

Imágenes ópticas multiespectrales y SAR para aplicación geológica: Caso Suroeste del Ecuador - Provincia de El Oro

Aracely Lima Abásolo^{1,2,*}, Antonio Vázquez Hoehne², Íñigo Molina Sánchez², Tannia Mayorga-Torres^{3,4}

¹ Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), Quito 170518, Ecuador.

² Universidad Politécnica de Madrid. Avenida del Mediterráneo km 7,0. Calle Mercator 2.
28031 Madrid, España.

³ Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental (FIGEMPA), 170521 Quito, Ecuador.

⁴ Universidad de Alicante. Escuela Internacional de Doctorado, 03690 Alicante, España.

* aracelylima7@gmail.com

RESUMEN

El avance de la cartografía geológica se vuelve más eficiente y eficaz con datos extraídos de los sensores remotos. La sinergia entre imágenes ópticas multiespectrales y radar de apertura sintética con resoluciones espaciales medias y altas, se convierte en una solución de interés para los Servicios Geológicos de países en vías de desarrollo. Estos países, debido a diferentes circunstancias, tanto por ubicación geográfica, presencia de vegetación y alto índice de nubosidad, así como asignación limitada de recursos, aún no han podido culminar la cartografía geológica, en escalas regionales 1:250,000; 1:100,000 (o 1:50,000 en zonas prioritarias). Presentamos una metodología que incluye la selección de imágenes satelitales, análisis geoespacial e interpretación de datos para la extracción de información geológica preliminar. Este enfoque metodológico culmina con la creación de un mapa interpretado base que sirve como insumo previo a la realización de la campaña de campo. El resultado obtenido fue la detección de contactos geológicos de las unidades mapeables más representativas y lineamientos estructurales observados. La validación del producto consistió en la comparación de las características geológicas interpretadas con las unidades de rocas y estructuras del mapa geológico publicado, evidenciándose un valor porcentual equivalente al 81% de similitud.

La metodología empleada se puede utilizar preferentemente en la generación de nueva cartografía geológica, así como en la actualización de mapas geológicos ya existentes. Es crucialmente importante para zonas remotas de difícil acceso por falta de vías de comunicación; así como en áreas afectadas por conflictos sociales debido a la oposición y resistencia a la explotación de recursos minerales.

Palabras clave: Cartografía geológica, imágenes ópticas, radar de apertura sintética, contactos geológicos, unidades geológicas, lineamientos estructurales.

ABSTRACT

The advancement of geological mapping has become more efficient and effective with the use of remote sensing data. The synergy between multispectral optical imagery and synthetic aperture radar with medium and high spatial resolution is becoming an interesting solution for Geological Surveys of developing countries. These countries have not yet been able to complete geological mapping at regional scales of 1:250,000; 1:100,000 (or 1:50,000 in priority areas). There are several reasons for this, both in terms geographical location, presence of vegetation and high cloud cover, and the limited allocation of resources.

We present a methodology involving selecting satellite imagery, geospatial analysing, and interpreting the data to extract preliminary geological information. This approach culminates in the production of an interpreted base map to be used as input prior to the field campaign.

The result was the identification of geological contacts of the most representative mappable units and observed structural lineaments. The validation of the product consisted in the comparison of the interpreted geological features with the rock units and structures of the published geological map, which showed a percentage similarity of 81%.

The methodology employed can be used to produce new geological maps as well as to update existing geological maps. It is particularly important for remote areas that are difficult to access due to lack of communication routes, where there are social conflicts due to the opposition and resistance to the exploitation of mineral resources.

Keywords: Geological mapping, optical images, synthetic aperture radar images, geological contacts, geological units, structural lineaments.

INTRODUCCIÓN

La observación de la Tierra desde el espacio ha encontrado muchos usos en las ciencias naturales, pero es en las últimas décadas donde los avances tecnológicos se han extendido hacia la aplicación

geológica (e.g., Singhroy, 1995; Massonnet y Feigl, 1998; Ferretti et al., 2001; Hernández y Moragues, 2002; Thurmond et al., 2006; Hong et al., 2007; Martha et al., 2010; Ferretti et al., 2011).

Una de las actividades prioritarias de los Servicios Geológicos a nivel mundial, es realizar la cartografía geológica a nivel nacional en diferentes escalas. Los mapas geológicos no solo resultan cruciales para planificación, construcción de obras de infraestructura, análisis de peligros y evaluación de riesgos para el ordenamiento territorial, sino que también son clave para la prospección y exploración de recursos minerales (e.g., Brusi et al., 2000; Ramli et al.; 2010; Oyarzun, 2011; Gutiérrez et al., 2013; Herrera, 2017; ASGMI, 2020).

Los gobiernos invierten ingentes cantidades de dinero para la localización de nuevas áreas con potencial geológico y minero. Para lograrlo, es fundamental completar la cartografía geológica a nivel regional. El levantamiento de la cartografía geológica constituye una faena larga y costosa; el uso de los sensores remotos puede optimizar tiempo y recursos (e.g., Bernknopf et al., 1993; Claverol, 1993; SEGEMAR, 2007; Cobb 2016; ASGMI, 2020); aunque esta técnica se encuentra en auge y es usada cada vez más en la actualidad, para aplicación geológica es mayormente utilizada en zonas semiáridas y secas (e.g., Ramadan, 2003; Chakouri et al., 2020).

El objetivo de este trabajo es implementar una metodología que permita a los Servicios Geológicos avanzar en el levantamiento de la cartografía geológica en áreas donde aún no se ha completado. Para lograr este objetivo, se utilizaron imágenes ópticas multiespectrales y radar de apertura sintética (SAR). Las imágenes ópticas multiespectrales se emplearon para la detección de contactos geológicos, mientras que el SAR se utilizó para identificar los lineamientos estructurales (estructuras geológicas). Estas imágenes fueron seleccionadas debido a su capacidad para identificar diferentes unidades geológicas en áreas tropicales, caracterizadas por una densa vegetación y una alta cobertura de nubes.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el suroeste del Ecuador, en la región costanera, provincia de El Oro (Figura 1), entre los 3° - 3°40'0'' de latitud sur y 79°30'0'' - 80°30'0'' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, con un área aproximada de análisis de 4,000 km².

La Figura 2 muestra la geología del área de estudio, que corresponde al Bloque Amotape-Tahuín (BAT; Mourier, 1988), constituido por rocas metamórficas (gneises, micaesquistos y sedimentos

epimetamórficos), las cuales pertenecen al Grupo Piedras del Precámbrico (Feininger, 1978, Feininger y Silberman, 1982). De igual forma, al BAT se le atribuyen diversas litologías que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cretácico (Aspden et al., 1995), agrupadas en varios terrenos bajo el nombre de “Complejo Metamórfico de El Oro” (Bosch et al., 2002). Estos terrenos son grandes bloques desplazados (Mourier, 1988; IIGE, 2019abc) que han sido interpretados como cuerpos alóctonos o paraúctonos independientes (Feininger y Bristow, 1980; Aspden y McCourt, 1986; Bourgois et al., 1987; Feininger, 1987). En el Jurásico tardío-Cretácico temprano se emplaza el Complejo Ofiolítico Rspas que es una escama obductada de una corteza oceánica subducida (Bosch et al., 2002; John et al., 2010). Al SE de los afloramientos metamórficos del BAT, se ubica la cuenca volcano-sedimentaria cretácica Alamor-Lancones (Kennerley, 1973; Reyes y Caldas, 1987).

Al Norte del BAT aflora la Unidad Pallatanga, de edad cretácica, considerada como basamento de la Cordillera Occidental. Esta unidad incluye basaltos, *pillow* lavas y otras unidades volcanoclásticas. Sobreyaciendo, se encuentra la Formación Jubones, que actúa como un importante marcador litoestratigráfico, compuesta por tobas del Mioceno. Al NE, los eventos geológicos están representados por los depósitos de la llanura costanera, pertenecientes a la Formación Quebrada Seca, con un aporte principal de sedimentos desde las rocas del Complejo Metamórfico de El Oro.

El basamento metamórfico está cubierto discordantemente por el vulcanismo continental terciario (Dunkley y Gaibor, 1997). Estos eventos volcánicos tienen sus equivalentes magmáticos con intrusiones de composición predominantemente granodiorítica.

La geología del área de estudio se vuelve más interesante debido al control estructural a nivel regional como local, ejercido por la deflexión de Huancambamba (Figura 3). Esta deflexión desempeña un papel crucial al influir en las principales estructuras del Ecuador, que generalmente tienen una orientación preferencial en dirección N-S. Sin embargo, en el sur del Ecuador, estas estructuras cambian abruptamente a una orientación E-O, destacando las fallas transversales de la Cordillera de los Andes, entre ellas, la falla Jubones y la Falla Tahuín (Figura 2). Este cambio complica la comprensión de la evolución geológica.

Según Yépez (2015), el origen y dirección E-O ha sido objeto de muchos debates, ya que su presencia rompe con el patrón predominante N-S o NNE de los Andes ecuatorianos. Numerosos geólogos han tratado de explicar este suceso, destacándose hipótesis relacionadas con microplacas, rotación de bloques y otras teorías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Imágenes satelitales

Imágenes Ópticas

Se seleccionaron 5 imágenes Landsat-8 OLI (*Operational Land Image*) del servidor de la USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) (Tablas 1a y 1b) y 7 de ASTER disponibles en el Instituto de Investigación Geológico y Energético de Ecuador – IIGE (Tablas 2a y 2b). Para aplicación geológica, no es imprescindible que las imágenes sean de fechas recientes, pero sí es crucial elegir las con la menor cobertura de nubes posible. Las imágenes seleccionadas tienen un porcentaje de nubosidad que oscila entre el 11 y el 38%. Se prefieren aquellas capturadas durante la estación seca, cuando la cobertura vegetal tiene menor densidad, lo que facilita una diferenciación más precisa de las unidades mapeables y las estructuras geológicas.

