



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN ESPACIAL ÓPTICA Y DE RADAR  
PARA EL ANÁLISIS GEOLÓGICO EN LA CONCESIÓN SANTA MARTHA,  
CANTÓN ZARUMA”**

### **PROYECTO DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN GEOLOGÍA**

Presentado por:

**YESENIA VANESSA BUSTOS QUIÑÓNEZ**

**KEVIN JOAO GONZABAY AGUIRRE**

**GUAYAQUIL-ECUADOR**

**2017**

## DEDICATORIA

A mi madre Jenny Quiñónez y mi abuelita Mariana Acosta, mujeres ejemplo de perseverancia y calidad humana, esto es por ustedes.

A mi hijo Santiago Gonzabay, mi hermana Ariana Gonzabay y mi novia Clara Armijos, espero ser en parte un ejemplo para ustedes y que alcancen sus objetivos de vida.

Yesenia Vanessa Bustos Quiñonez

Kevin Joao Gonzabay Aguirre

## **AGRADECIMIENTO**

A personas importantes Sra. Tersita Achi, Dr. Bolívar Estrella, Sr. Norbert Franken, Sr. Javier Gonzabay, Sra. Bebita Aguirre, Sra. Peggy Bravo e Ing. Andres Gonzabay. La gloria sea de Dios y de ustedes.

A nuestros maestros Msc. Jorge Coronel, Msc. David Altamirano, PhD. Maurizio Mulas, Msc. Daniel Garcés, por estar siempre dispuestos disipar nuestras dudas académicas.

Yesenia Vanessa Bustos Quiñonez

Kevin Joao Gonzabay Aguirre

# **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

**Ing. Edison Navarrete  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**Msc. Daniel Garcés León  
MIEMBRO EVALUADOR**

---

**Msc. Glenda Loayza Toro  
MIEMBRO EVALUADOR**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

---

**YESENIA VANESSA BUSTOS QUIÑÓNEZ**

---

**KEVIN JOAO GONZABAY AGUIRRE**

## RESUMEN

El presente estudio consiste en la detección de lineamientos estructurales y de ensambles mineralógicos propios de alteraciones hidrotermales en la concesión de Santa Martha mediante técnicas de teledetección. La aplicación de métodos como composiciones de bandas, cocientes de bandas y análisis de componentes principales propuestos por diversos autores son estudiados para comparar la efectividad del uso de las imágenes LANDSAT 8 y SENTINEL 2 en la preprospección geológica. Los resultados obtenidos detallan la precisión del análisis de la imagen de relieve y sombras y sus correspondientes filtrados, y la caracterización de zonas con vegetación, óxidos de hierro y minerales de alteración para ambos satélites. Los resultados indican una orientación preferencial para los lineamientos, la concordancia de la falla registrada en dos puntos en el campo y la interpretada en gabinete, la validación del método de las componentes principales, y finalmente, la comparación de resultados de ensambles minerales comprobados con el estudio de las láminas delgadas y los sugeridos por las componentes principales.

Palabras clave: minerales, lineamientos, LANDSAT 8, SENTINEL 2.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA .....	V
RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VII
ABREVIATURAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>16</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
1.1    Preámbulo .....	17
1.2    Planteamiento del problema .....	18
1.3    Justificación .....	19
1.4    Hipótesis .....	20
1.5    Objetivos.....	20
1.5.1    Objetivo general .....	20
1.5.2    Objetivos específicos .....	21

1.6	Delimitación de la zona de estudio .....	21
<b>CAPÍTULO 2.....</b>		<b>23</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>		<b>23</b>
2.1	Generalidades .....	24
2.2	Litología regional .....	26
2.3	Estructura regional.....	28
2.4	Litología local.....	29
2.5	Estructura local .....	30
2.6	Geomorfología e hidrografía .....	30
2.7	Alteración.....	32
2.8	Mineralización.....	33
<b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>34</b>
<b>MARCO TEÓRICO .....</b>		<b>34</b>
3.1	Alteración hidrotermal .....	35
3.1.1	Factores que controlan la alteración hidrotermal .....	35
3.1.2	Procesos resultantes de la alteración hidrotermal.....	37
3.1.3	Tipos de alteración hidrotermal .....	38
3.2	Fundamentos de Teledetección.....	40
3.3	Teoría general de Radar.....	43
3.4	SENTINEL 1 .....	45
3.5	SENTINEL 2 .....	45
3.6	LANDSAT 8 .....	46



3.7	Equivalencia de bandas espectrales .....	48
3.8	Base teórica de filtros .....	50
<b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>52</b>
<b>DATOS Y MÉTODOS.....</b>		<b>52</b>
4.1	Datos .....	53
4.2	Metodología general .....	54
4.3	Procesamiento de datos .....	57
4.3.1	Composición de imágenes en color natural .....	57
4.3.2	Procesamiento del DEM.....	57
4.3.3	Procesamiento de imagen SENTINEL 1 .....	59
4.3.4	Procesamiento de los ráster SENTINEL 2 y LANDSAT 8 .....	60
4.3.5	Muestreo digital y coherencia entre resultados .....	65
4.4	Campaña geológica de campo .....	68
4.5	Trabajo de laboratorio.....	68
4.6	Validación de la metodología.....	68
4.6.1	Lineamientos estructurales .....	68
4.6.2	Especies minerales .....	69
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>70</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>		<b>70</b>
5.1	Análisis visual preliminar.....	71
5.2	Análisis visual de imágenes satelitales en color natural .....	72
5.3	Análisis del Modelo de Elevación Digital.....	74

5.3.1	Análisis visual estructural del relieve y sombras .....	74
5.3.2	Análisis digital de imágenes procesadas a partir del DEM.....	74
5.4	Análisis visual de imagen RADAR .....	76
5.5	Análisis de zonas con minerales de alteración .....	76
5.6	Muestreo digital y coherencia entre resultados.....	92
5.7	Geología de Campo.....	94
5.7.1	Descripción de estaciones tipo.....	96
5.8	Validación del método.....	103
5.8.1	Lineamientos estructurales .....	103
5.8.2	Especies minerales .....	107
5.9	Zonas de interés prospectivo.....	110
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>112</b>
<b>DISCUSIÓN .....</b>		<b>112</b>
DISCUSIÓN .....		113
<b>CAPÍTULO 7.....</b>		<b>116</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>116</b>
CONCLUSIONES .....		117
RECOMENDACIONES.....		118
ANEXOS .....		119
BIBLIOGRAFÍA.....		145
ANEXOS		
BIBLIOGRAFÍA		

## ABREVIATURAS

ARCOM	Agencia de Regulación y Control Minero
DEM	Modelo de Elevación Digital
DGGM	Dirección General de Geología y Minas
DMZP	Distrito minero Zaruma Portovelo
DN	Número Digital de imagen
IGM	Instituto Geográfico Militar
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
PCA	Análisis de Componentes Principales
RGB	Composición de bandas en Rojo-Verde-Azul
SGR	Secretaría de Gestión de Riesgos
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIGTIERRAS	Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica
USGS	United State Geological Survey

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Ubicación del sector de estudio. ....	22
<b>Figura 2.1</b> Mapa geológico del Ecuador.....	28
<b>Figura 2.2</b> A. Geología local descrita en 1980; B. Geología local descrita en 2013.....	30
<b>Figura 2.3</b> Mapa geomorfológico de la concesión Santa Martha, escala 1:45.000.....	32
<b>Figura 3.1</b> Equivalencia de bandas del Satélite LANDSAR 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2.....	50
<b>Figura 4.1</b> Esquema metodológico general.....	56
<b>Figura 4.2</b> Procesamiento del Modelo de Elevación Digital (DEM) para extracción de lineamientos. ....	59
<b>Figura 4.3</b> Procesamiento de la imagen de SENTINEL 1 para extracción de lineamientos.....	60
<b>Figura 4.4</b> Procesamiento de los ráster LANDSAT 8 y SENTINEL 2 para identificación de alteraciones hidrotermales. ....	61
<b>Figura 4.5</b> A. Reflectancia de minerales de alteración en ETM+ y OLI. B. Reflectancia de minerales hidroxilos/óxido de hierro en ETM+ y OLI.....	63
<b>Figura 4.6</b> Reflectancia de la vegetación LANDSAT ETM+. ....	63

<b>Figura 5.1</b> A. Concesión Santa Martha; B. Realce de detalles de A. ....	71
<b>Figura 5.2</b> A. Composición RGB color natural en imagen SENTINEL 2, B. Realce de detalles de A; C. Composición RGB color natural en imagen LANDSAT 8, D. Realce de detalles. ....	73
<b>Figura 5.3</b> A. Imagen radar de SENTINEL 1; B. Realce de caracteres. ....	76
<b>Figura 5.4</b> Composición RGB567 de LANDSAT 8. ....	77
<b>Figura 5.5</b> Composición RGB567 de SENTINEL 2. ....	78
<b>Figura 5.6</b> RGB 10-11-7. ....	79
<b>Figura 5.7</b> Cociente de bandas de LANDSAT 8. ....	81
<b>Figura 5.8</b> Cociente de bandas de SENTINEL 2. ....	82
<b>Figura 5.9</b> Cociente de Sabins para LANDSAT 8. ....	84
<b>Figura 5.10</b> Cociente de Sabins para SENTINEL 2. ....	85
<b>Figura 5.11</b> RGB de Kaufmann para LANDSAT 8. ....	86
<b>Figura 5.12</b> RGB de Kaufmann para SENTINEL 2. ....	87
<b>Figura 5.13</b> PCA de LANDSAT 8. ....	89
<b>Figura 5.14</b> PCA de SENTINEL 2. ....	91
<b>Figura 5.15</b> Muestras digitales sobre el RGB de las componentes principales de LANDSAT 8. ....	92
<b>Figura 5.16</b> Muestras digitales sobre el RGB de las componentes principales de SENTINEL 2. ....	93
<b>Figura 5.17</b> A. Ubicación de la estación E1; B. Afloramiento de E1. ....	97
<b>Figura 5.18</b> A. Ubicación de la estación E11; B. Afloramiento de E11. ....	98

<b>Figura 5.19</b> A. Ubicación de la estación E16. B. Falla registrada en campo en E16. ....	99
<b>Figura 5.20</b> Ubicación de la estación E21.....	100
<b>Figura 5.21</b> Ubicación de la estación E24.....	102
<b>Figura 5.22</b> Ubicación de la estación E27.....	103
<b>Figura 5.23</b> Ubicación de estructuras localizadas en campo (dirección de buzamiento/buzamiento) e interpretadas en oficina (líneas negras entrecortadas).....	104
<b>Figura 5.24</b> Diagrama de rosas de diaclasas de campo. ....	107
<b>Figura 5.25</b> Muestras digitales y de campo sobre el RGB de las componentes principales de LANDSAT 8. ....	108
<b>Figura 5.26</b> Muestras digitales y de campo sobre el RGB de las componentes principales de SENTINEL 2. ....	109
<b>Figura 5.27</b> Mapa de zonas de interés prospectivo de la concesión Santa Martha.....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Coordenadas de la concesión Santa Martha.....	22
<b>Tabla II.</b> Descripción de las regiones del espectro electromagnético .....	41
<b>Tabla III.</b> Características de las bandas de Radar .....	44
<b>Tabla IV.</b> Características de bandas de SENTINEL 2 .....	46
<b>Tabla V.</b> Bandas de LANDSAT 8 con sus respectivas longitudes de onda y resolución espacial. ....	48
<b>Tabla VI.</b> Bandas equivalentes del Satélite ASTER, LANDSAT-7 ETM+, LANDSAT 8 y SENTINEL 2 .....	49
<b>Tabla VII.</b> Resumen de los filtros.....	51
<b>Tabla VIII.</b> Datos ráster.....	53
<b>Tabla IX.</b> Datos vectoriales.....	53
<b>Tabla X.</b> Valores asignados a píxeles, LANDSAT 8 .....	66
<b>Tabla XI.</b> Valores asignados a píxeles, SENTINEL 2 .....	67
<b>Tabla XIII.</b> Características de las imágenes filtradas.....	75
<b>Tabla XIV.</b> Matriz de los eigenvectores de LANDSAT 8 OLI .....	88
<b>Tabla XV.</b> Matriz de los eigenvectores de SENTINEL 2.....	90

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**



## 1.1 Preámbulo

Los sistemas de teledetección han incrementado la cantidad de imágenes y la resolución espectral, espacial y radiométrica de los sensores, permitiendo realizar estudios con mayor precisión en base a la superficie que abarca el barrido. La gran variedad de imágenes disponibles para uso académico y científico expande la utilidad al sector cartográfico geológico y favorece a la prospección minera, siendo su uso limitado por la resolución espacial que ofrecen estas plataformas.

Según INIGEMM (2016), se registra un total de 541 labores mineras en la provincia de El Oro. Mientras que ARCOM (2015), reporta 154 empresas dedicadas a la extracción de oro, 21 de concentrado de oro, 37 de plata, 2 de calizas, 3 de feldespato, 1 de cobre y 9 de concentrado de cobre.

Por otro lado, de acuerdo con los datos enunciados por SGR (2012), el cantón Zaruma consta de 24 concesiones mineras las cuales abarcan una superficie de 1664.03 has, de las que 1531.32 has están en fase de exploración y 132.7 has en etapa de producción.

Por tanto, estas cifras evidencian la necesidad de implementar técnicas que faciliten la delimitación de zonas de enriquecimiento anómalo de minerales.

En consecuencia, el presente documento se enfoca en la aplicación de información geográfica, tanto de imágenes radar y ópticas, así como datos de elevación para el análisis estructural y de alteraciones hidrotermales en la concesión Santa Martha del cantón Zaruma con el fin de registrar zonas anómalas y comparar su efectividad con el levantamiento de información en campo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

### **Problemática**

El objetivo de la prospección geológica minera es la delimitación de los sectores de interés para futuras exploraciones geológicas avanzadas con el fin de determinar zonas económicamente rentables. Sin embargo, el factor económico que involucra realizar este tipo de estudios es elevado y con frecuencia los prospectos no presentan resultados alentadores para continuar con la exploración.

Entre los límites de los cantones Zaruma y Portovelo, pertenecientes a la provincia de El Oro, en la parroquia Güizhagüiña del cantón Zaruma se ubica la concesión Santa Martha, la cual presenta una zona con un patrón de drenaje sub-paralelo, lo que sugiere un control geológico estructural en el área, razón por la cual el estudio ha sido enfocado en el sector,

además el sector es considerado una zona de interés minero debido a su proximidad con las áreas productivas del DMZP.

De acuerdo con lo mencionado, la problemática radica en que los métodos prospectivos tradicionales demandan muchos recursos para delimitar zonas de interés económico.

### **Formulación del problema**

“¿Es efectiva la aplicación de métodos de teledetección y análisis espacial para establecer zonas de interés prospectivo en la Concesión Santa Martha?”.

### **1.3 Justificación**

La teledetección ofrece nuevas herramientas indicativas y económicas que pueden aplicarse en la fase inicial de un proyecto de exploración a fin de determinar si en el sector existen condiciones favorables para un acumulación anómalo de minerales y discriminar las zonas más prometedoras de una gran área de estudio (Marchionni & Schalamuk, 2010).

Los sensores remotos permiten identificar lineamientos y mapear regiones con alteraciones hidrotermales (Eldosouky, Abdelkareem, & Elkhateeb, 2017). La integración de varios datos de sensores remotos y

geográficos se emplean de manera efectiva para mapear minerales característicos de zonas de alteración, delimitar regional y localmente estructuras y distinguir las diferentes unidades litológicas (Eldosouky, Abdelkareem, & Elkhateeb, 2017).

#### **1.4 Hipótesis**

La aplicación de sistemas de teledetección y análisis espacial es efectiva para determinar zonas de interés prospectivo en la concesión Santa Martha debido a que permite distinguir áreas con mayor intensidad de alteración hidrotermal y mayor fracturamiento y facilita eliminar zonas de poco interés, disminuyendo el costo de prospección en la primera fase del estudio geológico económico minero.

#### **1.5 Objetivos**

##### **1.5.1 Objetivo general**

Evaluar un método de preprospección minera mediante la comparación de información estructural y de alteración hidrotermal obtenida digitalmente con información geológica de campo para simplificar la prospección temprana en la concesión Santa Martha del cantón Zaruma.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

Analizar imágenes satelitales y DEM mediante observaciones geomorfológicas y aplicación de técnicas de realce de lineamientos para la definición de la ocurrencia y orientación preferencial de estructuras geológicas.

Generar imágenes que indiquen la presencia de minerales de alteración mediante la selección de componentes principales en imágenes LANDSAT 8 y SENTINEL 2 para la determinación de zonas de potencial alteración hidrotermal.

Comparar la información geológica obtenida del procesamiento de imágenes satelitales y modelo de elevación contrastándola con información geológica de campo y laboratorio para validar la efectividad de los métodos empleados.

## **1.6 Delimitación de la zona de estudio**

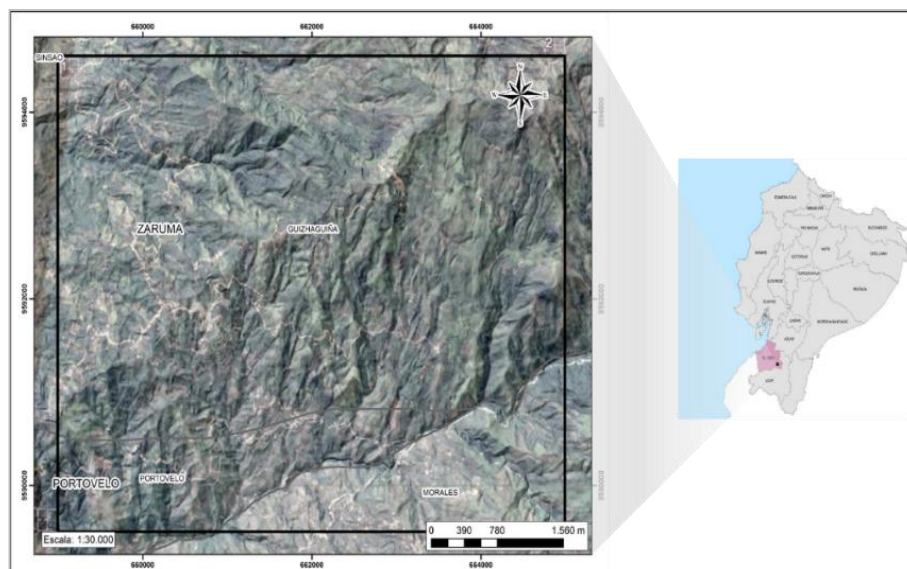
La zona de estudio se encuentra dividida entre los cantones Zaruma y Portovelo, ubicándose en la parte Sur oriental de la provincia de El Oro (Figura 1.1). La concesión se encuentra casi en su totalidad dentro de la parroquia Güizhagüña, una pequeña parte al Sureste de la concesión se encuentra en la parroquia Morales y otra porción al Suroeste en el

Norte del cantón Portovelo. Las coordenadas de la superficie de la zona de estudio se presentan en la Tabla I las mismas que están dadas en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 17S.

**Tabla I.** Coordenadas de la concesión Santa Martha.

<b>PUNTOS EXTREMOS</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
NW	659000	9594600
NE	665000	9594600
SE	665000	9589500
SW	659000	9589500

**Fuente:** ARCOM, 2001.



**Figura 1.1** Ubicación del sector de estudio.

**Fuente:** IGM, escala 1:50.000 (2013).

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

## **2.1 Generalidades**

El cantón Zaruma se encuentra al Sureste del Ecuador y representa el 11.4% del territorio de la provincia de El Oro con una superficie de 643.50 km<sup>2</sup>. Su población consta de 24.1 mil habitantes, de los cuales el 26.2% se dedica al trabajo en minas y canteras (INEC, 2010). Las explotaciones minerales que se han dado lugar en dicho cantón se presentan desde el tiempo de la colonia, la extracción se inició en el siglo XVI, fecha en la que incrementó su demanda. Actualmente, el tipo de minería que existe se divide entre pequeña minería y minería artesanal (Crespo, 2007).

### **Accesos**

Se puede acceder al cantón Zaruma desde la capital de la provincia, Machala, a través de la carretera de primer orden La Avanzada – Piñas - Zaruma y desde el Sur de la sierra ecuatoriana por la carreta de primer orden Loja – Piñas – Zaruma. Además, existen accesos mediante carreteras de segundo orden como la vía Paccha – Malvas – Zaruma (Crespo, 2007).

### **Población y división política**

La población del Cantón Zaruma oscila alrededor de los 24.097 habitantes aproximadamente, 9.631 habitantes viven en su única parroquia urbana denominada Zaruma (INEC, 2010), mientras que



aproximadamente 13.787 habitantes se reparten entre las 9 parroquias rurales del cantón (Censo, 2001), en el sector oriental se ubican Sinsao, Salvias y Güizhagüiña; en el sector occidental están Malvas, Arcapamba, Muluncay y Huertas y en sector Norte se asientan Guanazán y Abañin (Crespo, 2007).

Por otro lado, el cantón Portovelo se conforma de 13.284 habitantes, de los cuales 8.726 viven en el área urbana mientras que 4.558 residen en el área rural (López, 2014). Portovelo se compone de una parroquia urbana denominada Portovelo y tres parroquias rurales conocidas como Curtincápac, Salatí y Morales (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Portovelo, 2014).

### **Clima**

Según la información de la “Guía turística del cantón Zaruma” y la proximidad al cantón Portovelo, el clima del sector de estudio se define como templado subtropical con una estación húmeda de diciembre a abril en la que se evidencia precipitación importante y un periodo seco de mayo a noviembre, la humedad relativa es del 83%, la evaporación es de 738 mm/año y la precipitación es de 1582 mm/año. La temperatura oscila entre 16°C y 24°C con una temperatura promedio de 22°C.

## 2.2 Litología regional

Según el mapa geológico 1:1'000.000 del CODIGEM (1993) la zona de estudio está compuesta por las siguientes unidades litológicas.

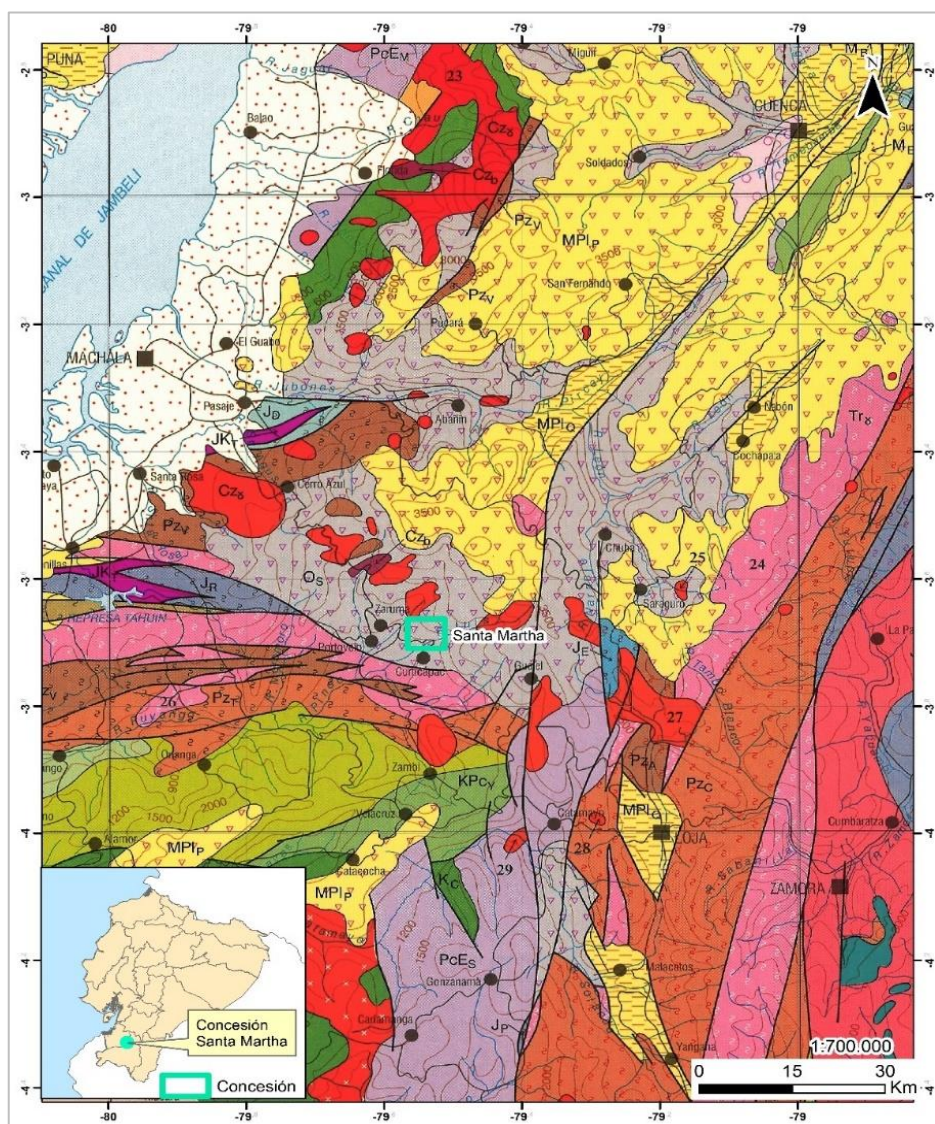
**Rocas metamórficas.** Según Apsden y otros (1995) y Feininger (1978), en Crespo (2007), las rocas metamórficas de la zona corresponden al segmento Norte del complejo metamórfico de El Oro. Crespo (2007) y Carrión (2010), aseguran que las rocas metasedimentarias probablemente subyacen a la mayoría de los depósitos volcánicos y sedimentarios de la zona, estas rocas afloran en la parte Sur del cantón Zaruma y en Portovelo, Este de Piñas, Norte de Chaguapamba y Oeste de Loja principalmente al Sur de la falla Piñas-Portovelo.

- **Terrenos Amotape y Chaucha (Paleoceno).** Representados por las unidades La Victoria conformada de esquistos y gneises semipelíticos, El Tigre constituida por metagrauwacas y pizarras y la unidad Piedras formada de anfibolitas basálticas.
  
- **Intrusivos metamorfizados (Triásico).** Granito gnéisico peraluminico con ocurrencia de granates, complejo de migmatitas y de pegmatitas.

- **Otras rocas metamórficas (Jurásico):** Unidad La Delicia constituida por esquistos negros y unidad Raspas conformada de esquistos negros, verdes, azules y eclogitas.

**Rocas volcánicas e intrusivos.** Según Crespo (2007), las intrusiones granodioríticas y dioríticas forman un cinturón NW-SE y afloran en los sectores Noroeste y Sureste de la formación Saraguro.

- **Unidad El Toro (Cretácico):** Rocas ultrabásicas y básicas.
- **Intrusivos (Eoceno):** Gabros, dioritas, granodiorita y pórfidos.
- **Formación Saraguro (Oligoceno):** Lavas andesíticas a riolíticas y piroclastos.
- **Volcánicos y vulcano sedimentarios (Mioceno):** Grupos Nabón y Quillollaco conformados de arcillas, tobas, areniscas y conglomerados y formación Pisayambo constituida de lavas andesíticas a riolíticas y piroclastos.



**Figura 2.1** Mapa geológico del Ecuador.

El rectángulo celeste muestra la superficie de la concesión Santa Martha.

**Fuente:** CODIGEM & BGS, 1993 (Escala 1:1'000.000).

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### 2.3 Estructura regional

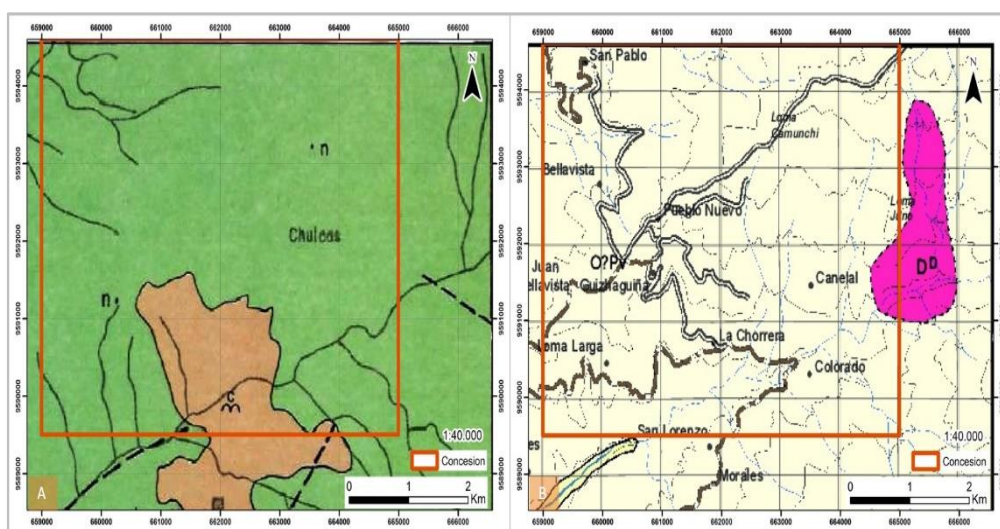
La principal estructura del sistema es la Fallas Piñas – Portovelo, esta importante falla/cabalgamiento Este-Sureste tiene un gran descenso en el bloque Norte y separa al grupo Saraguro al Norte del Complejo

Metamórfico de El Oro al Sur. También constituye el límite Sur del sistema de vetas auríferas del DMZP. Al Oeste de Piñas la falla aparece con alto buzamiento al Norte, mientras que, entre Piñas y la parroquia rural Salatí del cantón Portovelo aparece en un cabalgamiento (bajo ángulo), buzando al Norte. Otras fallas con rumbo NE con leve desplazamiento dextral están presentes al Sur de Portovelo y Norte de Zaruma. Estas forman un sistema conjugado con las estructuras de rumbo Noroeste (Carrión, 2010).

#### **2.4 Litología local**

Según la hoja Zaruma del mapa geológico nacional escala 1:100.000 elaborado por la DGGM (1980), la concesión está dominada por depósitos volcánicos de la formación Celica de edad cretácica la cual está constituida por tobas andesíticas a la base y lavas y pórfidos andesíticos al tope, además en la zona centro Sur de la concesión se aprecia un depósito coluvial holocénico, en contraste con esta información, la hoja geológica Zaruma escala 1:100.000 elaborada por el INIGEMM (2013), para el proyecto “Modelo piloto para la determinación del potencial geológico-mineralógico de las zonas Zaruma y Cariamanga a escala 1:100.000” reconoce únicamente depósitos volcánicos de la unidad oligocénica Portovelo formada de lavas basálticas y andesíticas, y tobas dacíticas y riolíticas; además de

un cuerpo intrusivo diorítico en el centro del límite oriental de la concesión.



**Figura 2.2** A. Geología local descrita en 1980; B. Geología local descrita en 2013.

**Fuente:** A. DGGM, 1980 (1:100.000); B. INIGEMM, 2013 (1:100.000).

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

## 2.5 Estructura local

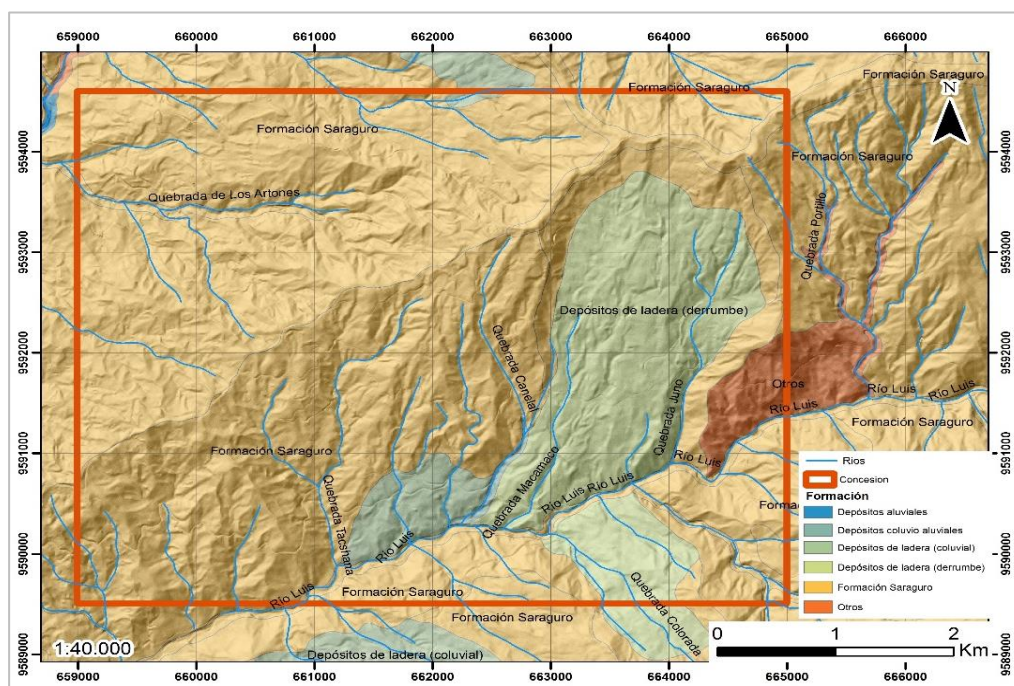
La hoja geológica Zaruma del DGGM (1980) muestra una falla inferida de rumbo NW-SE al Este de la concesión y otras dos fallas inferidas de rumbo NW-SE al Sur de la zona de estudio.

