot que dio origen a las islas. Este hotspot permanece fijo y se sabe que las islas más alejadas de este son las más antiguas así, San Cristóbal es la isla más antigua con ~4 M.a. y Fernandina es la isla más joven y de volcanismo activo con ~6,5 m.a. (White y otros, 1993; Vidito y otros, 2013).

El movimiento de la placa de Nazca en dirección este, provoca la subducción con la placa Sudamericana. Habiendo diferencia de densidades debido a que son placas oceánica y continental, respectivamente. Esto provoca que la placa más densa entre en subducción la placa menos densa (Nazca subduce Sudamericana). Como causa de este efecto, el manto terrestre empieza a derretirse debido a las altas temperaturas del material "perdido" en subducción, generándose el ascenso de magma que posteriormente podría formar un volcán, este ascenso de magma al entrar en contacto con la superficie pierde propiedades fisicoquímicas (contenido mineral, disminución de presión y temperatura, entre otros) pasando a ser denominado lava (Brown, 2009).

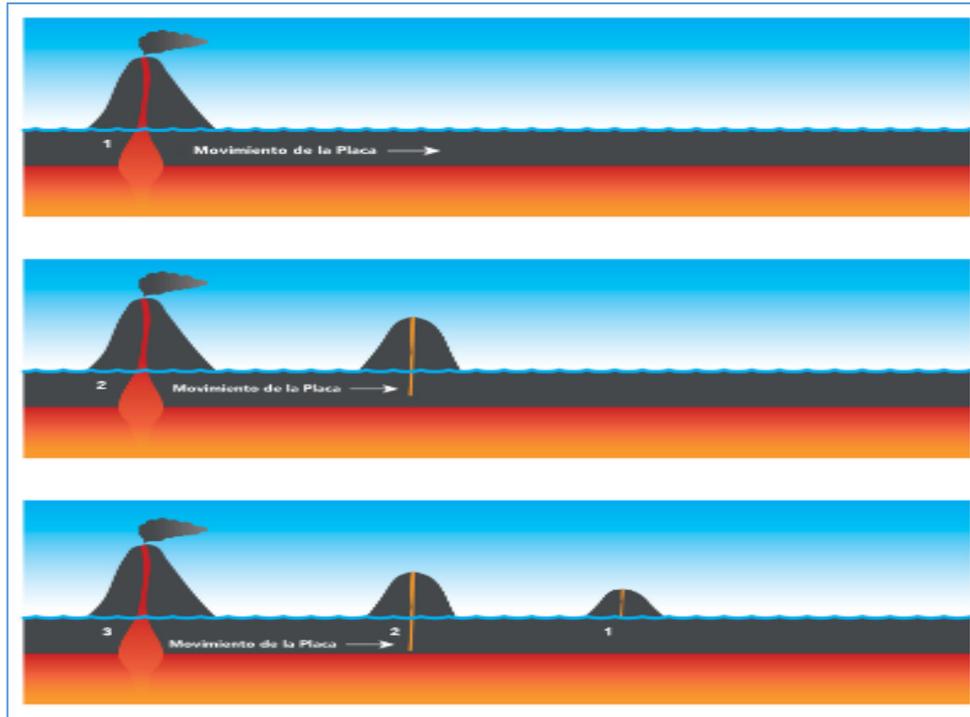


Figura 1.5: Creación de volcanes por hotspot, el cual permanece fijo. [Brown, 2009]

De acuerdo con Geist y otros, (2014) los volcanes de Galápagos presentan características que pueden ser clasificadas en tres grupos petrológicos:

- I. Que erupcionan magma primitivo.
- II. Que erupcionan magma toleítico.
- III. Que erupcionan magma altamente silíceo.

Estas composiciones pueden relacionarse con modelos evolutivos de cámaras magmáticas, los cuales a su vez se relacionan con la etapa en la que se encuentre el volcán en el hotspot. Así, ocurren tres etapas: (1) una fase juvenil del volcán, en esta fase se da crecimiento por fisuras radiales del material a la superficie. La mayor parte del reservorio de magma se encuentra en la corteza inferior y media, y la roca circundante es la corteza oceánica antigua, el magma evoluciona a diversos grados de cristalización (minerales como olivino, piroxeno y plagioclasas) y el liquid mush (olivine-gabro mush) es sobre todo rico en olivino. El volumen del volcán es relativamente pequeño pero su caldera tiende a ser grande y profunda. Por ejemplo, la Figura 1.6 muestra al volcán Cerro Azul con su caldera a ~5km.

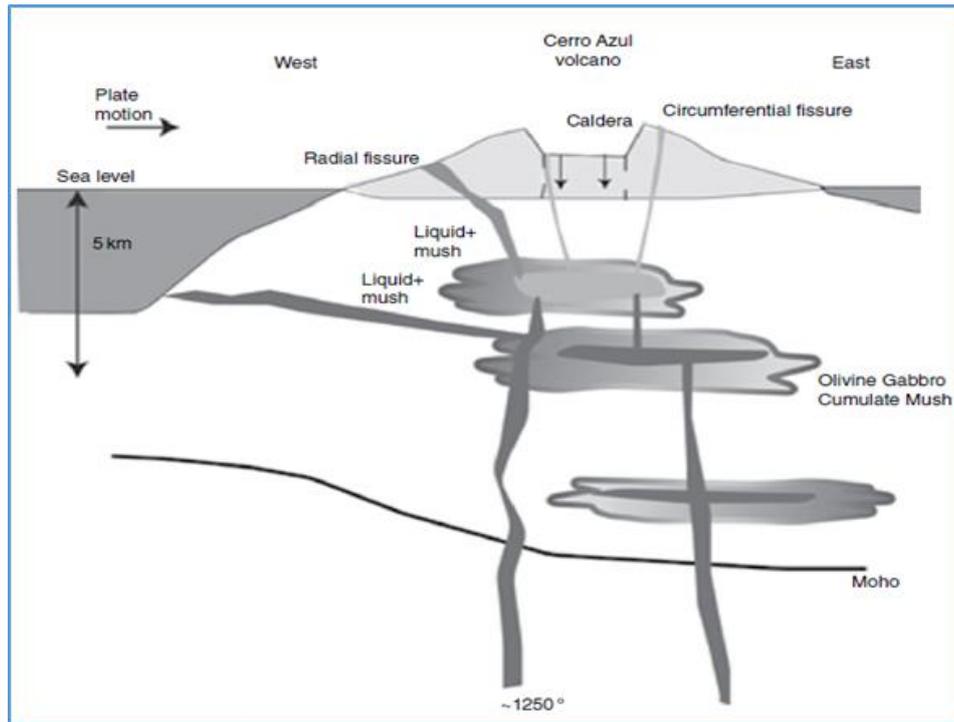


Figura 1.6: Etapa juvenil de un volcán de Galápagos, ubicado a un borde del hotspot. [Geist y otros, 2014]

(2) una segunda fase en la que el material alcanza equilibrio termodinámico ($\sim 1150^{\circ}\text{C}$), existe más cantidad de magma cristalizado dando como resultado mayor cantidad de volumen del volcán, en esta fase existe gran cantidad de mush olivino-gabro distribuido por toda la corteza y con temperatura y presión estables, la parte superior de la cámara está compuesta de sill y se encuentra a menos de 3km de profundidad (Figura 1.7), mientras que los diques radiales son capaces de intruir y alterar el mush.

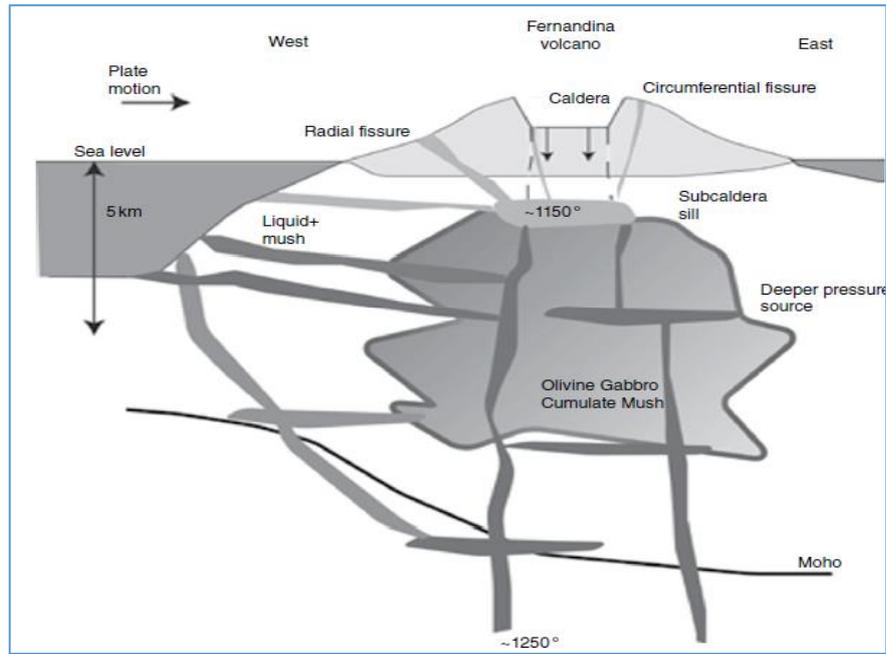


Figura 1.7: Etapa intermedia de un volcán respecto a su ubicación por encima del hotspot. [Geist y otros, 2014]

(3) La última etapa, el volcán se encuentra alejado del hotspot debido actividad de las placas tectónicas, la masa intrusiva reduce su temperatura, el magma es más frío y presenta mayor evolución respecto a las dos primeras etapas. Este desbalance térmico (enfriamiento a 850-900°C como en la Figura 1.8) es indicativo de acumulación de material máfico y riolita. El material del mush se oxida y el líquido basáltico atraviesa la corteza con poca interacción con los materiales circundantes. Esta fase se asocia con inactividad o muerte de volcán.

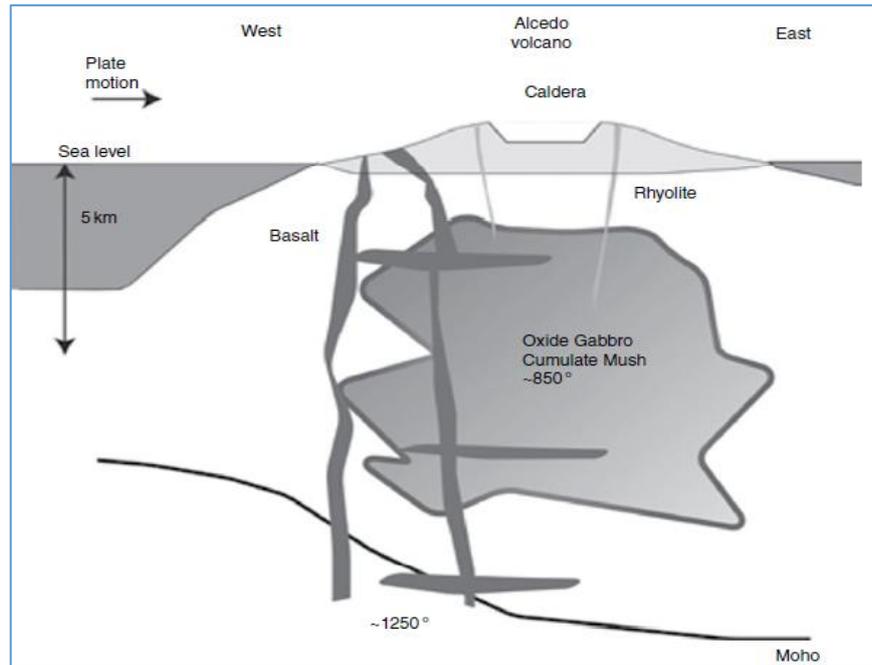


Figura 1.8: Etapa de madurez o inactividad de un volcán en Galápagos. [Geist y otros, 2014]

1.5.2. Geología de la Isla Santa Cruz

La composición litológica de la pluma de Galápagos ha sido inferida a lo largo de los años mediante el análisis de isótopos radiogénicos como Pb, Sr, Ni, entre otros (Zindler y Hart, 1986; Hofmann, 1997; Chauvel et al., 2008). Sin embargo, la mayoría de los volcanes en superficie presentan composiciones heterogéneas y los datos de isótopos han sido interpretados como mezcla entre reservorios del manto (Hofmann, 1997) o como fuente sin una unidad litológica dominante o distintiva (Zindler y Hart, 1986). Análisis de isótopos de Ni, Ca y Mn presentes en fenocristales de olivino y su correlación con otros datos (muestras de restos de lava volcánica) que han sido caracterizados como posibles fuentes de magma primario y derivados de peridotita del manto (Geist y otros, 2002; Herzberg, 2011) arrojan como resultado que la fuente litológica dominante de las islas Fernandina, Floreana, Genovesa, Wolf y Darwin es peridotita. Mientras que en las islas Santiago y Santa Fe la fuente dominante se trata de piroxenita. Santa Cruz es la isla que presenta mayor variabilidad respecto a las demás islas debido a que existe poca evidencia para asumir una fuente pura de peridotita o piroxenita. Por ejemplo, de 79 muestras de rocas tomadas en Santa Cruz (Herzberg y Asimow, 2008), solo 5 arrojan como resultado una fuente primaria de peridotita mientras que los 74 restantes se

encuentran ya sea muy alteradas por el intemperismo, tienen como fuente primaria piroxenita o solo representan errores en el procesamiento de datos en PRIMELT2.