Radar de apertura sintética

La Tabla 3 muestra las características de las imágenes SAR utilizadas: ALOS sensor PALSAR RTC (*Radiometric Terrain Correction por su sigla en inglés*) (ASF, 2022b, 2022c), Sentinel 1B GRD (*Ground Range Detected por su sigla en inglés*) (ESA, 2021; ASF, 2022a) descargadas gratuitamente de las plataformas: *Alaska Satellite Facility (ASF)- Earth Data Vertex* y Agencia Espacial Europea (ESA) para fines de investigación; y, 1 imagen TerraSAR-X EEC (AIRBUS, 2015), una cortesía obtenida del *German Remote Sensing Data Centre (DFD)* a través del ex Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).

Cartografía

Se utilizaron los siguientes mapas geológicos: Ecuador 1:1.000.000; Machala, Santa Rosa y Huaquillas escala 1:100.000 y MDE ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución.

Metodología

Preprocesamiento de las imágenes ópticas

La Figura 4 muestra el preprocesamiento realizado en el software ENVI. Para mantener la homogeneidad espacial se realizó un remuestreo de datos con un mismo tamaño de pixel (30 m). Las Landsat-8 OLI L1TP (*Terrain Precision Correction*), tienen calibración radiométrica y ortorrectificación, utiliza puntos de control terrestre GCP (*Ground Control points por su sigla en inglés*) o información de

posición integrada a bordo para la producción de una imagen con proyección geográfica (IGAC, 2013; NASA, 2022).

Las imágenes ASTER con nivel de procesamiento L1B, tienen radiancia georreferenciada en el sensor, donde las dimensiones de los subsistemas visible infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo térmico (TIR) permanecen constantes de una escena a otra (Abrams et al., 2002; ERSDAC, 2012). Las correcciones geométricas y topográficas fueron realizadas en el *software* SILCAST y se transformaron los valores de nivel digital ND a radiancia espectral.

En ambos tipos de imágenes se enmascararon los elementos de no interés (nubes y sombras). Posteriormente, se integraron las diferentes bandas en un solo archivo (*layer stack*; INIGEMM, 2013). Se aplicó el módulo FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) del *software* ENVI para la corrección atmosférica, un paso esencial previo a cualquier análisis cuantitativo (Adiri et al., 2020), lo que permitió obtener valores de reflectancia espectral (Song et al., 2001).

Preprocesamiento y procesamiento de las imágenes radar

La apariencia de las imágenes radar se ve influenciada por los parámetros del sensor (polarización de la señal y longitud de onda), así como factores ambientales (humedad del suelo y rugosidad de la superficie) (Meyer, 2019). Los efectos de distorsión geométrica, dados por el relieve o la pendiente del terreno, acarrear errores en la interpretación. Es fundamental realizar un preprocesamiento exhaustivo que incluya correcciones y calibración para lograr una representación precisa de la superficie terrestre (Figura 5). El preprocesamiento de radar se vuelve complejo y demandante desde el punto de vista informático. Esto implica la descarga de grandes conjuntos de datos SAR desde Internet y la ejecución de procesos prolongados en sistemas informáticos de escritorio. Además, el uso de *software* libre es complicado para los usuarios por la necesidad de programación que se debe emplear y el *software* comercial es extremadamente costoso. Esta situación representa un desafío significativo para los geólogos, ya que en muchas ocasiones las imágenes obtenidas no están listas para su interpretación debido al ruido *speckle* (distorsión radiométrica inherente a cualquier sistema de adquisición de imágenes radar) que presentan. En este trabajo, se propone una solución interesante que consiste en aprovechar el servicio gratuito proporcionado por diferentes plataformas, como la que ofrece la ASF a cargo del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska en Fairbanks (<https://asf.alaska.edu/asfsardaac/>), una de ellas denominada HyP3 con la posibilidad de procesamiento masivo en línea (en la nube), para la adquisición de escenas SAR. Estas plataformas *web* brindan capacidades avanzadas de procesamiento y análisis, lo que permite una

optimización significativa del tiempo. Al postular proyectos de investigación, se abre la oportunidad de acceder a una variedad de productos SAR (ASF, 2022a), como el producto ALOS PALSAR RTC, que es liberado con corrección radiométrica y geométrica. Ambas correcciones hacen que este producto sea superior, proporcionando una representación más precisa de la superficie terrestre. Los datos RTC son escenas polarimétricas y de haz fino (ASF, 2022c).

De igual forma, el producto *Ground Range Detected* GRD de Sentinel 1, consiste en datos que han sido detectados, analizados y proyectados al rango terrestre utilizando el modelo de elipsoide terrestre WGS84 (Filipponi, 2019; ARSET, 2022; ESA, 2021). Este proceso tiene como objetivo facilitar el procesamiento digital de las imágenes, que tienen un tamaño aproximado de 1 GB cada una. Además, el producto GRD incluye calibración radiométrica y un tratamiento *multilooking* para mejorar la calidad y utilidad de los datos.

Para reducir la apariencia granulosa, se aplica un filtro de moteado o *speckle* (Álvarez-Mozos et al., 2005) y finalmente la corrección geométrica (por las variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del haz en las deformaciones).

Por otro lado, la imagen TerraSAR-X (*Enhanced Ellipsoid Corrected EEC*) ofrece la ventaja de una superposición rápida, facilidad de integración muy precisa con otros datos espaciales. Este producto se utiliza para una amplia gama de propósitos cartográficos que demandan una geocodificación precisa en GeoTIFF (Martinis et al., 2013).

Análisis e interpretación geológica a partir de imágenes ópticas multiespectrales y SAR

Se emplearon técnicas de análisis geoespacial tanto en la interpretación visual para la detección de contactos geológicos y estructuras geológicas, así como en la generación automática de lineamientos. La Figura 6 muestra la metodología utilizada para el análisis y la interpretación geológica de las imágenes ópticas.

El área de estudio presenta una cobertura vegetal que incluye bosques nativos y vegetación arbustiva. En este trabajo de investigación se ha puesto mayor énfasis en las bandas del SWIR por su capacidad para detectar diferencias de color entre unidades geológicas. La detección de la vegetación se realiza mayormente utilizando las bandas del visible e infrarrojo cercano (VNIR) (Martín-González et al., 2007).

Para llevar a cabo el análisis geoespacial, se crearon varios mosaicos de imágenes ópticas multiespectrales y radar (Anexo 1). Posteriormente, se evaluaron diversas alternativas de fusión con el fin de mejorar la precisión de la interpretación y resaltar las características geológicas.

Contactos geológicos

Como primer criterio se empleó el método de observación visual de las imágenes Landsat y ASTER. Este método se basa en el análisis de diferentes combinaciones RGB (Rojo/Verde/Azul) y relación de bandas (cocientes de bandas), detalladas en la Tabla 4, las cuales son específicas y exclusivas para la interpretación de contactos geológicos de las unidades mapeables. Esto se fundamenta en que los diferentes conjuntos de rocas y materiales (afloramientos) presentan patrones espectrales característicos de absorción en ciertas longitudes de onda, dependiendo de la composición mineral de las rocas.

Las combinaciones RGB generan imágenes de color, lo que permite al geólogo analizar e interpretar objetos identificables al seguir los contornos de los diferentes polígonos o cuerpos observados en distintas gamas de colores. Es crucial tomar los polígonos más representativos y evidentes para inferir las unidades geológicas. Al aplicar esta técnica, se puede optimizar el levantamiento cartográfico en campo.

Para el procesamiento de imágenes ópticas se han utilizado diferentes *software* y plataformas (*software* especializado para tratamiento de imágenes satelitales como ENVI, PCI Geomatics, SNAP; Sistemas de Información Geográfica SIG como ArcGis, QGIS; *Google Earth Engine* GEE; SEPAL) que han contribuido para facilitar el proceso de combinación de las diferentes bandas y coeficientes. Los algoritmos disponibles permiten realizar cambios de las diferentes bandas con el propósito de escoger los mejores compositos o mosaicos de las escenas.

Estructuras geológicas

La Figura 7 resume la metodología empleada para la interpretación de estructuras geológicas en las imágenes SAR, aunque limitadas desde el punto de vista espectral (una sola frecuencia), pero con un sistema de iluminación lateral (Meyer, 2019) que realza las pequeñas diferencias de textura. Esto, acompañado por la orientación de las laderas y la rugosidad del terreno utilizando el DEM de Alos Palsar, han permitido resaltar las estructuras, lo que facilita la identificación de lineamientos rectos o ligeramente curvos en las imágenes.

Como segundo criterio, se empleó un método automático para la detección de lineamientos estructurales, mediante el algoritmo *LINE* utilizando una versión demo del *software* Catalyst (antes

llamado PCI Geomatics) (Villalta et al., 2022). El algoritmo detecta características lineales en una imagen y genera polilíneas en un segmento vectorial mediante tres etapas: detección de bordes, umbrales y extracción de curvas (e.g., PCI Geomatics, 2022; Thomas et al., 2022; Villalta et al., 2022).

La cantidad de lineamientos extraídos y la longitud de cada línea dependen de los valores de los parámetros ingresados. Para el caso de estudio se hicieron algunas pruebas, la Tabla 5 presenta los parámetros utilizados. Según Villalta et al. (2022), para el ojo humano un lineamiento que varía en intensidad a lo largo de su longitud puede verse como un solo lineamiento largo, mientras que, para un método numérico, el mismo lineamiento puede aparecer en varias líneas cortas. Por lo tanto, el desarrollo de un método numérico para extraer lineamientos debería ser robusto, permitir cambios graduales en el gradiente a lo largo del lineamiento y en su dirección (PCI Geomatics, 2022).