## 2.6 Geomorfología e hidrografía

El cantón Zaruma y Portovelo se caracteriza morfológicamente por tener pendientes fuertes, crestas redondeadas y numerosas colinas (Crespo, 2007), el relieve es accidentado con alturas que van de 240 a

270 y hasta 400 metros en los flancos (Crespo, 2007) y más de 1600 metros en las crestas (Carrión, 2010), la altura de las montañas aumenta hacia el Norte y se conectan con la cordillera de Chilla a más de 3500 m.s.n.m. El punto más alto es el cerro de Arcos con 3600 m.s.n.m. en la zona oriental del cantón, próximo a la frontera con Azuay (UTMACH, 2013).

La cuenca hidrográfica del río Puyango con sus principales afluentes, los ríos Pindo, Amarillo y La Calera ocupa parte importante del territorio del cantón, estos ríos nacen aproximadamente a 30 km al Noreste de Zaruma (Carrión, 2010), más al Suroeste, en el Perú, el Puyango toma el nombre de río Tumbes hasta su desembocadura en el Pacífico Norte peruano.



**Figura 2.3** Mapa geomorfológico de la concesión Santa Martha, escala 1:45.000.

**Fuente:** INIGEMM, 2016 (Escala 1:25:000).

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

## 2.7 Alteración

La propilitización penetrativa es la asociación más extendida a escala regional. Mientras que la silicificación, argilización y alteración fílica presentan una marca más localizada, principalmente confinada a las partes centrales del sistema mineralizado. La alteración argílica penetrativa intermedia a avanzada y la silicificación intensa más localizada ocupan un área que se ensancha hacia el Norte desde Portovelo hacia Arcapamba (Carrión, 2010).



## **2.8 Mineralización**

La principal mineralización económica es el oro libre, oro asociado con sulfuros y sulfosales de plata con una media de la razón plata: oro alrededor de 8:1, los sulfuros principales son pirita, esfalerita, galena y calcopirita (Carrión, 2010).

# **CAPÍTULO 3**

## **MARCO TEÓRICO**

### 3.1 Alteración hidrotermal

Se entiende como proceso de alteración hidrotermal al intercambio químico ocurrido durante la interacción fluido hidrotermal - roca. Esta interacción conlleva cambios químicos, mineralógicos y texturales en la roca afectada, productos del desequilibrio termodinámico entre las fases roca – fluido (Cueva y Hernández, 2016).

La principal consecuencia de las alteraciones hidrotermales es la transformación de una asociación mineral inicial de la roca encajante a un nuevo grupo mineral más estable bajo condiciones hidrotermales de presión, temperatura y composición de fluidos, la textura original de la roca puede cambiar parcial o totalmente debido a la alteración hidrotermal (Cueva y Hernández, 2016).

#### 3.1.1 Factores que controlan la alteración hidrotermal

Según Cueva y Hernández (2016), los factores que intervienen en la intensidad de la alteración hidrotermal son:

**Temperatura.** Conforme más alta sea la temperatura del fluido que baña la roca mayor será el efecto de alteración sobre la misma.

**Presión.** Controla fenómenos físicos de los fluidos hidrotermales como la profundidad de ebullición, generación de brechas hidrotermales y erupciones o explosiones hidrotermales.

**Composición del fluido.** La alteración es más intensa cuando el fluido hidrotermal tiene pH bajo (ácido).

**Permeabilidad de la roca.** A mayor permeabilidad mayor será el ingreso de los fluidos hidrotermales a la roca y más intensa será la alteración, en rocas impermeables los mismos fluidos pueden producir fracturamiento hidráulico o disolver minerales aumentando la permeabilidad de la roca y favoreciendo la alteración.

**Tiempo de interacción roca/fluido.** Mientras más tiempo esté la roca en contacto con los fluidos hidrotermales mayor será el efecto de alteración sobre la misma.

**Composición de la roca.** En alteraciones leves el tipo de minerales presentes en las rocas importa debido a que algunos minerales son más susceptibles que otros a la alteración, en

alteraciones intensas la alteración es independiente de la composición de la roca.

### 3.1.2 Procesos resultantes de la alteración hidrotermal

Cueva y Hernández (2016) aseguran que durante la alteración hidrotermal tienen lugar los siguientes procesos:

**Deposición directa.** Precipitación y depositación directa de minerales de los fluidos en la roca, para esto la roca debe tener discontinuidades que permitan el paso de los fluidos tales como diaclasas, fallas, foliaciones, fracturas hidráulicas, poros conectados, etc.

**Reemplazos.** Los minerales menos estables bajo condiciones hidrotermales tienden a ser reemplazados por otros más estables, la cinética del reemplazamiento depende de la permeabilidad de la roca.

**Lixiviación.** Los fluidos hidrotermales en su paso a través de las rocas tienden a extraer de ellas cationes metálicos de modo que la roca es deprimida en estos componentes o lixiviada.

### 3.1.3 Tipos de alteración hidrotermal

**Propilítica.** Presencia de epidota y/o clorita y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de álcalis o tierras alcalinas; H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y S pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también albita, calcita y pirita. Este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal. Generada por soluciones de pH neutro a alcalino y en rangos de temperatura bajos (200°-300°C) (Cueva y Hernández, 2016).

**Argílica Intermedia.** Importantes cantidades de caolinita, montmorillonita, smectita o arcillas amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica. Este tipo de alteración tiene lugar en rangos de pH entre 4 y 5. La caolinita se forma a temperaturas bajo los 300°C (Cueva y Hernández, 2016).

**Argílica avanzada.** Caracterizada por la destrucción total de feldespatos en condiciones de una hidrólisis muy fuerte, dando lugar a la formación de caolinita y/o alunita. Gran parte de los minerales de las rocas transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que, incluso, se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo) (Cueva y Hernández, 2016).

En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica”). Este tipo de alteración se da en un amplio rango de temperatura, pero a condiciones de pH entre 1 y 3.5. A alta temperatura (sobre 350°C) puede darse con andalucita además de cuarzo. Bajo pH 2 domina el cuarzo, mientras que alunita se da a pH sobre 2 (Cueva y Hernández, 2016).

**Silicificación:** Caracterizada por la destrucción total de la mineralogía original. La roca queda convertida en una masa silícea. Representa el mayor grado de hidrólisis posible (Cueva y Hernández, 2016).

**Fílica o cuarzo – sericítica.** Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a sericita y cuarzo, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración. Es el resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldespatos, en un rango de temperatura de 300° a 400°C y en un rango de pH 5 a 6 (Cueva y Hernández, 2016).

**Potásica.** Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango de 350° a 550°C. Por esta razón, frecuentemente se refiere a la alteración potásica como tardimagmática y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones intrusivos (Cueva y Hernández, 2016).

### 3.2 Fundamentos de Teledetección

**Radiación electromagnética.** La teoría ondulatoria sostiene que las partículas con temperatura superior al cero absoluto (0°K) generan



vibraciones las cuales originan perturbaciones u “ondas”. La energía que desprenden estas ondas al transportarse se denomina radiación electromagnética (Hernández, 2007).

**Tabla II.** Descripción de las regiones del espectro electromagnético.

REGIÓN O BANDA ESPECTRAL	LONGITUD DE ONDA	CARACTERÍSTICAS
Rayos Gamma	<0.03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se utiliza en teledetección
Rayos X	0.03-30 nm	
Ultravioleta (UV)	0.03-0.4 $\mu$ m	La radiación con $\lambda < 0.3\mu\text{m}$ es totalmente absorbida por la capa de ozono. La radiación con $0.3 < \lambda < 0.4\mu\text{m}$ se trasmite a través de la atmósfera y se detecta mediante fotodetectores y películas fotosensibles especiales.
Visible (azul, verde, rojo)	0.4-0.7 $\mu$ m	Detectado por fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N)
Infrarrojo reflejado	0.7-3.0 $\mu$ m	Radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El rango $0.7 < \lambda < 0.9 \mu\text{m}$ se detecta usando películas fotosensibles y se denomina infrarrojo fotográfico.
Infrarrojo térmico	3-5 $\mu$ m, 8-18 $\mu$ m	Corresponden a dos ventanas atmosféricas en la región térmica. Se detectan por sensores ópticos mecánicos y sistemas Vidicom especiales.
Radar (región de microondas)	0.1-100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, niebla y lluvia.
Ondas de radio	>100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Se utiliza en telecomunicaciones

**Fuente:** Hernández, 2007.

**Espectro electromagnético.** Conjunto continuo de las diferentes regiones de la energía electromagnética, separadas por las longitudes de onda que presentan (Hernández, 2007). En la Tabla II se detalla las características de las regiones o bandas espectrales.

**Firmas espectrales.** Cuando la energía electromagnética llega a la superficie terrestre, interactúa con todo material que se encuentre ya sea por reflexión, absorción o transmisión, de acuerdo a un patrón de respuesta espectral peculiar. Este comportamiento característico se lo denomina firma espectral (Hernández, 2007). Sin embargo, su determinación conlleva algunas dificultades asociadas a las siguientes causas:

La vegetación posee un comportamiento propio de cada estación debido a los cambios fenológicos, por lo que su firma espectral varía (Hernández, 2007).

Las condiciones de iluminación asociadas a la topografía (pendiente y orientación), la posición del sol durante el año (elevación y azimut), y las condiciones de humedad del suelo y la vegetación pueden convertirse en variaciones importantes en el patrón espectral (Hernández, 2007).

**Comportamiento espectral del suelo.** Los principales factores que determinan el comportamiento espectral de los suelos son el color y el porcentaje de humedad. Los suelos que presentan mayor reflectancia son aquellas tierras secas, en contraste a las que poseen un alto contenido de humedad. Otros factores son contenido de materia orgánica, textura y estructura, disposición vertical y horizontal, así como los ángulos de iluminación y observación de éstos (Hernández, 2007).

**Comportamiento espectral de los minerales.** El comportamiento espectral de los minerales se rige en su color. Los minerales blancos presentan una reflectancia muy fuerte contrario a los minerales oscuros. Por otro lado, las micas poseen baja reflectancia en especial la biotita. Cabe destacar que el estudio de los minerales mediante técnicas geomáticas permite la detección de minerales de alteración que facilitan la ubicación de yacimientos, acumulaciones minerales y/o zonas de alteración hidrotermal (Hernández, 2007).

### **3.3 Teoría general de Radar**

RADAR, Radio Detection and Ranging, es un sistema que consiste en un transmisor y un receptor de radio sincronizado que emite ondas electromagnéticas y procesa las ondas reflejadas para emplearlas en la detección de objetos, y caracterización terrestre y oceánica (Pérez,

2010). En la Tabla III se detalla las características de las bandas de frecuencia RADAR.

**Tabla III.** Características de las bandas de Radar.

<b>NOMBRE DE LA BANDA</b>	<b>FRECUENCIA (GHz)</b>	<b>LONGITUD DE ONDA</b>	<b>APLICACIONES</b>
L	1-2	15-30 cm	Control de tráfico de ruta
S	2-4	7.5-15 cm	Condiciones meteorológicas a largas distancias
C	4-8	3.75-7.5cm	Meteorología
X	8-12	2.5-3.75cm	Guía de misiles, meteorología, cartografía de resolución media, radares de superficie aeroportuarios
Ku	12-18	1.67-2.5cm	Cartografía de alta resolución. Altimetros para satélites
K	18-27	1.11-1.67cm	Absorción del vapor de agua. Usado para meteorología. Detección de nubes
Ka	27-40	0.75-1.11cm	Radares de ruta. Altimetría
Mm (Q,V,E,W)	40-300	7.5-1mm	Comunicaciones militares, meteorología a corta distancia.

**Fuente:** FTA., 2016.

### **3.4 SENTINEL 1**

Fue lanzado a bordo de un Soyuz desde el Puerto Espacial Europeo, en Guayana Francesa, en abril del 2014. Su objetivo es escanear por medio de imágenes radar la tierra y los océanos. Ejecuta sus operaciones dentro de la banda C (Tabla III). SENTINEL 1 provee fiabilidad, mejora el tiempo de revisión, cobertura geográfica y posee una rápida diseminación de datos para ayudar a las aplicaciones operacionales en las áreas de prioridad de monitoreamiento marino, terrestre y servicios de emergencia (ESA, 2014).

El satélite SENTINEL 1 recorre completamente la Tierra en seis días. Se encarga de transmitir datos a estaciones alrededor del mundo, así como también, transporta datos al Sistema Europeo Geoestacionario de Retransmisión de Datos (ESA, 2014).

### **3.5 SENTINEL 2**

Fue lanzado al espacio en junio 23 de 2015, a través del cohete Vega, es parte de la constelación de dos satélites. SENTINEL 2 es una misión europea que presenta una franja ancha de escaneo multiespectral y alta resolución temporal, radiométrica y espacial (ESA, 2015).

Su resolución temporal es de sólo 10 días (León, 2015). SENTINEL 2 posee un instrumento óptico que presenta 13 bandas espectrales: 4 bandas de 10m, 6 bandas de 20m y 3 bandas de 60m (QGIS, 2015). Las mismas que se muestran en la Tabla IV.

**Tabla IV.** Características de bandas de SENTINEL 2.

<b>BANDAS</b>	<b>LONGITUD DE ONDA (<math>\mu</math>)</b>	<b>RESOLUCIÓN (m)</b>
B1-Ultra azul (Costa y aerosol)	0.443	60
B2-Azul	0.490	10
B3-Verde	0.560	10
B4-Rojo	0.665	10
B5-VNIR	0.705	20
B6-VNIR	0.740	20
B7-VNIR	0.783	20
B8a-VNIR	0.865	20
B8-VNIR	0.842	10
B9-SWIR	0.940	60
B10-SWIR	1.375	60
B11-SWIR	1.610	20
B12-SWIR	2.190	20

**Fuente:** QGIS, 2015.

### 3.6 LANDSAT 8

La misión LANDSAT empezó en 1972 y constituye la base de datos más amplia y continua sobre cambios en la superficie terrestre, la octava versión de LANDSAT se denomina “LANDSAT Data Continuity Mission” (LDCM) o simplemente LANDSAT 8, dicha plataforma fue construida por la empresa “Orbital Sciences Corporation” en Gilbert, Arizona. Esta

plataforma cuenta con dos sensores, el primero llamado “Operational Land Imager” (OLI) y el segundo denominado “Thermal Infrared Sensor” (TIRS). Para este estudio nos centraremos en los datos del sensor OLI el cual fue construido por la empresa “Ball Aerospace Technologies Corporation en Boulder, Colorado (NASA, LANDSAT SCIENCE, 2014).

Las bandas espectrales del sensor OLI son similares a las de LANDSAT 7 ETM +, pero incorporan dos nuevas bandas, un canal profundo en el azul visible (banda 1) diseñado para la investigación de recursos hídricos y estudio de zonas costeras y nuevo canal infrarrojo (banda 9), para la detección de nubes cirrus. La relación señal/ruido y la resolución radiométrica de las imágenes de LANDSAT 8 (12 bits) son mejores que las versiones anteriores de LANDSAT. La resolución temporal es de 16 días similar a las demás (NASA, LANDSAT SCIENCE, 2014) (Tabla V).

**Tabla V.** Bandas de LANDSAT 8 con sus respectivas longitudes de onda y resolución espacial.

<b>BANDAS</b>	<b>LONGITUD DE ONDA (<math>\mu</math>)</b>	<b>RESOLUCIÓN (m)</b>
Banda 1 Aerosol Costero	0,43-0,45	30
Banda 2 Azul	0,45-0,51	30
Banda 3 Verde	0,53-0,59	30
Banda 4 Rojo	0,64-0,67	30
Banda 5 Infrarrojo cercano (NIR)	0,85-0,88	30
Banda 6 SWIR 1	1,57-1,65	30
Banda 7 SWIR 2	2,11-2,29	30
Banda 8 Pancromático	0,50-0,68	15
Banda 9 Cirrus	1,36-1,38	30
Banda 10 Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60- 11,19	100
Banda 11 Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,50- 12,51	100

**Fuente:** QGIS, 2015.

### 3.7 Equivalencia de bandas espectrales

Los diferentes satélites presentan características fijas tales como la resolución radiométrica y espacial, siendo éstas las que permiten definir el tipo de roca, alteración, estructura o zona de interés de acuerdo al objetivo planteado. Dichas características se presentan en la Tabla VI y Figura 3.1 donde se aprecia la diferencia de las bandas espectrales de los satélites LANDSAT 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2.

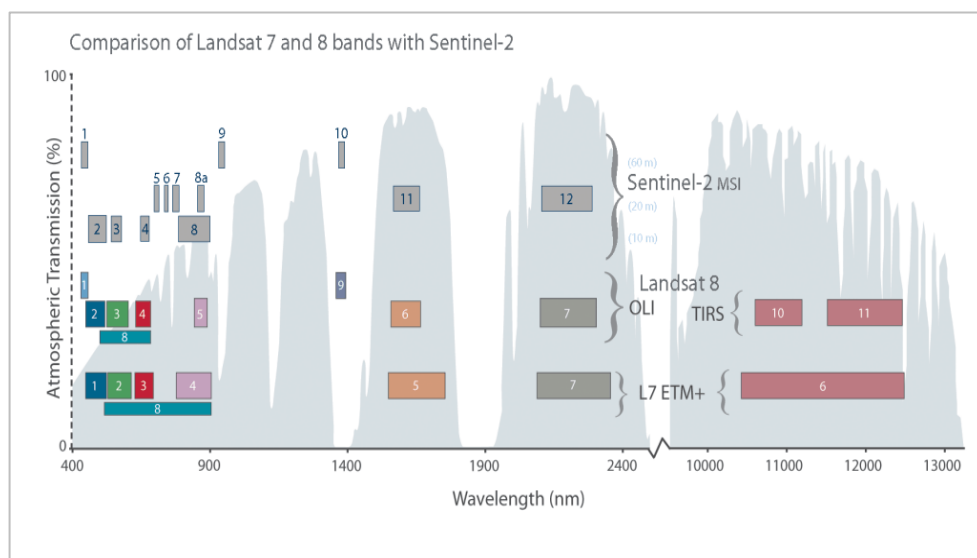


**Tabla VI.** Bandas equivalentes del Satélite ASTER, LANDSAT-7 ETM+, LANDSAT 8 y SENTINEL 2.

ASTER			LANDSAT-7 ETM+BANDS			LANDSAT 8 Y TIRS BANDS			SENTINEL 2			
BN	RES	LO	BN	RES	LO	RES	LO	BN	BN	RES	LO	
						30m Coastal/Aerosol	0.435- 0.451	Band 1	Band 1	10m aerosol	0.443	
			Band 1	30m blue	0.441- 0.514	30m blue	0.452- 0.512	Band 2	Band 2	10m blue	0.490	
Band 1	15m	0.52-0.6	Band 2	30m Green	0.519- 0.601	30m green	0.533- 0.590	Band 3	Band 3	10m green	0.560	
Band 2	15m	0.63- 0.69	Band 3	30m red	0.631- 0.692	30m red	0.636- 0.673	Band 4	Band 4	10m red	0.665	
Band 3	15m	0.76- 0.86	Band 4	30m NIR	0.772- 0.898	30m NIR	0.851- 0.879	Band 5	Band 8	10m VNIR	0.842	
Band 4	30m	1.6-1.7	Band 5	30m SWIR- 1	1.547- 1.749	30m SWIR-1	1.566- 1.651	Band 6	Band 11	20m	1.610	
Band 13	90m	10.25- 10.95	Band 6	60m TIR	10.31- 12.36	100m TIR-1	10.60- 11.19	Band 10				
Band 14	90m	10.95- 11.65				100m TIR-2	11.50- 12.51	Band 11				
Band 5	30m	2.145- 2.185	Band 7	30m SWIR- 2	2.064- 2.345	30m SWIR-2	2.107- 2.294	Band 7	Band 12	20m	2.190	
Band 6	30m	2.185- 2.225										
Band 7	30m	2.235- 2.285										
Band 8	30m	2.295- 2.365										

\*BN: banda del satélite; RES: resolución espacial (m); LO: longitud de onda ( $\mu$ ).

Fuente: QGIS, 2015.



**Figura 3.1** Equivalencia de bandas del Satélite LANDSAT 7 ETM+, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2.  
**Fuente:** NASA, 2017.

### 3.8 Base teórica de filtros

La ventana de análisis de imágenes del software SIG empleado tiene dos secciones importantes: visualización y procesamiento de datos, en la Tabla VII se detallan las características de ambas secciones.

**Tabla VII.** Resumen de los filtros.

<b>Secciones</b>	<b>Herramientas</b>			
<b>Visualización de datos</b>	Funciones			
	Extensión	Re-muestreo		
	Desplaza hacia los extremos los valores de los píxeles que queden fuera de un intervalo indicado previamente al programa.	Remuestrear es cambiar el tamaño de celda, quedando intacta la extensión del dataset ráster		
		Convolución cúbica	Majority	
		Define el nuevo valor de una celda en base al ajuste de una curva suave a través de los dieciséis centros de celdas de entrada más próximos.	Realiza un algoritmo de mayoría y determina el nuevo valor de la celda basándose en los valores más populares de la ventana de filtro.	
<b>Procesamiento de datos</b>	Clases de filtro de detección de aristas			
	De Gradiente	Laplaciano 5x5	Sobel	
	Detectan aristas en incrementos de 45%, las cuales son perpendiculares a la dirección del Gradiente.	Detecta aristas calculando el valor de un píxel en función de la ponderación de sus vecinos.	Vertical	Horizontal
			Detecta aristas N-S.	Detecta aristas E-W.

Fuente: ESRI, 2016.

# **CAPÍTULO 4**

## **DATOS Y MÉTODOS**

#### 4.1 Datos

Los datos vectoriales y ráster con la que se ejecutó el trabajo de gabinete se presenta a continuación en la Tabla VIII y Tabla IX donde se especifica fuente, escala, año, resolución y tipo.

**Tabla VIII.** Datos ráster.

DATOS RASTER	FUENTE	TIPO	RESOLUCIÓN	ESCALA	AÑO
Imagen SENTINEL	SENTINEL 1	Radar	10m	S.E.	2017
Imagen SENTINEL	SENTINEL 2	Óptica	10-20m	S.E.	2016
Imagen LANDSAT	LANDSAT 8	Óptica	30m	S.E.	2017
Modelo de Elevación Digital	SIGTIERRAS	Ráster	3-5m	S.E.	2015
Mapa geológico Zaruma	INIGEMM	Ráster	S.R.	1:100.000	2013
Mapa geológico Zaruma	DGGM	Ráster	S.R.	1:100.000	1980

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

**Tabla IX.** Datos vectoriales.

DATOS VECTORIALES	FUENTE	ESCALA	AÑO
Geomorfología	SIGTIERRAS	1:25.000	2016
Ríos y vías	IGM	1:50.000	2013
Continental, Provincial y cantonal	IGM	S.E.	2013
Curvas de nivel Zaruma	IGM	1:50.000	2013
Curvas de nivel Paccha	IGM	1:50.000	2013
Concesión Santa Martha	ARCOM	S.E.	2001

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

## 4.2 Metodología general

Las etapas metodológicas que se aplican en el desarrollo del presente documento se observan en la Figura 4.1 y se detalla a continuación.

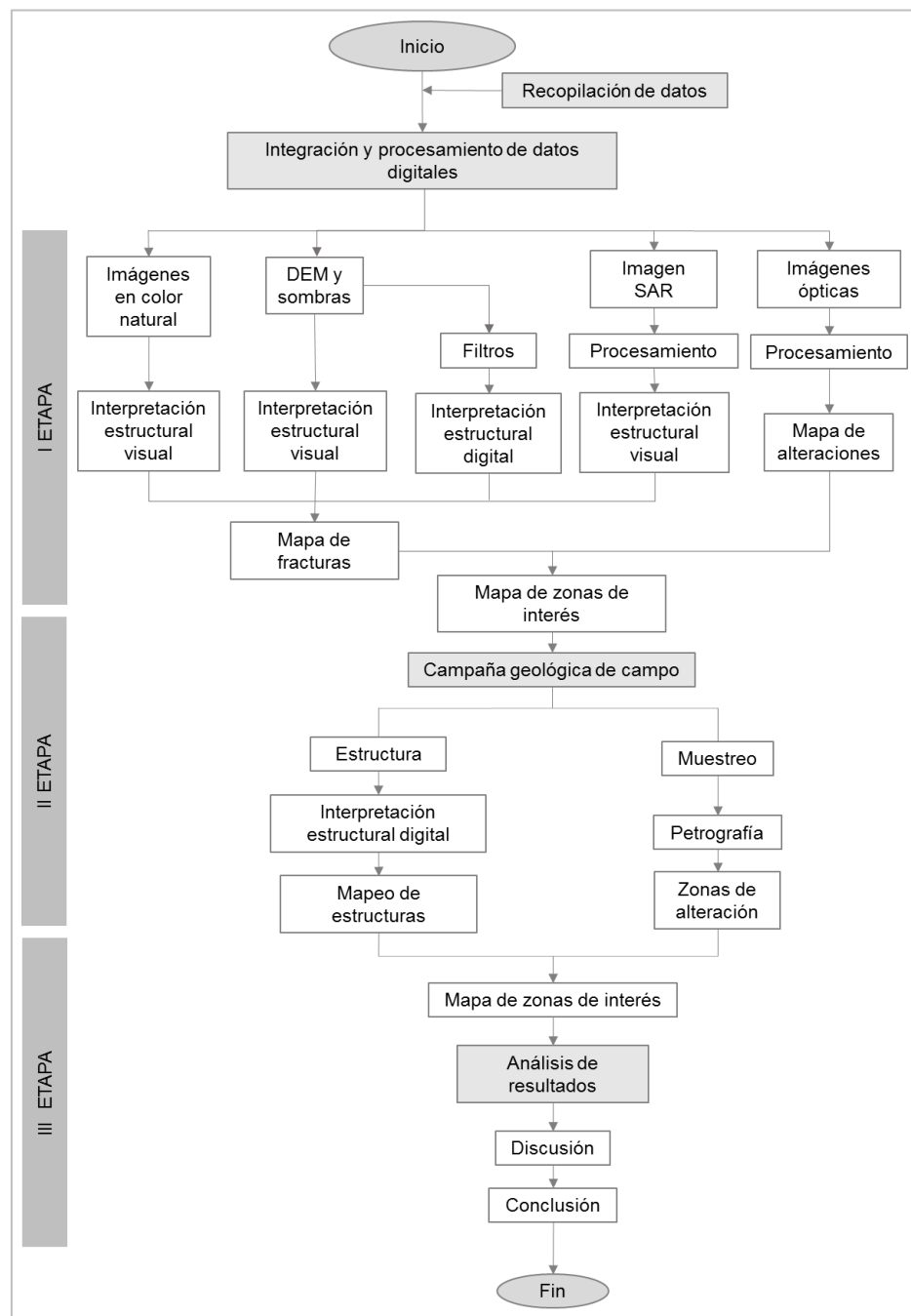
Se recopilaron datos bibliográficos de los siguientes portales cartográficos de libre acceso: SIGTIERRAS, IGM, ARCOM e INIGEMM, además se tomaron imágenes satelitales de LANDSAT 8, SENTINEL 1 y SENTINEL 2, un DEM 3X3 de la zona de estudio y la hoja geológica Zaruma del DGGM.

**I Etapa:** Se analizaron imágenes satelitales SENTINEL 2 y LANDSAT 8 en color natural para confirmar la existencia de un patrón de drenaje sub-paralelo en la zona de estudio. Se aplicaron filtros detectores de aristas a la imagen de relieve y sombras obtenido del DEM para interpretación estructural.

Se realizaron las calibraciones apropiadas a la imagen RADAR SENTINEL 1 para obtener información estructural. Se procesaron las imágenes ópticas de SENTINEL 2 y LANDSAT 8 para interpretación estructural. Se procesaron las imágenes ópticas de SENTINEL 2 y LANDSAT 8 para determinar zonas alteradas hidrotermalmente y se marcaron zonas de interés prospectivo en base a la información previa.

**II Etapa:** Se realizó una campaña geológica en la concesión Santa Martha, en la cual se levantó información geológica real. Se recolectaron muestras de mano y se tomaron datos estructurales. Se elaboraron 5 secciones delgadas de los sectores más representativos para identificar asociaciones minerales propias de algunas alteraciones hidrotermales.

**III Etapa:** Se comparó los resultados obtenidos de la primera y segunda etapa, y se determinó el procedimiento más acertado para la identificación temprana de zonas de interés prospectivo. Se discutió sobre las características que se observaron en los mapas geológicos del INIGEMM (2013) y DGGM (1980), la información resultante del procesamiento de las imágenes satelitales y los datos de campo.



**Figura 4.1** Esquema metodológico general.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.



### **4.3 Procesamiento de datos**

#### **4.3.1 Composición de imágenes en color natural**

Se elaboraron imágenes de color natural a partir de las bandas del espectro visible de las imágenes SENTINEL 2 y LANDSAT 8 (Rojo: Banda 4; Verde: Banda 3 y Azul: Banda 2, para ambas imágenes) con la herramienta Composición de bandas de un software SIG.

#### **4.3.2 Procesamiento del DEM**

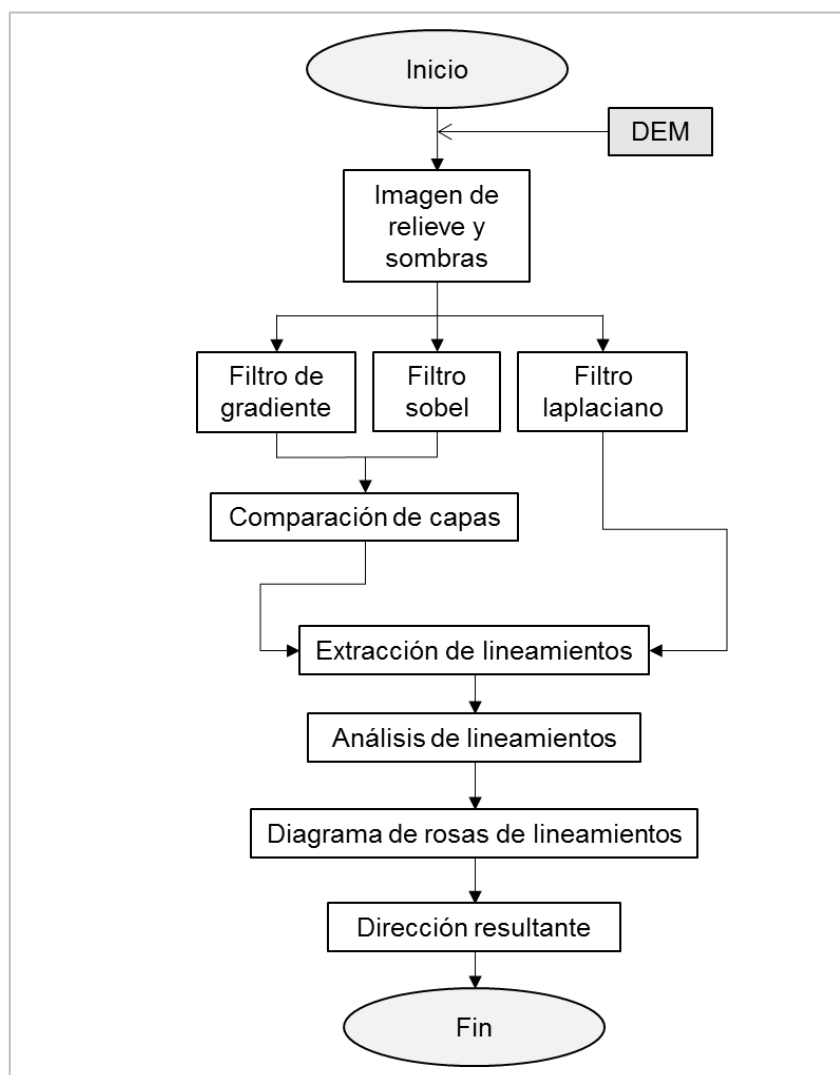
Empleando el Modelo de Elevación Digital del sector de estudio se obtuvo una imagen de relieve con la herramienta Hillshade de un software SIG. Luego se aplicaron a la imagen filtros detectores de aristas tales como Gradiente, Sobel y Laplaciano.