En la Figura 1.9 se observa la variabilidad de composición de los compuestos de Fe/Mn, Mn, Ni y Ca en las rocas de Santa Cruz. Las rocas fueron tomadas de los volcanes Ecuador, Roca Redonda y Sierra Negra y comparadas con el modelo de composición de magma primario de Geist. et al, (2002) representado por la curva de color negro. Las estrellas corresponden a la codificación de las muestras más representativas y las curvas muestran gran desviación estándar respecto al modelo de referencia, lo que es indicativo de fuente de magma variada. (Vidito y otros, 2013)

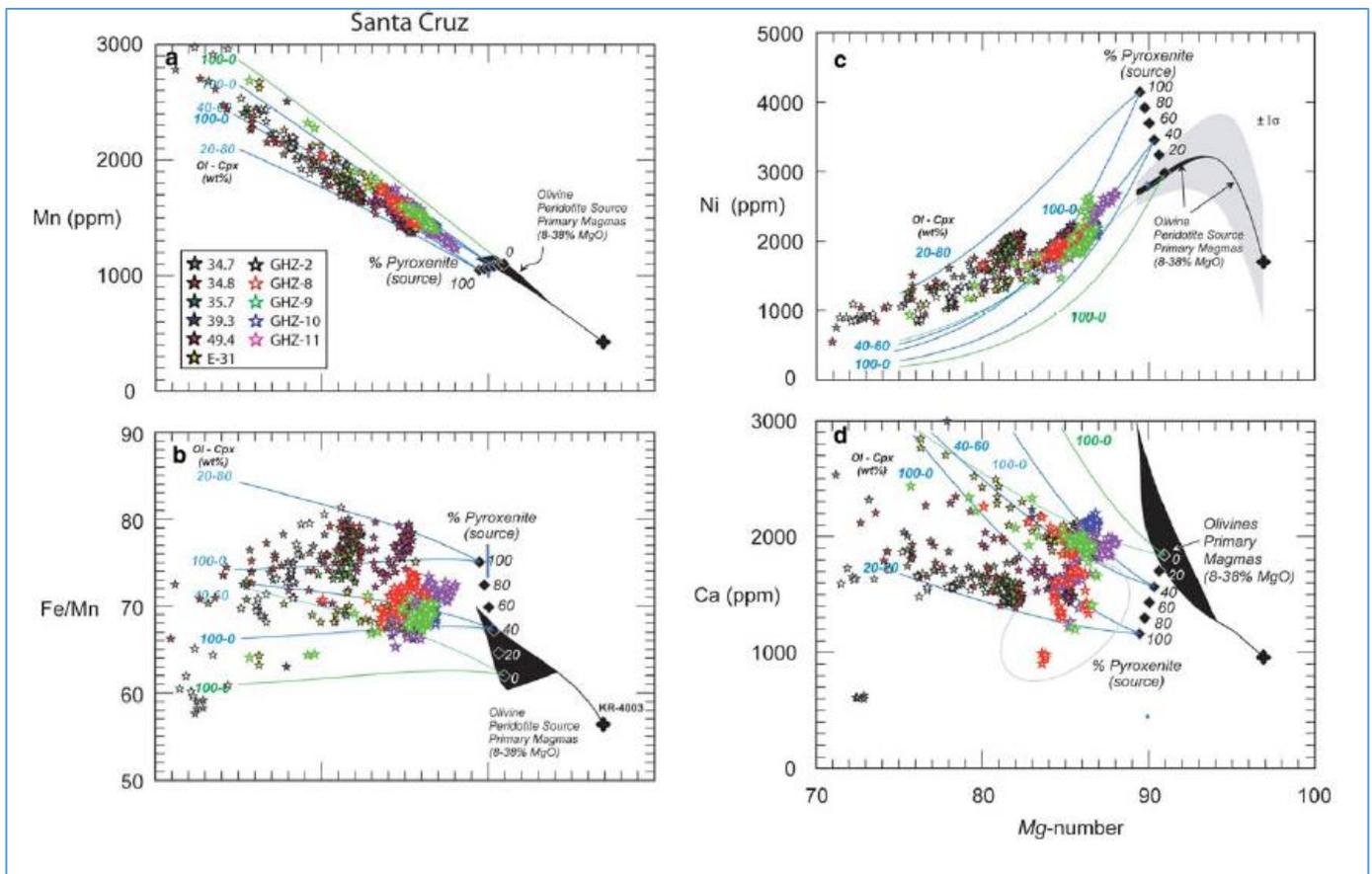


Figura 1.9: Variabilidad isotópica en Santa Cruz respecto a magma primario. [Vidito y otros, 2013]

La isla Santa Cruz es un volcán escudo de forma elíptica que posee una pendiente suave la cual está a 950 m sobre el nivel del mar. La alineación de conos volcánicos a lo largo de la serie de fallas normales E–W es la característica predominante en el área de la cima. La que va desde el faldón costero de poca altura hasta abrirse de forma graduada. (White et al., 1993) Así también, los cráteres de pozos grandes (pit crater en inglés) de más de 100 m de diámetro y profundidad están alineados a lo largo de la dirección en el flanco norte superior. (D'Ozouville, 2008) De acuerdo con White y otros (1993), las islas Baltra y Seymour (al norte) y Las Plazas (costa este) que se encuentran adyacentes a Santa Cruz no son más que bloques desprendidos de esta. Las lavas de Santa Cruz se pueden dividir en la serie Plataforma (Platforms serie), que son sedimentos marinos y la serie Escudo (Shield serie) que son flujos de lava basálticos (Bow, 1979).

Las series Plataforma son las más antiguas y se presentan principalmente en el noreste de la isla. Lo que significa que las islas adyacentes están todas constituidas por ellas. Las unidades más bajas de esta serie tienen litofacies que indican erupción submarina y están intercaladas con carbonatos marinos poco profundos o <100 m (Bow, 1979). En la vertiente norte del escudo a 300 m de elevación se pueden ver expuestas ventanas de flujos inversamente polarizados, que poseen una composición similar a los flujos expuestos a lo largo de la costa. Estos flujos están incluidos dentro de las series Plataforma. Las lavas de este tipo presentan fenocristales en los que su ensamblaje está dominado por plagioclasas con olivino. (White y otros, 1993)

Las lavas de la serie Santa Cruz Shield abarcan desde sinodatoide hasta olivina toleita, pero predominan los basaltos alcalinos de transición. (Bow, 1979) Y de acuerdo con White y otros (1993), estos son diversos desde el punto de vista petrográfico e incluyen ensamblajes de olivino solo y plagioclasa dominante, así como también lavas áféricas. Las lavas más jóvenes incluían hawaiitas. La edad de la serie Shield oscila entre 590 ± 27 m.a. y 24 ± 11 m.a.

1.5.3. Geomorfología

De acuerdo con Connor y Conway, (2000) la geomorfología volcánica se puede dividir en dos subcategorías que corresponde a: (1) la formación de productos volcánicos por un solo evento de volcanismo o edificios monogenéticos, y (2) edificios volcánicos que tuvieron su origen por acumulación de material de varios eventos de volcanismo o edificios poligenéticos. En los edificios monogenéticos (ejemplo en Figura 1.11) suelen tener un volumen menor a 1 km³ y el producto de las erupciones volcánicas tiende a localizarse en puntos fijos diferenciándose los siguientes tipos principales de conos volcánicos:

- I. *Spatter y Scoria Cones (SC)*: Suceden cuando los volcanes expulsan material gaseoso, generando salpicaduras o *spatters* pesadas y viscosas. El término *spatter* es sinónimo de aglutinación, el cual empleado para indicar apilamiento de clastos calientes que se han adherido y deformado durante la deposición. (Wolff y Sumner, 2000)
Dependiendo de la temperatura, si el material esta fundido cuando las partículas llegan al piso, estas se aglutinan entre ellas y se genera un *spatter cone*. Por otro lado, si las partículas se enfrían en el aire y llegan al piso como fragmentos sólidos, entonces se genera acumulación de escoria y el producto de este proceso será un *scoria cone*. Estos conos pueden llegar a alturas más o menos de 150 a 200m (Valentine y otros, 2005; Mulas y otros, 2016) y se forman en flancos de volcanes activos. Existen dos diferenciaciones respecto al tamaño de los SC, los de tamaño considerable son denominados bajo el mismo nombre, es decir, SC mientras que los de menores dimensiones se denominan *hornitos*. (Elsworth y Voight, 1996).
- II. *Tuff Cones (TC)*: Los conos de toba o conos de ceniza volcánica. Estos conos tienen material de grano fino, se diferencian de los SC porque se forman por interacción del magma con cuerpos de agua. El cambio abrupto de estado físico del agua, de líquido a gas provoca expansión y fragmentación violenta de lava, depositando cenizas que llegan a tener un tamaño de 100 a 300m. (Evers, 2014) Otra diferencia es que son producto de explosiones poco profundas, tendiendo a depositarse de forma lateral en lugar de hacerlo hacia arriba. Su composición química dominante suele ser basáltica y es producida por un solo episodio de volcanismo. (Connor y Conway, 2000)

- III. Anillos de toba y maars: Se forman por la interacción de cuerpos de aguas cercanos al punto de ascenso del magma. Corresponden a pequeñas depresiones circulares, los anillos de toba se diferencian a los conos de toba en que suelen ser de menor altura y su origen es de erupciones de alta energía. Por otro lado, un maar es similar a un anillo de toba con la diferencia por sus laderas, los maars cuentan con laderas de baja pendiente ($<25^\circ$) mientras que los anillos de toba son todo lo opuesto. (Rodríguez y Fernández, 2015)



Figura 1.11: Ejemplos de conos monogenéticos en la Isla Floreana, Galápagos. [Bernard, 2017]

Por otro lado, los edificios poligenéticos que se encuentran en Galápagos corresponden en su mayoría a volcanes escudo como el de la Figura 1.12. Los cuales presentan grandes dimensiones y ocurre por erupciones basálticas, se forman por corriente de fluidos de baja viscosidad. Su lava suele ser fluida, suelen tener escaso producto piroclástico. Los volcanes Sierra Negra, Fernandina, Wolf, Alcedo, Cerro Azul entre otros son volcanes escudo y representan la mayoría de la geomorfología de las Islas Galápagos. (Szakacs, 2010)



Figura 1.12: Volcán Fernandina como ejemplo de volcán escudo en las Islas Galápagos. [Putney, 2006]

Las morfologías de los escudos reflejan principalmente la acumulación de lava, y la respuesta estructural al emplazamiento y movimiento del magma en profundidad, que son las interacciones de los procesos superficiales. (Cullen, 1987) Las laderas superiores de la mayoría de los escudos de Galápagos son demasiado empinadas para haberse formado simplemente por la acumulación de lavas. Estas lavas surgen desde la cumbre, descendiendo por los flancos y quedando estancadas en la base, de modo que el volumen relativo añadido a los flancos es mucho menor que el que queda en las pendientes empinadas (McBirney y Williams, 1969; Nordlie, 1973).

1.5.4. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la escoria y ceniza volcánicas permiten su empleo como sustituto del agregado grueso (>5-125mm) y fino (5-60mm) del hormigón, respectivamente. (Neville, 1999). La escoria y la ceniza volcánicas se emplean mucho en la construcción y sus propiedades mecánicas son de menor calidad respecto a los agregados convencionales del hormigón (arena, grava, piedra triturada) aunque se considera apta para su empleo de acuerdo con la norma NTE INEN0872 que indica *“El termino Agregado se emplea para definir al material pétreo que se utiliza en el hormigón, independientemente de su tamaño”*. (INEN, 2011) Sin embargo, ensayos de resistencia a la compresión indican que, a mayor cantidad de estos materiales como agregados, menor será la resistencia y densidad media del hormigón con escoria respecto al hormigón convencional. En las Tabla 1.1 y 1.2 se observan los resultados de los ensayos del material pétreo en un período de 28 días, concluyéndose que el porcentaje óptimo de material volcánico como agregado del hormigón es de hasta el 25%. (Revelo, 2016)

Tabla 1.1: Comparación de resistencia a compresión de hormigón con agregados volcánicos y hormigón con agregados convencionales. [Revelo, 2016]

| Agregados [%] | Hormigón Convencional [kg/cm²] | Hormigón Volcánico [kg/cm²] | Disminución [%] |
|----------------------|--|---|------------------------|
| 25 | 245.49 | 238.28 | 5.51 |
| 50 | | 222.45 | 9.60 |
| 100 | | 200.17 | 18.88 |

Tabla 1.2: Comparación de densidad de hormigón con agregados volcánicos y hormigón con agregados convencionales. [Revelo, 2016]

| Agregados [%] | Hormigón Convencional [kg/m³] | Hormigón Volcánico [kg/m³] | Disminución [%] |
|----------------------|---|--|------------------------|
| 25 | 2401.39 | 2275.40 | 5.24 |
| 50 | | 2000.01 | 16.71 |
| 100 | | 1894.81 | 21.10 |

1.6. Marco Legal

1.6.1. Constitución Política de la República del Ecuador

Las actividades y permisos dentro de las islas Galápagos están regidas por la Constitución Política de la República del Ecuador, que es la normativa jurídica suprema vigente. En la cual los siguientes artículos mencionan sus aspectos más importantes.

En el artículo 258.- dispone que la provincia de Galápagos tendrá un Gobierno de Régimen Especial, su planificación y desarrollo se organizará en función de un estricto apego a los principios de conservación del patrimonio natural del Estado y del buen vivir, de conformidad con lo que determina la ley.

Su administración estará a cargo de un Consejo de Gobierno precedido por el representante de la Presidencia de la República integrado por los alcaldes de los

municipios de Galápagos, representantes de las juntas parroquiales y los representantes de los organismos que la ley determine.

En el art.317.- los recursos naturales no renovables pertenecen al patrimonio inalienable e imprescriptible del Estado.