De acuerdo con el análisis realizado mediante este método, muchos de los lineamientos obtenidos pueden estar relacionados con actividad antrópica (infraestructura) como líneas de transmisión eléctrica, redes de transporte (carreteras), canales y rasgos naturales (redes de drenaje, crestas de las montañas), lo que puede ocasionar confusión. La Figura 8 muestra un ejemplo de las líneas correspondientes a intervención antrópica, rasgos naturales y límites de la represa Tahuín, ubicados en el área de estudio.

Se procedió con el filtrado de los lineamientos y descarte de las líneas que corresponden a información secundaria (cartografía básica) y a objetos subjetivos que inevitablemente aparecen en la interpretación de sensores remotos. Se realizó un inventario de líneas rectas y curvas, considerando conjuntos de líneas con determinadas tendencias para la comparación respectiva en los mapas publicados.

Finalmente, se aplicaron técnicas de superposición espacial (Olmedo, 2006) en el *software* ArcGis para analizar la relación de los contactos geológicos y lineamientos extraídos con la litología y las estructuras geológicas respectivas del área de estudio.

RESULTADOS

Mapeo de contactos geológicos

La metodología empleada, que incluyó la interpretación visual y análisis geoespacial (superposición de mosaicos, combinaciones independientes de bandas en falso color y DEM de Alos Palsar), permitió discriminar 11 unidades mapeables. Estas unidades, las más representativas, están conformadas por

aproximadamente 74 polígonos y fueron identificadas por los cambios notorios de colores, resultado de la respuesta espectral de las diferentes unidades litológicas.

La Figura 9 muestra los contactos geológicos interpretados, superpuestos en los mosaicos y composiciones en RGB de las imágenes Landsat y ASTER. Los mejores resultados para la discriminación de unidades geológicas se observaron mayoritariamente en las imágenes del sensor ASTER, ya que sus 14 bandas abarcan una amplia región espectral (VNIR, SWIR, TIR), permitiendo distinguir las características espectrales de los distintos materiales que aparecen en la superficie de la Tierra. En particular, las bandas en el rango SWIR (bandas 4 a 9) son especialmente útiles, destacándose la banda 7, que se utiliza frecuentemente en las composiciones RGB y en los ratios (Tabla 4).

Mapeo de lineamientos por los métodos visual y automático

Con respecto a las estructuras geológicas, la metodología empleada mediante la interpretación visual permitió discriminar 150 lineamientos estructurales.

Los mejores resultados de discriminación visual de estructuras geológica se obtuvieron de las imágenes TerraSAR X, que tienen la más alta resolución espacial. Se utilizaron diferentes filtros para resaltar rasgos lineales y detectar bordes (Filter Radius, filtro de reducción de moteado-Gamma Map, filtro direccional y filtro pasa bajas), obteniendo distinciones y cambios notorios que permitieron trazar líneas, marcar tendencias y como producto se obtuvieron las estructuras geológicas. La Figura 10 muestra el mapa de lineamientos estructurales detectados en el análisis e interpretación visual de la imagen TerraSAR X. Se identifica un patrón de lineamientos con orientación NE-SO y otras características lineales transversales E-O.

Los resultados de procesamiento de las escenas Sentinel 1 y ALOS PALSAR, no delinearon características de fallas geológicas, por la baja resolución de las bandas C y L. Por lo tanto, las escenas se descartaron en este trabajo de investigación.

La Figura 11 muestra el mapa de lineamientos estructurales obtenidos a partir de la imagen TerraSAR X mediante el método automático utilizando el algoritmo LINE. La Tabla 6 indica la clasificación de los lineamientos, identificando un total de 20480 líneas cortas. La densidad de líneas también depende de la extensión del área investigada y la escala de trabajo. Aproximadamente 6652 líneas corresponden a bordes de diferentes objetos, que están ubicados al oeste y sureste del área de estudio. Las

13828 líneas restantes están distribuidas en dos conjuntos de lineamientos, unos con tendencias similares a las fallas interpretadas y otros que no han sido observados en el campo, por lo tanto, no están plasmados en el mapa publicado. El análisis realizado muestra que no es procedente borrar las líneas cortas menores a 500 m, pues se estarían eliminando inclusive aquellas que sí forman parte de las tendencias de los lineamientos encontrados.

El mapa obtenido contribuye a una estimación global de las tendencias de orientación de los lineamientos. Sin embargo, definitivamente no es conveniente competir con la experticia del geólogo en la interpretación, ya que el método automático tiende a incluir todas las texturas encontradas como lineamientos, lo cual no es real.

El mapa de lineamientos interpretado fue comparado con el mapa geológico del Ecuador publicado a escala 1:1,000,000, utilizando técnicas de superposición SIG para revelar la relación, el patrón y la correlación de los datos.

La Figura 12 presenta el mapa geológico interpretado del área de estudio (contactos geológicos de las unidades litoestratigráficas y lineamientos estructurales). La Tabla 7 indica los porcentajes de similitud entre las áreas de las unidades geológicas más representativas. Se realizaron comparaciones entre seis unidades geológicas representativas para establecer su paridad. El promedio de los porcentajes de coincidencia de unidades mapeables (polígonos), corresponde al 81% de similitud con las unidades litoestratigráficas del mapa geológico regional publicado (Tabla 7). Este valor porcentual se obtuvo comparando las áreas de los polígonos identificados con los del mapa publicado.

Es importante mencionar que se identificaron unidades pequeñas que no han sido representadas en el mapa geológico publicado, esto se debe a la interpretación a semidetalle de los datos ASTER que tienen una resolución espacial promedio de 30 m.

DISCUSIÓN

En las dos últimas décadas, a nivel mundial, se han implementado diversas metodologías que aplican sensores remotos en zonas áridas y semiáridas (e.g, Ramadan y Onsi, 2003; Chakouri, 2020). En varias publicaciones científicas se ha demostrado que la cartografía geológica con sensores remotos se adapta mejor en estas regiones. Sin embargo, en zonas tropicales con vegetación densa y alto índice de nubosidad, como es el caso de Ecuador, su aplicación ha sido más limitada y desafiante. El área de estudio

presenta una cobertura vegetal que incluye bosques nativos y vegetación arbustiva. El trabajo de investigación realizado no se enfocó en la detección de geomorfologías ni de la vegetación; existen bandas específicas de las imágenes satelitales para estos propósitos. Diversos estudios han demostrado que, utilizando pares estereoscópicos de ASTER (bandas 3b y RGB 321), junto con visualización 3D y mapa de pendientes, se pueden elaborar mapas geomorfológicos. En cambio, la detección de la vegetación se realiza mayormente utilizando las bandas del visible e infrarrojo cercano (VNIR) (Martin et al., 2007). Los contactos geológicos detectados no corresponden a límites morfológicos sino a la respuesta espectral de las unidades geológicas (las bandas del SWIR son especialmente sensibles a la composición mineralógica), y solo en algunos casos podría coincidir con la morfología (depósitos superficiales). En el presente trabajo se muestra como las imágenes ópticas se complementan eficazmente con las de radar de apertura sintética permitiendo mejorar la identificación de las características geológicas.

Se logró identificar unidades geológicas y lineamientos estructurales mediante la sinergia de estos dos tipos de imágenes, obteniéndose el 81% de similitud en las unidades litoestratigráficas del mapa geológico regional publicado, como se indica en la Tabla 7.

El enfoque metodológico que se muestran en las Figuras 4, 5, 6 y 7, sin lugar a duda brinda al geólogo una herramienta fundamental para la discriminación y extracción de características geológicas, convirtiéndola en una herramienta complementaria para la planificación del levantamiento geológico a escala regional. Aplicando esta metodología, el geólogo podrá llevar su mapa interpretado como insumo preliminar para campo y poner mayor atención en sitios de intersección entre unidades geológicas. Se pueden realizar consultas y análisis adicionales en función de los conjuntos de datos de las capas generadas. Si bien el resultado obtenido constituye una información preliminar obtenida por sensores remotos, sin duda, este resultado favorece en gran medida tanto la planificación de las campañas geológicas como la optimización de recursos humanos y económicos.

La metodología planteada radicó en dos partes principales: a) proveer a los lectores y a la comunidad geológica de los países que aún no han podido culminar la cartografía geológica regional, una nueva visión sobre los datos satelitales y las técnicas a implementar; b) la identificación de contactos geológicos y la detección de lineamientos estructurales.

Recursos satelitales para el cartografiado geológico

Aunque el uso de los recursos satelitales parece un proceso similar al trabajo convencional y cotidiano realizado por muchos servicios geológicos e institutos de investigación, la diferencia radica en la elaboración de la cartografía geológica, ahora impulsada por el vertiginoso avance de la tecnología, mediante el uso de herramientas y técnicas de teledetección que coadyuvan en la eficiencia, precisión y efectividad del proceso (e.g., Laubacher y ESPOL-ORSTOM, 1994; Meyer, 2019). Este nuevo método supera ampliamente al método convencional, ya que el costo de adquisición de las imágenes satelitales es menor (gratuito en muchos casos) que el de captura de fotografía aérea, y permite cubrir grandes extensiones.

A esto se debe añadir, la facilidad de obtener imágenes a través de plataformas de las Agencias Espaciales y el procesamiento optimizado en las nubes.

Una limitación que ha impedido culminar la cartografía geológica en muchos casos es la arraigada metodología convencional clásica implantada en los países en vías de desarrollo. Una gran cantidad de geólogos muestran resistencia al uso de la teledetección para la confección de las cartas geológicas, a pesar de las facilidades disponibles hoy en día.

Unidades geológicas y lineamientos estructurales

La superposición de capas (MDE, mosaicos, composiciones de bandas en falso color) en un SIG, junto con la experticia del geólogo (Figura 9), permite generar un mapa interpretado con base en imágenes adquiridas por sensores remotos (Figura 12). Este mapa sirve como insumo crucial para la planificación de las campañas de trabajo de campo, donde será validado; así como para afinar los hallazgos encontrados y los empalmes de las hojas geológicas aledañas en la etapa post campo.