En el caso del filtro Gradiente se emplearon todas las direcciones, es otras palabras, Norte, Sur, Este, Oeste, Noreste y Noroeste, los cuales fueron mostrados con distribución estándar y convolución cúbica. En cuanto al caso del filtro Sobel, se utilizaron ambos, es decir, vertical y horizontal, con display correspondiente a desviación estándar y un remuestreo de convolución cúbica. Con respecto al filtro Laplaciano, se empleó un display en desviación estándar y un remuestreo de tipo

Majority para obtener la imagen filtrada en Laplaciano 5x5. Finalmente, tanto para los resultados de los filtros tipo Gradiente como Sobel, se les aplicó comparación entre capas teniendo como resultado una imagen comparativa entre Gradiente Norte-Sur, Este-Oeste, Norte-Sur-Este-Oeste y Sobel vertical-horizontal (Figura 4.2).

Una vez obtenidas las trece imágenes, se extrajeron los lineamientos de cada una de ellas mediante el demo del software GEOMÁTICA, para después descartar lineamientos cercanos a los ríos y vías principales. Luego, las líneas que cumplían el requisito eran transformadas a vértices, teniendo X0 y Y0 como coordenadas iniciales y X1 y Y1 como coordenadas finales.

Gracias a esta operación, se determinó la longitud de cada lineamiento, por tanto, en este punto se procedió a excluir longitudes menores a 50m debido a que visualmente no eran representativos. Los lineamientos que cumplían estas características pasaron al demo del software ROCKWORK 16 para ser procesados y obtener la rosa de los vientos. Información con la que se obtuvo la dirección resultante (Figura 4.2).



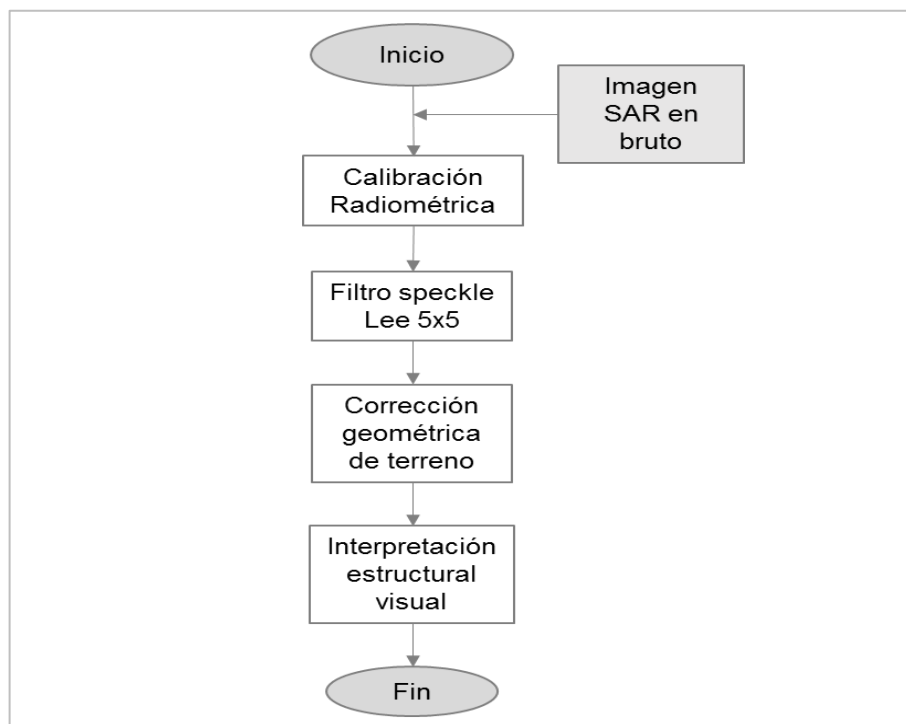
**Figura 4.2** Procesamiento del Modelo de Elevación Digital (DEM) para extracción de lineamientos.

**Elaborado por:** Bustos Y. & Gonzabay K., 2017.

### 4.3.3 Procesamiento de imagen SENTINEL 1

Sobre la imagen RADAR de SENTINEL 1 se realizó una calibración radiométrica, luego se aplicó un filtro speckle por el método de Lee en una matriz de 5x5 y finalmente se realizó una

corrección geométrica del terreno en el software SNAP (Figura 4.3).

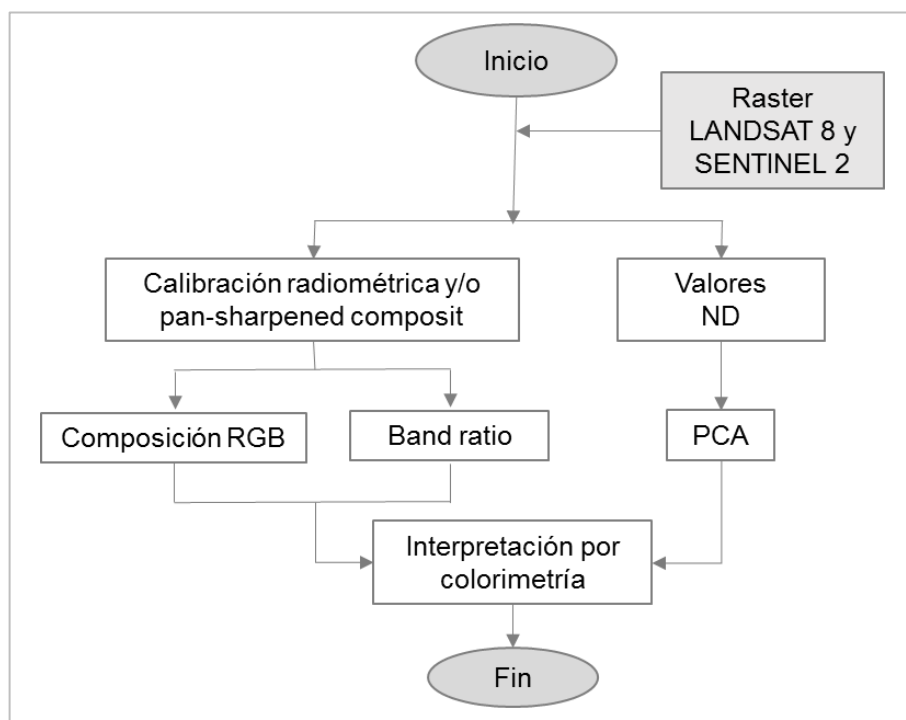


**Figura 4.3** Procesamiento de la imagen de SENTINEL 1 para extracción de lineamientos.

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

#### 4.3.4 Procesamiento de los ráster SENTINEL 2 y LANDSAT 8

El estudio geológico de la concesión Santa Martha se basó en el análisis espectral de dos imágenes satelitales: LANDSAT 8, tomada el 20 de noviembre del 2016 a las 15:27:50 y descargadas desde el servidor USGS; mientras que la imagen SENTINEL 2 fue tomada el 29 de octubre del 2016 a las 15:36:02 y descargada del mismo servidor.



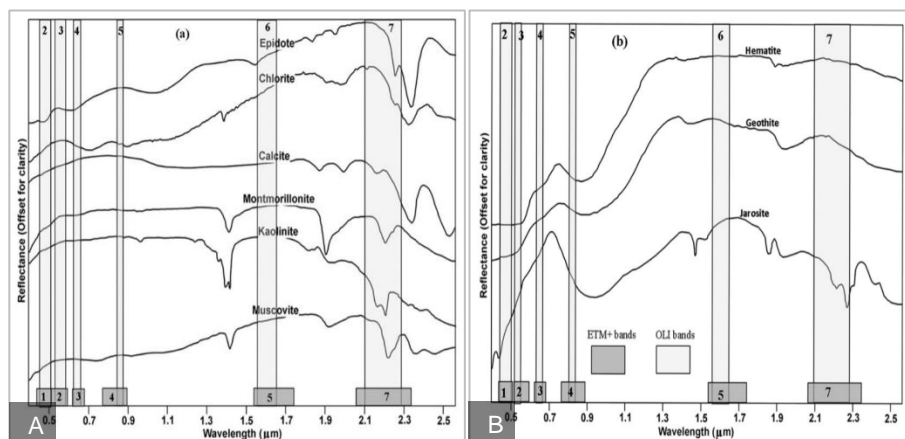
**Figura 4.4** Procesamiento de los ráster LANDSAT 8 y SENTINEL 2 para identificación de alteraciones hidrotermales. **Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

Tanto la imagen LANDSAT 8 y SENTINEL 2 se encuentran inicialmente en números digitales (ND). Es necesaria una conversión a valores de reflectancia para la imagen LANDSAT 8 y SENTINEL 2 para los procesos de composición de bandas RGB y cociente de bandas, adicional, se aplicó una composición pan-sharpened a la imagen LANDSAT 8 empleando un software SIG (Figura 4.4).

Cabe mencionar que las bandas más empleadas para la detección geológica y sus características son las siguientes: la

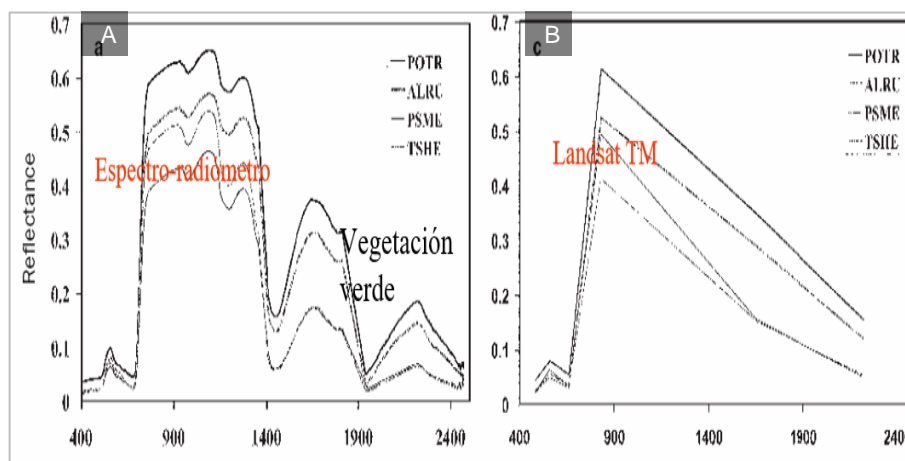
banda 7 que coincide con la absorción causada por minerales hidroxilos (arcillas, algunos óxidos y sulfatos) haciéndolos aparecer oscuros, la banda 6, que discrimina suelos y rocas debido a que es sensitiva con las variaciones de vegetación y suelos, también indica la presencia de rocas con contenido de hierro y hematita; y la banda 4 que permite discriminar suelos de vegetación y delinear la superficie del suelo. (Cunha, 2015).

En la Figura 4.5 A y B se puede observar los picos de absorción y reflectancia de los minerales de alteración y minerales hidroxilos/óxido de hierro de LANDSAT 7 ETM+ y LANDSAT 8 OLI. Además, en la Figura 4.6 se tiene la firma espectral de la vegetación para LANDSAT TM, la misma que favorece la compresión de la información.



**Figura 4.5** A. Reflectancia de minerales de alteración en ETM+ y OLI. B. Reflectancia de minerales hidroxilos/óxido de hierro en ETM+ y OLI.

**Fuente:** Masoumi, Eslamkish, Honarmand y Akbar, 2016.



**Figura 4.6** Reflectancia de la vegetación LANDSAT ETM+.  
**Fuente:** Karszenbaum & Barraza.

Para la obtención de resultados se emplearon las técnicas de composición de bandas en RGB, cociente de bandas y PCA.

### **Composición de bandas en RGB**

La combinación de los tres canales fundamentales (rojo, verde y azul) se asocian a tres canales de la imagen satelital (Amri, Mahdjoub & Guergour, 2010) la combinación de estos tres canales busca enfocar sectores de interés.

### **Cociente de bandas**

Se basa en la división de los pixeles de una banda para los pixeles de otra banda cuyas correlaciones sean muy pobres entre sí. El resultado no es sólo una imagen mono banda que permite discriminar con mayor facilidad áreas de interés, en su lugar, suprime cualquier efecto topográfico indeseado (Díaz, 2012). Cabe mencionar que, en la práctica, el proceso de cociente de bandas puede incluir relaciones matemáticas básicas tales como adición, sustracción y multiplicación de bandas tanto en el numerador como en el denominador (Díaz, 2012).

### **Análisis de componentes principales**

El análisis de componentes principales es usado como una alternativa para estudiar los principales datos multibanda. La transformación resultante produce variables no correlacionadas las cuales pueden ser asignadas a un color (Campell, 2007). Esta



técnica reduce la redundancia de datos multiespectrales (Díaz, 2012).

#### **4.3.5 Muestreo digital y coherencia entre resultados**

Se tomaron 40 muestras digitales en cada una de las imágenes compuestas de PCA, los puntos de muestreo son los mismos para la imagen con base LANDSAT 8 y para la imagen con base SENTINEL 2. Para cada muestra digital se realizaron los siguientes análisis.

##### **Clasificación colorimétrica de píxeles**

Se clasificaron los píxeles próximos a las muestras digitales en base a su respuesta colorimétrica, en la Tabla X y Tabla XI se muestran las respuestas asociadas a cada clase de píxeles para las imágenes con base LANDSAT 8 y SENTINEL 2 respectivamente.

**Tabla X.** Valores asignados a pixeles, LANDSAT 8.

<b>VALOR ASIGNADO</b>	<b>RESPUESTA</b>
1	Óxido de hierro
2	Óxido de hierro, moderada vegetación y escasos minerales (OH)
3	Vegetación, moderado óxido de hierro y minerales (OH)
4	Óxido de hierro, moderado minerales (OH) y escasos vegetación
5	Minerales (OH), moderado óxido de hierro y escasos vegetación
6	Minerales (OH), moderada vegetación y escasos óxido de hierro
7	Óxido de hierro y moderada vegetación
8	Minerales (OH), moderado óxido de hierro y vegetación
9	Vegetación, moderado óxido de hierro y minerales (OH)
10	Óxido de hierro, moderada vegetación y minerales (OH)
11	Óxido de hierro
12	Vegetación, moderado óxido de hierro y minerales (OH)
13	Óxido de hierro

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

**Tabla XI.** Valores asignados a pixeles, SENTINEL 2.

<b>VALOR ASIGNADO</b>	<b>RESPUESTA</b>
1	Óxido de hierro
2	Vegetación, moderado óxido de hierro y escasos minerales (OH)
3	Óxido de hierro, moderada vegetación y escasos minerales (OH)
4	Abundante vegetación
5	Abundante vegetación y escasos minerales (OH)
6	Minerales (OH), moderado óxido de hierro y vegetación
7	Escasos minerales (OH), óxido de hierro y vegetación

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Análisis de firmas espectrales**

Se elaboraron gráficos de las firmas espectrales para todas las muestras digitales mediante una dispersión de puntos colocando en el eje horizontal la longitud de onda promedio de las bandas y en el eje vertical los valores de reflectancia que presentan las bandas. Luego estas firmas fueron interpretadas comparándolas con firmas estándar para ciertos minerales de alteración.

### **Coherencia entre resultados**

Se compararon los resultados del análisis colorimétrico de las muestras digitales con sus respectivas firmas espectrales y se determinó la cantidad de muestras cuyos resultados presenten

coherencia, así mismo, se determinó el número de muestras con resultados incoherentes.

En base a la proporción de resultados coherentes sobre resultados incoherentes se decidió la aceptación del método.

#### **4.4 Campaña geológica de campo**

El levantamiento geológico de campo consistió en recorrer cortes de carretera y quebradas en la zona de estudio obteniendo información estratigráfica, estructural y litológica, además de tomar muestras para posterior estudio petrográfico.

#### **4.5 Trabajo de laboratorio**

Se elaboraron cinco láminas delgadas de las estaciones más representativas y fueron descritas petrográficamente en un microscopio de luz polarizada.

#### **4.6 Validación de la metodología**

##### **4.6.1 Lineamientos estructurales**

Se comparó la información estructural obtenida mediante el análisis visual de las imágenes satelitales en color natural, imagen de relieve y sombras e imagen SAR con datos

estructurales de campo para lo cual se mapearon ambos sets de datos en un software SIG y se observaron las semejanzas en las direcciones de los lineamientos.

Además, se comparó la información estructural obtenida mediante el análisis digital de imágenes procesadas a partir del DEM con datos estructurales de campo, para esto se elaboró un diagrama de rosas de las diaclasas mapeadas en campo y se contrastó con los diagramas de rosas de los lineamientos extraídos de las imágenes procesadas.

#### **4.6.2 Especies minerales**

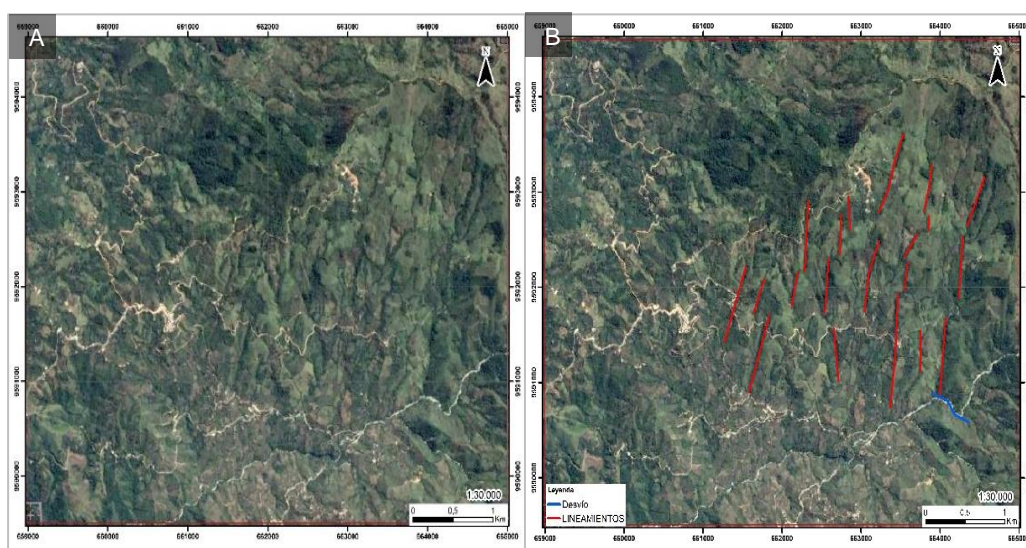
Se aplicó análisis colorimétrico a varios pixeles próximos a las estaciones de campo, luego se compararon las especies minerales que indican los valores asociados a los pixeles con los ensambles minerales determinados mediante petrografía.

# **CAPÍTULO 5**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## 5.1 Análisis visual preliminar

En la Figura 5.1 A se puede observar un patrón de drenaje sub-paralelo en la parte Este de la concesión Santa Martha, varias quebradas se encuentran dispuestas lateralmente la una de la otra con dirección preferencial NNE-SW, lo cual sugiere un control estructural dominante en el área de estudio, es decir, probablemente los cursos de las quebradas fueron modelados por fracturas asociadas a una actividad tectónica dominante local o regionalmente. Además, se observa que el río ha cambiado su curso en la parte Sureste de la concesión. En la Figura 5.1 B se marcaron las quebradas en rojo y el cambio del curso del río en azul.



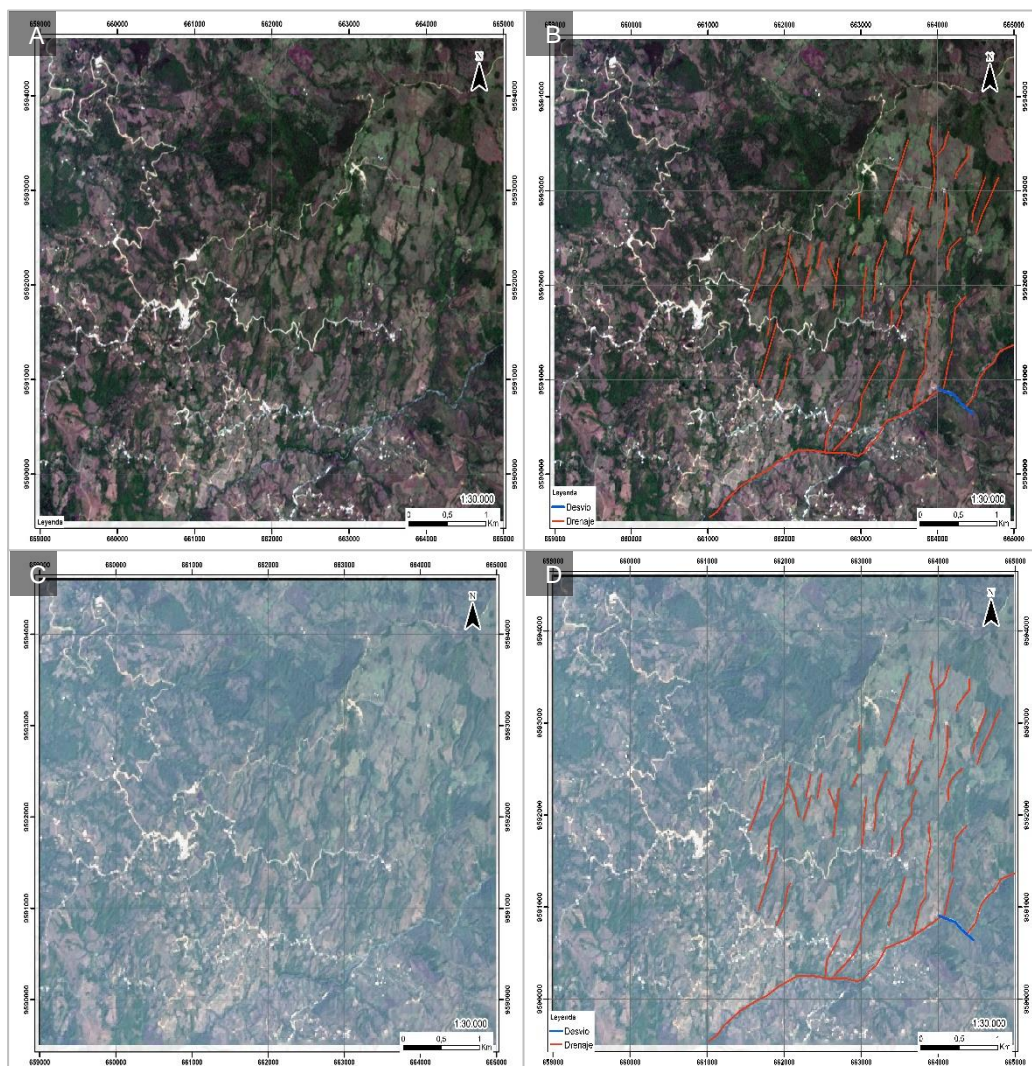
**Figura 5.1** A. Concesión Santa Martha; B. Realce de detalles de A.  
**Fuente:** Google Earth, 2016.

## **5.2 Análisis visual de imágenes satelitales en color natural**

La Figura 5.2 A es una composición de bandas en color natural de la imagen SENTINEL 2 (R: Banda 4; G: Banda 3; B: Banda 2) en la que se observa un patrón de drenaje sub-paralelo en la parte oriental de la concesión, y también se aprecia el cambio del curso del río antes mencionado. En la Figura 5.2 B se marcaron las quebradas y el río principal en color rojo, mientras que, el cambio de curso del río en azul.

La Figura 5.2 C es una composición de bandas en color natural de la imagen LANDSAT 8 (R: Banda 4; G: Banda 3; B: Banda 2) en la que se observa el patrón de drenaje sub-paralelo y el cambio de curso del río. En la Figura 5.2 D se marcaron las quebradas y el río en color rojo, y el cambio de curso del río en azul.





**Figura 5.2** A. Composición RGB color natural en imagen SENTINEL 2, B. Realce de detalles de A; C. Composición RGB color natural en imagen LANDSAT 8, D. Realce de detalles.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **5.3 Análisis del Modelo de Elevación Digital**

#### **5.3.1 Análisis visual estructural del relieve y sombras**

El ANEXO A muestra el patrón de drenaje característico de la zona, dos lineamientos estructurales de dirección NW-SE de los cuales, el lineamiento ubicado más al Sur corta el curso del río y una geoforma irregular en la parte centro Sur del extremo oriental de la coneción, la cual se presenta cortada por el lineamiento ubicado más al Sur, justo en la zona donde el río cambia su curso.

#### **5.3.2 Análisis digital de imágenes procesadas a partir del DEM**

Los resultados presentados en la Tabla XII se obtuvieron a partir de la extracción de lineamientos en las imágenes mostradas en los ANEXOS B - N, en donde se observa que la población de cada filtro se agrupó en intervalos de diez grados (BIN). En la tabla se puede apreciar los rangos mínimos y máximos dentro de los que se clasificó la población, teniendo como resultado que los lineamientos presentan una dirección preferencial de 25,38" a 36,89°.

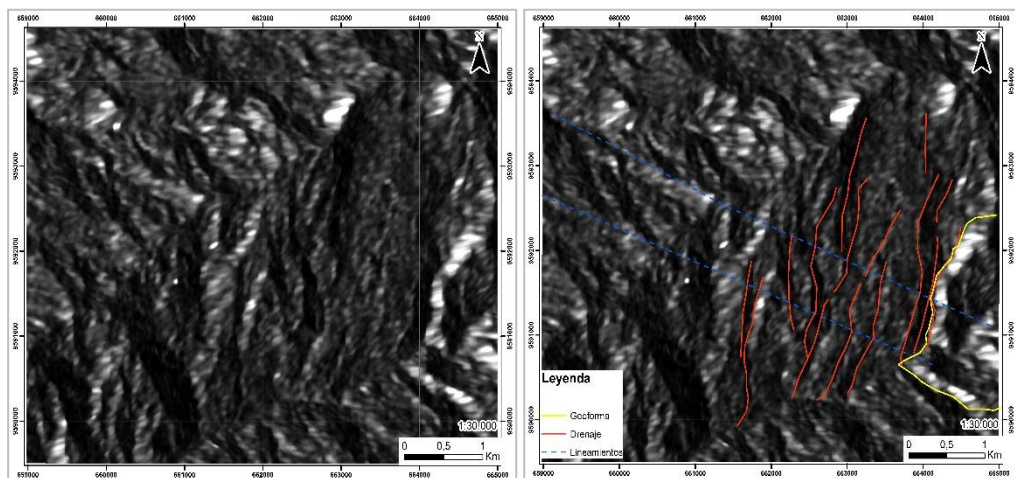
**Tabla XII.** Características de las imágenes filtradas.

FIGURA	BIN	POBLACIÓN	MÁXIMO BIN POBLACIONAL				VECTOR PROMEDIO	CONFIANZA	
			CANT	(%)	INTERVALO			INTERV	(%)
					MIN	MAX			
GRADIENTE NORTE	10°	1479	264	8,92	20°	30°	21,5	1,5	80
GRADIENTE SUR	10°	1324	181	6,84	60°	70°	70,2	1,9	80
GRADIENTE OESTE	10°	1477	264	8,94	20°	30°	21,5	1,5	80
GRADIENTE ESTE	10°	1680	289	8,6	20°	30°	21,2	1,5	80
GRADIENTE NORESTE	10°	1396	77,56	7,38	0°	10°	156,8	5,7	80
GRADIENTE NOROESTE	10°	1494	224	7,5	30°	40°	41,2	1,7	80
LAPLACIANO 5X5	10°	361	53	7,34	20°	40°	40	4,4	80
SOBEL HORIZONTAL	10°	1284	174	6,78	50°	60°	70,1	2	80
SOBEL VERTICAL	10°	1477	264	8,94	20°	30°	21,5	1,5	80
COMPARACIÓN GRADIENTE NORTE-SUR	10°	1059	145	6,85	70°	80°	70,3	1,9	80
COMPARACIÓN GRADIENTE ESTE-OESTE	10°	1370	265	9,67	20°	30°	21,6	1,4	80
COMPARACIÓN GRADIENTE NSEW	10°	1157	177	7,65	0°	10°	156,8	7,1	80
COMPARACIÓN SOBEL VERTICAL HORIZONTAL	10°	1153	264	8,94	0°	10°	156,9	7,1	80
<b>INTERVALO RESULTANTE</b>					25,38°	36,15°	66,89		

Elaborado por: Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

## 5.4 Análisis visual de imagen RADAR

En la Figura 5.3 A se aprecia el patrón de drenaje característico de la zona Este de la concesión, también se observan los lineamientos estructurales sub-paralelos de dirección NW-SE mencionados anteriormente y una respuesta con forma irregular en la parte centro Sur del extremo oriental de la concesión asociada a la geoforma reconocida en la imagen de relieve y sombras. En la Figura 5.3 B, las quebradas se resaltan en color rojo, los lineamientos en color azul y la respuesta irregular en color amarillo.



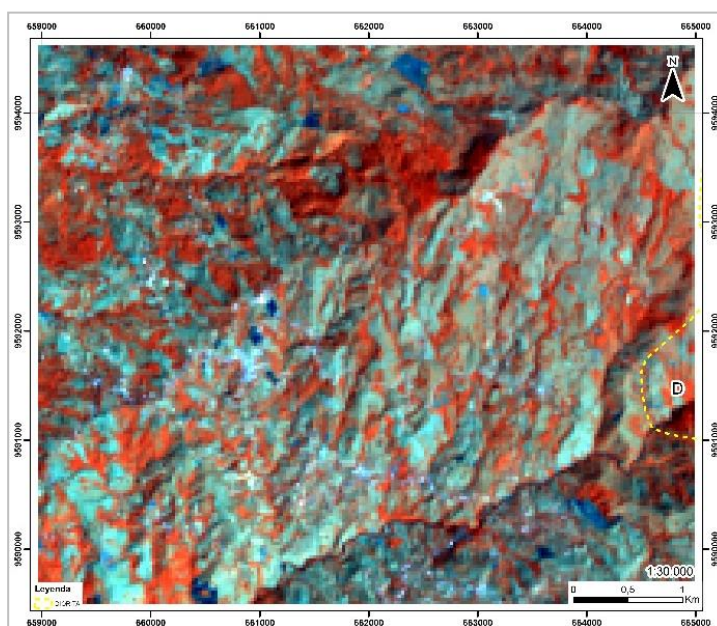
**Figura 5.3** A. Imagen radar de SENTINEL 1; B. Realce de caracteres.  
Elaborado por: Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

## 5.5 Análisis de zonas con minerales de alteración

### Composición de bandas

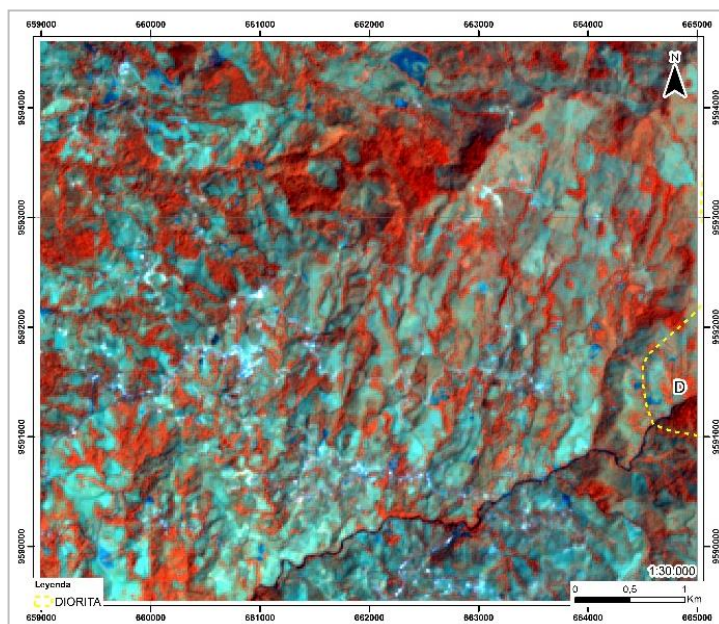
De acuerdo con la metodología que señala Cunha (2015), las bandas 5, 6 y 7 de LANDSAT 8 son propicias para la identificación de vegetación.

En la Figura 5.4 la vegetación frondosa se muestra de color rojo, el agua en negro, las zonas descubierta parcialmente de vegetación o con contenido arbóreo menor se presentan de tonalidades celestes, mientras que las zonas donde se identifican afloramientos se observan en azul.



**Figura 5.4** Composición RGB567 de LANDSAT 8.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

Para la construcción del RGB en SENTINEL 2 se utilizaron las bandas 8, 11 y 12 obteniendo resultados similares con resolución espacial diferente (Figura 5.5).

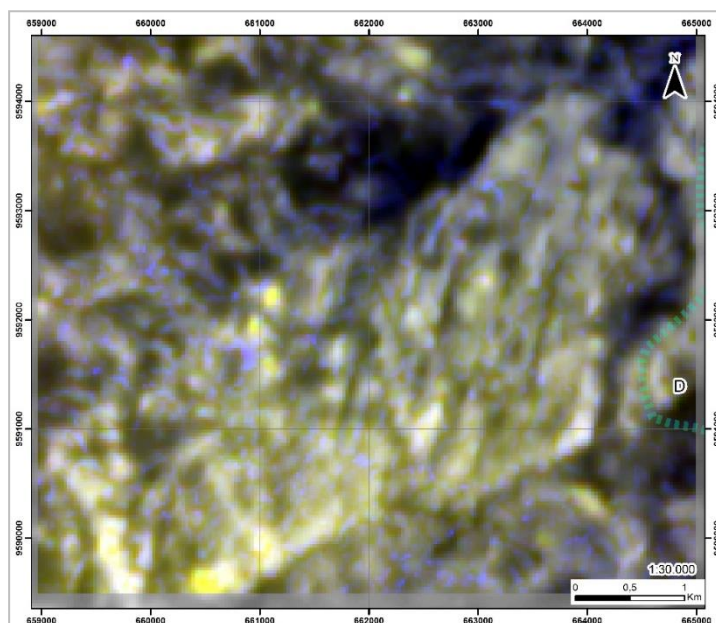


**Figura 5.5** Composición RGB567 de SENTINEL 2.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

Para la detección de silicatos se usaron las bandas 10, 11, 7 en RGB, composición que contiene dos bandas termales y una banda de infrarrojo de onda corta, permitiendo distinguir silicatos debido a su gran emisividad en el rango de 10.3 a 11.70  $\mu\text{m}$  (Ahmed & Amin, 2014) (Beiranvand & Hashim, 2015).