1.6.2. Leyes

Ley de Minería: Publicada en el Registro Oficial No. 517 del 29 de enero de 2009,

Referente a las áreas protegidas se declara que en el Art. 25.- se prohíbe la actividad extractiva de recursos no renovables en áreas protegidas. Excepcionalmente dichos recursos se podrán explotar a petición fundamentada de la Presidencia de la República, y previa declaratoria de interés nacional por parte de la Asamblea Nacional, de conformidad a lo determinado en el artículo 407 de la Constitución de la República del Ecuador.

En el Art 26.- se estipula los actos administrativos previos que deben ser cumplidos y otorgados por las autoridades e instituciones correspondientes según sea el caso antes de ejecutar las actividades mineras.

El Art 42.- indica la obligación que tienen los titulares de las concesiones mineras de presentar los informes auditados semestrales de producción de acuerdo con las guías técnicas que prepare la Agencia de Regulación y Control Minero. Además, de exigir que dichos informes sean realizados por Universidades o Escuelas Politécnicas que cuenten con Facultades o Escuelas de Geología, Minas, Ciencias de la tierra y/o Ambientales dotadas de suficiente capacidad técnica para realizar el informe, evaluación o comprobación; o profesionales y/o firmas certificados por la Agencia de Regulación y Control Minero.

Dentro de los artículos del 79 al 86, se establecen regulaciones y disposiciones que los titulares de las concesiones mineras tendrán que cumplir para la preservación y protección de los ecosistemas intervenidos.

Con respecto al libre aprovechamiento de materiales de construcción para obras públicas, el Art 144.- indica que el Estado podrá aprovechar libremente los materiales de construcción para obras públicas en áreas no concesionadas o concesionadas. Estos serán autorizados por el Ministerio Sectorial, cuya autorización está sujeta al cumplimiento de todas las disposiciones de la presente ley, especialmente las de

carácter ambiental. La vigencia y los volúmenes de explotación se registrarán y se extenderán única y exclusivamente por los requerimientos técnicos de producción y el tiempo que dure la ejecución de la obra pública.

1.6.3. Reglamentos

Reglamento General de la Ley de Minería: Tiene como objeto, establecer la normativa necesaria para la aplicación de la Ley de Minería. Fue publicada mediante decreto No. 119, el 9 de noviembre de 2009.

Reglamento Especial Para La Explotación De Materiales Áridos Y Pétreos: En el art. 1.- Objeto del Reglamento.-El presente Reglamento Especial tiene como objeto, establecer la normativa para la aplicación de la Ley de Minería, en procura de que, en el marco del artículo 264 de la Constitución de la República el Ecuador, cada Gobierno Municipal pueda ejercer las competencias para regular, autorizar y controlar la explotación de materiales áridos y pétreos que se encuentren en los lechos de los ríos, lagos, lagunas, playas de mar y canteras. Fue publicada mediante decreto No. 1279, el 07 de septiembre de 2012.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para la determinación del volumen de cada cono se tiene en cuenta diferentes criterios y metodologías de interpolación:

2.1 Criterio de selección de los conos

La primera consiste en la selección de conos de escoria, para empezar a identificar los conos que se pueden explotar, se crea un shapefile que delimita el sector poblado de la isla Santa Cruz como está establecido por el GADMSC. Se emplean curvas de nivel cada 20 m de toda la isla y simultáneamente se utilizan ortofotos e imágenes de Google Earth Pro como apoyo visual para verificar que las curvas se ajusten al terreno. Luego, para seleccionar los conos de escoria que se encuentran dentro de zonas pobladas, se emplea un criterio geomorfológico de pendientes. El dato de entrada corresponde a la topografía del terreno previamente verificada. El geoprocesamiento de estos datos topográficos se encuentra ordenado de manera sistemática en la Figura 2.1.

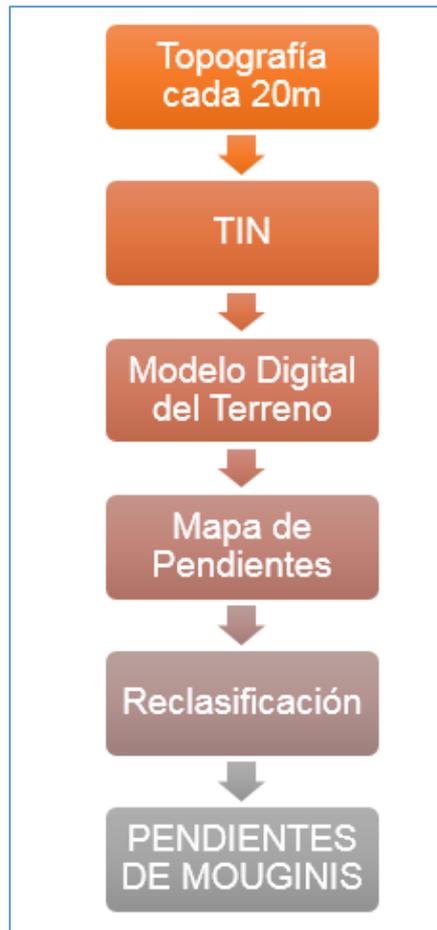


Figura 2.1: Datos de entrada y datos de salida.

Como se observa, el dato de salida corresponde a un mapa de pendientes denominado “*pendientes de Mouginis*”. Según la interpretación de Mouginis y otros, (1996) las pendientes de un terreno pueden ser divididas en siete rangos o clases (Tabla 2.1) que corresponden a las geoformas que se presentan en el terreno. Se consideran pequeños conos aquellos que tienen una pendiente entre 21° a 24,9°, conos de mayores dimensiones los de pendientes >25° y pueden llegar a tener dimensiones del 60% a 80% del tamaño de un volcán.

Tabla 2.1: Rangos de pendientes. [Mouginis y otros, 1996]

| Range | Class |
|----------|-------------------------|
| <4.9° | Flat |
| 5-8.9° | Flanks |
| 9-12.9° | Flanks |
| 13-16.9° | Shallow calderas |
| 17-20.9° | Shallow calderas |
| 21-24.9° | Calderas or small cones |
| >25° | 60-80% volcano height |

Los rangos intermedios (0-16,9°) corresponden en orden descendente en la Tabla 2.1 a zonas de planicie, posibles flancos de los mismos conos o mayor escala de volcanes y calderas superficiales. Una vez procesadas las curvas de nivel y reclasificado los rangos de pendientes de acuerdo con la metodología de Mouginis se procede a emplear un criterio para caracterizar geomorfológicamente cada cuerpo de la zona de estudio.

2.2 Criterio para Caracterización Geomorfológica

De acuerdo con Rodríguez y Fernández, (2015) las geoformas volcánicas pueden ser caracterizadas a través de los modelos que se observan en los SIG. Cada cono volcánico del estudio se encuentra relacionados a un único episodio eruptivo, razón por la que son denominados edificios monogenéticos.



Figura 2.2. Principales conos monogenéticos.

[Rodríguez y Fernández, 2015]

La Figura 2.2 muestra las principales formas de actividad volcánica de edificios monogenéticos. Las cuáles en este estudio son consideradas como referencia para una caracterización geomorfológica. La correlación entre las geoformas monogenéticas de referencia y los perfiles topográficos de Surfer 15 Free Trial permiten dicha caracterización.

2.3 Cálculo de Volumen

Para calcular un valor estimado del volumen de material de cada cono de ceniza, se utilizan tres diferentes software. Como datos de entrada se utilizan las curvas

de nivel cada 20m de toda la isla, se procede a recortar las curvas de nivel para que solo representen el área de estudio en el que se va a trabajar y así facilitar procesamientos dentro de los programas.

Previamente, las curvas de nivel son transformadas a un shapefile de puntos para mejor manejo de esta información. El shapefile contiene información de altura, así como también información de posición en coordenadas geográficas X y Y para cada uno de los puntos. Después, se necesita crear shapefiles de puntos que contengan el área de cada cono por separado.

Luego, se utilizan estos shapefiles de puntos con el objetivo de realizar una triangulación de interpolación polar o interpolación Delanuy (TIN) y así generar modelos digitales de los conos. El cálculo de los volúmenes es ejecutado usando estas superficies TIN como techo y una estimación de la altura base de los conos siguiendo la información topográfica, según la metodología de Mulas y otros (2016). Sin embargo, se le realizan pequeñas modificaciones para ajustarlas a los programas utilizados.

Para la estimación de los volúmenes se utilizaron los siguientes softwares: Surfer 15 (durante su periodo free trial), AutoCAD Civil 3D y GIS para comparar los valores de los volúmenes siguiendo la misma metodología y así poder establecer un margen de error con respecto a los resultados. Los datos de entrada son nubes de puntos analizados con:

2.3.1. Surfer

En Surfer 15 (versión libre) es necesaria una mayor cantidad de puntos a los alrededores del cono para generar un mejor modelado de la superficie TIN. Para el proceso de cálculo de volumen, no se genera una superficie de la topografía preexistente para restarla de la topografía actual como lo indica Mulas y otros (2016). Más bien se elige un polígono que represente la base más adecuada. Este es el polígono borde que delimitará la zona de cálculo como se muestra en la Figura 2.3. Luego, se asigna el valor de altura que mejor se le ajuste a la base. Todo esto con el fin de calcular el volumen que existe sobre el plano horizontal con ese valor de cota y considerando la superficie TIN como techo. En ensayos previos, se realizó el cálculo de volumen sin un polígono que delimite el área de estudio, lo que generaba que el cálculo de volumen fuera erróneo en los casos

en el que existiese material encima del valor base que no perteneciera al cono y correcto en los que no existiera ese material. De aquí, la importancia de delimitar el área de cálculo con un polígono de borde generado a conveniencia.

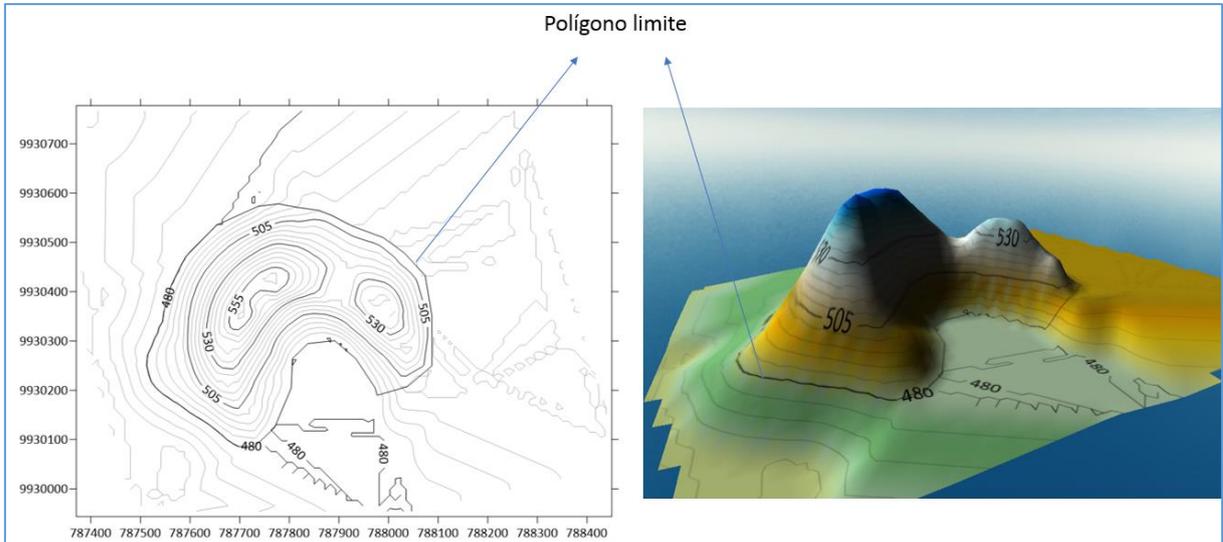


Figura 2.3: Polígono que delimita la base de cálculo de volumen en Surfer.

2.3.2. GIS

Por otro lado, en GIS es necesario eliminar los puntos que se consideran que no deben pertenecer a la superficie de estudio y se procede a agregar puntos adicionales con valores de cotas que mejor se ajusten al criterio de pendientes para poder generar un cierre del contorno el cual tiene similitud con el polígono base creado en Surfer. Estos puntos generan la superficie TIN y luego se calcula el volumen indicando cual es el valor de base. La Figura 2.4 muestra de manera sistemática este proceso.

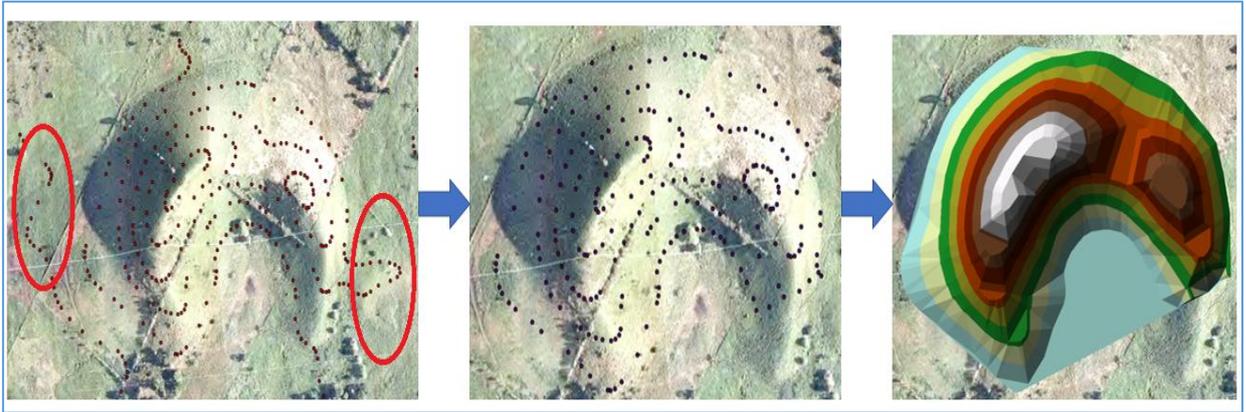


Figura 2.4: Eliminación de puntos que no se consideran pertenecientes a la superficie, cierre del polígono e interpolación en formato TIN.