En la mayor parte de publicaciones científicas (e.g., Hunt y Ashley, 1979; Yamaguchi 1987, Ninomiya, 2001, 2002, 2005; Hernández y Moragues, 2002; Novikova, 2004; Marquetti et al., 2005; Karimpour et al., 2014), las composiciones de bandas en falso color y relaciones de bandas descritas, son de uso exclusivo para la identificación y exploración de minerales, en algunos casos determinadas litologías. Sin embargo, en esta investigación, las combinaciones se han empleado para la detección de unidades mapeables.

Esta técnica no ha sido explotada totalmente, los servicios geológicos a nivel regional se han enfocado preferencialmente en el cálculo de razones de bandas para discriminar minerales, dejando de lado la detección de contactos geológicos. Esto se debe a que la cartografía geológica sigue aplicando técnicas convencionales como la fotointerpretación o la fotogeología mediante el uso de un estereoscopio.

Los resultados mostraron un aumento en el número total de unidades geológicas detectadas, en comparación con los contactos geológicos y lineamientos estructurales plasmados en el mapa publicado (IIGE, 2017). Esto se debe al detalle que se puede conseguir a partir de las imágenes satelitales de mediana y alta resolución. En este caso, debido a la resolución espectral y espacial de las imágenes ASTER se identificaron contactos geológicos adicionales o más precisos. Estas imágenes sobrepuestas a un DEM pueden ser usadas para crear mapas sombreados que destacan características del relieve, lo que ayuda a visualizar las estructuras geológicas que pueden no ser obvias en el mapa publicado. La metodología empleada puede incluso ayudar en auditorías de trabajo de campo, tanto para hojas nuevas como para la actualización de hojas históricas. Adicionalmente, si existieran inconsistencias en la interpretación realizada en campo, éstas pueden afinarse con las observaciones en las imágenes satelitales, las mismas que denotan en muchos casos mayor precisión.

El resultado de los lineamientos interpretados visualmente en las imágenes de radar TerraSAR-X, son más detallados que los encontrados en campo (Figura 10). Estos rasgos están en concordancia con las tendencias direccionales del mapa geológico publicado.

Si bien la identificación de estructuras geológicas mediante el método automático, presenta un gran interés por la rapidez con la que se detectan los lineamientos, éstos solo pueden proporcionar una aproximación preliminar. Los resultados del algoritmo, al mezclar líneas de actividad antrópica con rasgos naturales, no garantizan una identificación precisa de los lineamientos existentes. Por lo tanto, se considera necesario validar los lineamientos encontrados y mejorar el algoritmo para obtener resultados más fiables (Figura 11).

Hasta el día de hoy, la geología no produce un resultado cuantitativo sino más bien uno de orden cualitativo o de interpretación y producción sistemática (Pascale, 2021; Red Geomatica, 2022). No obstante, se hacen muchos esfuerzos desde el siglo XXI para dar inicio a la geología matemática y para ello, están siendo tomadas en cuenta las grandes cantidades de datos obtenidos por los satélites y sensores (Suarez-Burgoa, 2017).

Todo el trabajo realizado utilizando la teledetección no funciona si no existe una estrecha colaboración entre el geomático y el geólogo de campo. Esta colaboración es fundamental para que los mapas interpretados con sensores remotos sean funcionales, porque si el geólogo de campo no confía en el producto interpretado simplemente será un trabajo infructuoso que se guardará en el escritorio.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La sinergia entre imágenes ópticas y radar de apertura sintética con resoluciones espaciales medias y altas, se convierte en una solución de mucho interés para los Servicios Geológicos de países en vías de desarrollo. Los que aún no han culminado la cartografía geológica, en escalas regionales 1:100,000 y 1:50,000; que, por su ubicación geográfica tienen zonas con vegetación, un alto índice de nubosidad y la disponibilidad limitada de recursos financieros.

Se implementó un enfoque metodológico comprensible para los geólogos que planifican, recopilan y preparan los insumos previos a las campañas de campo.

Al estudiar y evaluar las características de las imágenes satelitales, se comprobó que las imágenes radar se complementan adecuadamente con las ópticas, produciendo una mejora significativa en los resultados.

Se trabajó con un remuestreo de tamaño de pixel de 30 m en las imágenes ópticas. Sin embargo, por el avance tecnológico se puede mejorar inclusive a 10 m para afinar los objetos geológicos, debido al avance y el lanzamiento de nuevas plataformas satelitales.

La metodología propuesta aprovecha el desarrollo y avance de la teledetección, la disponibilidad de imágenes gratuitas para investigación y el procesamiento en la nube mediante algoritmos programados para la obtención de composiciones de bandas en falso color y mosaicos, así como varias herramientas que proveen las plataformas de las Agencias Espaciales, lo que resulta en un ahorro significativo de tiempo y dinero para los países en vías de desarrollo.

Con los resultados aquí obtenidos, se muestra como las regiones que abarcan el infrarrojo de onda corta, el infrarrojo térmico (imágenes ópticas) y el microondas (radar de apertura sintética) del espectro electromagnético, son de mayor interés para la detección de información geológica preliminar. Se destaca la importancia de la banda 7 (SWIR) de ASTER para la geología, por el resultado obtenido a través de la combinación de bandas realizada. Además, se subraya la necesidad de complementar las imágenes ópticas

multiespectrales con las de radar, especialmente en zonas como Ecuador, donde gran parte del territorio permanece cubierto por nubosidad durante casi todo el año, dificultando la captura de información mediante sensores ópticos. Este método no está condicionado por la presencia de factores meteorológicos adversos, ni tampoco por conflictos sociales donde las comunidades locales se resisten a la prospección geológica para la búsqueda de recursos minerales.

Los resultados obtenidos incluyen la detección de objetos geológicos, que se compararon con los mapas geológicos publicados. La identificación de líneas de intersección entre superficies que limitan dos grupos de rocas, convierte a la teledetección en una técnica de predicción.

El objetivo de acoplar el uso de imágenes satelitales y el método empleado favorecerá la cadena de producción de la cartografía geológica a diferentes escalas. Esta metodología también puede contribuir con los Servicios Geológicos de países que aún no han podido completarla debido a limitaciones financieras. Además, se destaca la aplicabilidad de la metodología en otros países que se encuentran en etapas iniciales o de actualización de la misma.

Se confirma el potencial de los sensores remotos para la investigación geológica de grandes extensiones a nivel regional, favoreciendo la aceleración del levantamiento de la cartografía geológica a cargo de los Servicios Geológicos.

Finalmente, se enfatiza la necesidad de desarrollar metodologías automáticas que agilicen la identificación de las características geológicas, dado que las problemáticas emergentes en este campo requieren intervenciones rápidas, así como la exploración y explotación de yacimientos precisan análisis eficientes y acelerados. Se deberá avanzar hacia metodologías automáticas que relacionen la emisión-reflexión, la clasificación y metodologías de segmentación. De igual forma, realizar clasificación supervisada de imágenes ópticas multiespectrales para distinguir litologías, y así poder llegar a una interpretación mucho más robusta de las rocas existentes en la superficie terrestre.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se ha realizado en el contexto de fin de grado del Doctorado en Ingeniería Geomática, Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid. La autora principal agradece a: *USGS, ASF, Google, ESA, DFD, IEE*; por las plataformas y datos obtenidos gratuitamente para fines de investigación y al Instituto de Investigación

Geológico y Energético de Ecuador (IIGE), Dirección de Gestión Científica y Dirección de Gestión de la Información – Línea de Investigación Geomática, por facilitar la información necesaria para el desarrollo de esta publicación. Un agradecimiento muy especial a los coautores, profesores de la UPM por su guía y apoyo incondicional y a los revisores anónimos por todas las precisiones plasmadas.

REFERENCIAS

- Abrams, M. J., Rothery, D. A., Pontual, A., 1988, Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics*, 151(1-4), 387-401.
- Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B., 2002, ASTER user handbook, version 2, Jet Propulsion Laboratory.
- Aboelkhair, H., Abdelhalim, A., Hamimi, Z., Al-Gabali, M., 2020, Reliability of using ASTER data in lithologic mapping and alteration mineral detection of the basement complex of West Berenice, Southeastern Desert, Egypt, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-20.
- Adiri, Z., Lhissou, R., El Harti, A., Jellouli, A., Chakouri, M., 2020, Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications, *Ore Geology Reviews* 2020, 117: 103332. <<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103332>>
- AIRBUS. TerraSAR-X Image Product Guide., 2015, Issue 2.1, <https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf>, consulta: 10 de mayo de 2021.
- Alaska Satellite Facility (ASF), 2015, ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products. ASF engineering. <https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf>, consulta: 22 de febrero de 2023.
- Alaska Satellite Facility (ASF), 2022a, <<https://asf.alaska.edu>>, consulta: 05 de junio de 2021.
- Alaska Satellite Facility (ASF), 2022b, ALOS PALSAR – About, <<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>>, consulta: 04 de junio de 2022.
- Alaska Satellite Facility (ASF), 2022c, ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction, 2022: <<https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>>, consulta: 05 de junio de 2022.
- Álvarez-Mozos, J., Casali, J., González-Audicana, M., 2005, Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas, *Revista de Teledetección*, 23: 27-42.
- Anderson, G., Berk, A., Acharya, P., Matthew, M., Bernstein, L., Chetwynd, J. et al., 2000, MODTRAN4: Radiative transfer modeling for remote sensing, Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery VI. 4049, *International Society for Optics and Photonics*: 176-184.
- Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos (ASGMI), 2020, Situación de la cartografía geológica y metodologías aplicadas en los países iberoamericanos.