De acuerdo con Beiranvand (2015), las rocas con altos valores de emisividad de silicatos se manifiestan de color rojo, las rocas con cantidad moderada de silicatos se muestran en rosa y las rocas pobres en silicatos se presentan en tonos oscuros. Por tanto, los tonos azules contienen minerales pobres en silicatos. En la Figura 5.6, se observa que

al Sureste de la concesión existe gran concentración de silicatos mientras que la parte Este se muestra pobre en silicatos.



**Figura 5.6 RGB 10-11-7.**  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

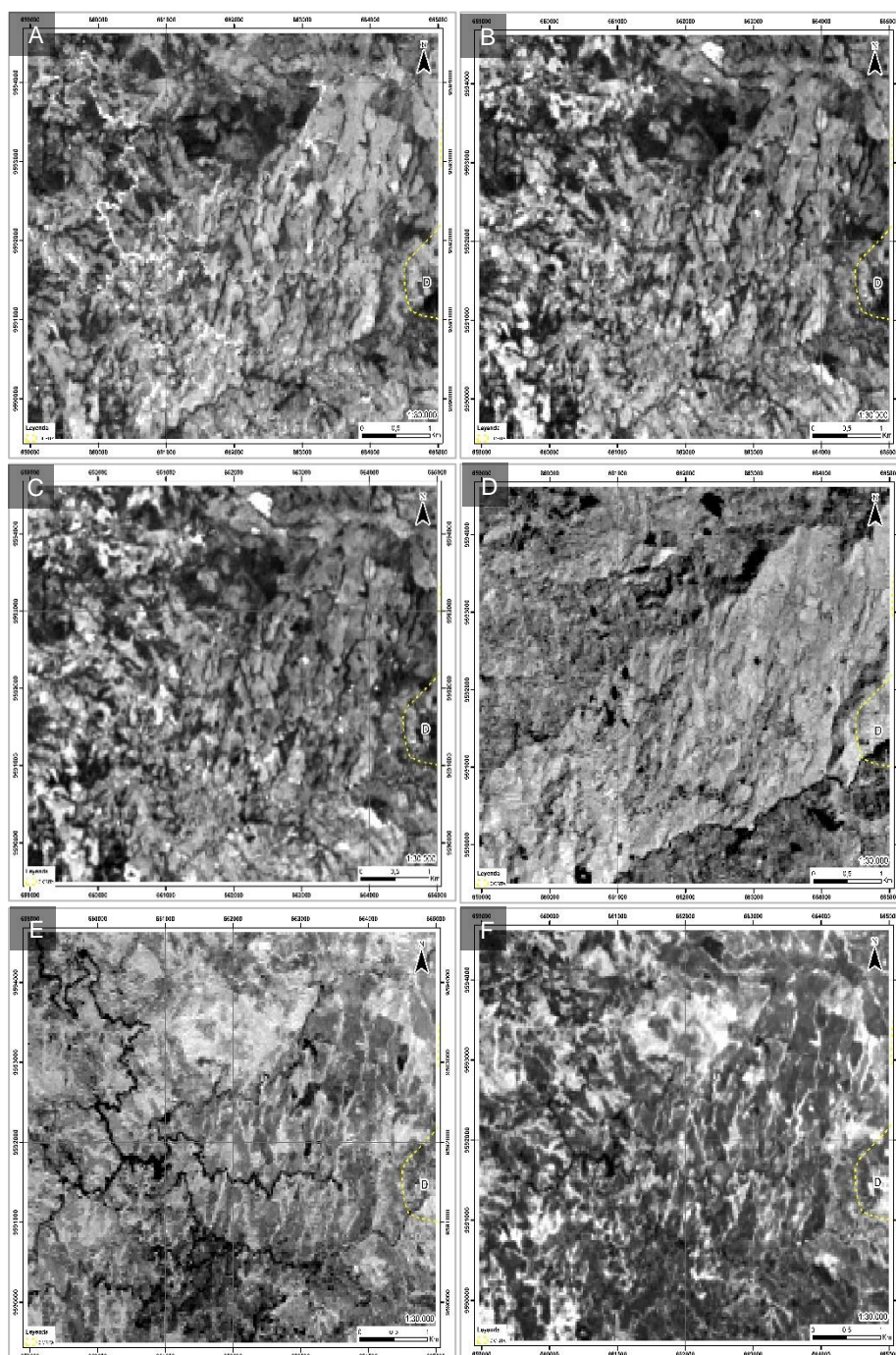
### **Análisis de los cocientes de bandas**

Para resaltar las áreas con abundantes minerales de óxidos de hierro se empleó el cociente banda 4 entre banda 2, las respuestas positivas se distinguen en tonos claros (Figura 5.7 A) (Cunha, 2015). La banda 6 dividida para la banda 5 discrimina ferro-minerales en tonos brillantes (Figura 5.7 B) (Cunha, 2015). Minerales arcillosos tales como illita, caolinita, y montmorillonita son discriminados con el cociente 7/5 en tonos claros (Figura 5.7 C) (Cunha, 2015). El cociente 6/7 distingue en tonos brillantes, rocas alteradas que contienen arcillas y alunita de las rocas

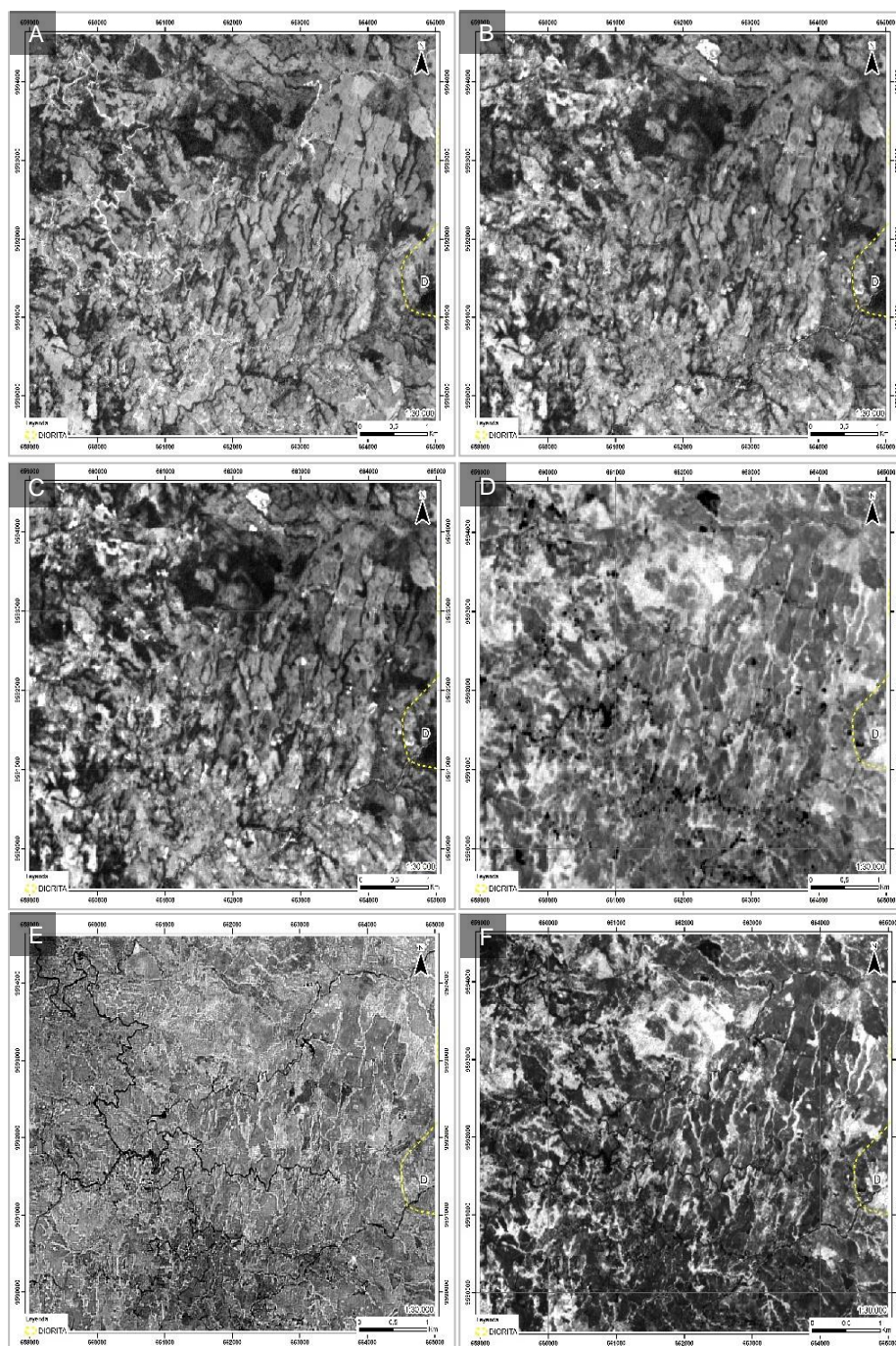
inalteradas (Figura 5.7 D) (Cunha, 2015). Los minerales de arcilla se determinaron por el cociente  $7/4$  que se pueden observar en tonos claros en la Figura 5.7 E (Laake, 2011). El cociente  $5/4$  se empleó para distinguir vegetación, Este cociente fue tomado del análogo cociente de bandas para SENTINEL señalado por Meer (2014) (Figura 5.7 F).

De la misma manera, se emplearon las bandas equivalentes de LANDSAT 8 anteriormente mencionadas para elaborar los cocientes de bandas correspondientes a SENTINEL 2. Para minerales con óxido de hierro se utilizó el cociente  $4/2$  (Figura 5.8 A). En cuanto, para los ferro-minerales se empleó el cociente  $11/8$  (Figura 5.8 B). Por otro lado, para los minerales arcillosos se utilizó el cociente  $12/8$  (Figura 5.8 C). Para distinguir las zonas alteradas se empleó el cociente  $11/12$  (Figura 5.8 D). El cociente  $12/4$  indica minerales de arcilla (Figura 5.8 E). Para las zonas con vegetación se utilizó el cociente  $8/4$  (Figura 5.8 F) (Meer, Werff & Ruitenbeek, 2014).





**Figura 5.7** Cociente de bandas de LANDSAT 8  
 A. 4/2; B. 6/5; C. 7/5; D. 6/7, E. 7/4; F. 5/4.  
 Elaborado por: Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

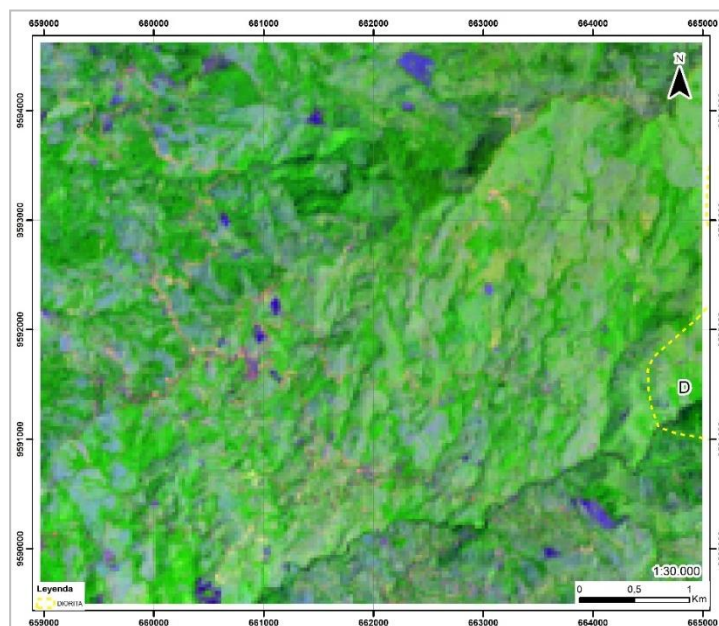


**Figura 5.8** Cociente de bandas de SENTINEL 2  
 A. 4/2; B. 11/8; C. 12/8; D. 11/12; E. 12/4; F. 8/4.  
 Elaborado por: Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Composiciones de cocientes de bandas**

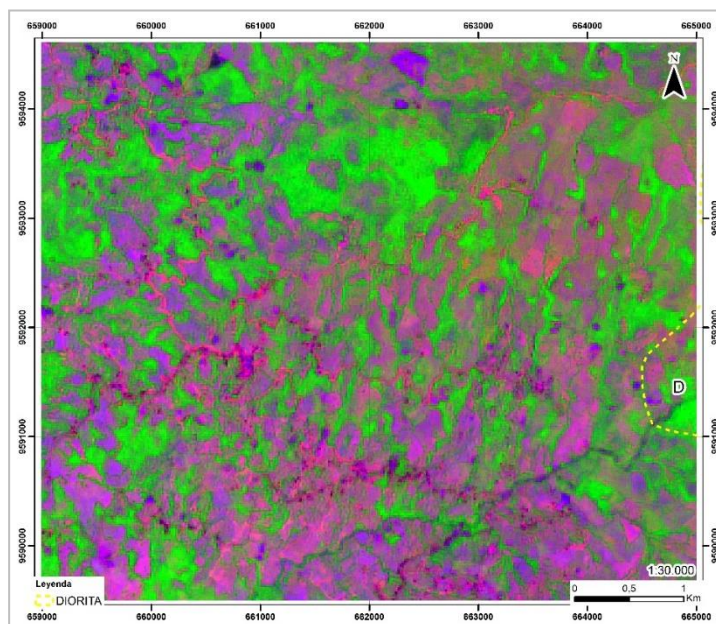
Empleando los cocientes de bandas 4/2, 6/7 y 6/5 en RGB se distinguieron la litología y las zonas de alteración hidrotermal (Sabins, 1999). El cociente 4/2 fue usado para mapear óxidos como hematita, limonita y jarosita, las mismas que poseen alta reflectancia en la región del rojo. El cociente 6/7 fue empleado para mapear minerales arcillosos como caolinita, illita y montmorillonita, mientras que, el cociente 6/5 muestra alta reflectancia en ferro-minerales (Figura 5.9).

En las zonas amarillas se tiene óxidos de hierro y arcillas de rocas alteradas, en azul se distinguen zonas con ferro-minerales, de color cyan se observan los sectores con ferro-minerales y arcillas de rocas alteradas, las tonalidades verdes señalan arcillas en rocas alteradas. Se distinguen el río en negro, el poblado en rojo y parte de las carreteras en amarillo (Figura 5.9).



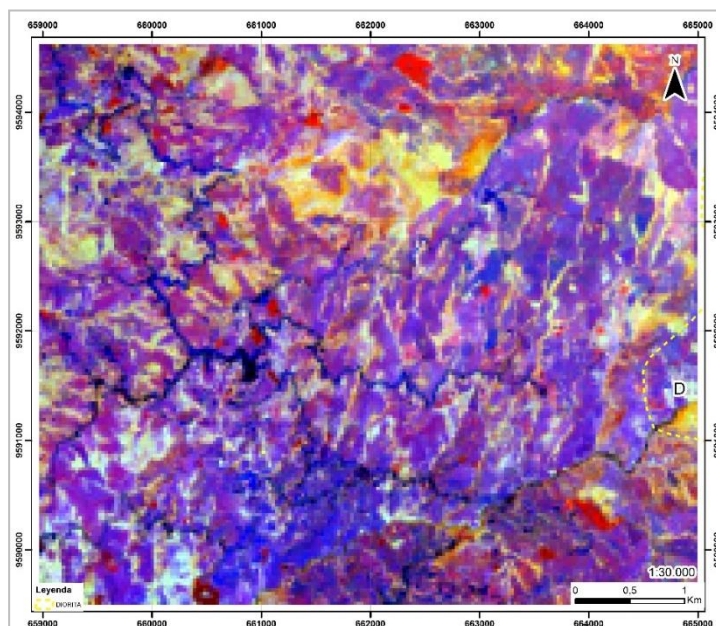
**Figura 5.9** Cociente de Sabins para LANDSAT 8.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

De la misma forma, se emplearon las equivalencias de cocientes por lo que la composición RGB se constituye de  $4/2$ ,  $11/12$  y  $11/8$ . Analizando la Figura 5.10 se pudo indicar que el verde marca las zonas con arcillas en rocas alteradas, el tono magenta señala óxidos de hierro con ferro-minerales, mientras que los tonos morados más intensos señalan mayor cantidad de ferro-minerales que óxidos de hierro. Finalmente, los tonos verdes señalan minerales de arcilla en rocas alteradas.



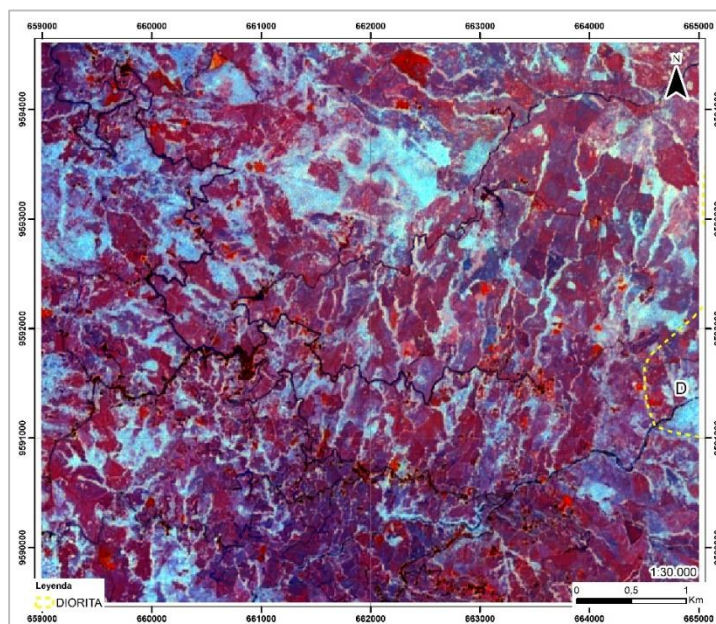
**Figura 5.10** Cociente de Sabins para SENTINEL 2.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

Además, empleando la combinación RGB de Kaufmann se tuvo los cocientes de banda 7/4 para la región del rojo, 5/4 para el verde y 6/7 para el azul. En la Figura 5.11, el color amarillo representa vegetación más arcillas, rojo arcillas, naranja mayor tendencia de arcillas que vegetación, azul determina arcillas en rocas alteradas hidrotermalmente según Cunha (2015), el morado indica vegetación más arcillas, los sectores más claros representan la presencia de los tres componentes (arcillas, vegetación, rocas alteradas). Los sectores negros indican al poblado y el azul oscuro las vías principales.



**Figura 5.11** RGB de Kaufmann para LANDSAT 8.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

De manera similar, se utilizaron los cocientes de bandas análogos de SENTINEL 2 para elaborar el RGB el cual consta de los radios 12/4, 8/4, 11/12 en rojo, verde y azul respectivamente. En la Figura 5.12, el color cian indica vegetación más arcillas. Tonos morados, vegetación más arcilla en rocas alteradas. Coloración azul representa vegetación. Las zonas negras señalan vías principales. Finalmente, el color rojo representa roca alterada hidrotermalmente según Cunha (2015).



**Figura 5.12** RGB de Kaufmann para SENTINEL 2.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Análisis de componentes principales**

Siguiendo la metodología de Masoumi (2016), se realizaron los análisis de componentes principales tanto para los DN's de las bandas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 de LANDSAT 8 como para los DN's de las bandas 2, 3, 4, 8, 11 y 12 de SENTINEL 2.

Analizando la Tabla XIII se determinó que en PC1 los signos positivos indican albedo. PC2 representa vegetación debido a su alto en la banda 5 (0.98463). PC3 realza las vías principales. PC4 muestra un alto positivo en la banda 6 (0.49324), mientras que en la banda 7 se encuentra un pico de absorción (-0.80061). Por tanto, de acuerdo con las características de las firmas espectrales, los minerales de hidroxilo se presentan de tonos

claros puesto que la banda 6 refleja y la 7 absorbe. PC5 corresponde a óxidos de hierro los mismos que se pueden observar de tonalidades oscuras debido a que el alto positivo se ubica en la banda 2 (0.78485) y el alto negativo en la banda 4 (-0.56944). Teniendo estos parámetros en cuenta se realizó la composición RGB: PC2, -PC5 y PC4.respectivamente.

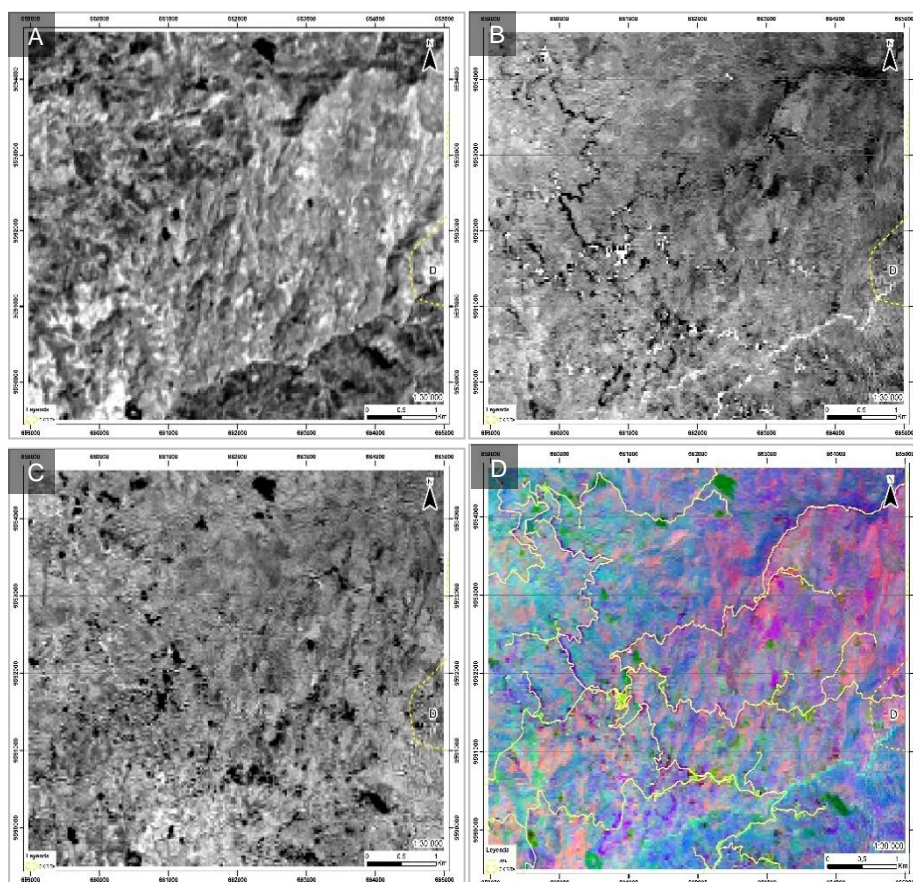
**Tabla XIII.** Matriz de los eigenvectores de LANDSAT 8 OLI.

BAND	2	3	4	5	6	7	EIG (%)
PC1	0.12689	0.17364	0.29805	0.00836	0.72461	0.58291	70.3986
PC2	-0.02095	0.03644	-0.05280	0.98463	0.10416	-0.12286	27.1132
PC3	0.38309	0.49203	0.62764	0.07469	-0.45964	0.01942	2.0368
PC4	0.04282	0.12012	0.28239	-0.14044	0.49324	-0.80061	0.336
PC5	0.78485	0.21289	-0.56944	-0.03950	0.09545	-0.06120	0.0724
PC6	0.46784	-0.81650	0.33231	0.05977	-0.02079	-0.00356	0.0429

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

La Figura 5.13 A muestra el PC2, donde las tonalidades brillantes señalan la vegetación; la Figura 5.13 B, señala el PC5 cuyos tonos menos brillantes indican óxidos de hierro, aunque también se aprecia el área urbana de la parroquia Güizhagüiña y parte de las vías principales. la Figura 5.13 C muestra el PC4 el cual señala minerales con bases hidroxilo (principalmente arcillas) en tonalidades claras. Finalmente, la Figura 5.13 D muestra la composición RGB de las componentes principales PC2, -PC5 y PC4.





**Figura 5.13 PCA de LANDSAT 8.**  
 A. PC2; B. PC5; C. PC4; D. RGB: PC2, -PC5, PC4.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

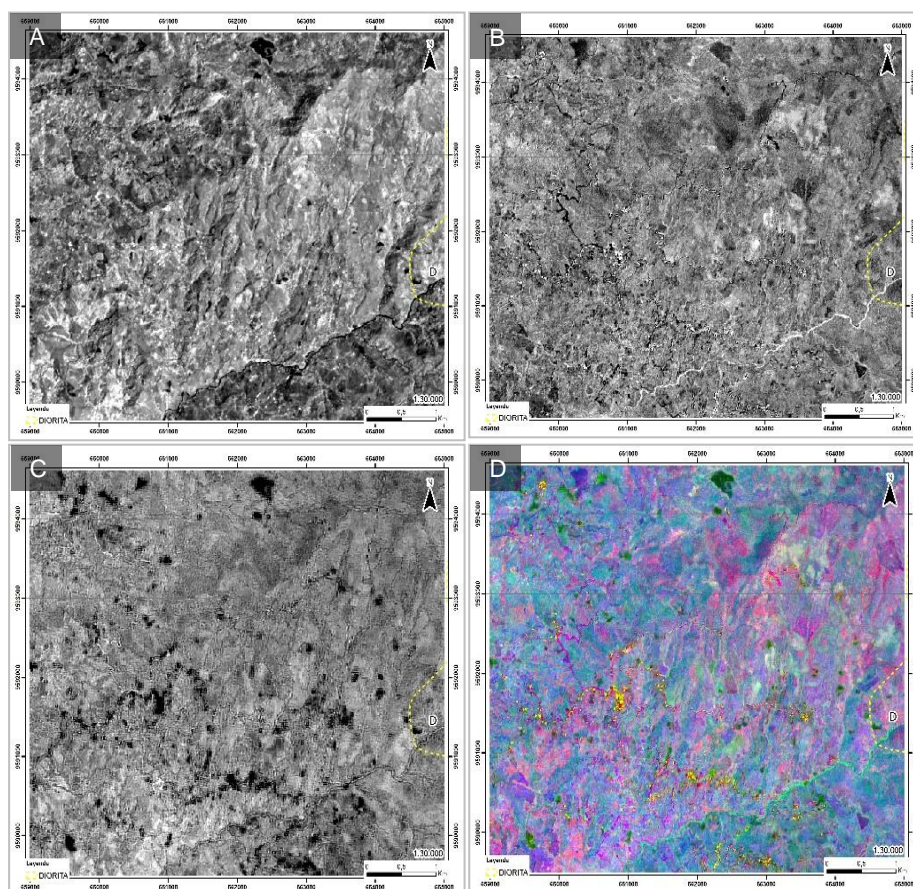
En cuanto al análisis de componentes principales para SENTINEL 2 se utilizaron los ND de las bandas 2, 3, 4, 8, 11 y 12 (Tabla XIV), de los cuales se obtuvo que el PC1 representa el brillo de la superficie y el albedo. PC2 representa la vegetación debido al pico positivo en la banda 8 ( $9.63045E-01$ ). PC3 posee picos en la banda 4 ( $-6.08467E-01$ ) y banda 11 ( $4.54979E-01$ ). PC4 presenta un pico de absorción en la banca 12 ( $-8.065875E-01$ ) y uno de reflectancia en la banda 11 ( $5.457643E-01$ ) por lo que es perfecto para detectar arcillas en pixeles con tonalidades claras.

PC5 posee dos picos ubicados en la banda 2 y 3 con un valor de 5.052776E-01 y un pico de absorción en la banda 4 (-6.762929E-01) por lo que se pueden distinguir zonas con óxidos de hierro en tonos oscuros. Finalmente, el PC6 no muestra información, los eigenvectores (vectores propios) no proporcionan un porcentaje de contenido por lo que no fue utilizado en el estudio. Gracias a la información anterior, se compuso un RGB con CP2 para rojo, -CP5 en verde y CP4 en azul.

**Tabla XIV.** Matriz de los eigenvectores de SENTINEL 2.

BN	2	3	4	8	11	12	EIG (%)
PC1	1.804E-01	1.804E-01	3.640E-01	-2.128E-01	6.601E-01	5.670E-01	69.042
PC2	1.118E-01	1.118E-01	3.059E-02	9.630E-01	2.150E-01	2.039E-02	25.340
PC3	-4.468E-01	-4.468E-01	-6.085E-01	1.824E-02	4.550E-01	1.520E-01	4.8128
PC4	3.889E-03	3.889E-03	1.975E-01	-1.119E-01	5.458E-01	-8.066E-01	0.5433
PC5	5.053E-01	5.053E-01	-6.763E-01	-1.200E-01	1.496E-02	-6.626E-02	0.2625
PC6	7.071E-01	-7.071E-01	0	0	0	0	0

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

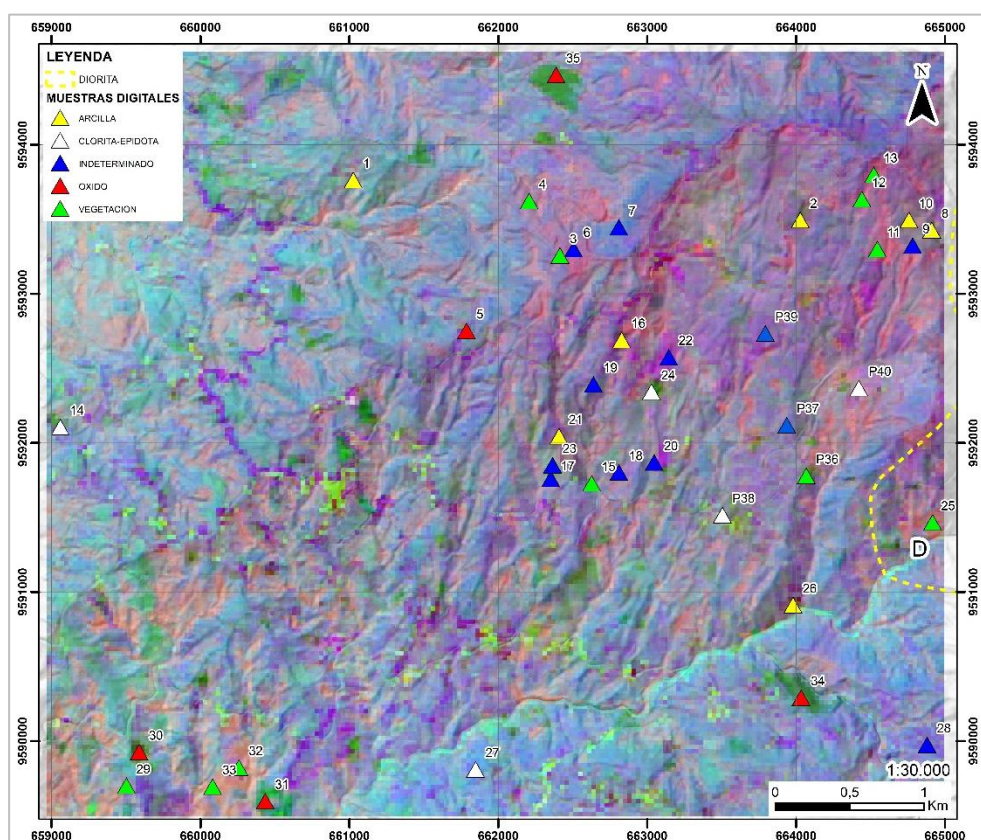


**Figura 5.14** PCA de SENTINEL 2.  
 A. PC2; B. PC5; C. PC4; D. RGB: PC2, -PC5, PC4.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

La Figura 5.14 A muestra el PC2, donde las tonalidades brillantes señalan la vegetación. La Figura 5.14 B señala el PC5 cuyas zonas más absorbentes indican óxidos de hierro, aunque también se aprecia el área urbana de la parroquia Güizhagüiña y parte de las vías principales. En cuanto a la Figura 5.14 C, el PC4 señala minerales con bases hidroxilo (principalmente arcillas) en tonalidades brillantes. La (Figura 5.14 D) es una composición RGB de las componentes principales PC2, -PC5 y PC4.