2.3.3. AutoCAD Civil 3D

Por otro lado, en AutoCAD Civil 3D el cálculo de volumen se determina entre dos superficies por lo que en este caso se necesita generar una superficie TIN como techo y otra como base. Las superficies TIN son creadas a partir del mismo archivo de puntos utilizados para Surfer 15. Con la diferencia que para la superficie TIN base no se les asigna valores de altura al mismo grupo de puntos durante la creación. Esto genera una superficie con similar área planar que la superficie TIN techo. Se modifica la cota de la superficie TIN base con el valor de cota que se considera adecuado, se añade el polígono base utilizado en Surfer 15 para delimitar el área de cálculo y se procede a calcular el volumen entre las dos superficies. La Figura 2.5 se trata de uno de los polígonos irregulares que representan conos volcánicos en AutoCAD Civil 3D. Por último, se analizan los valores de volumen obtenidos determinado el valor medio y su desviación estándar.

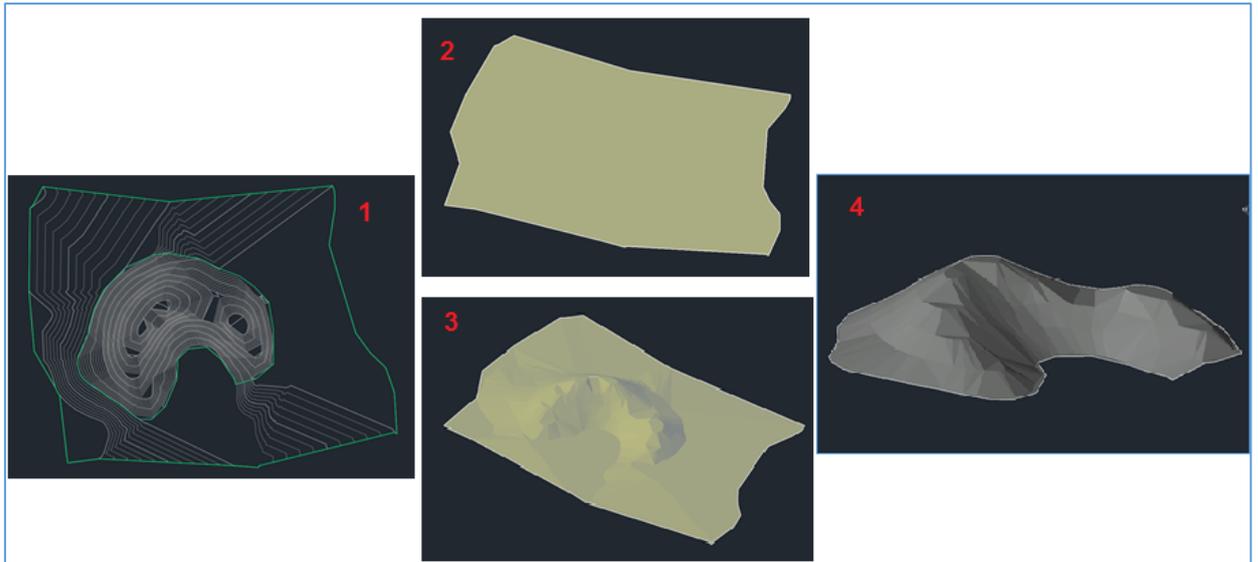


Figura 2.5: Representación de un cono en AutoCAD Civil 3D donde (1) son las curvas de nivel del cono, (2) superficie base, (3) superficie techo y (4) interpolación que da como resultado un modelamiento en 3D.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez aplicadas las diferentes metodologías, mencionadas en el capítulo 2 se obtuvieron los siguientes datos y resultados:

3.1 Mapa de pendientes

El criterio de selección de los conos de escoria dentro de zonas pobladas se refleja en el mapa de la Figura 3.1 donde los conos que son objeto de estudio se encuentran señalados de color gris como indica la leyenda del mapa. En total se trata de 18 cuerpos identificados, de los cuales:

- I. 14 corresponden a conos volcánicos.
- II. 3 se tratan de flujos de lava con dimensiones pequeñas, por lo tanto, no se consideran aptos para explotación de recursos.
- III. 1 cuerpo ubicado al extremo noreste del mapa que se trata de una depresión que se encuentra ubicada entre zona protegida y la zona de estudio. La parte ubicada dentro de la zona de estudio es pequeña con respecto a la parte que se encuentra en zona protegida. Por lo tanto, al igual que los flujos de lava, no se considera apto para extracción de material pétreo.

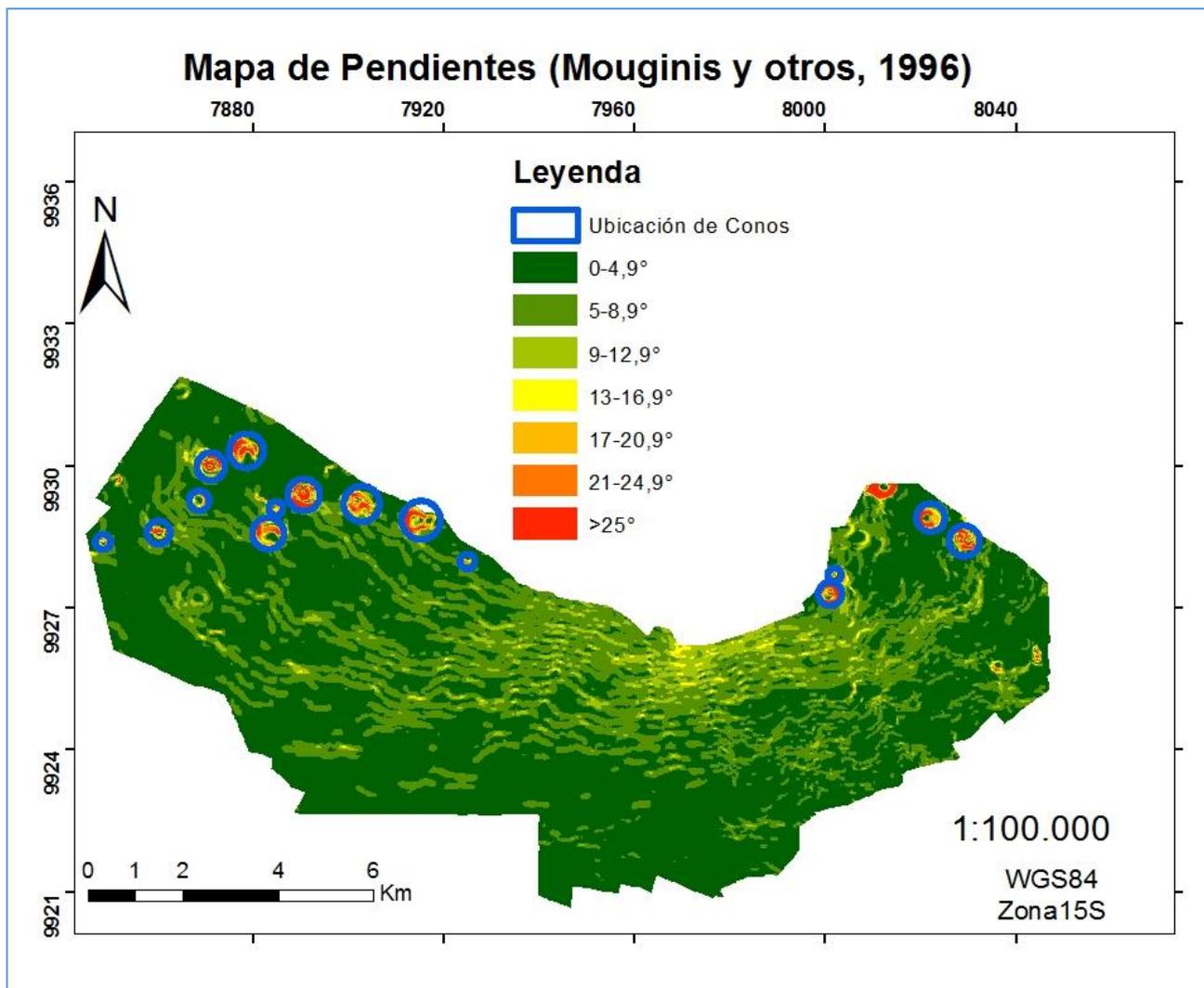


Figura 3.1: Conos que pertenecen a la zona de estudio.

3.2 Caracterización Geomorfológica

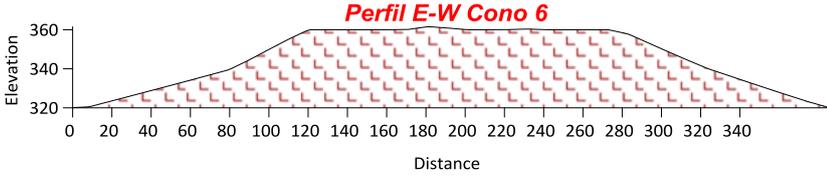
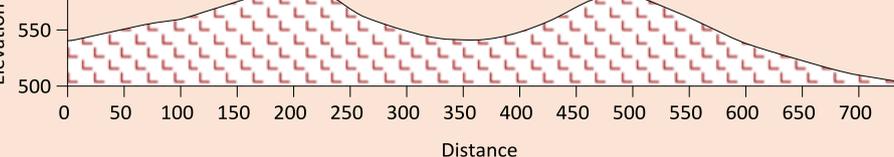
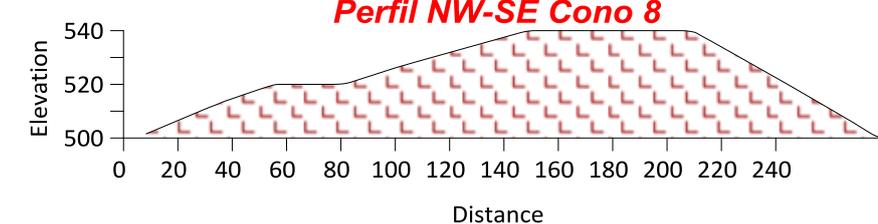
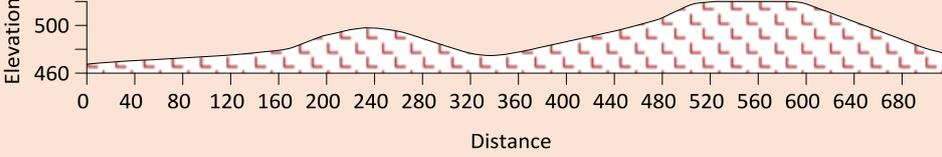
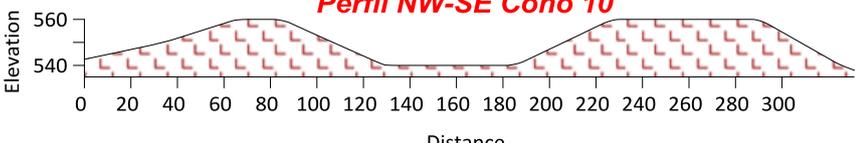
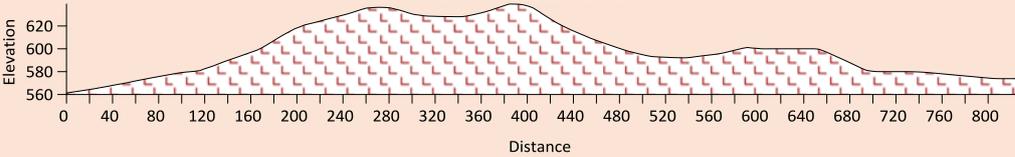
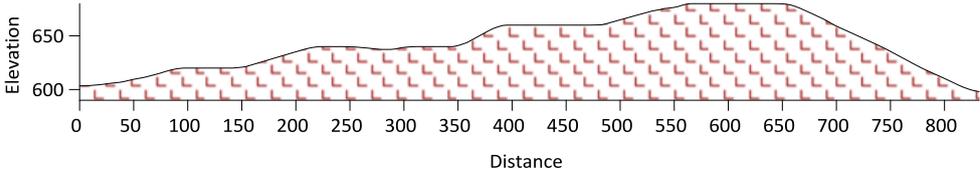
Para obtener los perfiles topográficos de la Tabla 3.1 se empleó Surfer 15 Free Trial porque se ajustan más a la metodología de la sección 2.2, y es posible observar los conos en tres dimensiones, permitiendo diferenciar entre alineación de conos y conos de toba, que suelen tener perfiles similares sin importar su orientación.