- Aspden, J. A., McCourt, W. J., 1986, Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia. 1986, *Geology*, 14(5), 415-418. 1986.
- Aspden, J. A., Bonilla, W., Duque, P., 1995, The El Oro metamorphic complex, Ecuador: geology and economic mineral deposits (No. 67), British Geological Survey.
- Applied Remote Sensing Training (ARSET), 2022, *Procesamiento y Análisis de Imágenes SAR*. Podest Er.
- <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session2-SAR-Spanish_0.pdf>, consulta: 07 de junio de 2022.
- Bernknopf, R., Brookshire, D., Soller, D., McKee, M., Sutter, J., Matti, J., Campbell, R. 1993, Societal value of geologic maps: U.S. Geological Survey Circular 1111, 53 pp.
- Bosch, D., Gabriele, P., Lapierre, H., Malfere, J. L., Jaillard, E., 2002, Geodynamic significance of the Raspas Metamorphic Complex (SW Ecuador): geochemical and isotopic constraints. *Tectonophysics*, 345(1-4): 83-102.
- Bourgeois, J., Toussaint, J. F., Gonzalez, H., Azema, J., Calle, B., Desmet, A., ... & Tournon, J., 1997, Geological history of the Cretaceous ophiolitic complexes of northwestern South America (Colombian Andes), *Tectonophysics*, 143(4), 307-327.
- Brusi, D., Linares, R., Pallí, L., Roqué, C., 2000, Lectura ambiental de cartografía geológica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8(3): 247-260.
- Chakouri, M., Lhissou, R., El Harti, A., Maimouni, S., Adiri, Z., 2020, Assessment of the image-based atmospheric correction of multispectral satellite images for geological mapping in arid and semi-arid regions, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. doi: <<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100420>>.
- Claverol, M., 1993, *Compendio de teledetección geológica (Vol. 1)*, Universidad de Oviedo, Departamento de Geología.
- Cobb, J., 2016, The value of geological maps and the need for digitally vectorized data. *Digital Mapping Techniques '02 – Workshop Proceedings*, U.S. Geological Survey Open-File Report 02-370, <<https://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-370/cobb.html>>, consulta: 22 de agosto de 2023.
- Dunkley, P., Gaibor, A., 1997, *Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 2–3° S*, Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental, Programa de Información Cartográfica y Geológica, CODIGEM–BGS, Quito, Informe 2.
- ERSDAC, Japan Space Systems, 2012, Earth Remote Sensing Division. <<https://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/eng/index.E.html>>, consulta: 03 de octubre de 2022.
- European Space Agency (ESA), 2021, *User guides – Sentinel-1 SAR – Level 1*. <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>>, consulta: 28 de diciembre de 2022.
- Feininger, T., 1978, *Geologic Map of Western El Oro Province*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Feininger, T., Bristow, C., 1980, Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador, *Geologische Rundschau*, 1980, 69(3), 849-874.

- Feininger, T. y Silberman, M., 1982, K-Ar geochronology of basement rocks on the northern flank of the Huancabamba deflection, Ecuador (No. 82-206), US Geological Survey.
- Feininger, T., 1987, Allochthonous terranes in the Andes of Ecuador and northwestern Peru, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(2): 266-278.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. 2001. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 8-20.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A., 2011, A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49: 3460-3470.
- Filipponi, F., 2019, Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*, 18, 6201. 10.3390/ECRS-3-06201, <<https://www.mdpi.com/2504-3900/18/1/11>>, consulta: 02 de marzo de 2023.
- Gutiérrez, L., Cerezal, J., Losada, J., 2013, Construcción de obras y aprovechamientos hidráulicos en terrenos e islas volcánicas, Ingeniería geológica y geotécnica. In *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos: Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*, Colegio de Ingenieros de Montes: 377-398.
- Hernández, A., Moragues, J., 2002, Uso de la información espacial para cartografía, geología y producción minera, Ciclo V, Comisión Nacional de Asuntos Espaciales (CONAE).
- Herrera, J., 2017, *Introducción a la Minería (2ª Edición)*, Vol. III: La exploración e investigación minera.
- Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. 2007, Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility, *Natural Hazards* 43: 23-44.
- Hunt, G.; Ashley, R., 1979, Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7), 1613-1629.
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM), 2013, Instructivo de interpretación de imágenes. Dirección de Laboratorios Geocientíficos.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), 2017, Mapa Geológico del Ecuador, escala 1:1'000.000. 1 mapa.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), 2019a, Hoja geológica Huaquillas, escala 1:100,000: Ecuador, 1 mapa.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), 2019b, Hoja geológica Machala, escala 1:100,000, Ecuador, 1 mapa.
- Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), 2019c, Hoja geológica Santa Rosa, escala 1:100 000, Ecuador, 1 mapa.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2013, Productos LDCM – Landsat 8: Bogotá, Centro de Investigación y Desarrollo - CIAF. <<https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>>, consulta: 04 de noviembre de 2022.
- Instituto de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM), 2013, Instructivo de corrección atmosférica, Ecuador.

- John, T., Scherer, E., Schenk, V., Herms, P., Halama, R. Garbe-Schönberg, D., 2010, Subducted seamounts in an eclogite-facies ophiolite sequence: the Andean Raspas Complex, SW Ecuador, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159, 265-284.
- Karimpour, M., Mazhari, N., Shafaroudi, A., 2014, Discrimination of Different Erosion Levels of Porphyry Cu Deposits using ASTER Image Processing in Eastern Iran: A Case Study in the Maherabad, Shadan, and Chah Shaljami Areas, *Acta Geol. Sin.* 88, 1195–1213.
- Kennerley, J., 1973, Geology of the Loja Province, Southern Ecuador. Institute of Geological Sciences, Report 23: 1-34.
- Laubacher, G., ESPOL-ORSTOM, C., 1994, Aportes de la teledetección a la geología de la región Puyango-Celicaelf hidrocarbures équateur, 143.
- Marchionni, D. y Tessone, M., 2009, Cartografía geológica y reconocimiento de áreas de alteración hidrotermal con imágenes LANDSAT-TM en el área de La Manchuria, Macizo del Deseado, Patagonia Argentina, *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 3269-3276.
- Martha, T., Kerle, N., van Westen, C. J., Kumar, K., 2010, Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods, *Geomorphology* 116: 24-36.
- Marquetti, C., Marín, G., Kaku, M., Kohno, I., 2005, Procesamiento y análisis de imágenes Aster para el estudio metalogénico de Malimán, San Juan, Proyecto GEOSAT-AR, 81 pp.
- Martín-González, F., Carreño Conde, F., De Pablo, M. A., 2007, Aplicación de imágenes Landsat (TM y ETM+) en estudios geoestructurales en el NO del Macizo Ibérico.
- Martinis, S., Twele, A., Strobl, C., Kersten, J., Stein, E., 2013, A multi-scale flood monitoring system based on fully automatic MODIS and TerraSAR-X processing chains. *Remote Sensing* 5(11): 5598-5619.
- Massonnet, D., Feigl, K.L. 1998, Radar interferometry and its application to changes in the earth's Surface. *Reviews of Geophysics* 36: 441-500.
- Meyer, F., 2019, *The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques*. SERVIR Global Science Coordination Office, 21 pp.
- Mourier, T., 1988, La transition entre Andes marginales et Andes cordilléraines à ophiolites. Évolution sédimentaire. magmatique et structurale du relai de Huancabamba (30- 8 0 S. Nord Pérou Sud Équateur), Tesis Doc, Ciencias, Univ. Paris XI, 275 pp. Orsay.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2022, Landsat Science. <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>>, consulta: 28 de septiembre de 2022.
- Ninomiya, Y., 2001, "Spectral Indices for Lithologic Mapping with ASTER Thermal Infrared Data Appying to a Part of Beishan Mountains, Gansu, China. Institute of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Sydney, Australia."
- Ninomiya, Y., 2002, "Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multiespectral thermal infrared ASTER data" *International Society for Optical Engineering SPIE* 4710: 191-202.

- Ninomiya, Y., 2005, "Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data." *Science direct*: 13.
- Novikova, J., 2004, Cartografía geológica con imágenes aster de depósitos tipo Candelaria. Chile.
- Olmedo, M. T. C., 2006, Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. Cuadernos Geográficos.
- Oyarzun, R., 2011, Introducción a la geología de minas. Madrid, España: Ediciones GEMM.
- Pascale, G., 2021. Comment on "Crustal faults in the Chilean Andes: geological constraints and seismic potential" by, *Andean Geology* 46 (1): 32-65. *Andean Geology*. 48(1): 175-183.
- PCI Geomatics, 2022. CATALYST. LINE: Lineament Extraction. Disponible en línea <https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/references/pciFunction_r/easi/E_line.html>, consulta: 12 de diciembre de 2022.
- Pérez, Daniel José; Ducart, Diego Fernando; Crósta, Alvaro Penteadó, Mapeo geológico con datos ASTER y ETM en Sierra de Umango (29°00' S) Sierras Pampeanas Occidentales, Provincia de La Rioja, Argentina, En Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13 (SBSR), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2007. p. 2103-2110.
- Pour, Amin y Hashim, Mazlan, The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits, *Ore geology reviews*, 2012, vol. 44, p. 1-9.
- Ramli, M. F., Yusof, N., Yusoff, M. K., Juahir, H., Shafri, H. Z. M., 2010, Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review, *Bulletin of engineering Geology and the Environment*, 69(2), 215-233.
- Ramadan, T., Onsi, H., 2003. Use of ERS-2 SAR and Landsat TM images for geological mapping and mineral exploration of Sol Hamid Area, South Eastern Desert, Egypt, *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 6: 13-24.
- Red Geomatica, 2022, Capítulo I: Introducción a la Cartografía Temática, <http://redgeomatica.rediris.es/cart02/arb01T/cart0T/Tcap1/1_10.htm>, consulta: 28 de diciembre de 2022.
- Reyes Rivera, L., Caldas Vidal, J, 1987, Geología de los cuadrángulos de: Las Playas 9-c, La Tina 9-d, Las Lomas 10-c, Ayabaca 10-d, San Antonio 10-e, Chulucanas 11-c, Morropón 11-d, Huancabamba 11-e, Olmos 12-d, Pomahuanca 12-e [Boletín A 39].
- Rodríguez, K., Martínez, A., 2012, Aplicación de datos Aster para la detección de zonas de alteración en los alrededores del A° del Guindo, Cordillera Frontal de Mendoza, Argentina.
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), 2005, Contribuciones técnicas Proyecto GEOSAT-AR, 2005. Instituto de Geología y Recursos Minerales y JICA. Mapeo Geológico Regional con la utilización de datos Satelitales de última generación en la república Argentina.
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), 2007, Secretos de la Tierra, Museo Participativo Minero.
- Singhroy, V., 1995, SAR integrated techniques for geohazard assessment, *Adv. Space Res*, 15: 67-78.
- Song, C., Woodcock, C., Seto, K., Lenney M., Macomber, S., 2001, Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects?, *Remote Sensing of Environment*, 75: 230-244.