## 5.6 Muestreo digital y coherencia entre resultados

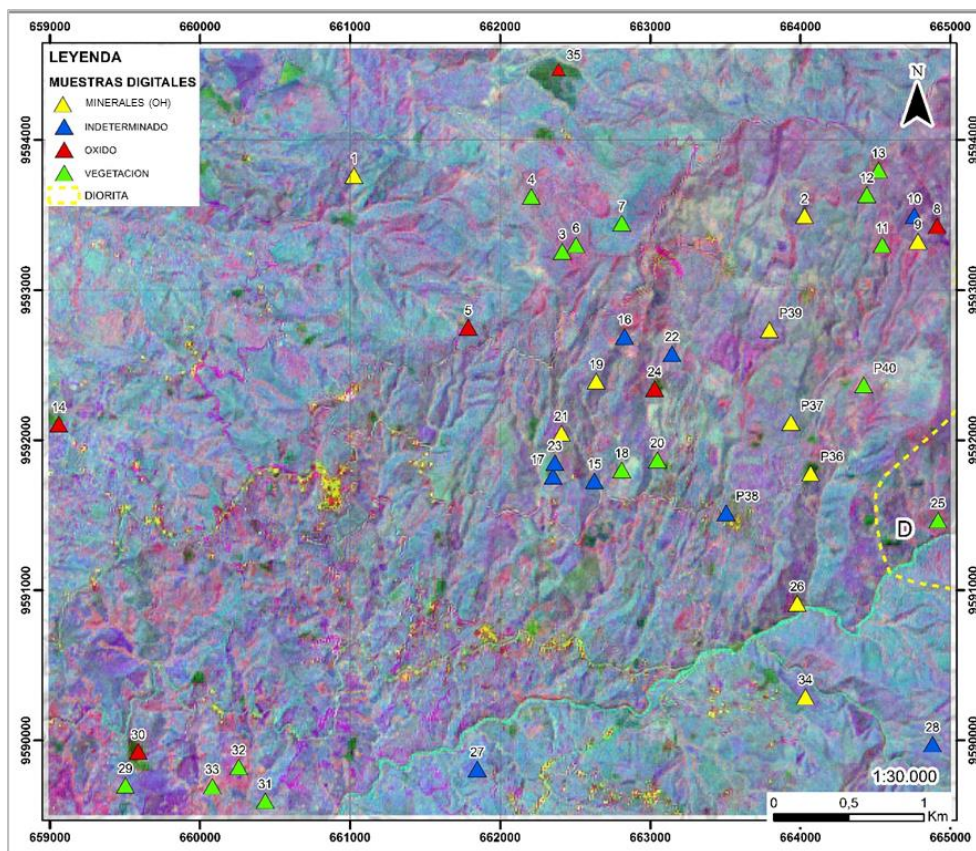
La Figura 5.15 representa la composición RGB de las componentes principales de LANDSAT 8 sobre la que se ubican los puntos en los que se tomaron las muestras digitales.



**Figura 5.15** Muestras digitales sobre el RGB de las componentes principales de LANDSAT 8.

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

La Figura 5.16 representa la composición RGB de los PCA de SENTINEL 2 sobre la cual se ubican los puntos donde se tomaron las muestras digitales.



**Figura 5.16** Muestras digitales sobre el RGB de las componentes principales de SENTINEL 2.

**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Análisis de firmas espectrales**

En los ANEXOS O y Q se muestran los minerales que las firmas espectrales reconocen en cada muestra digital para las imágenes con base LANDSAT 8 y SENTINEL 2 respectivamente (ANEXO P, ANEXO R).

### **Clasificación colorimétrica de píxeles**

En los ANEXOS O y Q se muestran los valores asignados a los píxeles de las muestras digitales tomadas en las imágenes con base LANDSAT 8 y SENTINEL 2 respectivamente.

### **Coherencia entre los resultados**

En el ANEXO O y Q se indican las muestras digitales que presentan coherencia entre los resultados del análisis colorimétrico con el análisis de firmas espectrales.

Para la imagen compuesta de PCA con base LANDSAT 8 se tiene una relación de resultados coherentes a incoherentes de 2.33 a 1, con 70% de resultados coherentes. Para la imagen compuesta de PCA con base SENTINEL 2 se tiene una relación de resultados coherentes a incoherentes de 3.44 a 1, con 77.5% de resultados coherentes.

En base a estos resultados se acepta el método de análisis colorimétrico para ambas imágenes.

## **5.7 Geología de Campo**

De acuerdo con la información obtenida en campo y laboratorio se determinaron dos unidades litológicas, una las cuales se ha dividido en

tres subunidades; A, B y D en función de las características que presenta la roca, además se define el contacto entre las unidades reconocidas. A continuación, se describen las unidades y subunidades.

A: Riolita porfídica con feldespato y plagioclasas alterados a clorita, epidota además de sulfuros diseminados (Estación tipo 1).

B: Riolita porfídica con cuarzo, feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota además de sulfuros macroscópicos (Estación tipo 11).

C: Andesita porfídica con cuarzo, feldespato y plagioclasas alterados a clorita y zeolita, y piroxenos alterados a epidota (Estación tipo 21).

D: Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas además de sulfuros diseminados (Estación tipo 24).

CD: Contacto andesita (C) - riolita (D) (Estación tipo 27).

### 5.7.1 Descripción de estaciones tipo

#### Estación 1

Ubicación: Vía Güizhagüiña – Canelal Km 1.6 (Figura 5.17 A).

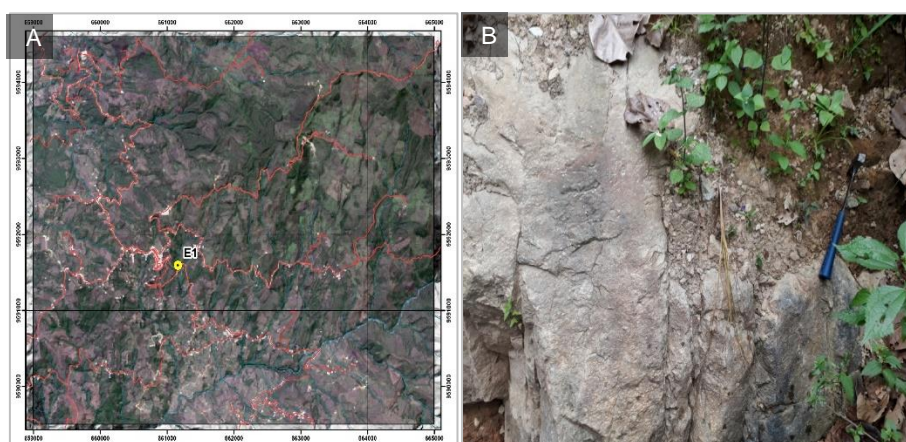
Coordenadas: 661162 – 9591595

Afloramiento en quebrada en el que se aprecia una sola unidad de riolita porfídica con matriz microlítica hialocristalina color verde grisáceo con cristales de cuarzo ipidiomorfo color gris muy ligero de 1 a 2 mm, feldespato ipidiomorfo color gris muy ligero de 0.6 a 1.5 mm, plagioclasa ipidiomorfa color gris muy ligero de 0.7 a 1.5 mm y piroxenos ipidiomorfos color negro grisáceo de 1 a 7 mm, además de minerales accesorios como clorita y epidota alitromorfos color amarillo verdoso oscuro en pequeños cristales circulares de 0.4 mm alterando a los feldespatos y plagioclasas; y cristales de pirita de 0.5 mm (Figura 5.17 B).

Se observan fracturas con las siguientes direcciones:  $(10^{\circ}/80^{\circ}\text{SE})$ ,  $(20^{\circ}/80^{\circ}\text{SE})$ ,  $(\text{N}/80^{\circ}\text{E})$ ,  $(20^{\circ}/74^{\circ}\text{SE})$  y una vetilla rellena de cuarzo con dirección  $(30^{\circ}/60^{\circ}\text{SE})$ .



En el ANEXO S se presentan fotografías de la muestra macroscópica y la lámina delgada de la roca del afloramiento.



**Figura 5.17** A. Ubicación de la estación E1; B. Afloramiento de E1.

**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

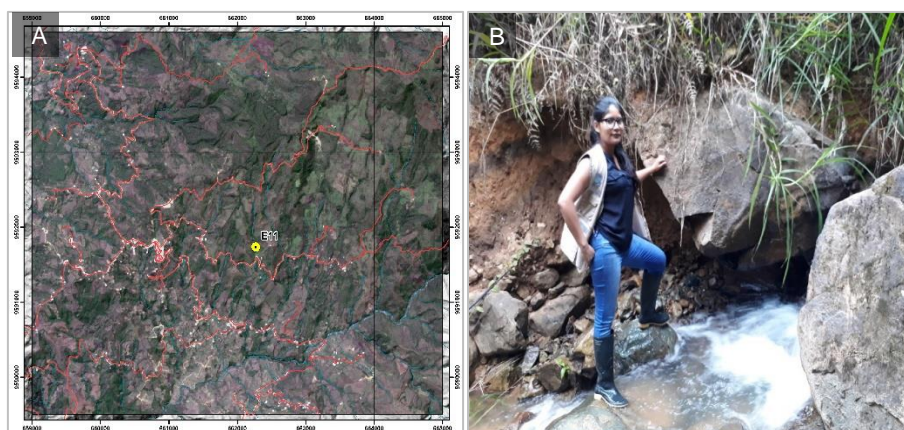
### **Estación 11**

Ubicación: Vía Güizhagüiña – Canelal Km 2.55 (Figura 5.18 A).

Coordenadas: 663233 – 9591539

Afloramiento en quebrada en el que se aprecia una sola unidad de riolita porfídica con matriz microlítica holocristalina constituida de cristales de cuarzo ipidiomorfo color gris muy ligero de 1 a 10 mm, feldespato ipidiomorfo color gris ligero de 1 a 5 mm, plagioclasa ipidiomorfa color gris ligero de 4 a 6 mm y piroxeno ipidiomorfo color negro grisáceo de 1 a 5 mm además de

minerales accesorios como epidota alitromorfos color amarillo verdoso oscuro en pequeños cristales circulares de 0.2 mm alterando a los feldespatos, plagioclasas, cuarzo y piroxenos, biotita alitromorfa color negro de 0.5 a 1 y pirita ipidiomorfa en cristales de 0.4 a 2 mm diseminada en la matriz (Figura 5.18 B). ANEXO T En el ANEXO T se presentan fotografías de la muestra macroscópica y la lámina delgada de la roca del afloramiento. 169/28SW. Se observan fracturas con dirección  $(169^{\circ}/28^{\circ}\text{SW})$ .



**Figura 5.18** A. Ubicación de la estación E11; B. Afloramiento de E11.

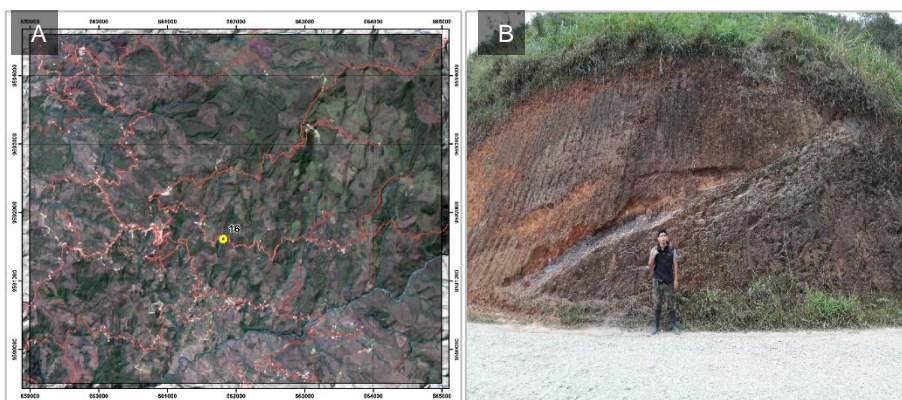
**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Estación 16**

Ubicación: Vía Güizhagüiña – Canelal km 2.19 (Figura 5.20 A).

Coordenadas: 661814 – 9591613

Afloramiento en carretera en el que se aprecia una sola unidad de riolita porfídica con feldespatos y plagioclasa alterados a clorita y epidota. Se evidencia una falla de dirección  $123^{\circ}/28^{\circ}\text{SW}$  (Figura 5.19).



**Figura 5.19** A. Ubicación de la estación E16. B. Falla registrada en campo en E16.

**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### Estación 21

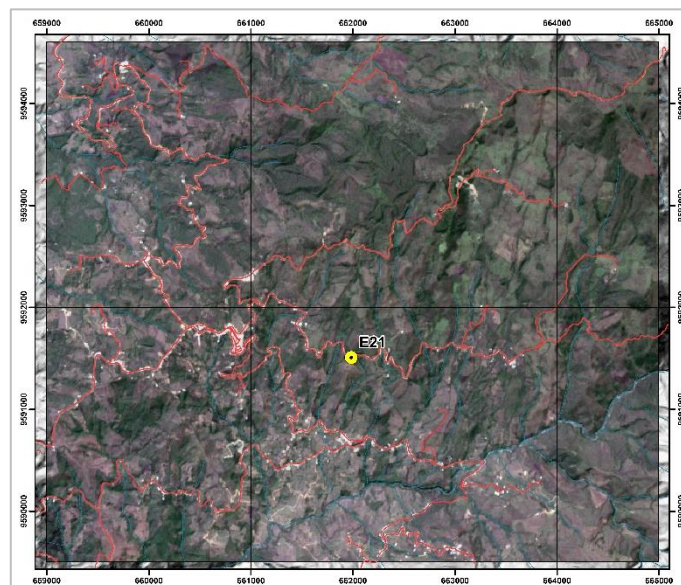
Ubicación: Vía Güizhagüiña – Canelal km 2.19 (Figura 5.20).

Coordenadas: 661162 – 9591595

Afloramiento en carretera en el que se aprecia una sola unidad de andesita porfídica con matriz microlítica fluidal hialocristalina color negro grisáceo con cristales de cuarzo idiomorfo color gris verdoso de 0.5 a 5 mm, feldespatos ipidiomorfo color gris verdoso

de 0.5 a 1 mm, plagioclasa idiomorfa color gris verdoso de 1.5 a 2 mm y piroxeno ipidiomorfo color negro grisáceo de 1 a 10 mm, además de minerales accesorios como clorita y zeolitas alitromorfas color gris verdoso en cristales de 0.6 mm alterando a los cristales de cuarzo, feldespatos y plagioclasas, epidota alitromorfa color gris verdoso en cristales de 0.5 mm alterando a los piroxenos y pirita alitromorfa de 0.5 mm.

En el ANEXO U se presentan fotografías de la muestra macroscópica y la lámina delgada de la roca del afloramiento.



**Figura 5.20** Ubicación de la estación E21.

**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

**Estación 24**

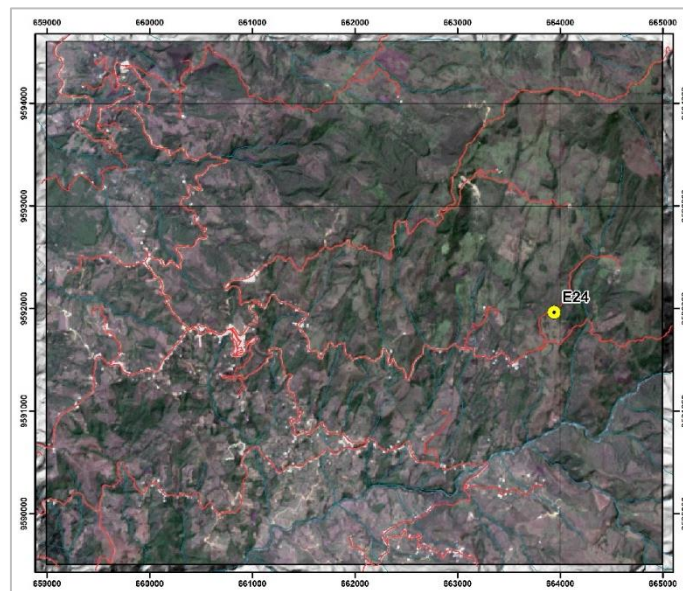
Ubicación: 630 m al Noreste del barrio Canelal (Figura 5.21).

Coordenadas: 664091 – 9591984

Afloramiento en carretera en el que se aprecia una sola unidad de riolita porfídica con matriz microlítica hialocristalina color verde grisáceo con cristales de cuarzo ipidiomorfo color gris muy ligero de 1 a 2 mm, feldespato ipidiomorfo color gris muy ligero de 0.6 a 1.5 mm, plagioclasa ipidiomorfa color gris muy ligero de 0.7 a 1.5 mm y piroxeno ipidiomorfo color negro grisáceo de 1 a 2 mm, además de minerales accesorios como clorita y epidota alitromorfas color amarillo verdoso oscuro en pequeños cristales circulares de 0.4 mm alterando a los feldespatos y plagioclasas, minerales de arcilla color blanco alterando a las plagioclasas y cristales de pirita de 0.5 mm.

En esta estación se evidencia que la alteración de clorita y epidota en la matriz y los cristales de la roca es más intensa que en las estaciones anteriores.

En el ANEXO V se presentan fotografías de la muestra macroscópica y la lámina delgada de la roca del afloramiento.



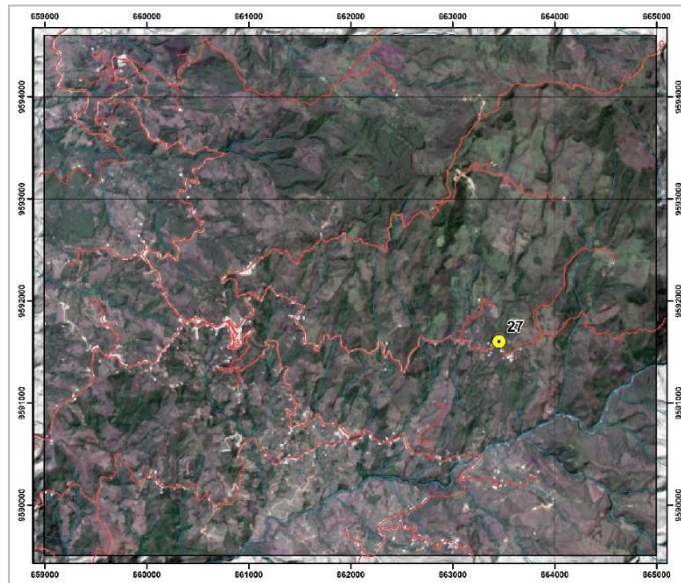
**Figura 5.21** Ubicación de la estación E24.  
**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **Estación 27**

Ubicación: Vía Güizhagüiña – Canelal km 4,42 (Figura 5.22).

Coordenadas: 663454 – 9591603

Afloramiento en quebrada en el que se aprecia el contacto de la unidad riolítica con la unidad andesítica. En el ANEXO W se presentan fotografías de la muestra macroscópica del afloramiento.



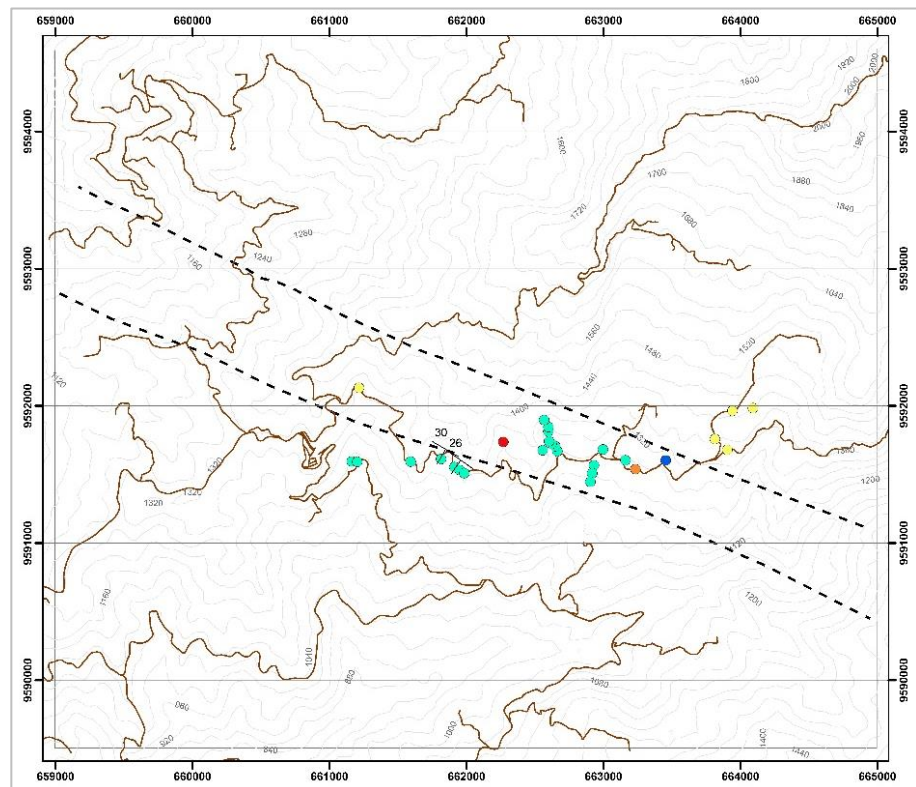
**Figura 5.22** Ubicación de la estación E27.  
**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

El ANEXO X presenta una breve descripción de todas las estaciones de la campaña geológica de campo.

## 5.8 Validación del método

### 5.8.1 Lineamientos estructurales

Los datos estructurales recopilados en campo tales como diaclasas y fallas se muestran en el ANEXO X.



**Figura 5.23** Ubicación de estructuras localizadas en campo (dirección de buzamiento/buzamiento) e interpretadas en oficina (líneas negras entrecortadas).

**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

Mediante el análisis de las imágenes satelitales en color natural y la imagen de relieve y sombras se determinaron dos fracturas sub-paralelas de dirección NW-SE, por otra parte, en campo se reconoció una falla en dos puntos con medidas  $120^{\circ}/30^{\circ}\text{SW}$  y  $125^{\circ}/26^{\circ}\text{SW}$ . En la Figura 5.23 se puede apreciar que la falla mapeada en campo corresponde a la estructura Sur del par que se reconoció en las imágenes.

La Tabla VII, indica que la orientación preferencial de los lineamientos se encuentra entre  $25,38^{\circ}$  y  $36,15^{\circ}$ , las cuales se asocian a las quebradas



que tienen direcciones entre  $20^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ . Cabe mencionar que los lineamientos extraídos digitalmente de las imágenes filtradas se distribuyen en toda la zona de estudio mientras que las diaclasas medidas en campo corresponden únicamente a las estaciones de la campaña.

En el diagrama de rosas de la Figura 5.24 se muestran 18 clases de diaclasas, la primera clase incluye diaclasas con rumbos de  $0^{\circ}$  a  $10^{\circ}$ , la segunda clase de  $10^{\circ}$  a  $20^{\circ}$ , la tercera de  $20^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  y de la misma manera cada clase tiene tolerancia de  $10^{\circ}$ .

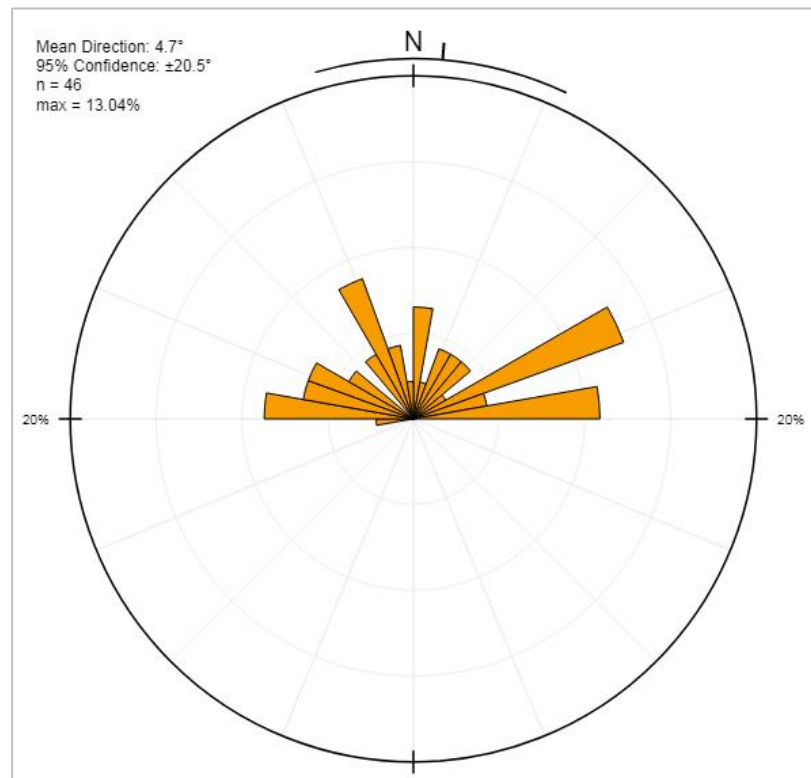
En la sección ANEXOS B-N se presentan los lineamientos extraídos de las imágenes procesadas a partir del DEM. Para cada imagen se ha generado un diagrama de rosas de lineamientos con tolerancia  $10^{\circ}$  y se han considerado las clases con mayor cantidad de datos.

Los lineamientos presentados en los ANEXOS B, D, E, H, J y L tienen su moda en la clase de  $20^{\circ}$  a  $30^{\circ}$ , los del ANEXO C tienen moda de  $60^{\circ}$  a  $70^{\circ}$ , los lineamientos del ANEXO F tienen moda entre  $0^{\circ}$  y  $10^{\circ}$ , los del ANEXO G en  $30^{\circ}$  a  $40^{\circ}$  y una segunda moda de  $40^{\circ}$  a  $50^{\circ}$ , los del ANEXO I entre  $50^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ , para el ANEXO K la moda está entre  $70^{\circ}$  y  $80^{\circ}$ ;

y tanto para el ANEXO M como para el ANEXO N la moda está entre  $0^{\circ}$  y  $10^{\circ}$ .

Las modas de los lineamientos extraídos de imágenes procesadas correspondientes a los ANEXOS C, F, I, K, M, N y G coinciden con algunas clases del diagrama de diaclasas de campo, las modas de los lineamientos de los ANEXOS B, D, E, H, J y L se asocian a las quebradas sub-paralelas de la parte Este de la concesión con dirección entre  $20^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ .

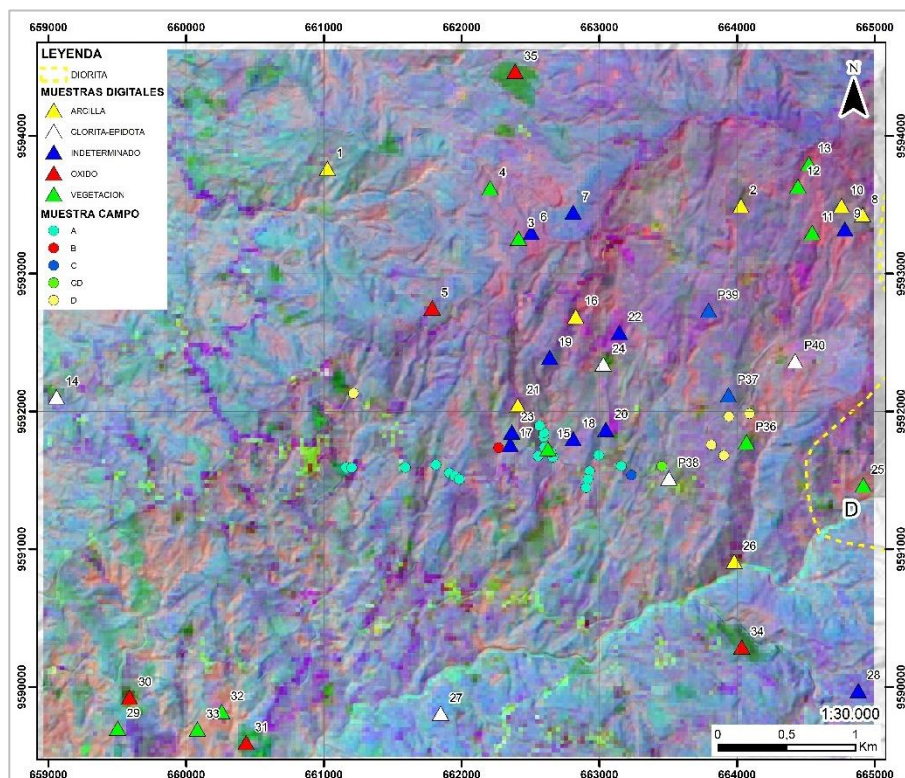
Ninguna imagen procesada arrojó lineamientos con rumbos comprendidos entre  $80^{\circ}$  y  $180^{\circ}$  como moda.



**Figura 5.24** Diagrama de rosas de diaclasas de campo.  
**Fuente:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### 5.8.2 Especies minerales

La Figura 5.25 corresponde a la composición RGB de los PCA en base LANDSAT 8, en donde las firmas de las muestras digitales con menos dispersión corresponden principalmente a respuestas no diferenciadas y de vegetación de modo que no se pueden comparar con la información geológica de campo y laboratorio.

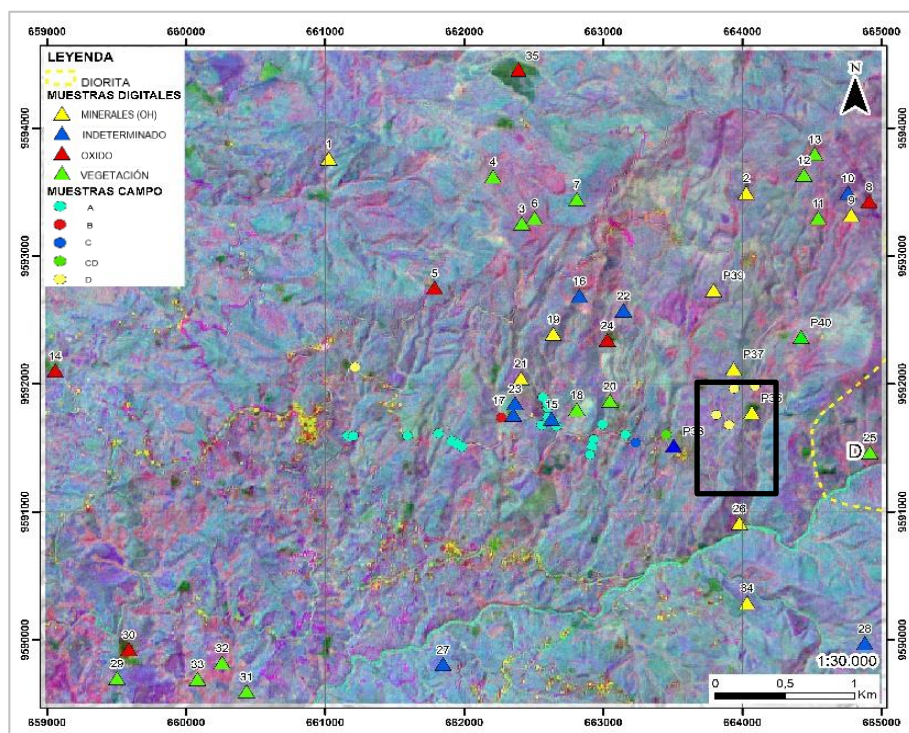


**Figura 5.25** Muestras digitales y de campo sobre el RGB de las componentes principales de LANDSAT 8.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

La Figura 5.26 corresponde a la imagen RGB de los PCA en base SENTINEL 2 y muestra un recuadro negro en el que están inscritas varias estaciones de la subunidad D cuyos principales minerales de alteración son clorita, epidota y arcillas. El recuadro también inscribe a las muestras digitales P36 y P37 cuyas firmas espectrales indican presencia con base hidroxilo (OH).

El ANEXO Y muestra la relación entre los minerales de alteración presentes en las rocas de la zona y las respuestas de los valores de pixeles próximos a las estaciones.