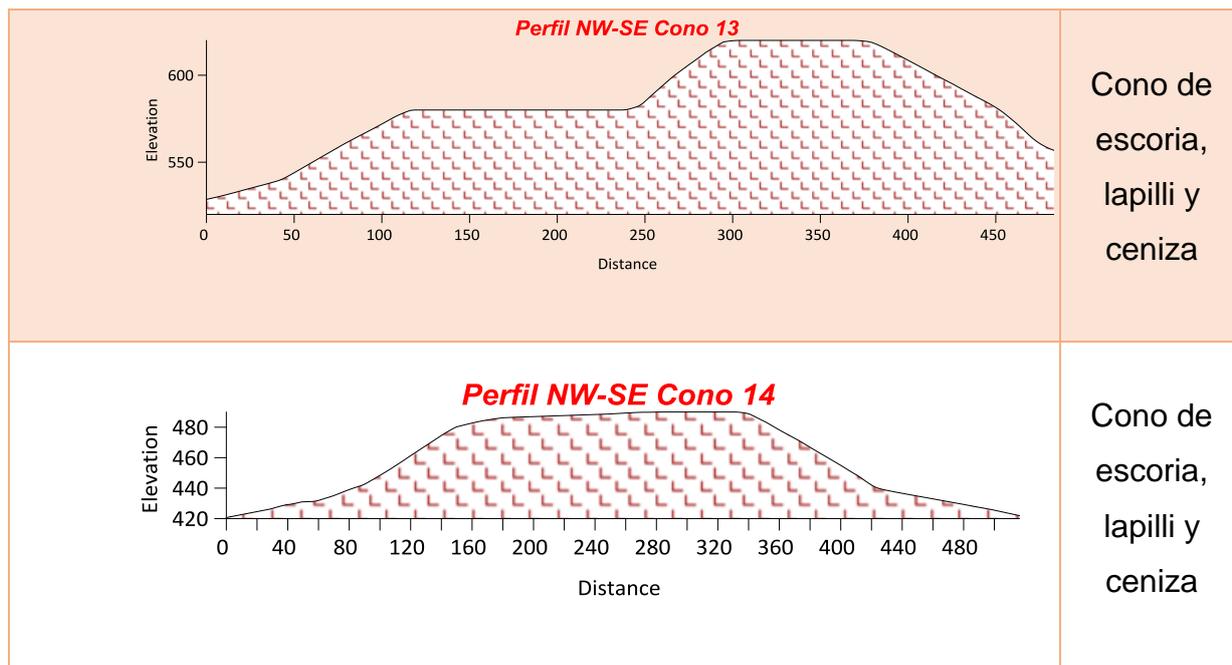
Otro punto que tomar en cuenta en cada perfil es la orientación en la que fueron realizados, esta orientación diferente entre conos se debe a que se seleccionó un perfil representativo respecto a la metodología aplicada. Por ejemplo, el perfil más representativo del cono 1 se encuentra en la dirección N-S porque es la figura más similar a un cono de toba o un cono de escoria de la Figura 2.2.

Entonces, el paso preliminar para nombrar a un cono volcánico consistió en un análisis 2D que correlaciona datos de referencia de la sección 2.2 con los datos de salida o resultados de cada uno de los perfiles de la Tabla 3.1. Como apoyo adicional, se emplearon los modelos en 3D de la Tabla 3.2, los cuales se fueron observando uno a uno con el fin de obtener la nomenclatura correcta de las geoformas del terreno.

Tabla 3.1: Perfiles topográficos elevación vs distancia y su caracterización geomorfológica.

| Perfil Topográfico Elevación vs Distancia [m] | | Geoforma |
|--|-----------------------------------|-----------------|
| <p>Perfil N-S Cono 1</p> <p>Elevation vs Distance graph for Perfil N-S Cono 1. The y-axis (Elevation) ranges from 360 to 400. The x-axis (Distance) ranges from 0 to 400. Two peaks are visible at approximately 120m and 280m distance, both reaching an elevation of about 400m. The area under the curve is shaded with a red hatched pattern.</p> | Conos de toba | |
| <p>Perfil NW-SE Cono 2</p> <p>Elevation vs Distance graph for Perfil NW-SE Cono 2. The y-axis (Elevation) ranges from 450 to 500. The x-axis (Distance) ranges from 0 to 800. A small peak is at 250m (elevation ~490m) and a larger peak is at 500m (elevation ~500m). The area under the curve is shaded with a red hatched pattern.</p> | Cono de toba | |
| <p>Perfil NE-SW Cono 3</p> <p>Elevation vs Distance graph for Perfil NE-SW Cono 3. The y-axis (Elevation) ranges from 500 to 550. The x-axis (Distance) ranges from 0 to 500. A broad peak is centered at 250m distance, reaching an elevation of approximately 550m. The area under the curve is shaded with a red hatched pattern.</p> | Cono de toba | |
| <p>Perfil N-S Cono 4</p> <p>Elevation vs Distance graph for Perfil N-S Cono 4. The y-axis (Elevation) ranges from 440 to 460. The x-axis (Distance) ranges from 0 to 340. A broad, low peak is centered at 180m distance, reaching an elevation of approximately 460m. The area under the curve is shaded with a red hatched pattern.</p> | Cono de escoria, lapilli y ceniza | |
| <p>Perfil NW-SE Cono 5</p> <p>Elevation vs Distance graph for Perfil NW-SE Cono 5. The y-axis (Elevation) ranges from 340 to 380. The x-axis (Distance) ranges from 0 to 480. A small peak is at 180m (elevation ~360m) and a larger peak is at 440m (elevation ~380m). The area under the curve is shaded with a red hatched pattern.</p> | Anillo de toba | |

| | |
|---|--|
|  <p style="text-align: center;">Perfil E-W Cono 6</p> | <p>Cono de escoria, lapilli y ceniza</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil E-W Cono 7</p> | <p>Cono de toba</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil NW-SE Cono 8</p> | <p>Cono de escoria, lapilli y ceniza</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil NW-SE Cono 9</p> | <p>Alineación de conos y hornitos</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil NW-SE Cono 10</p> | <p>Anillo de toba</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil NW-SE Cono 11</p> | <p>Alineación de conos y hornitos</p> |
|  <p style="text-align: center;">Perfil NW-SE Cono 12</p> | <p>Alineación de conos y hornitos</p> |



3.3 Cálculo de volúmenes

3.3.1. Análisis de metodología y valores obtenidos

Utilizando el software Surfer 15 para el cálculo de volúmenes de los conos ya seleccionados, el programa puede calcular el volumen de la superficie, teniendo en cuenta dicha superficie como techo y especificando un valor de cota para la base. Esto significa que se crea un plano horizontal que pase por el valor de cota. El valor del volumen será el que exista entre la superficie del cono y el plano horizontal. En algunos casos, la superficie de cono también posee elevaciones a los lados del cono a evaluar. Cuando se realiza el cálculo con conos con esta característica, los valores de volumen resultan altos pero equivocados. Por eso la necesidad de establecer un polígono de área que establezca los límites donde se calculara el volumen. De esta forma el valor del volumen calculado a la misma cota haciendo uso del borde será de una veracidad mayor. En la Tabla 3.2 se puede observar el volumen de los 14 conos obtenidos utilizando el borde y sin el borde que delimita la zona en los cálculos. Los valores en color rojo representan

la diferencia considerable que existe entre un valor de volumen calculado usando el borde y sin el borde. En total conforman 10 conos los que presentan esta condición. El color amarillo representa gran cantidad de volumen, siendo 5 el número de conos con mayor volumen.

Tabla 3.2: Valores en Surfer con bordes y sin bordes.

| Cono | Nivel de base | Volumen [m ³] | |
|------|---------------|---------------------------|------------|
| | | Surfer | |
| | msnm | Borde | Sin Borde |
| 1 | 360 | 6 713,337 | 13 901,112 |
| 2 | 460 | 5 148,014 | 5 146,657 |
| 3 | 480 | 5 967,367 | 11 245,935 |
| 4 | 440 | 1 106,909 | 2 632,842 |
| 5 | 340 | 4 344,738 | 23 299,789 |
| 6 | 320 | 2 261,155 | 4 876,021 |
| 7 | 500 | 15 748,741 | 23 046,110 |
| 8 | 500 | 993,049 | 993,049 |
| 9 | 460 | 7 034,247 | 10 186,870 |
| 10 | 540 | 830,900 | 1 486,359 |
| 11 | 550 | 12 164,848 | 15 450,948 |
| 12 | 600 | 10 031,983 | 10 971,391 |
| 13 | 520 | 9 102,818 | 14 295,735 |
| 14 | 420 | 5 398,143 | 5 398,186 |

En AutoCAD Civil 3D, el proceso es un poco más complicado porque es necesario crear una superficie base aparte de la superficie original del terreno. El programa calcula el volumen entre estas dos superficies. Pero al igual que Surfer, este tiene la facilidad de utilizar un polígono delimitador para calcular el volumen que se encuentre dentro de este.

Dentro de proceso para calcular el volumen de GIS, se encuentra el de adicionar puntos de elevación para poder tener un mejor cierre de la curva de acuerdo con el valor de cota que se presente en los alrededores. En muchos casos la curva de nivel no representa toda la forma del cono por el espaciamiento de las curvas o falta de puntos. Esta es la razón, de la necesidad de adicionar puntos para un

mejor modelamiento de la superficie. Pero para poder adicionar estos puntos de la mejor forma, es necesario tener idea de colocar donde se encuentran los límites de cada cono. Cosa que se obtiene teniendo Ortofotos de calidad. Así que uno de los limitantes de este programa sería este. Ya que a diferencia de Surfer o AutoCAD aquí no es posible realizar el cálculo del volumen de la superficie usando un polígono que determine de donde se va a calcular el volumen. Pero si tiene la facilidad de realizar el cálculo sobre un valor de cota designado, al igual que Surfer.

De los tres programas, la forma más rápida, sencilla y efectiva para calcular el volumen de una superficie es Surfer 15, que posee todas las ventajas de los otros dos programas.

3.3.2. Valores de los volúmenes obtenidos

Se realizó el cálculo de volúmenes para los 14 conos identificados dentro de la zona poblada utilizando 3 softwares diferentes ya mencionados. Con los 3 valores obtenidos de un mismo cono, se obtiene un valor promedio y su desviación estándar relativa (DER%). Esto con la finalidad de un valor más fiel y con un margen de error calculado con valores obtenidos de diferentes medios. En la Tabla 3.3. se encuentran los 14 valores de volúmenes promedio, desviación estándar (DE) y desviación estándar relativa (%DER). Se presentan, el valor del volumen calculado por cada uno de los programas, su valor medio y la desviación estándar relativa, que poseen los datos. Analizando los datos obtenidos se puede decir que existe una desviación estándar relativa que va desde el 0% hasta el 10.26%. Valores que representan un muy bajo error en general y que generan rangos de confiabilidad respecto a resultados. Dentro de los 14 conos se puede observar que los valores de volumen en m^3 varían considerablemente. El cono 10, es el cono más pequeño de todos y posee un volumen $\sim 833,107 m^3$ con una %DER de 0.55. Mientras que el cono 7, es el más grande de todos con un volumen de $15\,549,934 m^3$ y un %DER de 2.27. También, en la Tabla 3.3 se encuentran señalados de color amarillo los 5 conos de mayor volumen, siendo estos los más atractivos para considerar un plan de futura explotación. Estos conos son el 7, 9, 11, 12 y 13. Será necesario

someterlos a análisis más profundos y tomando en cuenta otros criterios para determinar la factibilidad de explotación.

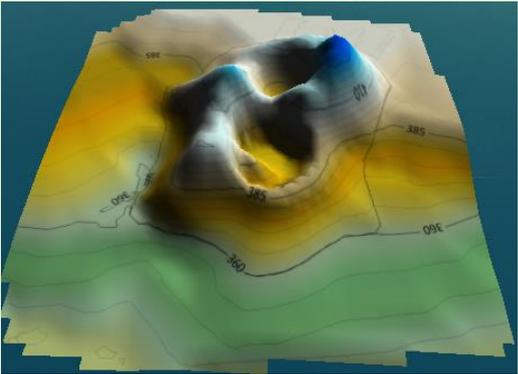
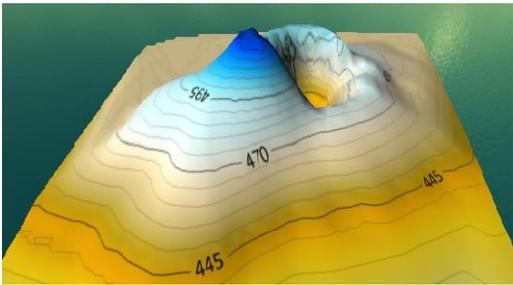
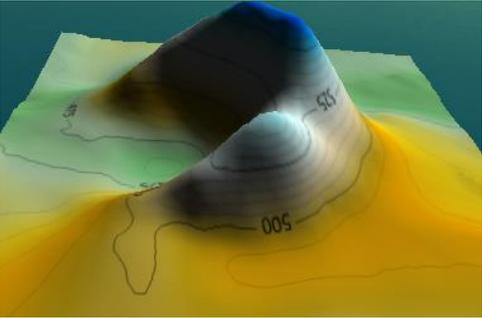
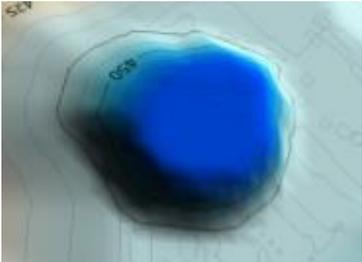
Tabla 3.3: Volúmenes estimados de los conos de ceniza dentro de la zona poblada de Santa Cruz. En amarillo están seleccionados los 5 conos con mayor volumen