- Suarez-Burgoa, L., 2017, Mathematization of geology, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41): 30-38.
- Thomas, A., Radzuma, T., Mukosi, N., 2022, Usefulness of Sentinel-2 satellite data to aid in geoscientific mapping work: a case study of Giyani Greenstone Belt area. *Episodes Journal of International Geoscience*.
- Thurmond, A. K., Abdelsalam, M. G., Thurmond, J. B., 2006, Optical-radar-DEM remote sensing data integration for geological mapping in the Afar Depression, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 44(2), 119-134.
- United States Geological Survey (USGS), 2019, <<https://landsat.usgs.gov/>>, consulta: 06 de junio de 2019.
- Villalta, M., Viña, A., Larreta, E., Romero, P., Mulas, M., 2022, Lineament Extraction from Digital Terrain Derivate Model: A Case Study in the Girón–Santa Isabel Basin, South Ecuador. *Remote Sensing*, 14(21), 5400.
- Yamaguchi, Y. 1987, Possible techniques for lithologic discrimination using the short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1. *Remote Sensing of Environment*, 23(1), 117-129.
- Yépez, B., 2015, Análisis gráfico lineal y reinterpretación geométrica de la morfología y tectónica del sur de Ecuador: 3 pp, <http://www.viaminera.com/uploads/1/2/5/9/125973241/yepez_sapele_v2.pdf>, consulta: 28 de noviembre de 2022.

PIE DE FIGURAS

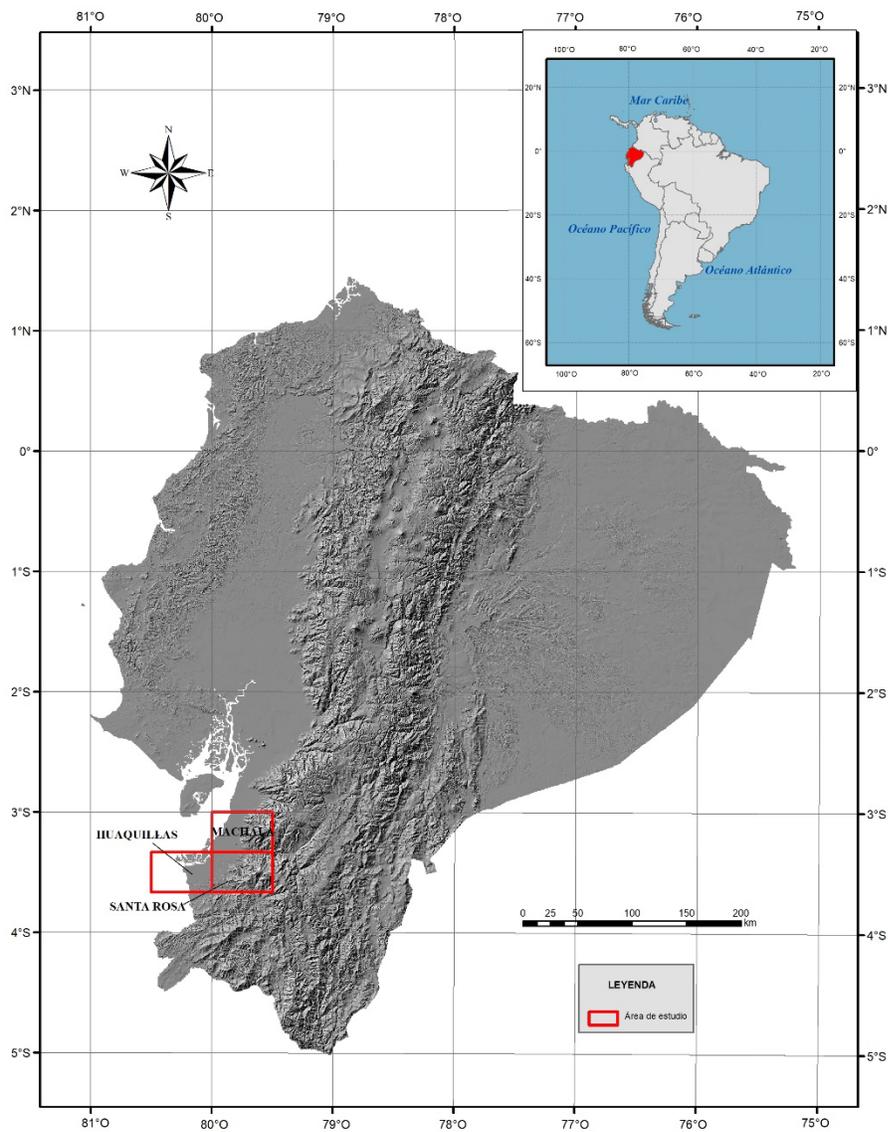


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Hojas: Machala, Huaquillas y Santa Rosa, escala 1:100,000, sobre el mapa sombreado de relieve MDE-SRTM 30 m. Proyección UTM-17S. Datum WGS84. Fuente: NASA, 2013

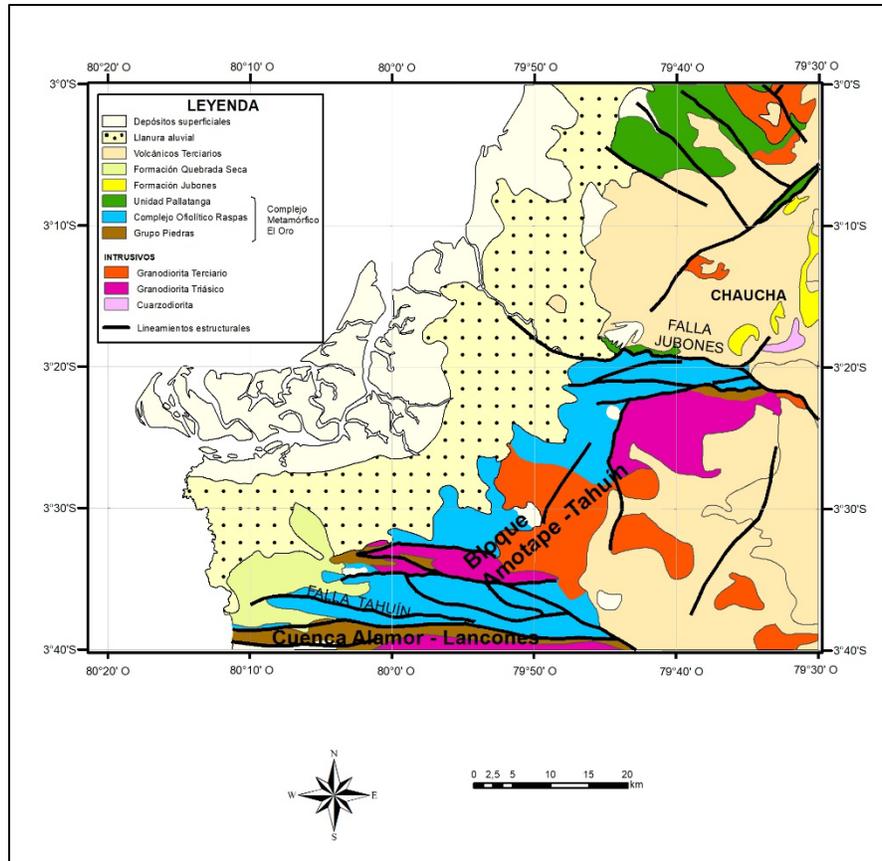


Figura 2. Mapa geológico regional del área de estudio. Fuente: IIGE, 2017

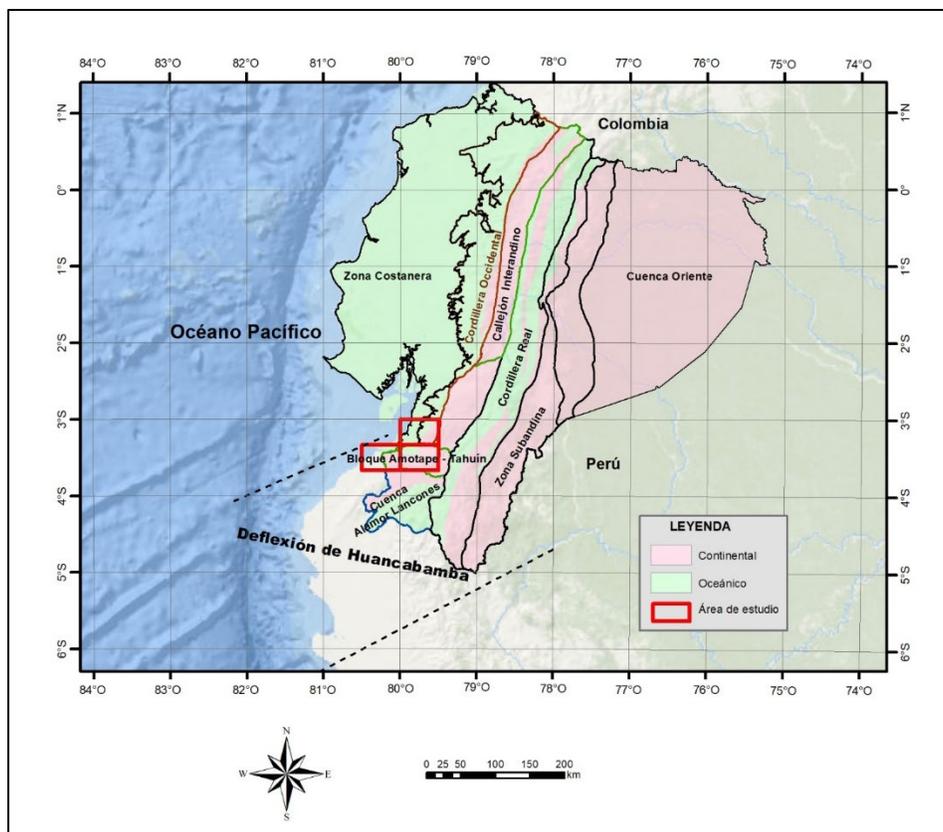


Figura 3. Terrenos litoestratigráficos, dominios morfoestructurales del Ecuador y Deflexión de Huancabamba. Fuente: Paladines A., 1996; IIGE, 2017. Crédito Mapa Base: ESRI, Garmin, GEBCO, NOAA N GDC y otros.