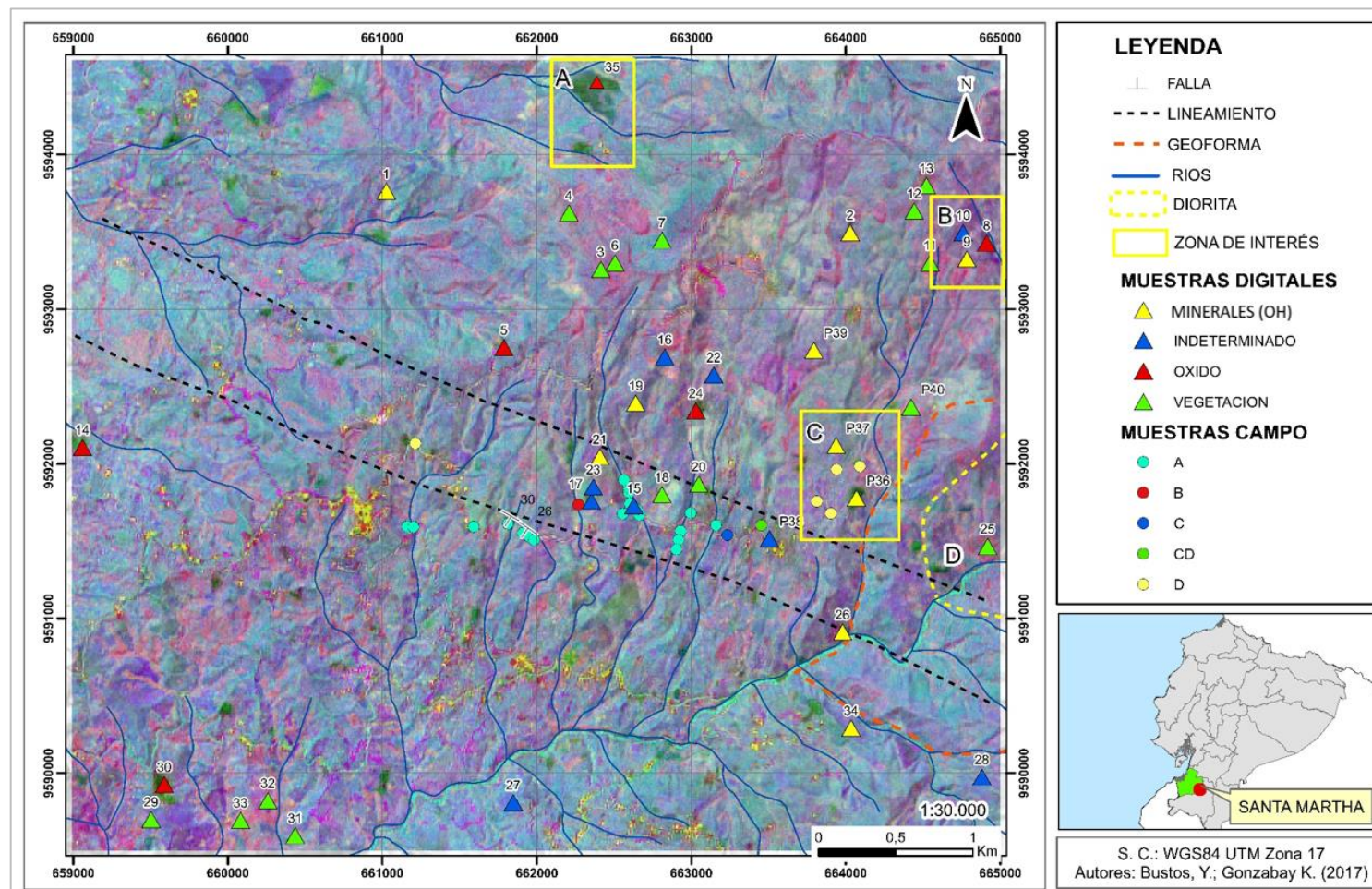
Todas las estaciones guardan relación con la respuesta colorimétrica puesto que todas las rocas presentan clorita y epidota y algunas rocas presentan arcillas y las respuestas colorimétricas de los pixeles sugieren óxidos de hierro y minerales con base hidroxilo (OH) como lo son las cloritas, la epidota y los minerales de arcilla.



**Figura 5.26** Muestras digitales y de campo sobre el RGB de las componentes principales de SENTINEL 2.  
**Elaborado por:** Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

### **5.9 Zonas de interés prospectivo**

En base a los resultados de los análisis de firmas espectrales y colorimétrico sobre la imagen compuesta de PCA en SENTINEL 2; y a la presencia de fracturas, se sugieren los sectores A, B y C como zonas de interés prospectivo debido a la ocurrencia de minerales de alteración hidrotermal y la proximidad con las estructuras reconocidas (Figura 5.27).



**Figura 5.27** Mapa de zonas de interés prospectivo de la concesión Santa Martha.  
Elaborado por: Bustos Y., Gonzabay K., 2017.

# **CAPÍTULO 6**

## **DISCUSIÓN**



## DISCUSIÓN

La hoja geológica Zaruma del DGGM (1980) muestra una falla inferida de rumbo NW-SE al Sureste de la concesión y dos fallas inferidas subparalelas de rumbo NE-SW al Sur de la concesión, por su parte, la hoja Zaruma del INIGEMM (2013) no muestra ninguna de estas estructuras. En la Figura 5.23 se reconocen dos estructuras subparalelas con similar rumbo NW-SE ubicadas al Sur Oeste de la falla inferida en la hoja del DGGM (1980), estas estructuras probablemente constituyen una familia de fallas junto con la falla inferida antes mencionada.

Tanto la hoja geológica Zaruma del DGGM (1980) como la hoja Zaruma del INIGEMM (2013) definen en el área de estudio una sola unidad litológica. En la campaña de campo y posterior estudio petrográfico de laboratorio se definieron dos unidades litológicas en la concesión, siendo estas riolítica y andesítica.

La geoforma reconocida en la imagen de relieve y sombras (ANEXO A) está ubicada sobre un intrusivo diorítico según la hoja geológica Zaruma del INIGEMM (2013), probablemente esta geoforma se deba a un levantamiento topográfico producto de la intrusión del cuerpo diorítico. La hoja geológica Zaruma del DGGM (1980) no muestra el intrusivo.

El método empleado para determinar vegetación y afloramientos de Cunha (2015) presenta resultados similares en las imágenes de ambos sensores.

El método de Beiranvand & Hashim (2015) para determinar zonas ricas en silicatos es aplicable únicamente a la imagen LANDSAT 8 debido a que la imagen SENTINEL 2 carece de bandas en el espectro del infrarrojo térmico.

El cociente de bandas propuesto por Laake (2011) resalta efectivamente las zonas que contienen minerales de arcilla para LANDSAT 8, mientras que para SENTINEL 2 muestra una escasa respuesta. En cuanto al cociente de bandas que menciona Cunha (2015) para señalar rocas alteradas que contengan arcillas es mucho más certero usándolo en SENTINEL 2 que en LANDSAT 8. Finalmente, el cociente de bandas propuesto por Meer (2014) sirve tanto para SENTINEL 2 como para LANDSAT 8.

Las firmas espectrales que no fueron relacionadas a ningún mineral de alteración según la comparación con las firmas estándar presentadas por Masoumi (2016) pueden ajustarse a minerales de arcilla como caolinita, montmorillonita, illita y alunita mediante una comparación con firmas estándar presentadas por Delendatti (2003).

La resolución espacial de la imagen LANDSAT 8 es menor que la de SENTINEL 2, debido a esto, algunas operaciones como RGB y cociente de bandas no resaltaron las diversas respuestas de interés geológico sobre la imagen LANDSAT 8.

Debido a que los pixeles de SENTINEL 2 son más pequeños que los de LANDSAT 8, la clasificación es más precisa y el análisis colorimétrico es más sencillo.

# **CAPÍTULO 7**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

Se determinó la presencia de dos estructuras lineales subparalelas de rumbo NW-SE, de las cuales, la estructura Sur fue comprobada en campo (123/28SW). Por otro lado, se definió que la orientación preferencial de los lineamientos estructurales está entre  $25.38^\circ$  y  $36.15^\circ$  de modo que estos filtros resaltan principalmente las quebradas de dirección NE-SW ubicadas en la parte oriental de la concesión. Los filtros detectores de aristas realizaron varios lineamientos asociados a fracturas en la zona de estudio.

Para la imagen del PCA de LANDSAT 8 el análisis colorimétrico presenta el 70% de resultados coherentes con el análisis de firmas, mientras que para la imagen SENTINEL 2 la coherencia entre los análisis es del 77,5%. En base a esto se acepta el método. No se eligieron zonas de interés prospectivo en LANDSAT 8 debido a que las zonas con mayor densidad de estaciones de campo incluyen principalmente muestras digitales con firmas de minerales no reconocidos y vegetación.

Los sectores A, B y C han sido seleccionados en base al análisis colorimétrico y de firmas espectrales sobre la imagen compuesta de PCA en SENTINEL 2 y a la presencia de estructuras.

El método propuesto, sin considerar la campaña de campo, involucró un impacto ambiental nulo debido a que se emplearon únicamente técnicas de detección remota de modo que no se contaminó ni se desforestó la zona de estudio. Además, el método propuesto implicó una baja inversión económica debido a que se emplearon datos de libre acceso y software de licencia abierta.

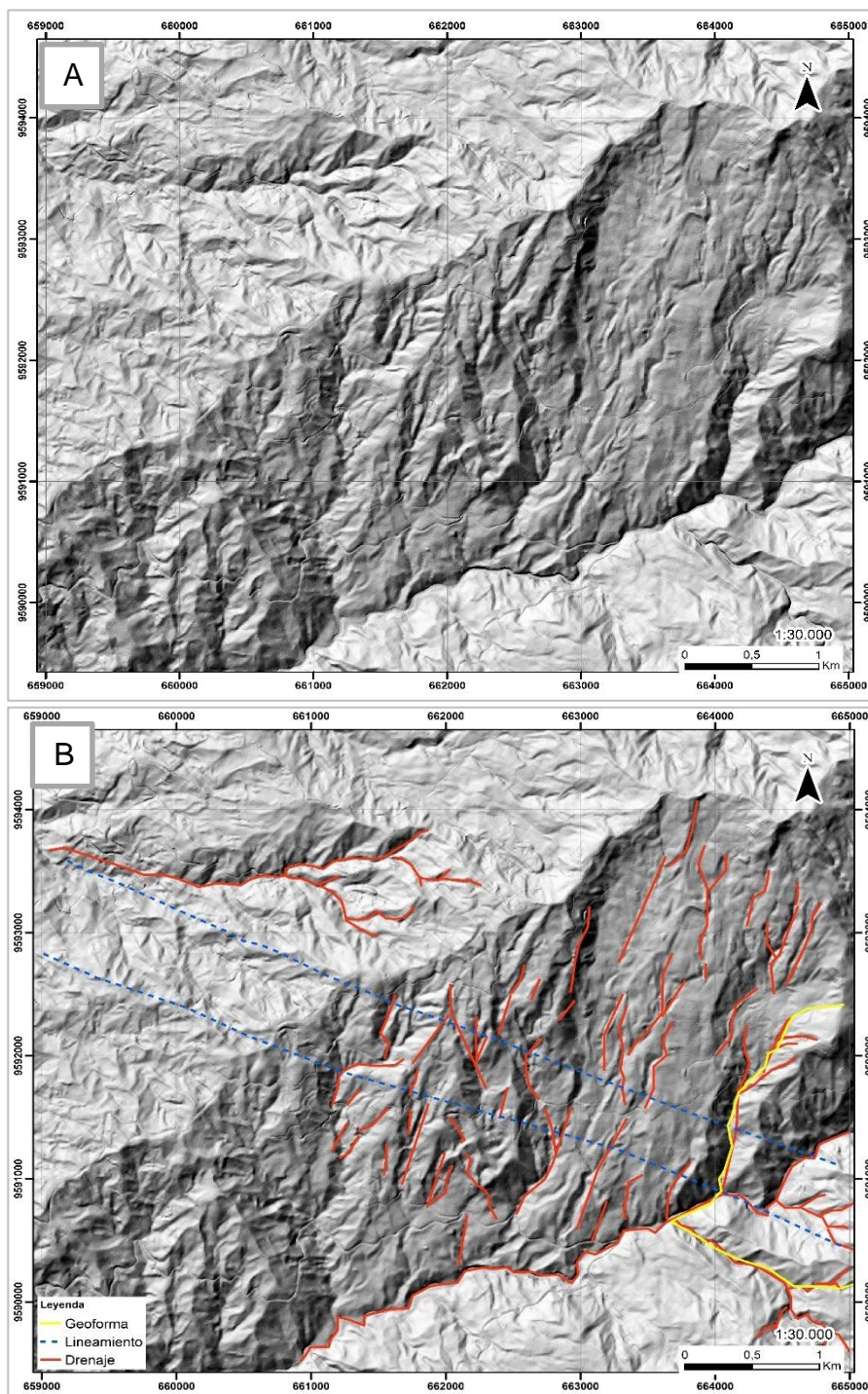
## **RECOMENDACIONES**

Debido a los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda emplear las imágenes SENTINEL 2 para la identificación de zonas con potenciales alteraciones hidrotermales debido a que la resolución espacial de SENTINEL 2 es mayor que la de LANDSAT 8.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

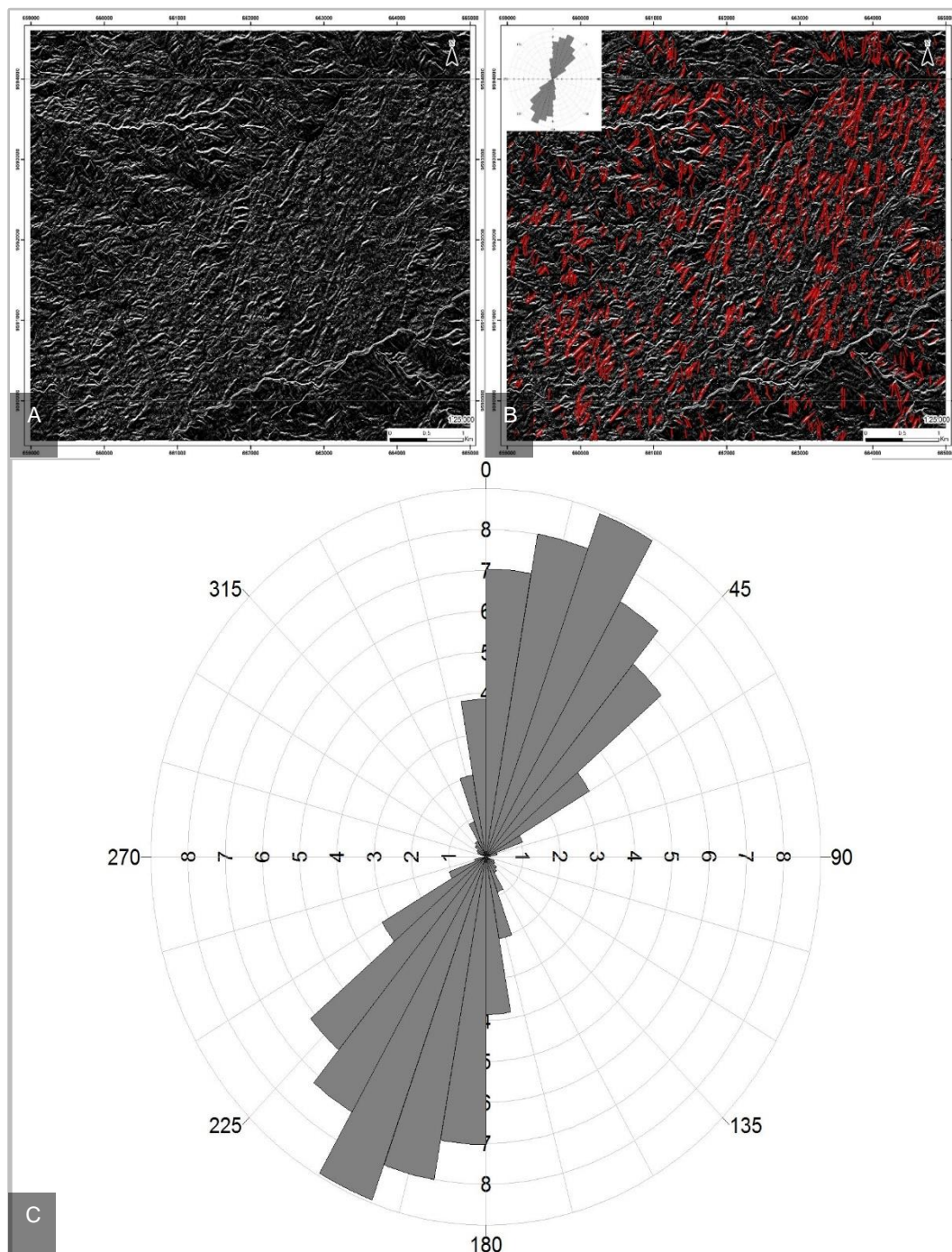
## A. IMAGEN DE RELIEVE Y SOMBRAS. B. REALCE DE LINEAMIENTOS (AZUL). DRENAJE (ROJO) Y GEOFORMA (AMARILLO).