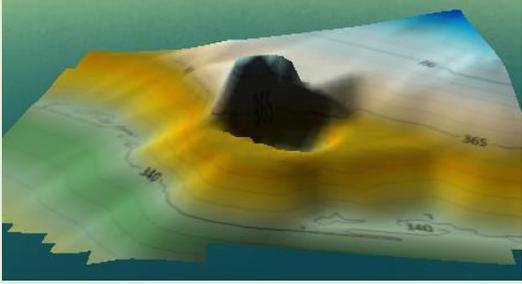
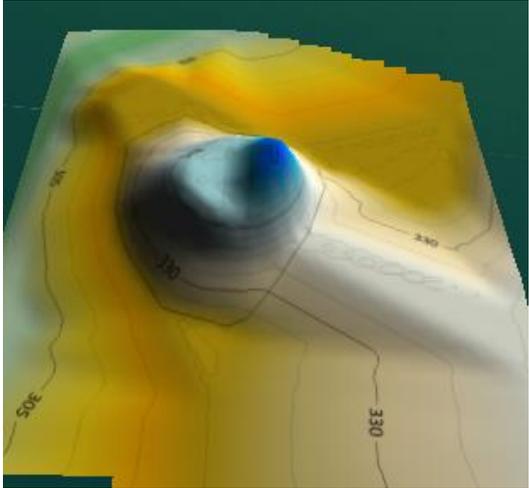
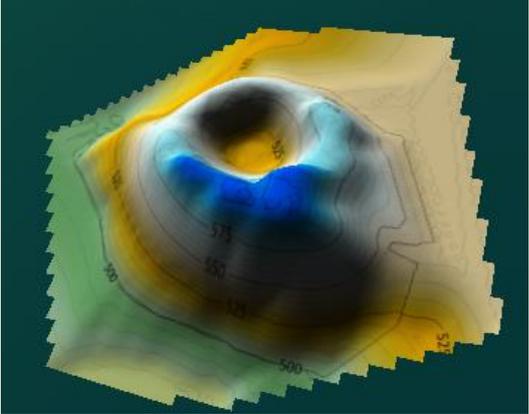
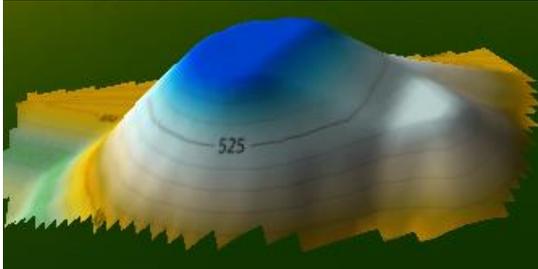
| Cono | Nivel de base | Volumen [m ³] | | | Promedio | DE | %D ER |
|------|---------------|---------------------------|------------|------------|-------------------|-------------------|----------|
| | | GIS | Surfer | Civil 3D | | | |
| | Msn m | | | | [m ³] | [m ³] | |
| 1 | 360 | 6 731,156 | 6 713,337 | 6 585,565 | 6 676,686 | 79,414 | 1.19 |
| 2 | 460 | 5 149,691 | 5 148,014 | 5 154,430 | 5 150,711 | 3,327 | 0.06 |
| 3 | 480 | 5 910,710 | 5 967,367 | 5 973,925 | 5 950,667 | 34,759 | 0.58 |
| 4 | 440 | 1 105,198 | 1 106,909 | 1 107,252 | 1 106,453 | 1,100 | 0.10 |
| 5 | 340 | 3 619,127 | 4 344,738 | 4 352,590 | 4 105,485 | 421,216 | 10.3 |
| 6 | 320 | 2 267,078 | 2 261,155 | 2 260,814 | 2 263,016 | 3,522 | 0.16 |
| 7 | 500 | 15 142,698 | 15 748,741 | 15 758,363 | 15 549,934 | 352,709 | 2.27 |
| 8 | 500 | 993,126 | 993,049 | 993,078 | 993,084 | 39 | 0.01 |
| 9 | 460 | 6 633,491 | 7 034,247 | 7 024,397 | 6 897,378 | 228,586 | 3.31 |
| 10 | 540 | 838,354 | 830,900 | 830,068 | 833,107 | 4,562 | 0.55 |
| 11 | 550 | 11 643,886 | 12 164,848 | 12 112,851 | 11 973,862 | 286,947 | 2.40 |
| 12 | 600 | 9 904,325 | 10 031,983 | 9 972,721 | 9 969,676 | 63,883 | 0.64 |
| 13 | 520 | 9 049,884 | 9 102,818 | 9 090,952 | 9 081,218 | 27,777 | 0.31 |
| 14 | 420 | 5 339,787 | 5 398,143 | 5 398,461 | 5 378,797 | 33,784 | 0.63 |

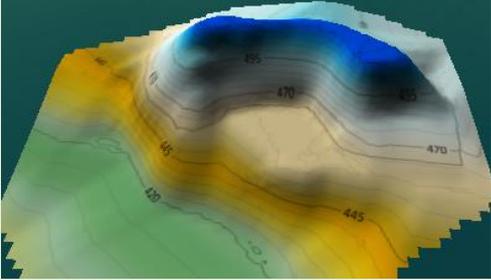
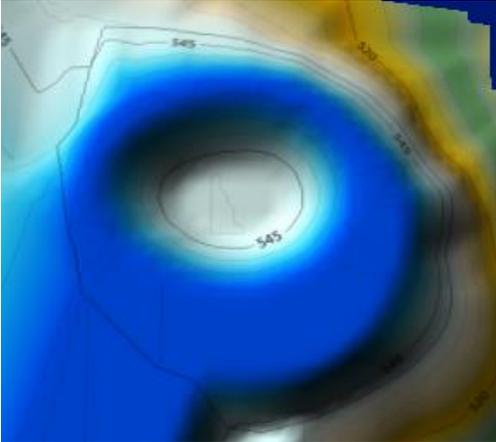
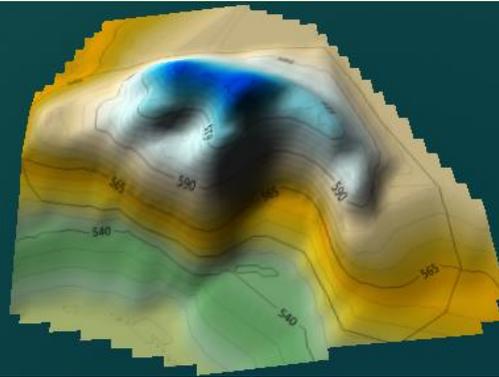
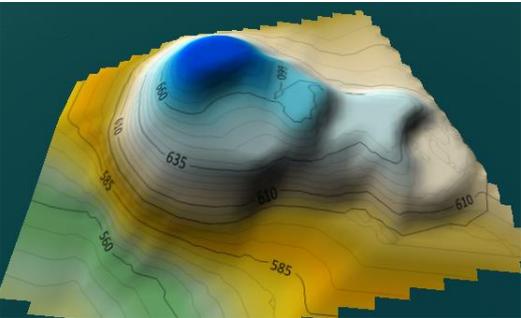
Finalmente, la aplicación de cada una de las metodologías se encuentra resumida en la Tabla 3.4, la cual es una Tabla resumen de los resultados obtenidos tanto en la caracterización geomorfológica como del cálculo de volumen de los conos. El orden de la Tabla de izquierda a derecha corresponde a: modelos 3D de cada cono de la zona de estudio, descripción geomorfológica y el volumen, el cual corresponde a un valor medio junto con la variabilidad que presentan los datos. Dentro de la Tabla 3.4 se encuentran incluidos todos los conos que pertenecen a la zona poblada de la Isla Santa Cruz excluyendo las dos minas que se encuentran en funcionamiento, es decir, de estos 14 conos

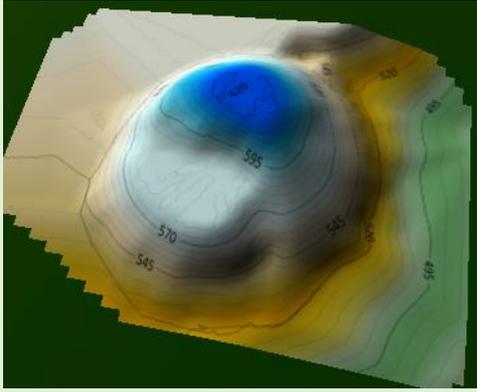
solo 5 se consideran los más propensos a ser explotados como ya se mencionó al inicio de la sección 3.3.2, esto se debe, a que son los conos con mayor volumen en unidades cúbicas.

Tabla 3.4: Tabla resumen de resultados.

| CONO | DESCRIPCIÓN | $V \pm \delta V$ [m ³] |
|---|--|------------------------------------|
|  | <p>Cono 1: Cono de toba con dos cráteres. Los diámetros son de ~50m y ~70m. La altura media del cono es ~40m.</p> | <p>6 676,686± 79,414</p> |
|  | <p>Cono 2: Cono de toba. Sus dimensiones son de ~60m de altura, con un perfil alto y una pendiente fuerte (>25°). Tiene un cráter con diámetro ~200m.</p> | <p>5 150,711± 3,327</p> |
|  | <p>Cono 3: Cono con tendencia a la circularidad, sin presencia de cráteres. Caracterizado como un cono de toba. Tiene dos elevaciones de material de ~50m y ~20m.</p> | <p>5 950,667± 34,759</p> |
|  | <p>Cono 4: Cono de escoria de ~20m de altura y ~300m de diámetro. Presenta forma irregular y yace sobre una plataforma de pendiente suave o plana (<4,9°).</p> | <p>1 106,453± 1,100</p> |

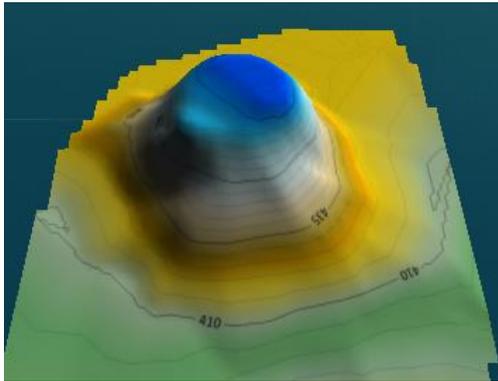
| | | |
|---|--|--------------------------------|
|  | <p>Cono 5: Anillo de toba, sus dimensiones se encuentran en el rango de 20 a 40m de altura, presenta un cráter con diámetro ~110m.</p> | <p>4 105,485± 421,216</p> |
|  | <p>Cono 6: Cono de escoria con presencia de un cráter. Localizado sobre una superficie irregular donde el material se acumuló a favor de la pendiente. Sus dimensiones corresponden a ~40m de altura y ~300m de diámetro.</p> | <p>2 263,016± 3,522</p> |
|  | <p>Cono 7: Cono de toba con cráter con ~80m de altura media y ~200m de diámetro. Sus flancos presentan pendientes fuertes (>25°).</p> | <p>15 549,934± 352,709</p> |
|  | <p>Cono 8: Cono de escoria, su material se ha deformado a favor de la pendiente que yace. Su altura es de ~40 m y su diámetro ~160m. El material que se acumuló en zona de pendiente tiene un área aproximada de 60x20 m².</p> | <p>993,084± 39</p> |

| | | |
|---|--|--------------------------------|
|  | <p>Cono 9: Alineación de conos y hornitos. Las alturas se encuentran en el rango de 10 a 60m.</p> | <p>6 897,378± 228,586</p> |
|  | <p>Cono 10: Anillo de toba circular. El cráter tiene un diámetro ~80 m y tiene una altura ~20 m.</p> | <p>833,107± 4,562</p> |
|  | <p>Cono 11: Alineación de conos y hornitos con cráteres en la parte superior o techo y en la base. Con ~30m y ~70m, de diámetro respectivamente. Las alturas varían de 20 a 60 m.</p> | <p>11 973,862± 286,947</p> |
|  | <p>Cono 12: Alineación de conos y hornitos. Sus dimensiones varían de 10 a 50m en altura y de 20 a 200m en diámetro.</p> | <p>9 969,676± 63,883</p> |



Cono 13: Cono de escoria de ~100 m de altura y ~400 m de diámetro. Su material se ha acumulado a favor de una pendiente que va de suave (5-9°) a intermedia (9-17°). Presencia de un cráter en el tope de ~200m de diámetro.

9 081,218±
27,777



Cono 14: Cono de escoria de ~60m de altura y ~400m de diámetro. Posicionado sobre zona de pendiente plana a suave (<4,9°).

5 378,797±
33,784

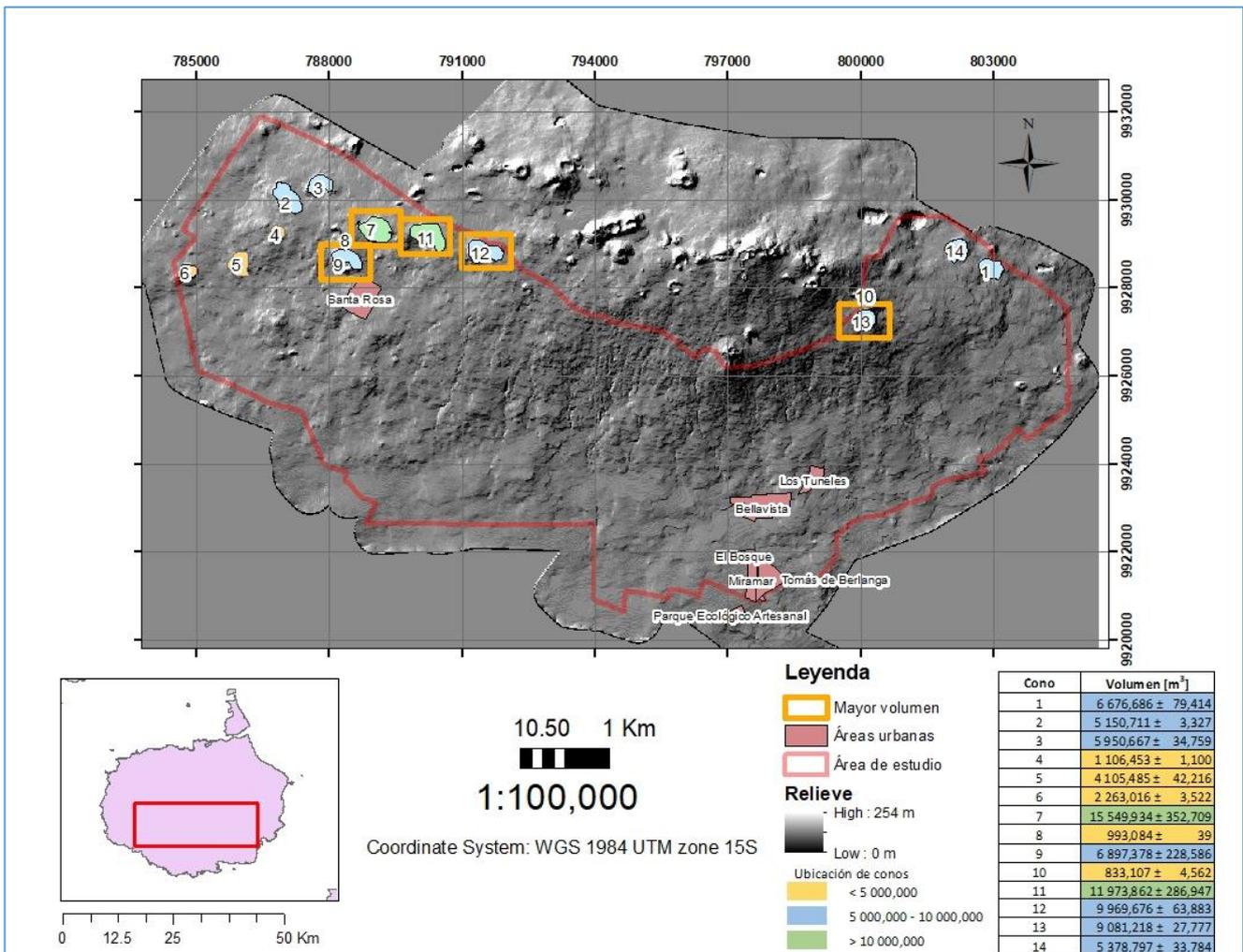


Figura 3.2: Mapa de posibles recursos.