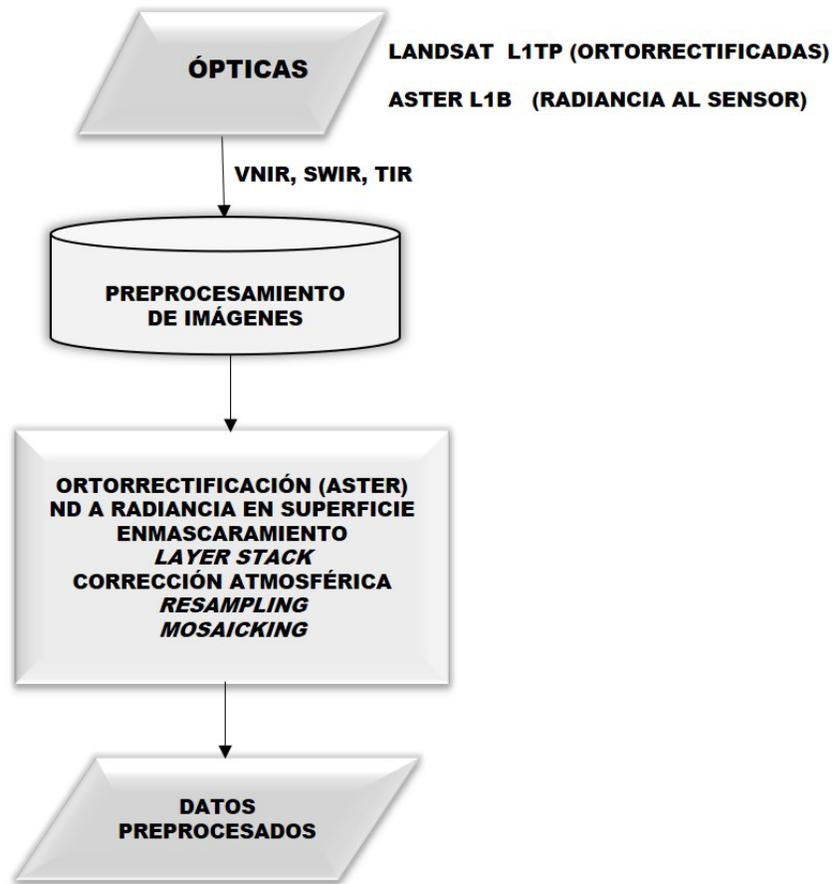


Figura 4. Flujograma metodológico de preprocesamiento de imágenes ópticas

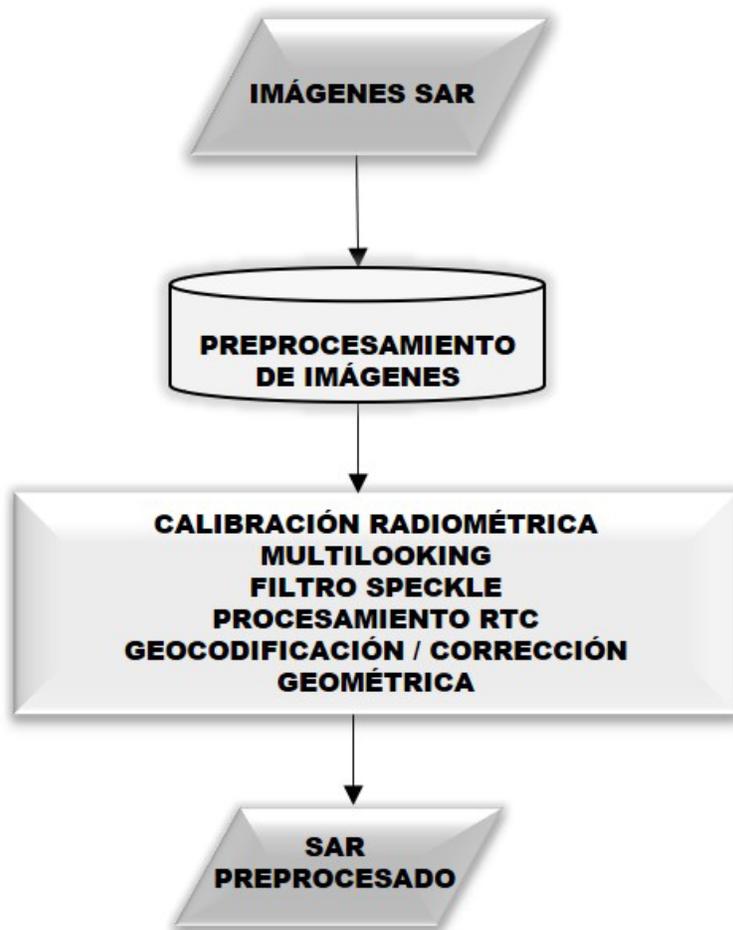


Figura 5. Flujograma metodológico de preprocesamiento SAR

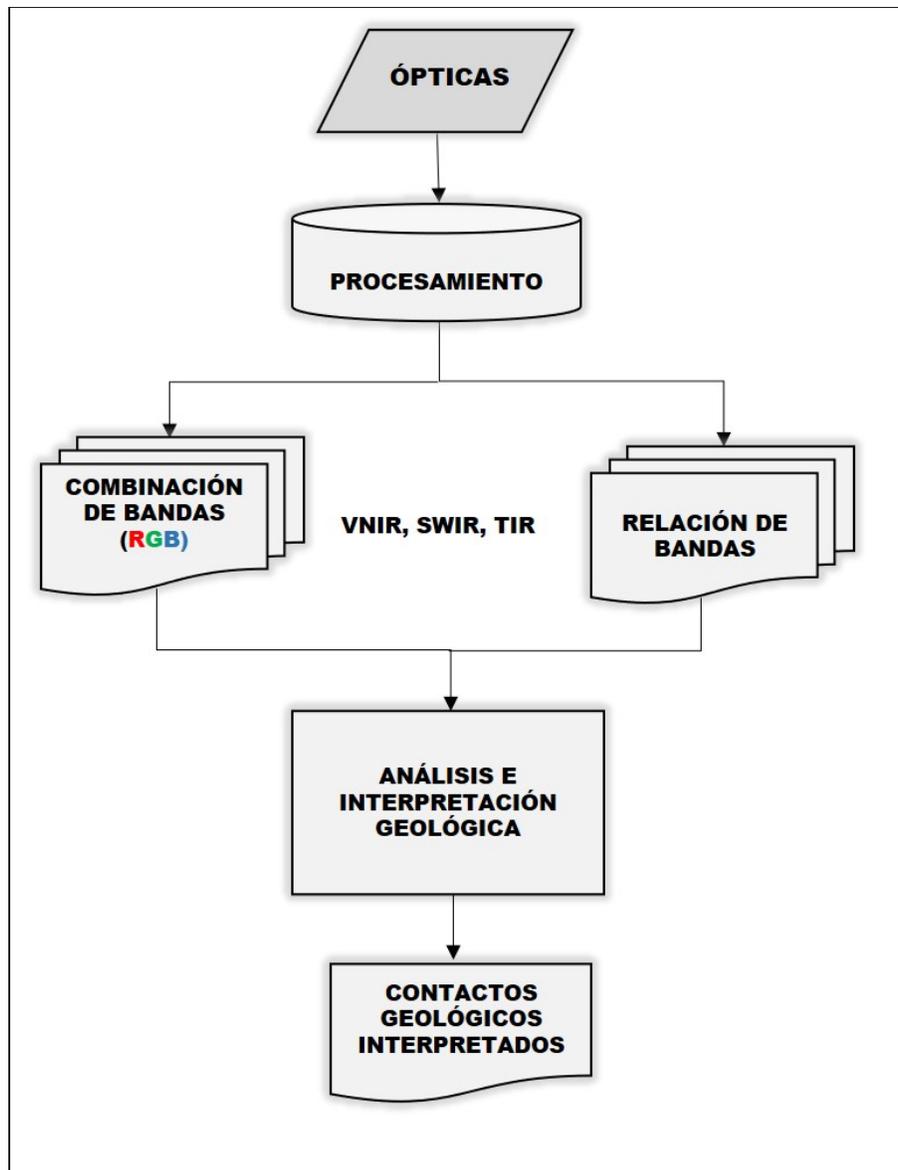


Figura 6. Flujograma metodológico para análisis e interpretación geológica

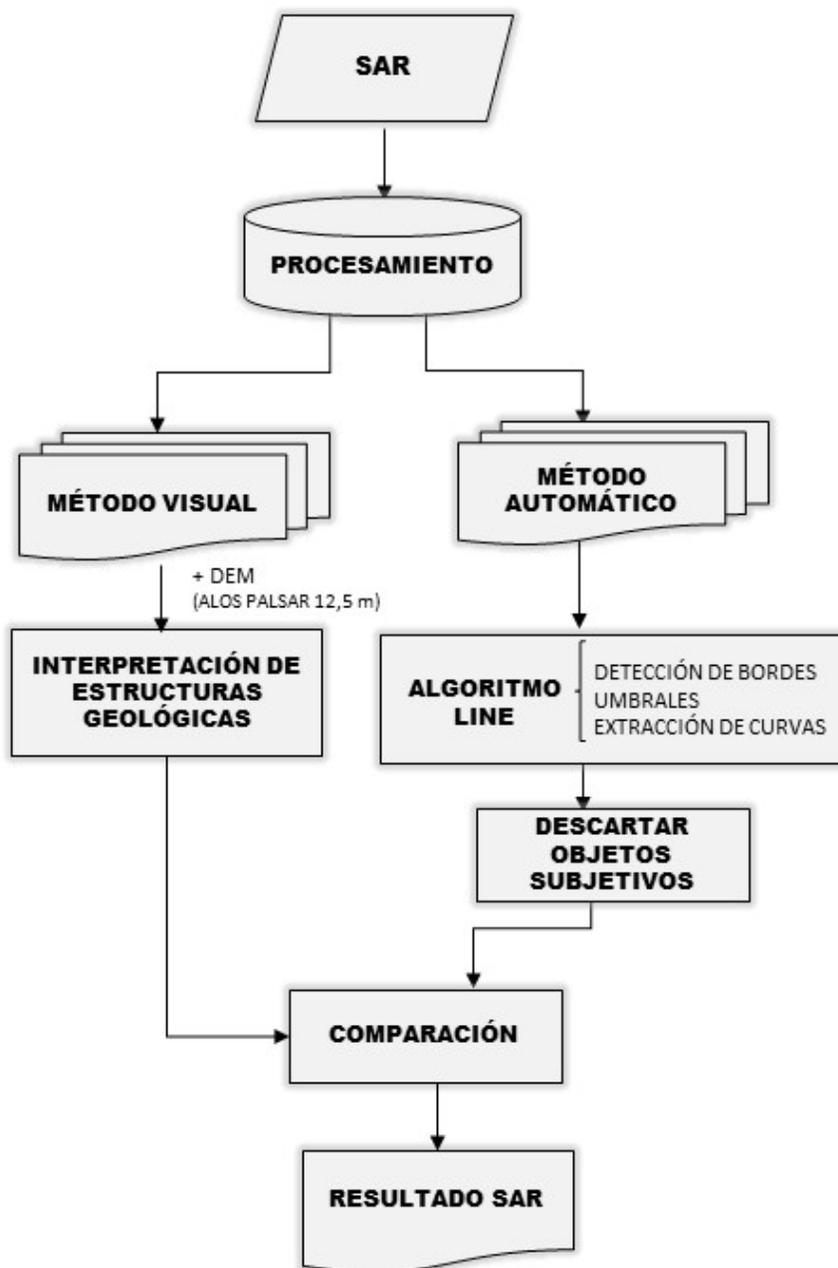


Figura 7. Flujograma metodológico para interpretación de estructuras geológicas