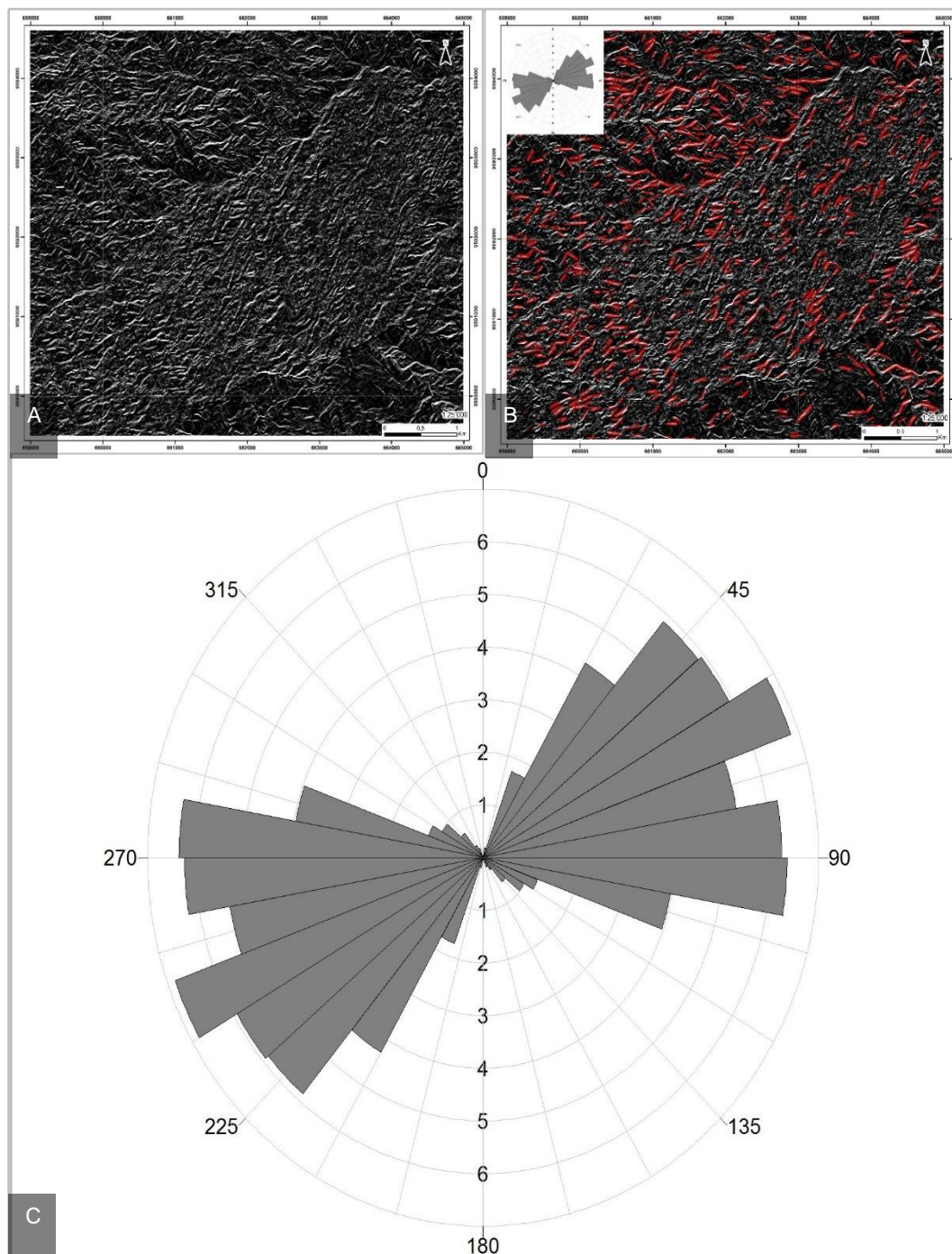
## ANEXO B

A. FILTRO DE GRADIENTE NORTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



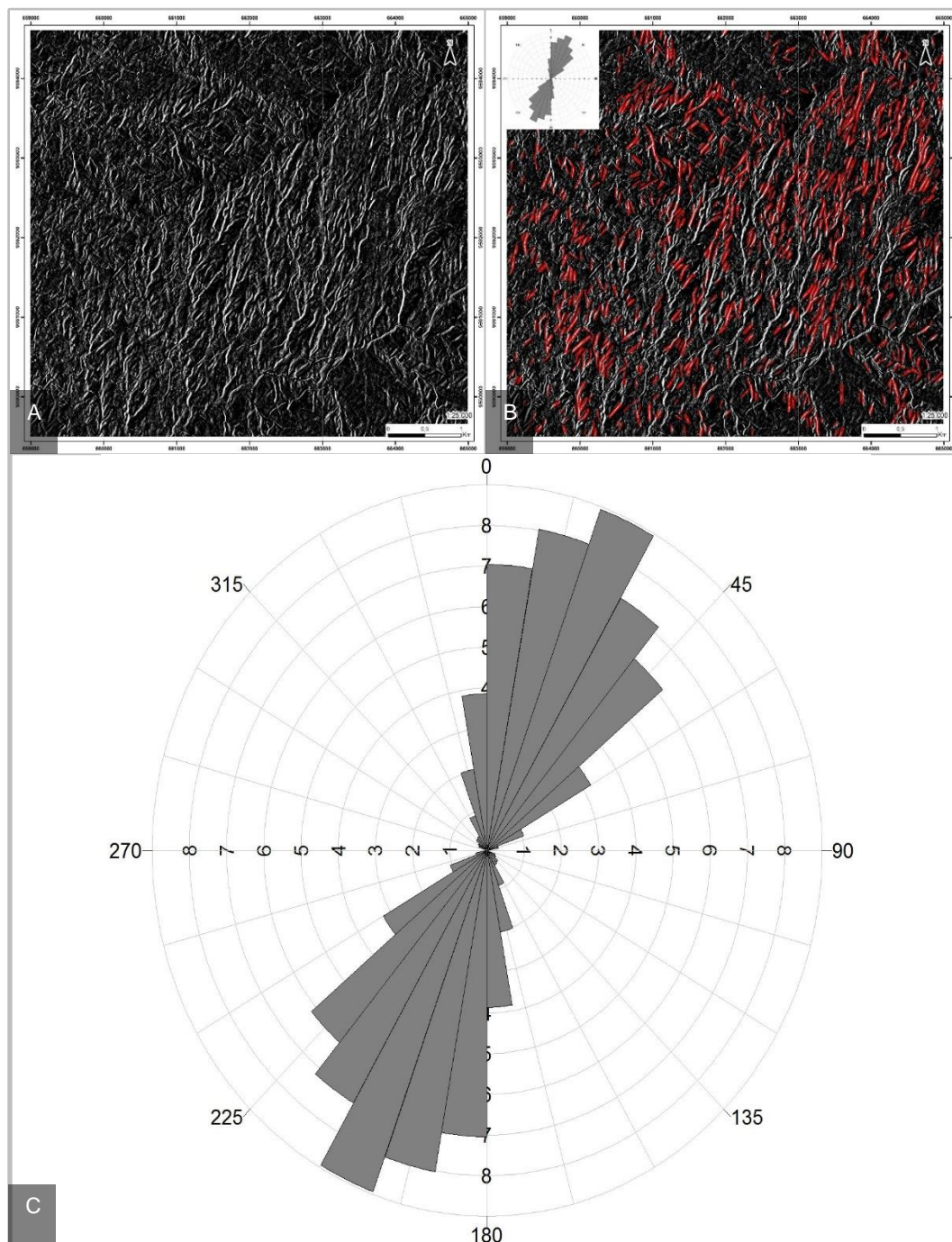
## ANEXO C

A. FILTRO DE GRADIENTE SUR. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



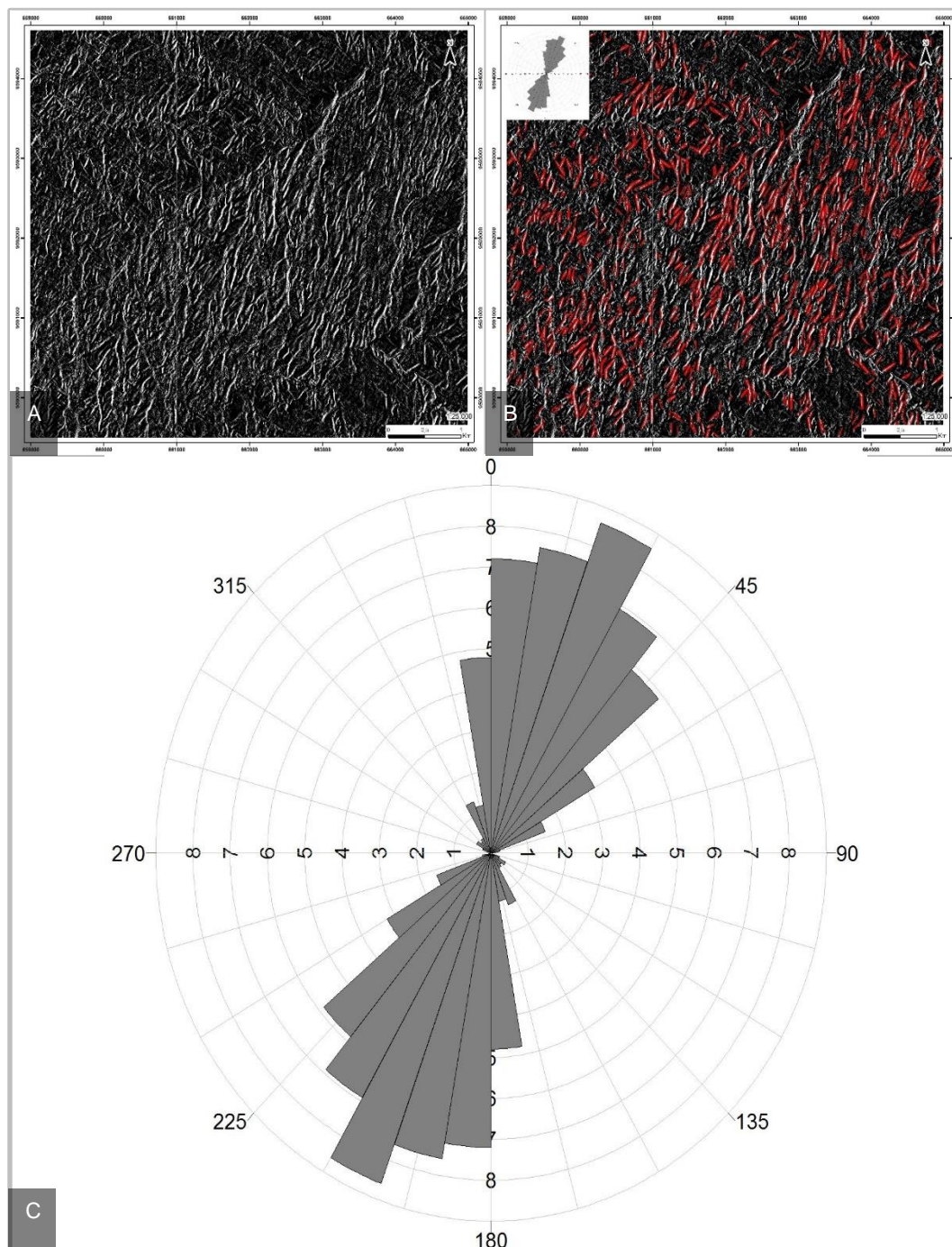
## ANEXO D

A. FILTRO DE GRADIENTE OESTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



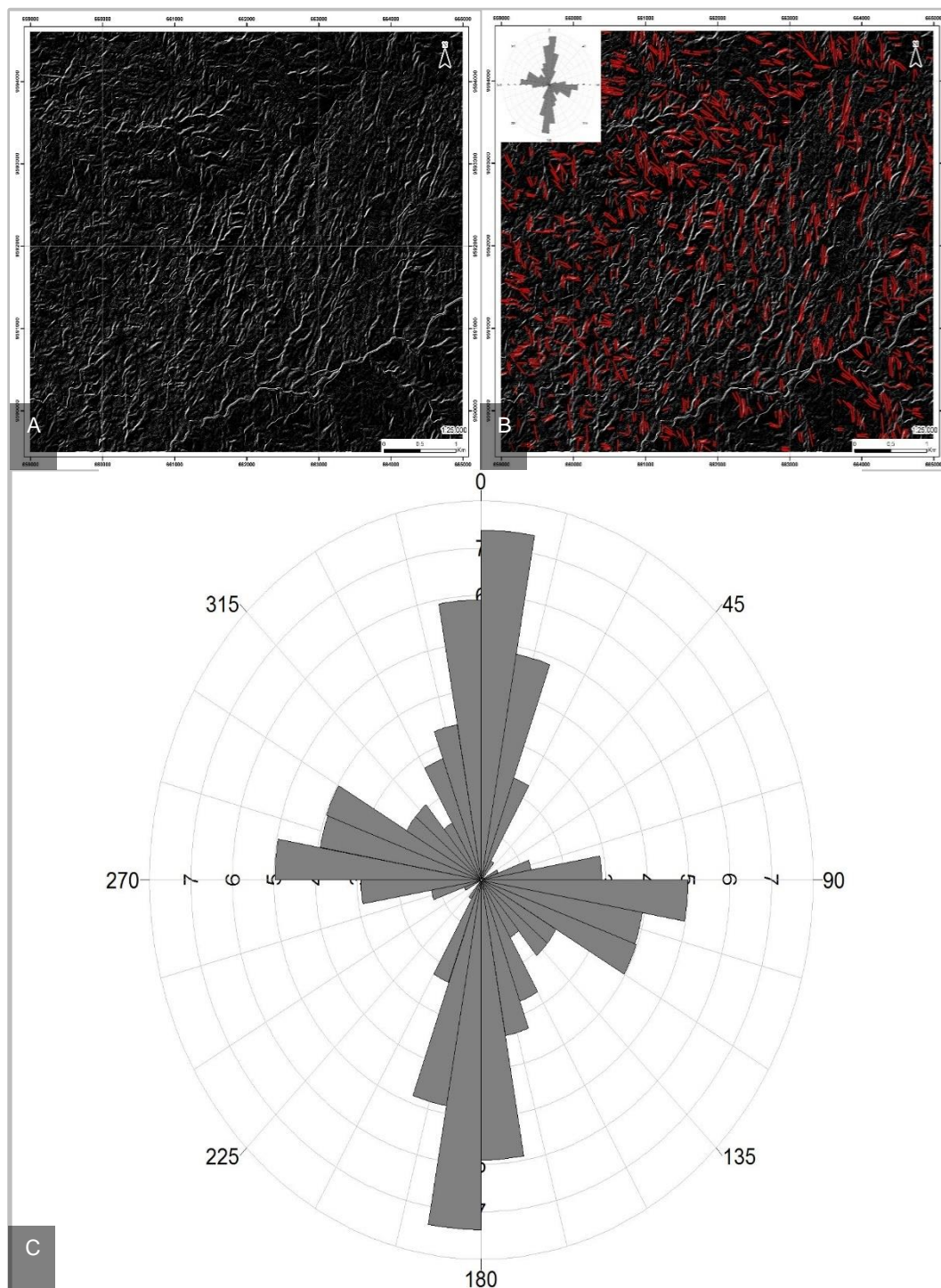
## ANEXO E

## A. FILTRO DE GRADIENTE ESTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS)



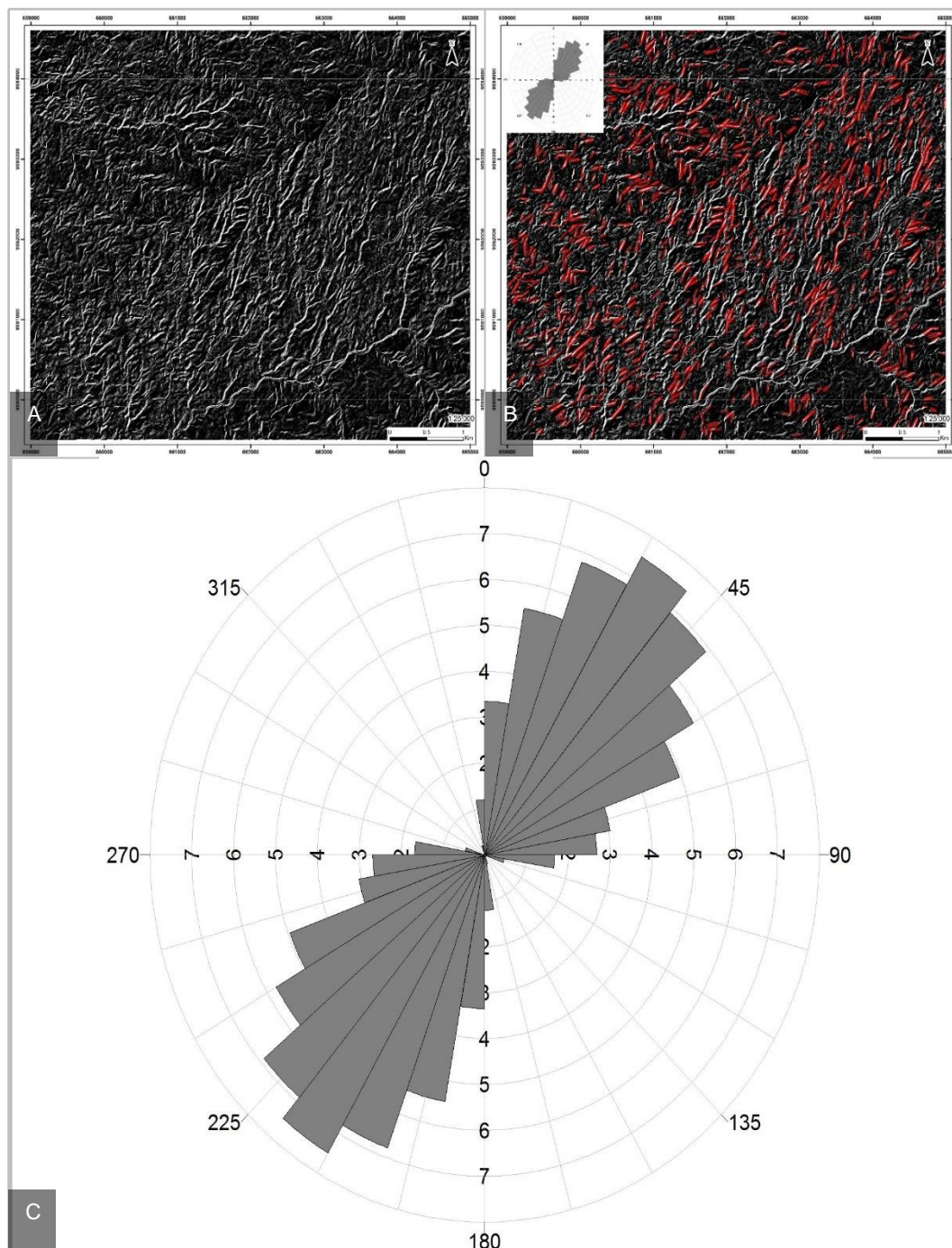
## ANEXO F

A. FILTRO DE GRADIENTE NORESTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



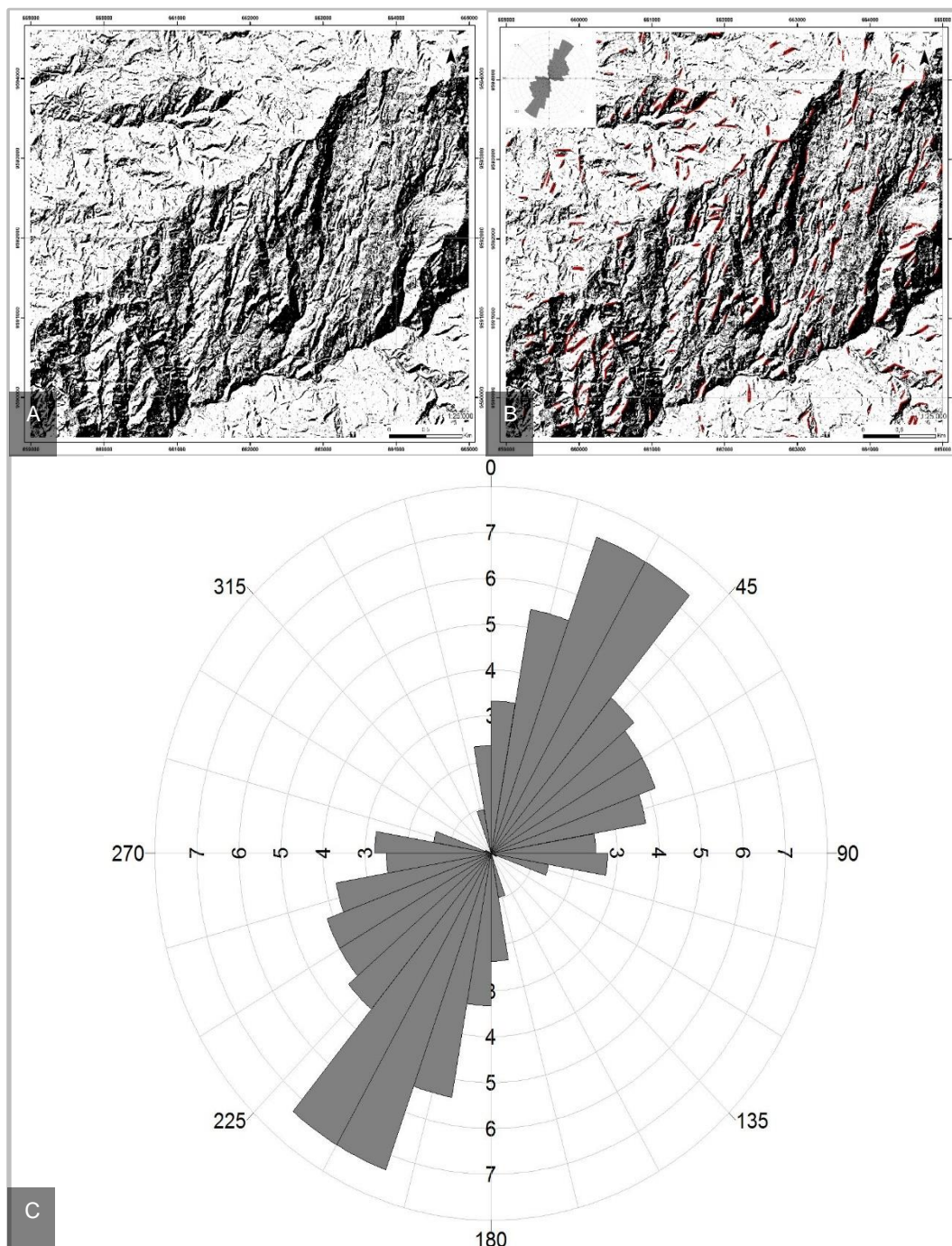
## ANEXO G

A. FILTRO DE GRADIENTE NOROESTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



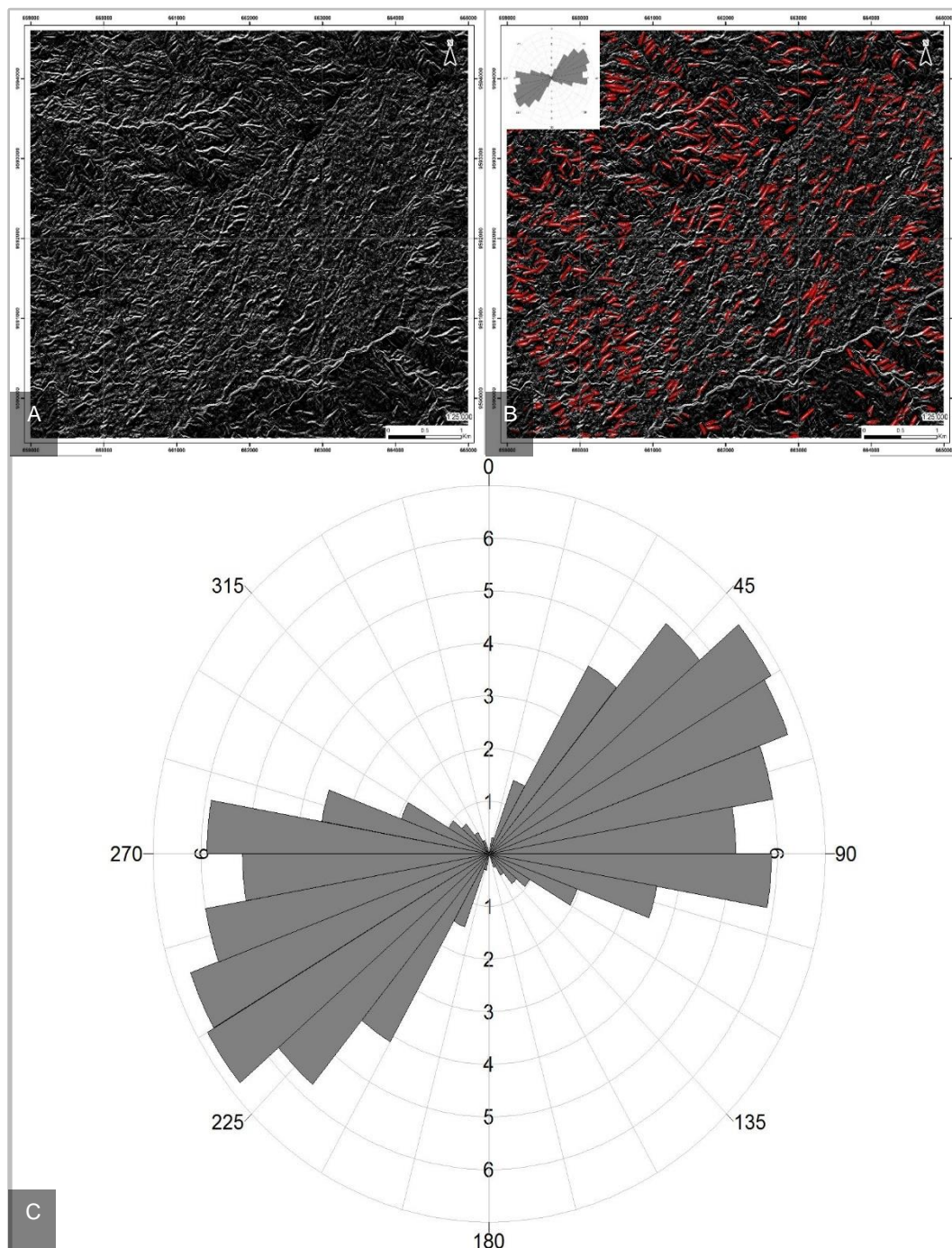
## ANEXO H

## A. FILTRO LAPLACIANO 5X5. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



## ANEXO I

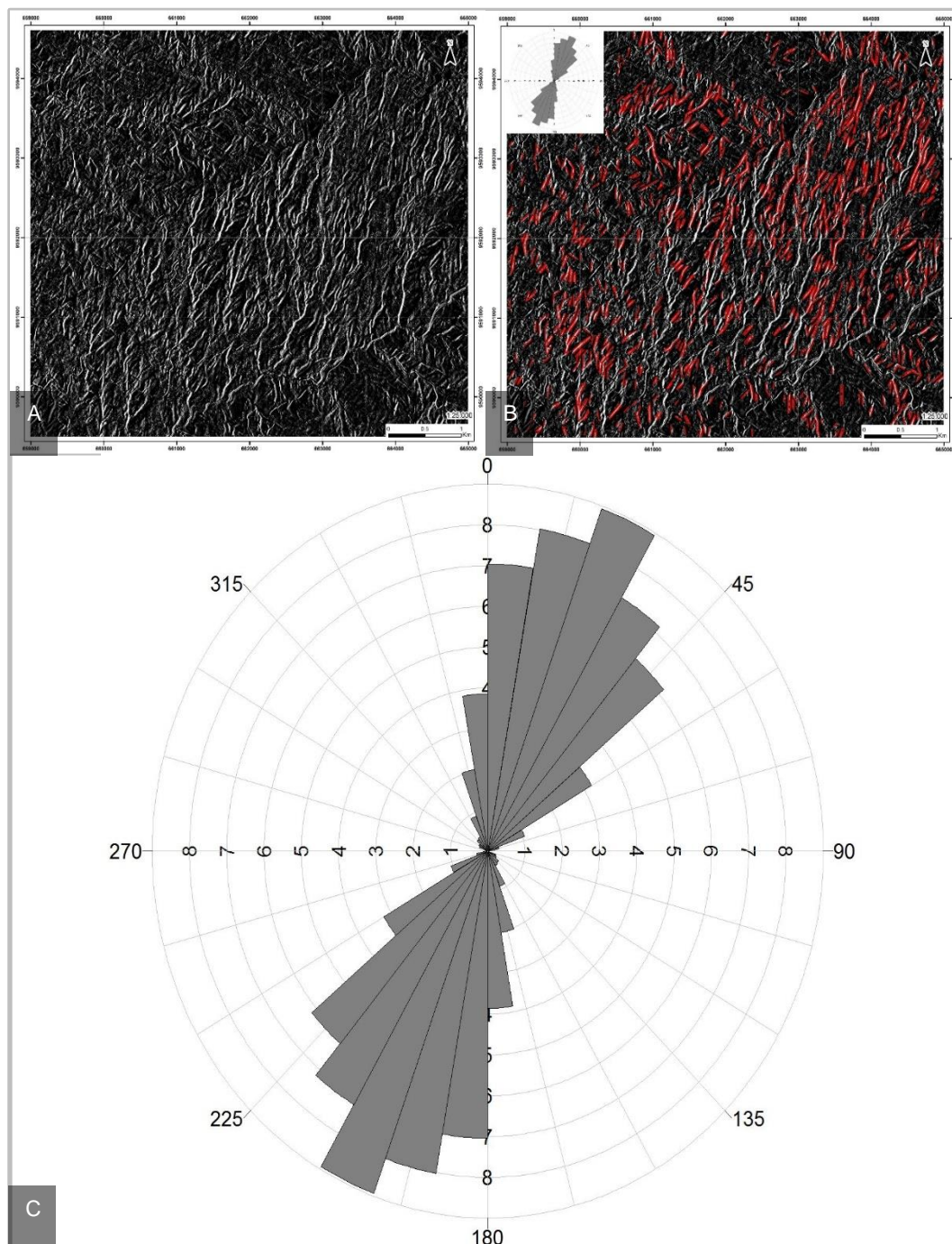
A. FILTRO SOBEL HORIZONTAL. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).





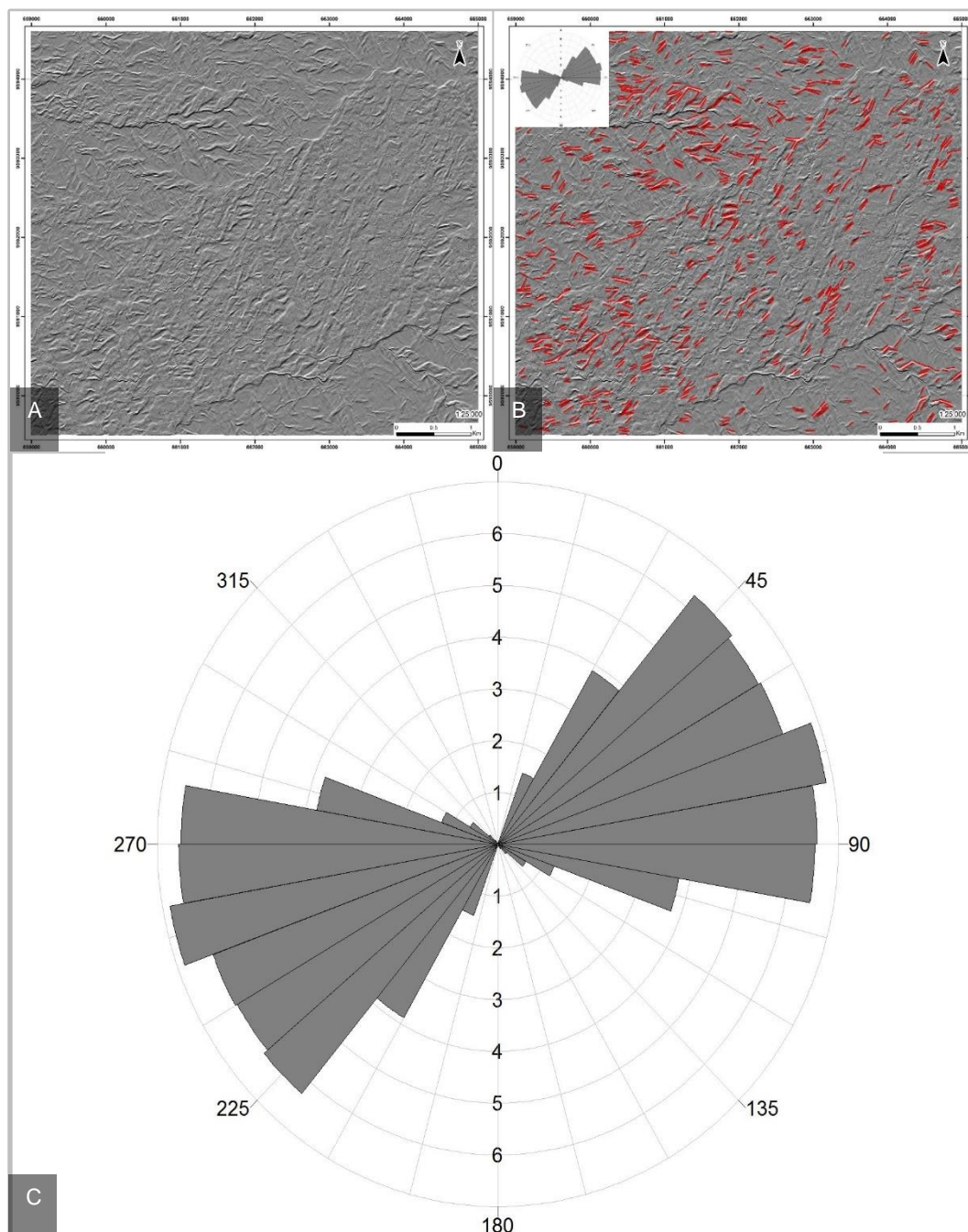
## ANEXO J

## A. FILTRO SOBEL VERTICAL. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



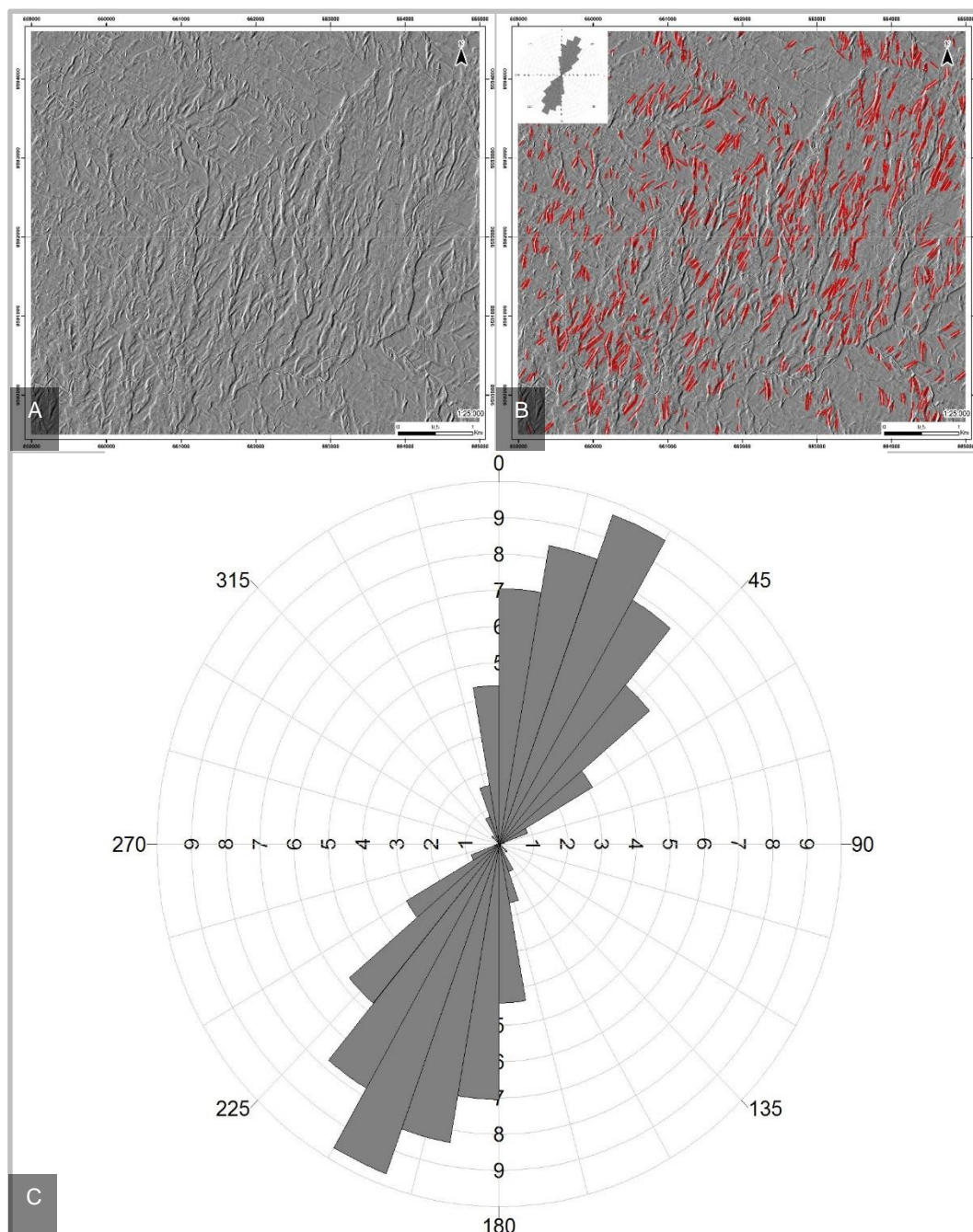
## ANEXO K

A. FILTRO COMPARACIÓN GRADIENTE NORTE-SUR. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



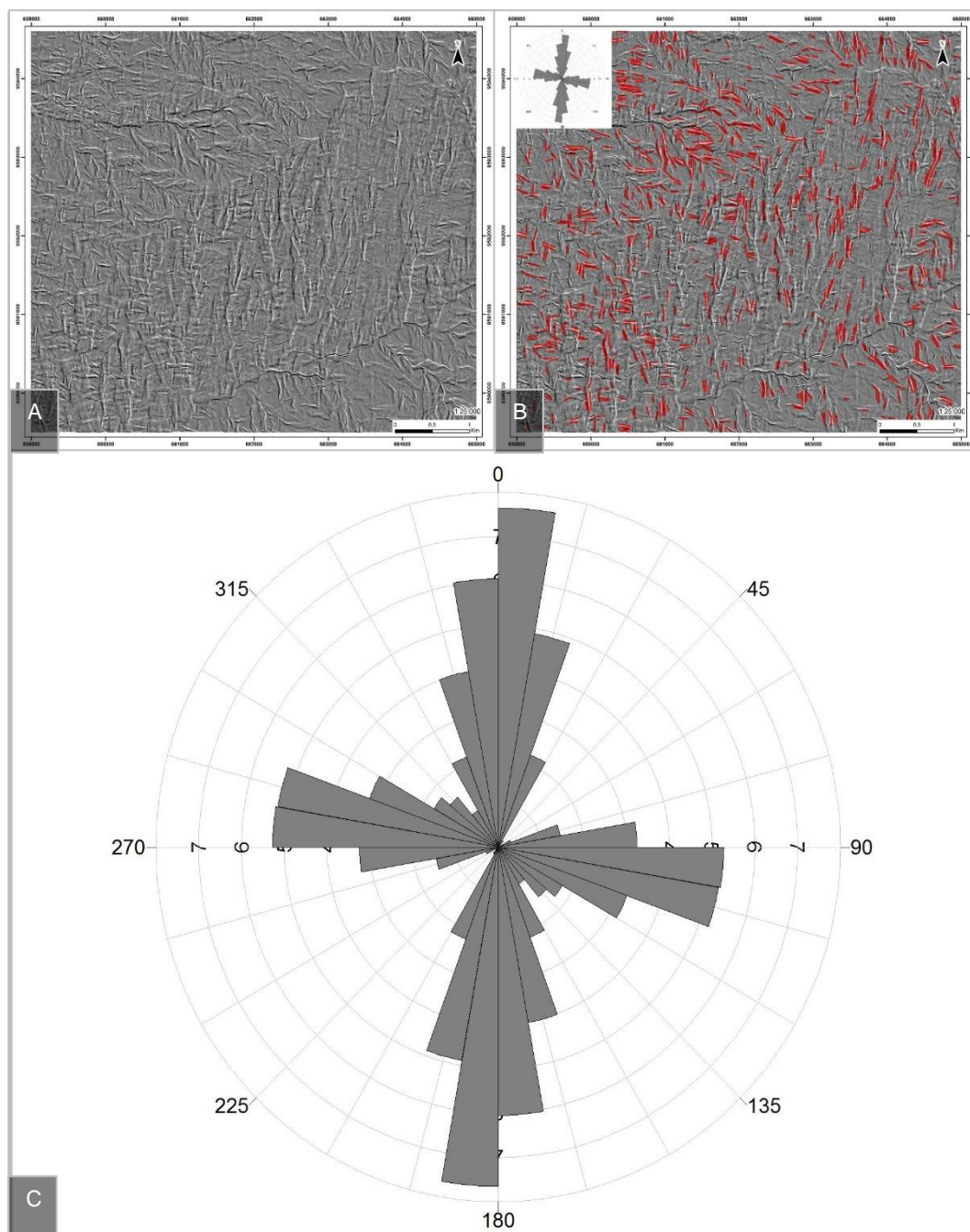
## ANEXO L

A. FILTRO COMPARACIÓN GRADIENTE ESTE-OESTE. B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



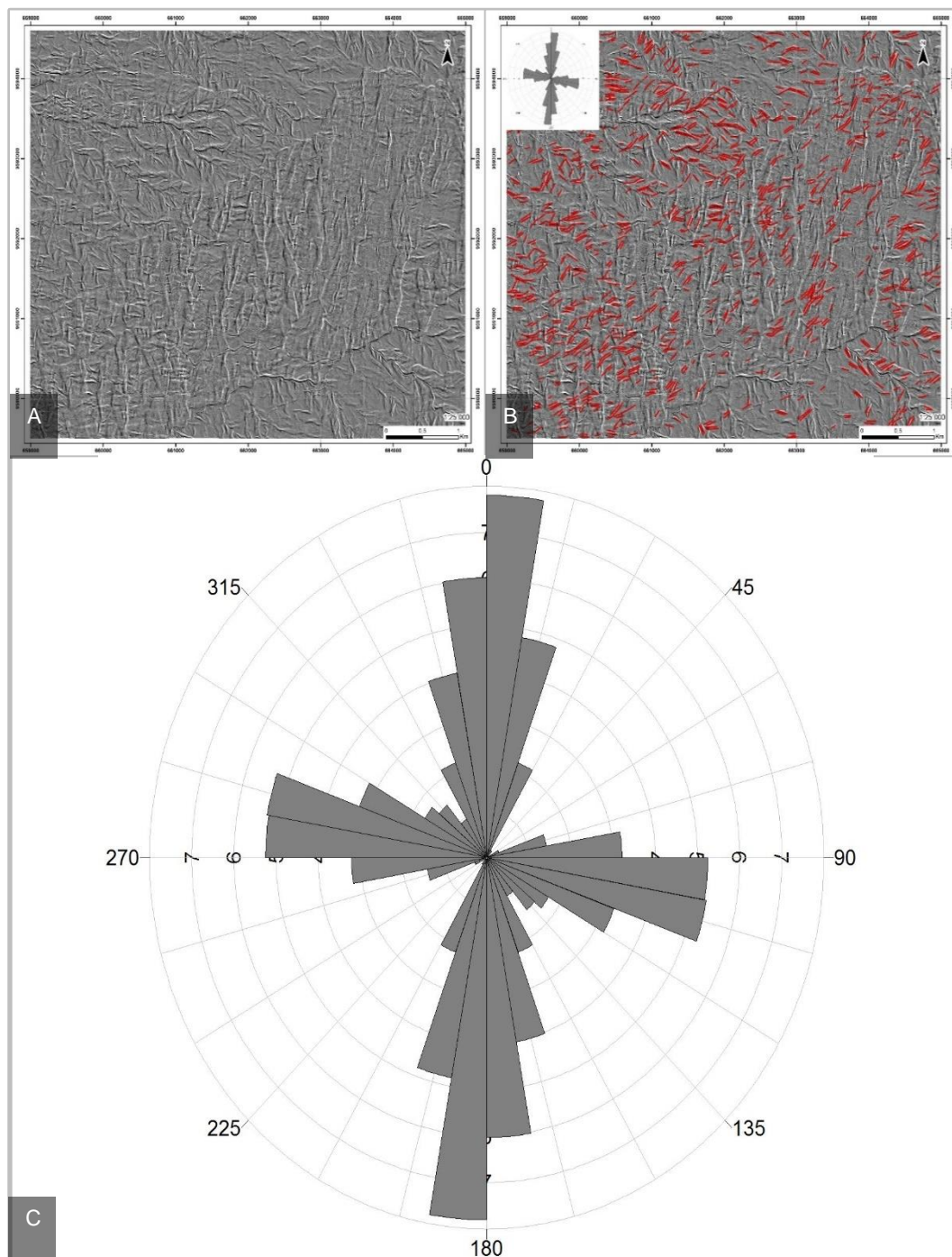
## ANEXO M

**A. FILTRO COMPARACIÓN GRADIENTE NORTE-SUR-ESTE-OESTE (NSEW). B. LINEAMIENTOS (ROJO). C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).**



## ANEXO N

A. FILTRO SOBEL VERTICAL-HORIZONTAL. B. LINEAMIENTOS (ROJO).  
C. DIRECCIÓN (DIAGRAMA DE ROSAS DE LINEAMIENTOS).



**ANEXO O**  
**MUESTRAS DIGITALES DE LANDSAT 8.**

LONGITUD ONDA	0,48	0,56	0,66	0,87	1,61	2,20	MUESTREO	FIRMA	CLASE	COHERENCIA
Reflectancia	0,06	0,08	0,10	0,26	0,34	0,29	1	ARCILLA	6	Si
	0,05	0,08	0,09	0,23	0,31	0,29	2	ARCILLA	8	Si
	0,04	0,05	0,04	0,28	0,17	0,16	3	VEGETACION	8	Si
	0,04	0,06	0,04	0,30	0,16	0,15	4	VEGETACION	3	Si
	0,05	0,07	0,08	0,17	0,20	0,22	5	OXIDO	4	Si
	0,04	0,05	0,04	0,29	0,14	0,14	6	INDETERMINADO	13	No
	0,04	0,05	0,04	0,20	0,12	0,14	7	INDETERMINADO	11	No
	0,06	0,07	0,09	0,25	0,30	0,27	8	ARCILLA	8	Si
	0,05	0,07	0,07	0,27	0,26	0,23	9	INDETERMINADO	8	NO
	0,06	0,07	0,08	0,27	0,29	0,26	10	ARCILLA	8	Si
	0,04	0,06	0,05	0,31	0,19	0,17	11	VEGETACION	13	Si
	0,05	0,07	0,06	0,33	0,23	0,20	12	VEGETACION	13	Si
	0,04	0,06	0,05	0,35	0,23	0,19	13	VEGETACION	13	Si
	0,06	0,08	0,09	0,21	0,25	0,26	14	CLORITA-EPIDOTA	1 y 4	Si
	0,05	0,06	0,06	0,29	0,22	0,20	15	VEGETACION	3	Si
	0,06	0,08	0,10	0,26	0,32	0,28	16	ARCILLA	13	Si
	0,05	0,07	0,07	0,22	0,25	0,24	17	INDETERMINADO	10 y 4	No
	0,05	0,07	0,06	0,29	0,22	0,20	18	INDETERMINADO	10 y 3	No
	0,05	0,07	0,08	0,25	0,26	0,24	19	INDETERMINADO	3, 5 y 2	No
	0,06	0,08	0,09	0,31	0,26	0,23	20	INDETERMINADO	2, 5 y 8	No
	0,07	0,09	0,10	0,29	0,34	0,29	21	ARCILLA	4	Si
	0,06	0,09	0,10	0,30	0,29	0,25	22	INDETERMINADO	2	No
	0,05	0,06	0,06	0,24	0,23	0,21	23	INDETERMINADO	10	No
	0,06	0,07	0,07	0,24	0,25	0,25	24	CLORITA-EPIDOTA	14	Si
	0,05	0,07	0,06	0,35	0,21	0,18	25	VEGETACION	3	Si
	0,08	0,11	0,13	0,29	0,37	0,34	26	ARCILLA	4	Si
	0,05	0,06	0,06	0,17	0,18	0,18	27	CLORITA-EPIDOTA	5	Si
	0,06	0,08	0,09	0,26	0,25	0,23	28	INDETERMINADO	4	No
	0,05	0,07	0,06	0,30	0,22	0,19	29	VEGETACION	3	Si
	0,07	0,09	0,11	0,20	0,28	0,31	30	OXIDO	7	Si
	0,06	0,06	0,07	0,14	0,16	0,20	31	OXIDO	12	Si
	0,05	0,07	0,05	0,38	0,21	0,17	32	VEGETACION	3	Si
	0,05	0,07	0,05	0,35	0,21	0,18	33	VEGETACION	3	Si
	0,05	0,06	0,07	0,16	0,20	0,23	34	OXIDO	1	Si
	0,05	0,06	0,06	0,13	0,20	0,24	35	OXIDO	1	Si
	0,06	0,07	0,08	0,23	0,26	0,25	36	VEGETACION	8	Si
	0,05	0,06	0,06	0,26	0,21	0,19	37	INDETERMINADO	8	No
	0,08	0,10	0,11	0,26	0,26	0,26	38	CLORITA-EPIDOTA	2 y 10	Si
	0,06	0,08	0,09	0,28	0,26	0,23	39	INDETERMINADO	8	No
	0,05	0,08	0,06	0,37	0,22	0,19	40	CLORITA-EPIDOTA	3	SI

## ANEXO P

FIRMAS ESPECTRALES DE LAS MUESTRAS DIGITALES DE LANDSAT  
8.