Como resultado final se obtuvo el mapa de recursos de la Figura 3.2, este mapa es el producto final de la aplicación del mapa de pendientes de Mouginis, caracterización geomorfológica y cálculo de volumen. Se puede apreciar los conos de cenizas con sus respectivos volúmenes y los pueblos cercanos. Los conos están diferenciados por una escala de color con relación a su volumen: los conos con volúmenes menores a 5 000,000 m³ son amarillo, los que están entre 5 000,000 m³ y 10 000,000 m³ de color celeste y mayores a 10 000,000 m³ de color verde. Los conos encerrados en rectángulos naranja son los 5 de mayor volumen.

3.3.3. Volúmenes obtenidos de las minas en funcionamiento

Aparte de los volúmenes que se calcularon para los conos identificados dentro de la zona poblada, se empleó la misma metodología para calcular un estimado del volumen que poseen las minas de granillo negro (Mina 1) y granillo rojo (Mina 2). Actualmente las minas se encuentran en etapa de funcionamiento y pertenecen a la zona protegida de la isla. En la Tabla 3.5 se pueden observar los valores obtenidos a través de los dos SIG's y el CAD, el valor promedio en amarillo y la desviación estándar relativa correspondiente entre los tres valores de volumen.

Tabla 3.5: Volúmenes estimados de las minas de granillo rojo y negro dentro de la zona protegida de Santa Cruz.

| Mina | Nivel de base msn m | Volumen [m ³] | | | Promedio [m ³] | DE [m ³] | %DE R |
|------|---------------------|---------------------------|-----------|-----------|----------------------------|----------------------|-------|
| | | GIS | Surfer | Civil 3D | | | |
| | | 1 | 560 | 1 107,094 | 1 499,998 | 1 510,851 | |
| 2 | 250 | 3 166,106 | 3 355,523 | 3 348,381 | 3 290,003 | 107,358 | 3.26 |

3.3.4. Cálculo de volumen a una resolución 10x10

Como proceso adicional del estudio, se adquirió un DEM de 10mx10m, esto se llevó a cabo durante el proceso de elaboración del producto final, con el fin de comparar y observar como una resolución diferente (DEM 10x10 vs. DEM 20x20) afecta o no la variabilidad de los datos de salida. Una de las primeras diferencias notable se observa en la Figura 3.3 debido a que, a partir de un DEM es posible elaborar un mapa de relieve del terreno o hillshade. El DEM 10x10 con respecto al DEM 20x20, presenta una mejor calidad al momento de ser procesado a hillshade.

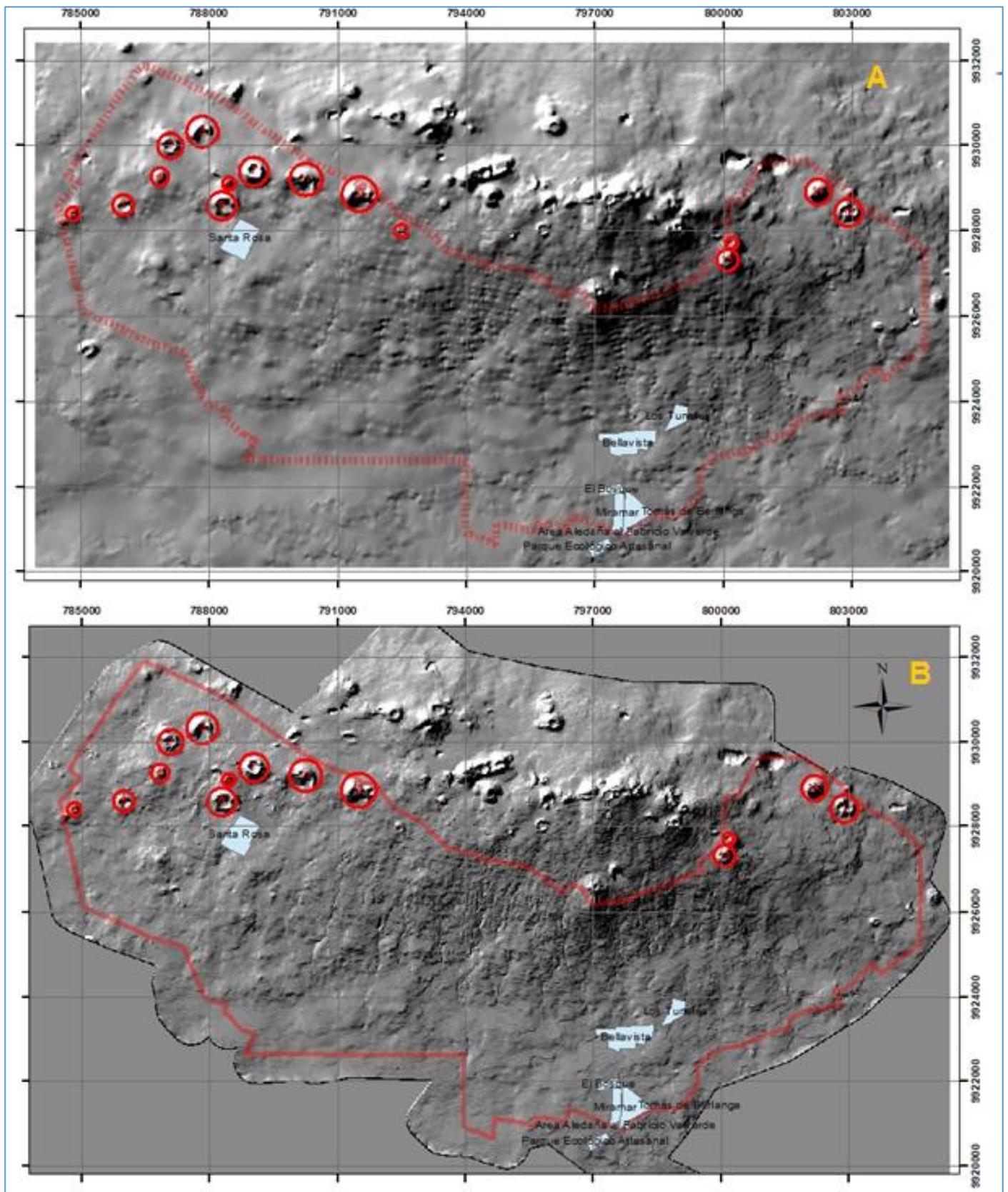


Figura 3.3: Mapa de relieve de la zona de estudio: (A) desde un DEM 20x20 y (B) desde un DEM 10x10.

Luego, con este nuevo DEM se realizó el cálculo de volumen aplicando la misma metodología, pero solo a los 5 conos identificados previamente como los de mayor volumen. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6, donde el volumen de cada uno de los conos fue calculado de la misma forma y tomando como nivel base la misma cota de la Tabla 3.3, es decir, el único parámetro que varía es la resolución del DEM.

Tabla 3.6: Volúmenes estimados de los 5 conos más grandes con DEM 10x10m dentro de la zona poblada de Santa Cruz.

| Conos | Nivel de base | Volumen [m ³] | | | Promedio [m ³] | DE [m ³] | %DER |
|-------|---------------|---------------------------|------------|------------|----------------------------|----------------------|------|
| | | GIS | Surfer | Civil 3D | | | |
| | msnm | | | | | | |
| 7 | 500 | 14 999,803 | 15 714,964 | 15 723,505 | 15 479,424 | 415,386 | 2.68 |
| 9 | 460 | 6 697,239 | 7 023,556 | 7 024,243 | 6 915,013 | 188,598 | 2.73 |
| 11 | 550 | 11 254,446 | 12 146,229 | 11 404,632 | 11 601,769 | 477,458 | 4.12 |
| 12 | 600 | 9 892,001 | 9 987,356 | 9 969,615 | 9 949,657 | 50,714 | 0.51 |
| 13 | 520 | 9 064,931 | 9 148,914 | 9 147,112 | 9 120,319 | 47,976 | 0.53 |

Al comparar los cinco conos de mayor volumen de la Tabla 3.3 con la Tabla 3.6 se observa que los valores de volumen promedio de cada cono no varían significativamente al variar la resolución del DEM. Sin embargo, estos datos se encuentran sujetos a la confirmación de su veracidad, la Tabla 3.7 muestra la desviación estándar poco significativa entre una resolución 10x10 y una de 20x20, así como una desviación estándar relativa que va de 0.14% a 2.23%, se encuentra subrayada debido a que se consideran cambios pequeños.

Tabla 3.7: Variabilidad de los datos por resoluciones de DEM distintas.

| Conos | Volumen promedio DEM 10x10 [m ³] | Volumen promedio DEM 20x20 [m ³] | DE [m ³] | %DER |
|-------|--|--|----------------------|------|
| 7 | 15 479,424 | 15 549,934 | 49,858 | 0.32 |
| 9 | 6 915,013 | 6 897,378 | 12,470 | 0.18 |
| 11 | 11 601,769 | 11 973,862 | 263,109 | 2.23 |
| 12 | 9 949,657 | 9 969,676 | 14,156 | 0.14 |
| 13 | 9 120,319 | 9 081,218 | 27,649 | 0.30 |

CAPÍTULO 4

4. Posible planificación de explotación

Adicionalmente, observando la ubicación espacial que tienen los 14 conos con su entorno, los 5 conos de mayor volumen se encuentran a una distancia apropiada de los pueblos y ciudades, algo que es importante a considerar para determinar su factibilidad. Esto se llevó a cabo con ayuda de ortofotos de lugar y el software Google Earth Pro. Podemos decir que el cono 7 y 9 son los más cercanos al pueblo de Santa Rosa y se observan poco o casi nada de estructuras como edificios o casas alrededor de ellas. Los conos 11 y 12 están ubicados de tal manera que no existen estructuras de este tipo a sus alrededores. El cono 13 por otro lado está ubicado al otro extremo de nuestra área de estudio. Esta considerablemente lejos de algún pueblo o ciudad y no se encuentran casas o estructuras en su perímetro. En consideración a esto, los 5 conos antes mencionados se vuelven aún más atractivos para futuros estudios y puntos principales para evaluar directamente en el campo. Pero por lo pronto con los valores de volúmenes calculados, se realizó una planificación del plan de explotación que se podría optar por usar en el futuro. Teniendo en cuenta la información acerca del estado de las minas de materiales pétreos, se asume un valor de extracción de material pétreo de 40,000 m³ al año, según la proyección del valor de extracción hecha para el 2019 que es de 37,774 m³. Esta proyección y demás datos correspondientes a los estados de las minas de Santa Cruz pueden ser encontradas en “Técnicas y sistemas de construcción sustentable con materiales alternativos en la Provincia de Galápagos” del año 2013. El valor de extracción de material puede ser mayor o menor, pero todo dependerá de la demanda que exista a futuro. En las Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se encuentra una posible planificación de explotación de los 5 conos más grandes. Considerando niveles de 20m de altura y una explotación anual de 40,000 m³, se estima como podría estar diseñada su explotación por niveles dentro de los próximos 10 años. Para el caso de estos ejemplos, se consideró empezar una explotación desde el primer nivel, la parte más alta. Pero la explotación se puede diseñar para empezar desde cualquier nivel y depende de cuanto material se desea extraer de estos para completar la demanda anual.

Tabla 4.1: Posible plan de explotación del cono 7.

| Cono | Nivel | Piso | Altura | Volumen | Volumen Acumulado | Años de explotación | | | | | | | | | | Total | |
|------|-------|------|--------|------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---|
| | | msnm | | | | m | m ³ | m ³ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | 8 |
| 7 | 1 | 600 | 20 | 463,997 | 463,997 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |
| | | 580 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 580 | 20 | 1 458,555 | 1 922,552 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 560 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 560 | 20 | 3 104,324 | 5 026,875 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 540 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 540 | 20 | 4 756,499 | 9 783,374 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 520 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 520 | 20 | 5 965,367 | 15 748,741 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 500 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 15 748,741 | | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |

Tabla 4.2: Posible plan de explotación del cono 9.

| Cono | Nivel | Piso | Altura | Volumen | Volumen Acumulado | Años de explotación | | | | | | | | | | Total | |
|------|-------|------|--------|-----------|-------------------|---------------------|----------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---|
| | | msnm | | | | m | m ³ | m ³ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | 8 |
| 9 | 1 | 520 | 20 | 1 091,095 | 1 091,096 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |
| | | 500 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 500 | 20 | 2 388,121 | 3 479,216 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 480 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 480 | 20 | 4 646,127 | 7 034,248 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 460 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 7 034,248 | | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |

Tabla 4.3: Posible plan de explotación del cono 11.

| Cono | Nivel | Piso | Altura | Volumen | Volumen Acumulado | Años de explotación | | | | | | | | | | Total | |
|------|-------|------|--------|----------------|-------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | msnm | m | m ³ | m ³ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 11 | 1 | 640 | 10 | 83,297 | 83,297 | 40,000 | 40,000 | 3,297 | | | | | | | | 83,297 | |
| | | 630 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 630 | 20 | 69,7016 | 780,313 | | | 36,703 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 316,703 |
| | | 610 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 610 | 20 | 1 827,544 | 2 607,857 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 590 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 590 | 20 | 3 834,576 | 6 442,433 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 570 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 570 | 20 | 5 722,649 | 12 165,082 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 550 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 12 165,082 | | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |

Tabla 4.4: Posible plan de explotación del cono 12.

| Cono | Nivel | Piso | Altura m | Volumen m ³ | Volumen Acumulado m ³ | Años de explotación | | | | | | | | | | Total | |
|------|-------|------|-------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---|
| | | msnm | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 12 | 1 | 680 | 20 | 420,135 | 420,135 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |
| | | 660 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 660 | 20 | 1 474,457 | 1 894,591 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 640 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 640 | 20 | 3 122,078 | 5 016,670 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 620 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 620 | 20 | 5 015,314 | 10 031,984 | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 600 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | 10 031,984 | | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 | |

Tabla 4.5: Posible plan de explotación del cono 13.

| Cono | Nivel | Piso | Altura m | Volumen m ³ | Volumen Acumulado m ³ | Años de explotación | | | | | | | | | | Total | | |
|------|-------|------|-------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | msnm | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| 13 | 1 | 620 | 20 | 354,474 | 354,474 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 34,474 | | 354,474 | |
| | | 600 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2 | 600 | 20 | 843,503 | 1 197,977 | | | | | | | | | | | 5,526 | 40,000 | 45,526 |
| | | 580 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3 | 580 | 20 | 1 913,810 | 3 111,787 | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 560 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4 | 560 | 20 | 2 676,305 | 5 788,092 | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 540 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 540 | 20 | 3 314,727 | 9 102,819 | | | | | | | | | | | | | 0 |
| | | 520 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 9 102,819 | | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 40,000 | 400,000 |

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En la zona poblada de Santa Cruz existen 18 cuerpos volcánicos monogenéticos, de los cuales 14 son clasificados como conos. Las otras estructuras corresponden a 3 flujos de lavas y 1 depresión. Los 14 conos volcánicos corresponden a: 5 conos de toba, 1 anillo de toba, 3 alienaciones de conos y hornitos y 5 conos de escoria, lapilli y ceniza.

Se calcularon los volúmenes mediante tres software. La mina de granillo rojo actualmente tiene un volumen de $3\,290,005 \pm 107,358 \text{ m}^3$ y la mina de granillo negro $1\,505,425 \pm 7,654 \text{ m}^3$ con error relativo en los cálculos de 3.26% y 0.51%, respectivamente. Los conos 5 conos de mayor volumen tienen medidas que fluctúan entre $6\,000,000 \text{ m}^3$ y $16\,000,000 \text{ m}^3$ con una variabilidad en el rango de $27,000 \text{ m}^3$ a $353,000 \text{ m}^3$.

Se compara como afecta la resolución del DEM en los 5 conos de mayor tamaño, lo resultados obtenidos muestran que en un DEM 20x20 el error relativo varía entre 0.31% y 2.27% y en un DEM 10x10 el error varía entre 0.53% a 2.68%, con dispersión de datos de 0.14% a 2.23%. Aunque, el error relativo es mayor en la resolución 10x10, no afecta de manera significativa los resultados. Esto se debe a que el cambio de resoluciones no es abrupto.

Por último, se presenta un primer borrador de plan de explotación de los 5 conos de mayor volumen del cual se estima una factibilidad positiva en caso de extracción del material. Además, el valor de la demanda anual se puede satisfacer explotando 1 o 2 niveles de los conos mayores en un lapso mayor a 10 años.

5.2. Recomendaciones

Realizar topografía de campo a detalle, con resolución métrica, ya que se presentarían resultados más certeros en los cálculos de volumen de los 5 conos caracterizados como recurso para posible explotación. Los datos podrían presentar o no un margen de error considerable al haber un cambio abrupto en la resolución del DEM. Por ejemplo, un DEM 20x20 comparado con DEM 1x1.

Verificar las caracterizaciones geomorfológicas, conos soldados y conos no soldados con observaciones reales de campo.

Ir al campo y tomar muestras de rocas de los conos para realizar los respectivos análisis petrográficos con la finalidad de caracterizar el tipo de material y su calidad.

Realizar estudios de especies endémicas para evaluar los efectos ambientales de la extracción de recursos no renovables.

Para la logística de un mejor plan de explotación se recomienda considerar la densidad del material en los cálculos, para poder realizar la planificación en valores de toneladas. Y así, obtener valores más reales al desprestigiar los espacios vacíos existente en el material como las vesículas y orificios.

BIBLIOGRAFÍA

Bernard B. (2017). Clasificación de los volcánes del Ecuador parte 2: en base a su morfología. Accedido el 17 de agosto desde <http://ceniza-ecuador.over-blog.com>

Bow C. S. (1979). Geology and petrogenesis of lavas from Floreana and Santa Cruz islands, Galápagos Archipelago. PhD thesis, Univ. of Oreg., Eugene. 308pp.

Brown, L. (2009). Los puntos calientes de Galápagos. Royal Geographical Society. Accedido el 5 de junio del 2018 desde <http://descubriendogalapagos.ec>.

Chauvel C., Lewin E., Carpentier M., Arndt N. y Marini J. (2008). Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array. *Nat. Geosci.*, 1. 64–67.

Cañizares F. (2016). Sismo de Pedernales, Ecuador 2016. Artículo presentado en Escuela Politécnica Nacional (Mayo del 2016), Quito, Ecuador.

Claussen B. (2015). La Geología de las Islas Galápagos. Geoscience Research Institute, 89. Accedido el 6 de julio del 2018 desde <http://grisda.org/espanol/ciencia-de-los-origenes/ciencia-2015-2019/>

Constitución Política de la República del Ecuador: Publicada en el Registro Oficial No. 449 del 20 octubre del 2008. Última modificación: 30 de enero del 2012.

Connor C. y Conway F. (2000). Basaltic Volcanic Fields. Academic Press. *Encyclopedia of Volcanoes*. 331-343.

Dirección del Parque Nacional Galápagos, Dirección de Ecosistemas. (2013). Técnicas y sistemas de construcción sustentable con materiales alternativos en la Provincia de Galápagos. Puerto Ayora, Galápagos.

D'Ozouville, N., Deffontaines, B., Benveniste, J., Wegmüller, U., Violette, S., & De Marsily, G. (2008). DEM generation using ASAR (ENVISAT) for addressing the lack of freshwater ecosystems management, Santa Cruz Island, Galapagos. *Remote Sensing of Environment*, 112. 4131-4147.

Eliasson. U. (1984). Chapter 7: Native climax forest. In R. Perry (Ed), *Key environments: Galápagos*.

Elsworth, D. y Voight, B. (1996). Evaluation of volcano flank instability triggered by dyke intrusion. *Special Publication Geological Society of London*, 110. 45-54.

Evers J. (2014). Volcanic Cone. National Geographic Society: *Volcanoes*. Accedido el 31 de julio desde <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/volcanic-cone/>

Galápagos tiene 25.244 habitantes según censo 2015. Artículo por Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Quito, Ecuador.

Geist D., Bergantz G. y Chawdick W. (2014). Galápagos magma chambers. *American Geophysical Union*, 204 (1). 55-69.

Geist D., Naumann T. y Larson P. (1998). Evolution of Galápagos Magmas: Mantle and Crustal Fraction without assimilation. *Oxford University Press: Journal of Petrology*, 39 (5). 953-971.

Geist D., Naumann T., Standish J., Kurz M., Harpp K., White W. y Fornari D. (2005). Wolf Volcano, Galápagos Archipelago: Melting and Magmatic Evolution at Margins of a Mantle Plume. *Oxford University Press: Journal of Petrology*, 46 (11). 2197-2224.

Geist D., White W., Albarede F., Harpp K., Reynolds R., Blichert-Toftand J. y Kurz M. (2002). Volcanic evolution in the Galápagos: The dissected shield of Volcan Ecuador. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 3(10). 1061.

Gibson S. y Geist D. (2010). Geochemical and geophysical estimates of lithospheric thickness variation beneath Galápagos.

Grimaldi D. (2017). Cordillera Submarina en Placa de Nazca, 707. Accedido el 12 de agosto desde <https://grimaldi707.wordpress.com/2017/09/06/simulacros>

Gripp A. y Gordon R. (2002). Young tracks of hotspot and current plate velocities. *Geophysical Journal International*, 150 (2). 321-361.

Herzberg C. (2011). Basalts as temperature probes of Earth's mantle. *Geology*, 39.1179–1180.

Herzberg C. y Asimow P. (2008). Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9. 9001.

Hey R. (1977). Tectonic evolution of the Cocos-Nazca spreading center. *Geological Society of America*, 88. 1401-1406.

Hoernle K., Werner R., Morgan J. y Mrazek J. (2000). Existence of complex spatial zonation in the Galápagos plume for at least 14 m.y. *ResearchGate*, 28 (5). 435-438.

Hofmann W. (1997). Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385. 219–229.

Holmes A. (1929). Radioactivity and earth movements: *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, 18 (3). 559– 606.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) (2011). NTE INEN 0872: Áridos para Hormigón. Requisitos. Quito. 21pp.

Kerr R. y Mériaux C. (2004). Structure and dynamics of sheared mantle plumes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5 (12). 1-42.

Klein E., Smith D., Williams C. y Schouten H. (2005). Counter-rotating microplates at the Galapagos triple junction. *Nature International Journal of Science*, 443. 855-858.

Kurz M. y Geist D. (1999). Dynamics of the Galápagos hotspot from helium isotope geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (23/24), 4139-4156.

Lay T., Williams Q. y Garnero E. (1998). The core–mantle boundary layer and deep Earth dynamics. *Nature International Journal of Science*, 392. 461-468.

Ley de Minería: Publicada en el Registro Oficial No. 517 del 29 de enero de 2009

Lonsdale P. (1988). Structural Pattern of the Galapagos Microplate and Evolution of the Galapagos Triple Junctions. *Journal of Geophysical Research*, 45 (9). 3942-3950.

McBirney A. y Williams H. (1969). *Geology and Petrology of Galápagos Islands* (1st ed.). Berkeley, California: The Geological Society of America.

Morgan J. (1972). Deep Mantle Convection plumes and plate motions. *American Association of Petroleum Geologists*, 56. 203-213.

Mouginis P., Rowland S. y Garbeil H. (1996). Slopes of western Galápagos volcanoes from airborne interferometric radar. *Geophysical Research Letters*, 23 (25). 3767-3770.

Mulas, M., Cioni, R., Andronico, D., & Mundula, F. (2016). The explosive activity of the 1669 Monti Rossi eruption at Mt. Etna (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 115-133.

Munro D. y Rowland S. (1996). Caldera morphology in the western Galápagos and implications for volcano eruptive behavior and mechanisms of caldera formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 72, 85-100.

Neville A. (1999). *Tecnología del concreto*. México, IMCYC. 162pp.

Putney M. (2006). Isla Fernandina. Accedido el 17 de agosto desde <https://www.flickr.com/people>

Reglamento Especial Para La Explotación De Materiales Áridos Y Pétreos: Publicada mediante decreto No. 1279, el 07 de septiembre de 2012.

Reglamento General de la Ley de Minería publicada mediante decreto No. 119, el 9 de noviembre de 2009.

Revelo C. (2016). Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón con: escoria volcánica como sustituto del agregado grueso y arena volcánica como sustituto del agregado fino. Tesis de grado, Univ. Técnica de Ambato, 81pp.

Rodríguez A. y Fernández J. (2015). Las geoformas volcánicas y su modelado morfométrico con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Enseñanzas de Ciencias de la Tierra*, 23 (1). 40-48.

Sallarès V. y Charvis P. (2003). Crustal thickness constraints on the geodynamic evolution of the Galapagos Volcanic Province. *Elsevier*, 214. 545-559.

Sallarès V., Charvis P., Flueh E., Bialas J. y SALIERI Scientific Party (2005). Seismic structure of the Carnegie ridge and the nature of the Galápagos hotspot. *Geophysical Journal International*, 161. 763-788.

Szakács, A. (2010). From a definition of volcano to conceptual volcanology. *Geological Society of America Special Papers*, 470. 67-76

Valentine, G. A., & Gregg, T. K. P. (2008). Continental basaltic volcanoes—processes and problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177(4). 857-873.

Vidito C., Gazel E., Geist D. y Harpp K. (2013). Lithological structure of the Galápagos Plume. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 14, 4214-4240.

Villagómez D., Toomey D., Hooft E. y Solomon S. (2007). Upper mantle structure beneath the Galápagos Archipelago from surface wave tomography. *Journal Geophysical Research*, 112. 1-25.

White W., McBierney A. y Duncan R. (1993). Petrology and Geochemistry of the Galápagos Islands: Portrait of a Pathological Mantle Plume. *Journal of Geophysical Research*, 98 (11). 19533-19563.

Wolff J. y Sumner J. (2000). *Lava Fountains and their products*. Academic Press: Encyclopedia of Volcanoes. 321-329.

Zindler, A., and S. Hart (1986). Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14. 493–571.