**ANEXO Q**  
**MUESTRAS DIGITALES DE SENTINEL 2.**

LONGITUD ONDA	0,49	0,56	0,67	0,84	1,61	2,19	MUESTREO	FIRMA	CLASE	COHERENCIA
Reflectancia	0,05	0,06	0,07	0,20	0,25	0,14	1	ARCILLA	6	Si
	0,05	0,06	0,08	0,20	0,28	0,17	2	ARCILLA	6	Si
	0,03	0,05	0,03	0,28	0,14	0,06	3	VEGETACION	2	Si
	0,03	0,05	0,03	0,27	0,15	0,07	4	VEGETACION	2	Si
	0,05	0,07	0,09	0,15	0,21	0,14	5	OXIDO	1	Si
	0,03	0,04	0,03	0,24	0,12	0,05	6	VEGETACION	2	Si
	0,03	0,04	0,03	0,21	0,11	0,06	7	VEGETACION	5	Si
	0,05	0,06	0,08	0,18	0,29	0,19	8	OXIDO	3	Si
	0,05	0,06	0,08	0,20	0,27	0,17	9	ARCILLA	6	Si
	0,05	0,07	0,08	0,22	0,28	0,17	10	VEGETACION	3	No
	0,03	0,05	0,03	0,27	0,18	0,09	11	VEGETACION	2	Si
	0,03	0,05	0,04	0,29	0,19	0,09	12	VEGETACION	2	Si
	0,03	0,05	0,04	0,28	0,20	0,10	13	VEGETACION	2	Si
	0,06	0,08	0,09	0,20	0,23	0,15	14	OXIDO	3	Si
	0,04	0,05	0,04	0,21	0,20	0,12	15	INDETERMINADO	2	No
	0,05	0,07	0,07	0,23	0,24	0,14	16	INDETERMINADO	2	No
	0,04	0,06	0,06	0,20	0,19	0,11	17	INDETERMINADO	7	No
	0,04	0,07	0,05	0,27	0,22	0,11	18	VEGETACION	2	Si
	0,05	0,06	0,07	0,20	0,24	0,15	19	ARCILLA	6	Si
	0,05	0,07	0,07	0,26	0,21	0,12	20	VEGETACION	2	Si
	0,06	0,08	0,10	0,21	0,30	0,19	21	ARCILLA	6	Si
	0,05	0,07	0,07	0,24	0,22	0,12	22	INDETERMINADO	2	No
	0,04	0,05	0,05	0,20	0,21	0,12	23	INDETERMINADO	7	No
	0,05	0,06	0,08	0,13	0,25	0,21	24	OXIDO	3	Si
	0,04	0,05	0,04	0,30	0,19	0,09	25	VEGETACION	2	Si
	0,07	0,09	0,11	0,24	0,32	0,21	26	ARCILLA	6	Si
	0,04	0,05	0,06	0,15	0,17	0,10	27	INDETERMINADO	5	No
	0,05	0,07	0,07	0,20	0,20	0,11	28	INDETERMINADO	5	No
	0,04	0,06	0,04	0,24	0,19	0,09	29	VEGETACION	2	Si
	0,06	0,08	0,10	0,16	0,26	0,21	30	OXIDO	1	Si
	0,04	0,06	0,04	0,26	0,17	0,08	31	VEGETACION	2	Si
	0,04	0,06	0,04	0,30	0,18	0,08	32	VEGETACION	3	Si
	0,04	0,06	0,04	0,33	0,18	0,08	33	VEGETACION	4	Si
	0,05	0,06	0,08	0,18	0,25	0,15	34	ARCILLA	6	Si
	0,04	0,04	0,06	0,07	0,18	0,15	35	OXIDO	1	Si
	0,04	0,06	0,06	0,20	0,25	0,16	36	ARCILLA	6	Si
	0,06	0,07	0,06	0,19	0,20	0,12	37	ARCILLA	6	Si
	0,04	0,06	0,06	0,20	0,20	0,10	38	INDETERMINADO	7	No
	0,05	0,07	0,08	0,23	0,25	0,14	39	ARCILLA	6	Si
	0,04	0,07	0,05	0,30	0,20	0,10	40	VEGETACION	6	Si

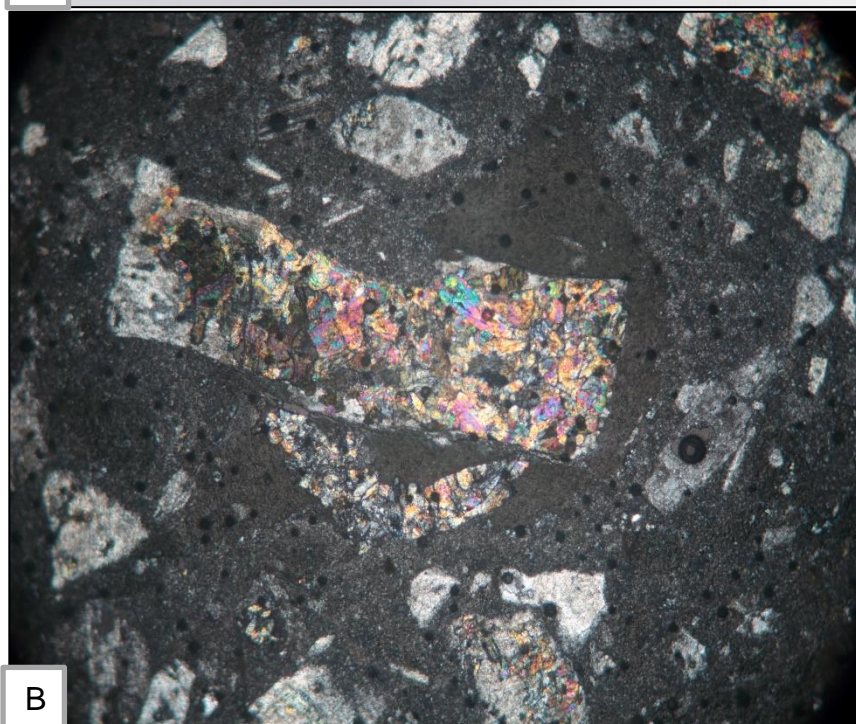


## ANEXO R

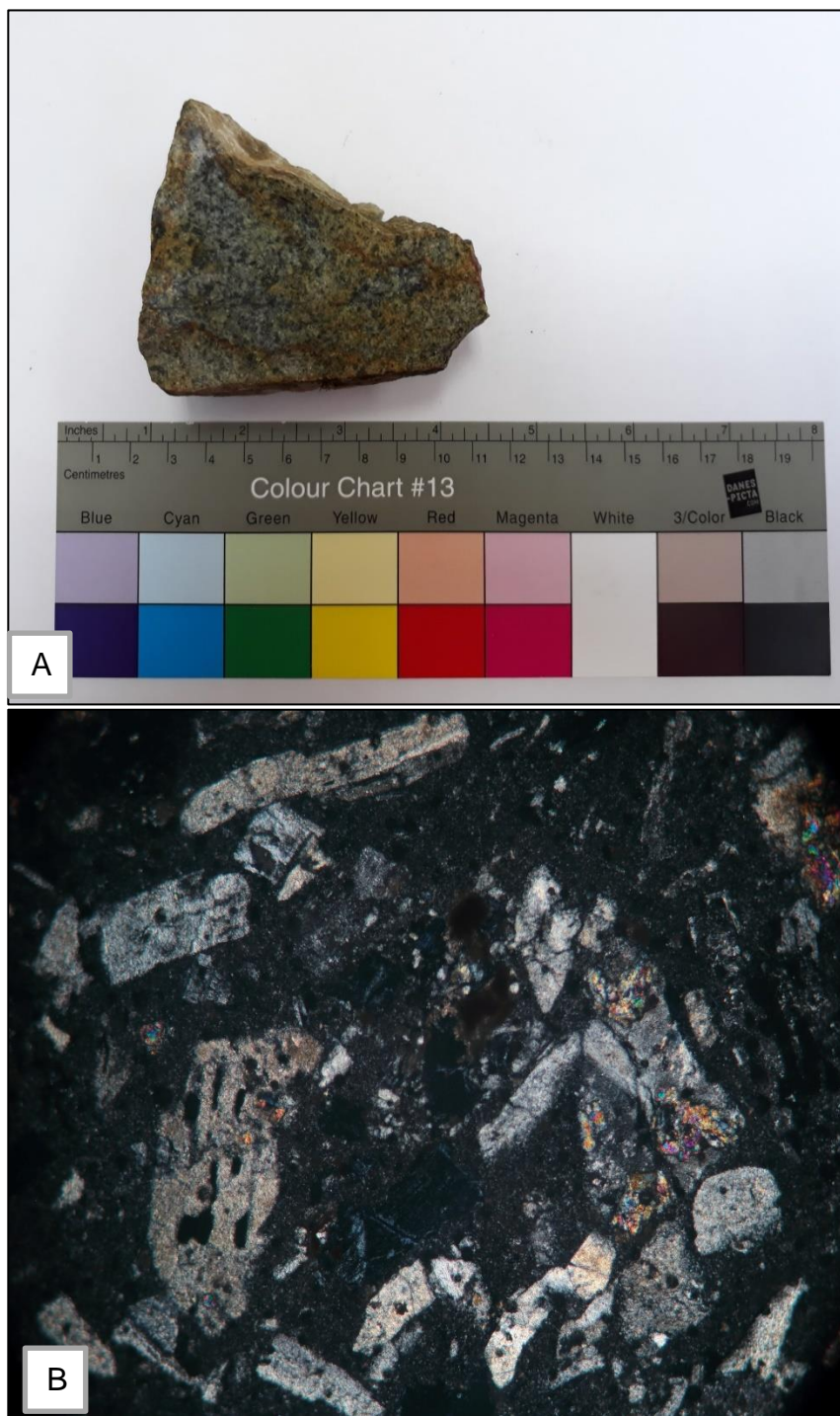
### FIRMAS ESPECTRALES DE LAS MUESTRAS DIGITALES DE SENTINEL 2.



## ANEXO S

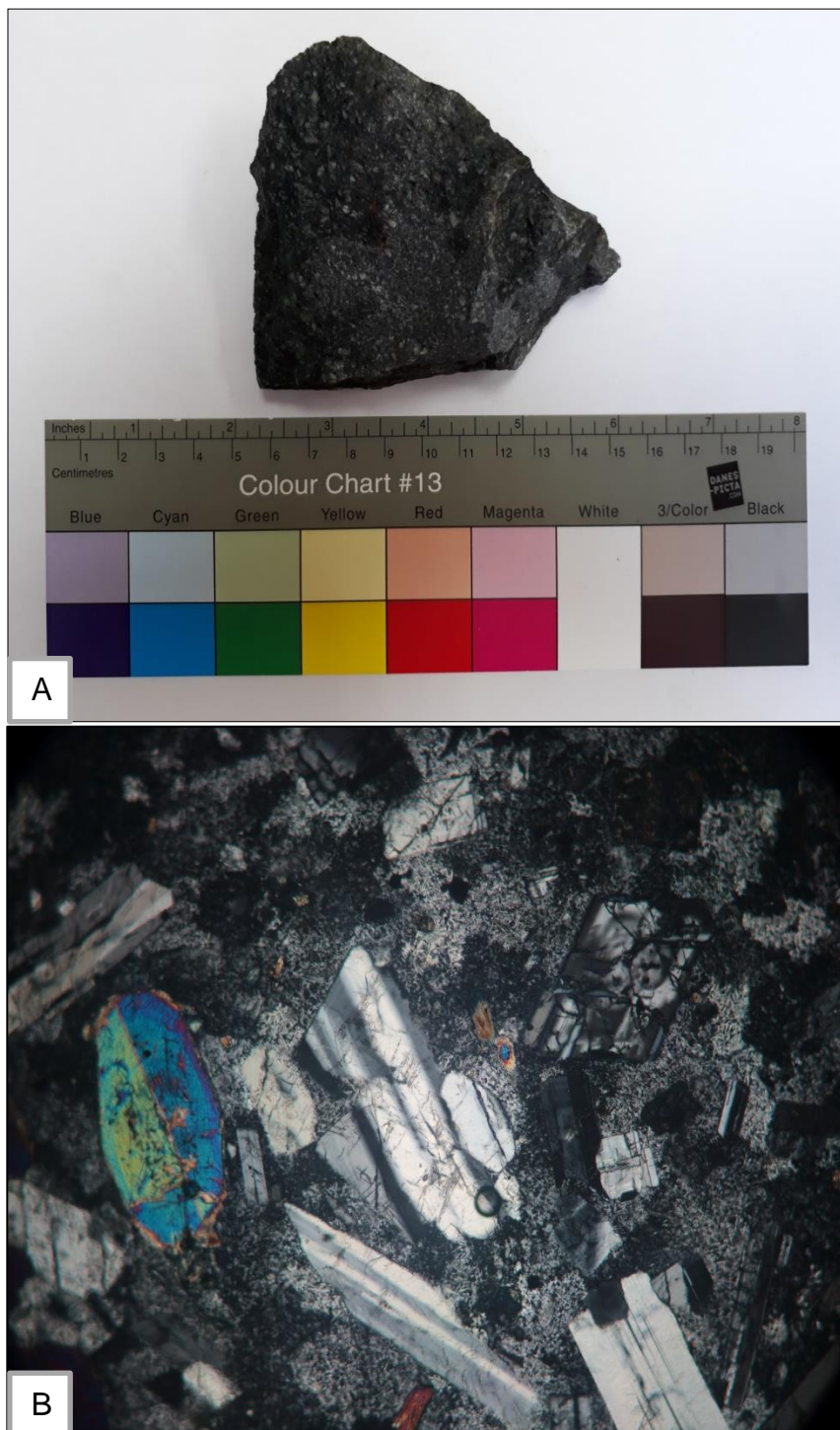
MUESTRA DE MANO. y B. LÁMINA DELGADA CORRESPONDIENTES  
A LA ESTACIÓN 1.

## ANEXO T

A. MUESTRA DE MANO. y B. LÁMINA DELGADA  
CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN 11.

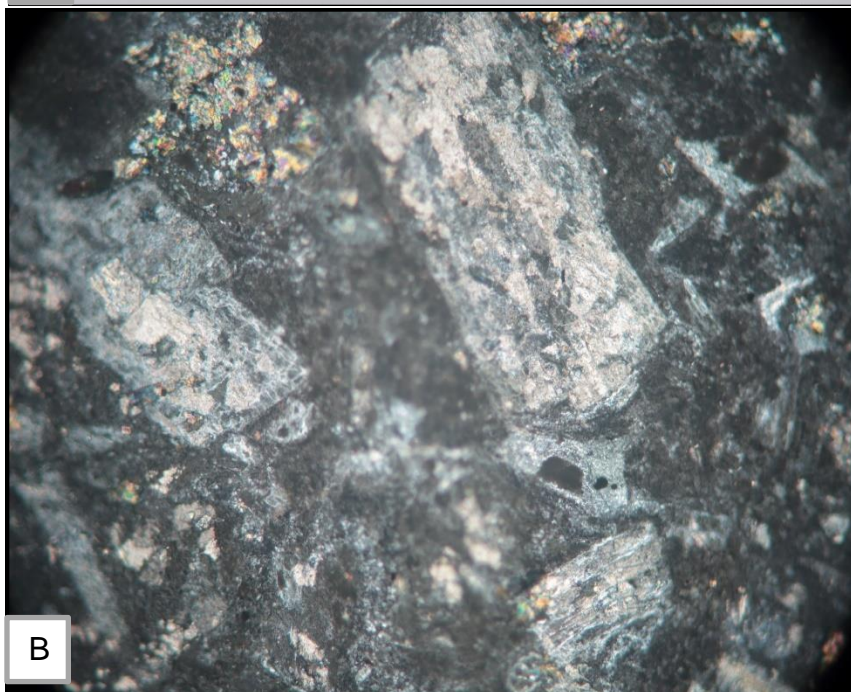
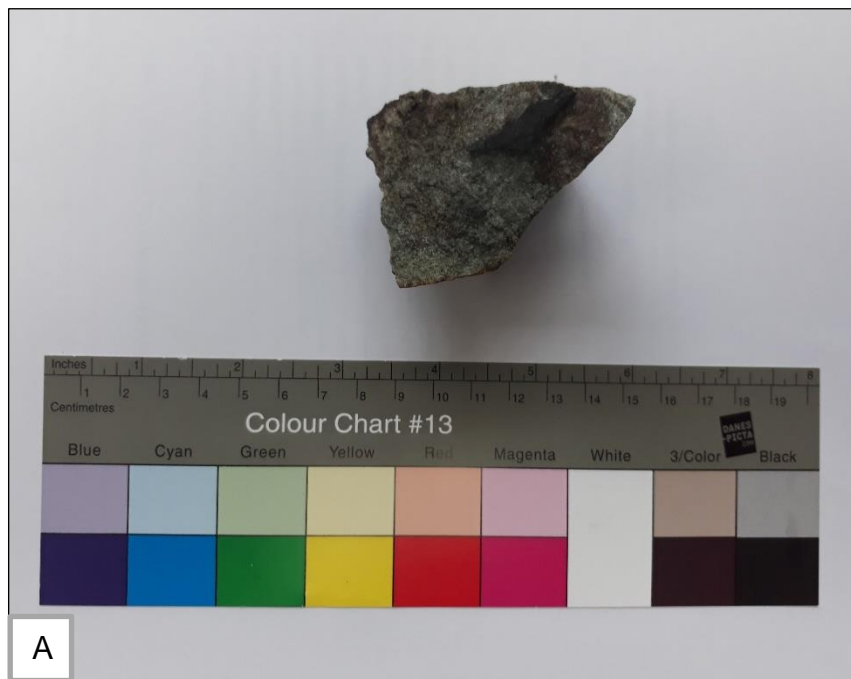
## ANEXO U

## A. MUESTRA DE MANO. y B. LÁMINA DELGADA CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN 21.



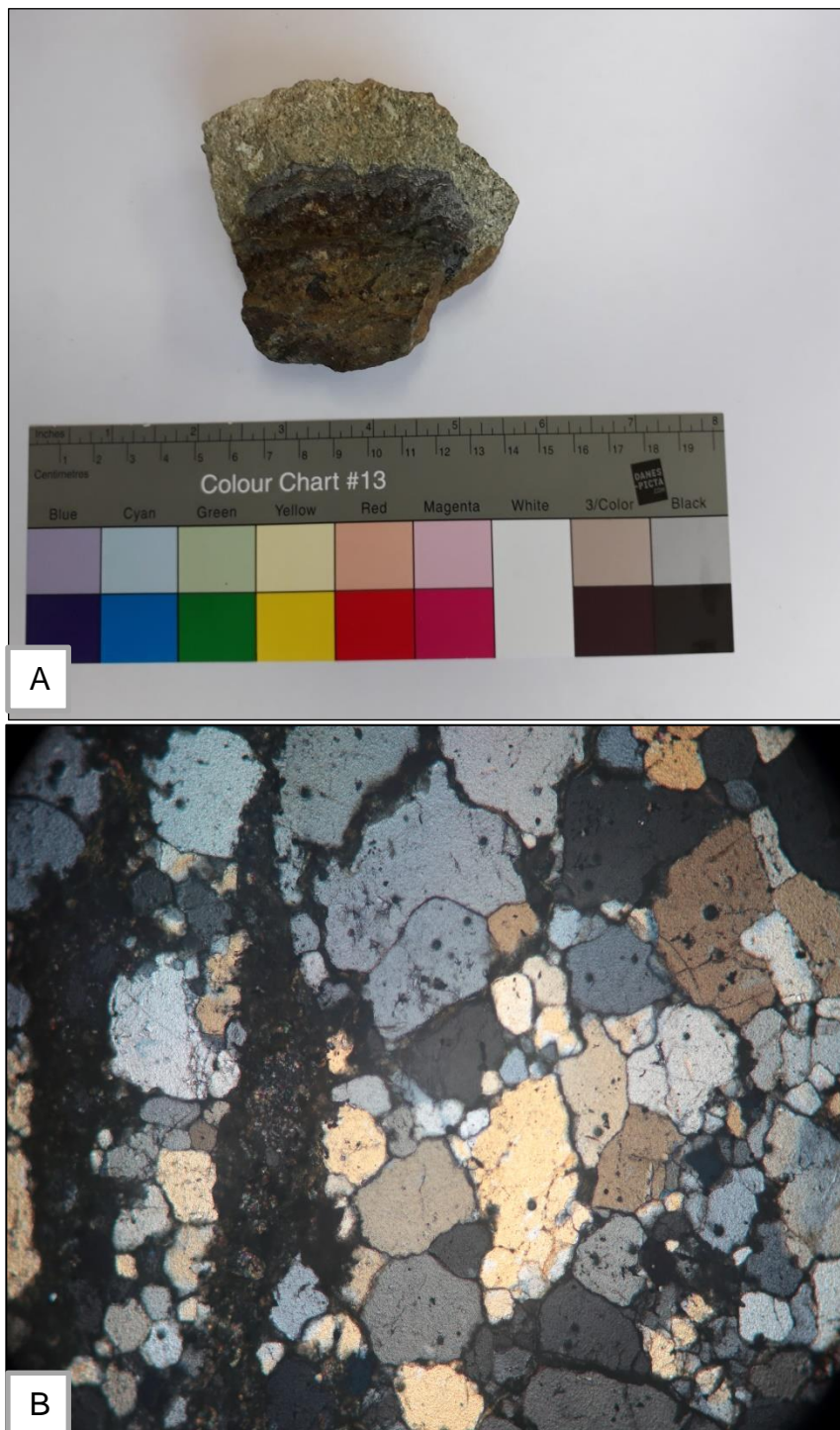
## ANEXO V

## A. MUESTRA DE MANO. y B. LÁMINA DELGADA CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN 24.



## ANEXO W

## A. MUESTRA DE MANO. y B. LÁMINA DELGADA CORRESPONDIENTES A LA ESTACIÓN 27.



## ANEXO X

### BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS ESTACIONES GEOLÓGICAS.

ESTACIÓN	X	Y	LITOLOGÍA	FRACTURAS
1	661162	9591595	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	10/80SE - 20/80SE - N/80E - 20/74SE - 30/60SE
2	661202	9591592	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	140/70NE - 193/60NW - 95/4SW
3	662663	9591669	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	
4	662648	9591706	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	154/82NE - 151/84NE - 162/84NE - 258/65NW - 264/65NW
5	662621	9591723	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	51/65SE - 105/20SW
6	662603	9591742	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	5/76SE; 174/69NE; 126/83SW
7	662597	9591815	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
8	662598	9591846	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	95/68NE - 175/88NE - 152/11SW
9	662566	9591897	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	70/87SE - 22/81SE - 135/81SW
10	662556	9591677	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
11	662269	9591737	Riolita porfídica con cuarzo, feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros macroscópicos	169/28SW
12	662931	9591567	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
13	662918	9591509	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
14	662904	9591447	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
15	662996	9591683	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-
16	661814	9591613	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	123/28 SW
17	661592	9591594	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	40/82SE - 100/54NE - 40/77SE - 160/45NE - 235/78NW - 157/30SW
18	661912	9591554	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	155/87NE - 175/78NE - 179/90NE - 125/26SW
19	661951	9591531	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	120/36SW - 145/47SW
20	661983	9591509	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	185/75NW
21	663233	9591539	Andesita porfídica con cuarzo, feldespato y plagioclasa alterados a clorita y zeolita y piroxenos alterados a epidota	-
22	661215	9592132	Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas, sulfuros	283/50NW - 285/62NW - 65/69SE - 10/39SE - 260/59NW - 176/20NE - 25/29SE
23	663941	9591964	Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas, sulfuros	-
24	664091	9591984	Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas, sulfuros	-
25	663813	9591758	Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas, sulfuros	-
26	663904	9591680	Riolita porfídica con matriz y cristales alterados intensamente a clorita y epidota, y plagioclasas alteradas a arcillas, sulfuros	-
27	663454	9591603	Contacto Andesita-Riolita, Vetillas, sulfuros	-
28	663160	9591604	Riolita porfídica con feldespato y plagioclasa alterados a clorita y epidota, sulfuros	-

## ANEXO Y

## MINERALES DE ALTERACIÓN DE ESTACIONES Y MUESTRAS DIGITALES, SENTINEL 2.

ESTACIÓN	MINERALES DE ALTERACIÓN	CLASE	MINERALES SEGÚN CLASIFICACIÓN	Relación
1	Clorita y epidota	2	Moderado Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
2	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
3	Clorita y epidota	7	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
4	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
5	Clorita y epidota	3 y 7	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
6	Clorita y epidota	6	minerales (OH) y moderado óxido de hierro	Si
7	Clorita y epidota	3 y 7	Moderado óxido de hierro y escaso minerales (OH)	Si
8	Clorita y epidota	4	No se reconocen minerales	No
9	Clorita y epidota	4	No se reconocen minerales	No
10	Clorita y epidota	3 y 6	Moderado óxido de hierro y minerales (OH)	Si
11	Clorita y epidota	3 y 5	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
12	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
13	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
14	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
15	Clorita y epidota	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
16	Clorita y epidota	3 y 5	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
17	Clorita y epidota	6 y 7	Moderado óxido de hierro y minerales (OH)	Si
18	Clorita y epidota	3, 5 y 6	Moderado óxido de hierro y minerales (OH)	Si
19	Clorita y epidota	2, 4 y 5	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
20	Clorita y epidota	2, 3 y 5	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
21	Clorita y zeolita	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
22	Clorita, epidota y arcillas	2, 3, 4 y 5	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
23	Clorita, epidota y arcillas	2 y 3	Óxido de hierro y escasos minerales (OH)	Si
24	Clorita, epidota y arcillas	1,5 y 6	Moderado óxido de hierro y minerales (OH)	Si
25	Clorita, epidota y arcillas	3 y 5	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
26	Clorita, epidota y arcillas	3 y 5	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
27	Clorita, epidota y arcillas	3, 5 y 7	Escaso Óxido de hierro y minerales (OH)	Si
28	Clorita y zeolita	3 y 7	Moderado óxido de hierro y escaso minerales (OH)	Si



# **BIBLIOGRAFÍA**

- Ahmed, A., & Amin, B. (2014). *Lithological mapping and hydrothermal alteration using LANDSAT 8 data: a case study in ariab mining district, red sea hills, Sudan*. Johor Bahru: Science Publishing Corporation.
- Amri, K., Mahdjoub, Y., & Guergour, L. (2010). *Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine area (Tahifet-Central Hoggar, Algeria)*. Arabia Saudita: Saudi Society for Geosciences.
- Beiranvand, A., & Hashim, M. (2015). *Regional Hydrothermal Alteration Mapping Using LANDSAT 8 Data*. Johor Bahru: Geoscience and Digital Earth Centre.
- Campell, N. (2007). *The decorrelation stretch transformation*. Australia: International Journal of Remote Sensing.
- Carrión, G. (2010). *Estudio mineralógico para la determinación de oro refractario en los distritos mineros de Portovelo, Bella Rica y San Gerardo*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja, Escuela de Geología y Minas.
- Crespo, J. (2007). *Elección del sistema de explotación del bloque R- Norte de al veta Santa Ana, distrito minero Zaruma Portovelo*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.
- Cueva, S., Hernandez, J. (2016). *Aplicación del método de difracción para la determinación y cuantificación de minerales de alteración hidrotermal*

*del sondaje Tel-01 del proyecto Telimbela, su relación con la litología y mineralización.* Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

Cunha, R. (2015). *Mapping hydrothermal gold mineralization using LANDSAT 8 data. A case of study in Chaves license, Portugal.* Portugal: Universidade do Porto.

Delendatti, G. (2003). *Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM.* San Juan: Revista de la Asociación Geológica Argentina.

Díaz, K. (2012). *Análisis de los sistemas LANDSAT ETM+ y TERRA ASTER como métodos de prospección de yacimientos epitermales. El caso del depósito aurífero de ROdalquilar, Almería.* Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía.

Eldosouky, A., Abdelkareem, M., & Elkhateeb, S. (2017). *Integration of remote sensing and aeromagnetic data for mapping structural features and hydrothermal alteration zones in Wadi Allaqi area, South Eastern Desert of Egypt.* Egipto: African Earth Sciences.

ESA. (2014). *EUROPEAN SPACE AGENCY.* Recuperado el 22 de junio de 2017, de SENTINEL 1: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/SENTINEL 1/Introducing\\_SENTINEL 1.](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/SENTINEL_1/Introducing_SENTINEL_1)

- ESA. (2015). *EUROPEAN SPACE AGENCY*. Recuperado el 22 de junio de 2017, de SENTINEL 2: [https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/SENTINEL 2](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/SENTINEL_2).
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Ventana análisis de imagen: Sección de visualización: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/image-analysis-window-display-section.htm>.
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Función Extender: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/stretch-function.htm>.
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Función de convolución: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/convolution-function.htm>.
- ESRI. (2016). *ArcGIS Desktop*. Obtenido de Remuestrear: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/resample.htm>.
- FTA. (17 de marzo de 2016). *Televisión Satelital Libre*. Obtenido de <http://ftapinamar.blogspot.com/2016/03/la-banda-l.html>.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Portovelo*. (30 de junio de 2014). Recuperado el 22 de junio de 2017, de Portovelo: <http://www.portovelo.gob.ec/el-canton/division-politica/12-division-politica.html>.

- Hernández, J. (2007). *Procesamiento digital de imágenes*. Chile: Santiago de Chile, Universidad de Chile.
- INEC. (2010). *Ficha de cifras generales del cantón Zaruma*. Quito: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- INEC. (2010). *Población y demografía cantonal*. Quito: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- INIGEMM. (2016). *Programa de mejoramiento de las condiciones de trabajo de la pequeña minería y minería artesanal*. Quito: Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador.
- Karszenbaum, H., & Barraza, V. (s.f.). *Introducción a la Teledetección Cuantitativa*. Buenos Aires: Instituto de Astronomía y Física del Espacio.
- Laake, A. (2011). *Integration of satellite Imagery, Geology and geophysical Data*. 2011: In Earth and Environmental Sciences.
- León, A. (2015). *Descripción, descarga y manipulación de productos SENTINEL 2*. Lima: Guia Sentinel.
- López, R. (2014). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. Portovelo: Gobierno Autónomo Descentralizado de Portovelo.
- Marchionni, D., & Schalamuk, I. (2010). *Aplicación de la teledetección espacial óptica y de radar para el análisis geológico y la detección de áreas miineralizadas en el sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz*. Buenos Aires: Revista de la Asociación Geológica Argentina.

- Martínez, R. (2013). *ENTRE MARES (Observatorio Geográfico de Panamá)*.  
Obtenido de Imágenes LANDSAT 8 de Panamá:  
<http://georem.blogspot.com/2013/08/imagenes-LANDSAT-8-de-panama.html>.
- Masoumi, F., Eslamkish, T., Honarmand, M., & Akbar, A. (2016). *A Comparative Study of Landsat-7 and Landsat-8 Data Using Image Processing Methods for Hydrothermal Alteration Mapping*. Tehran: Resource Geology, 72-88.
- Meer, F., Werff, H., & Ruitenbeek, F. (2014). *Potential of ESA's SENTINEL 2 for geological applications*. Twente: Department of Earth Systems Analysis.
- NASA. (2014). *LANDSAT SCIENCE*. Recuperado el 15 de junio de 2017, de LANDSAT 8 Overview: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/LANDSAT-8/LANDSAT-8-overview/>.
- NASA. (2017). *Landsat Science*. Obtenido de SENTINEL 2 A Launches—Our Compliments & Our Complements: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/SENTINEL2a-launches-our-compliments-our-complements/>.
- Neale, C., Jaworowski, C., Heasler, H., Sivarajan, S., & Masih, A. (2016). *Hydrothermal monitoring in Yellowstone National Park using airborne thermal infrared remote sensing*. Utah: ELSEVIER.

- Peñarreta, G. E. (2005). *Visita El Oro*. Recuperado el 04 de Junio de 2017, de Visita El Oro: <http://visitaeloro.com/turismo/el-oro/destinos/zaruma/>.
- Pérez, C. (2010). *Introducción al RADAR*. España: Universidad de Cantabria.
- QGIS. (2015). *From GIS to Remote Sensing*. Obtenido de User Manual of the Semi-Automatic Classification Plugin: <https://fromgistors.blogspot.com/p/user-manual.html?spref=scp>.
- Sabins, F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews* 14, 157–183.
- UTMACH. (2013). *Guía turística del cantón Zaruma*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Wang, G., Du, W., & Carranza, E. (2016). *Remote sensing and GIS prospectivity mapping for magmatic-hydrothermal baseand precious-metal deposits in the Honghai district, China*. China: Journal of African Earth Sciences.