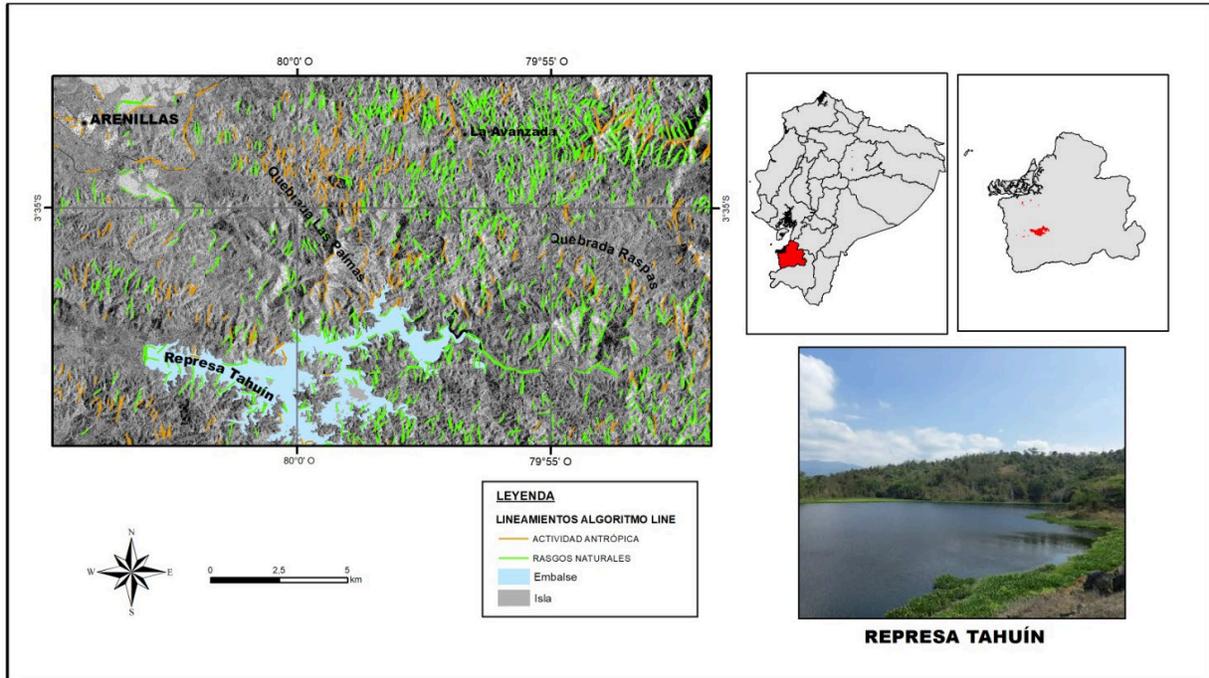


Figura 8. Líneas extraídas por el algoritmo LINE en la Represa Tahuín

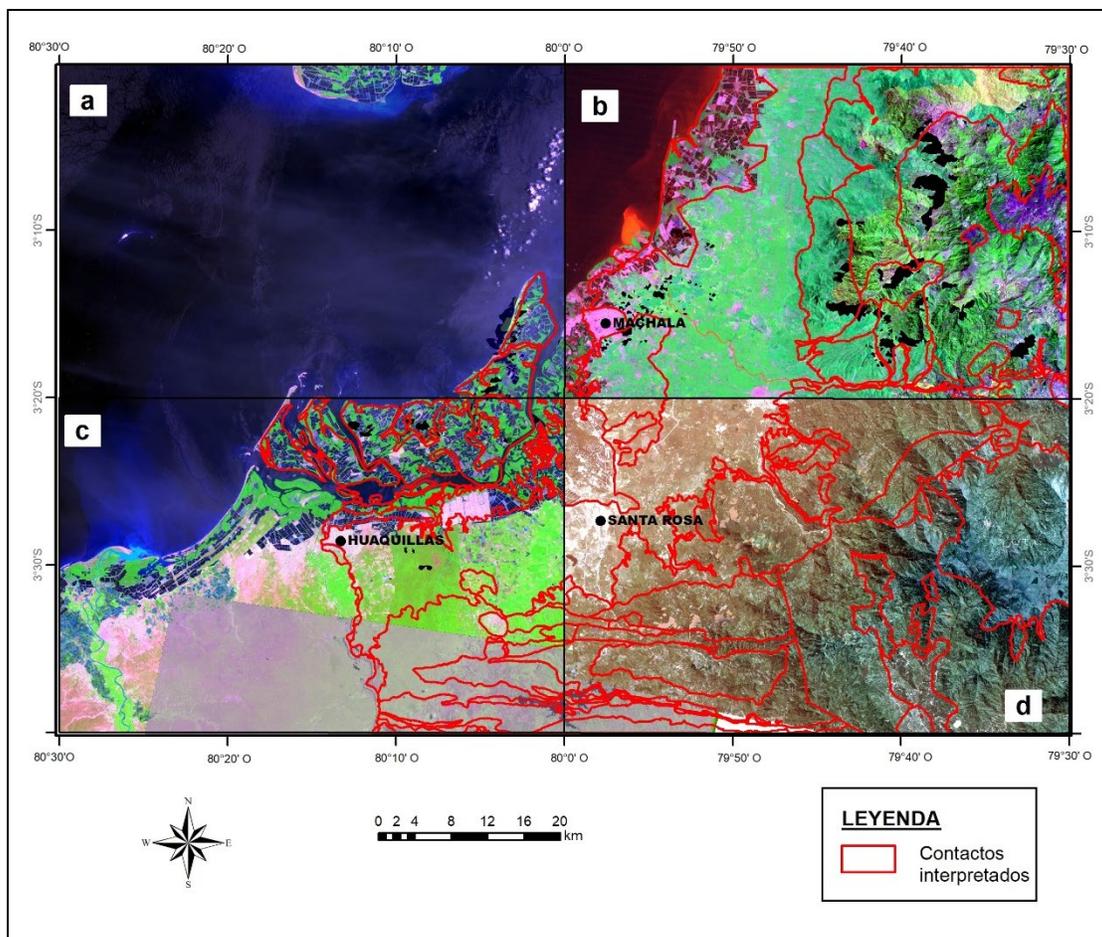


Figura 9. Contactos geológicos superpuestos en mosaicos de composiciones falso color RGB. A) imagen ASTER, combinación de bandas 742; b) imagen ASTER, combinación de bandas 247; c) imagen ASTER, combinación de bandas 742 y 435; d) Imagen Landsat, combinación de bandas 482.

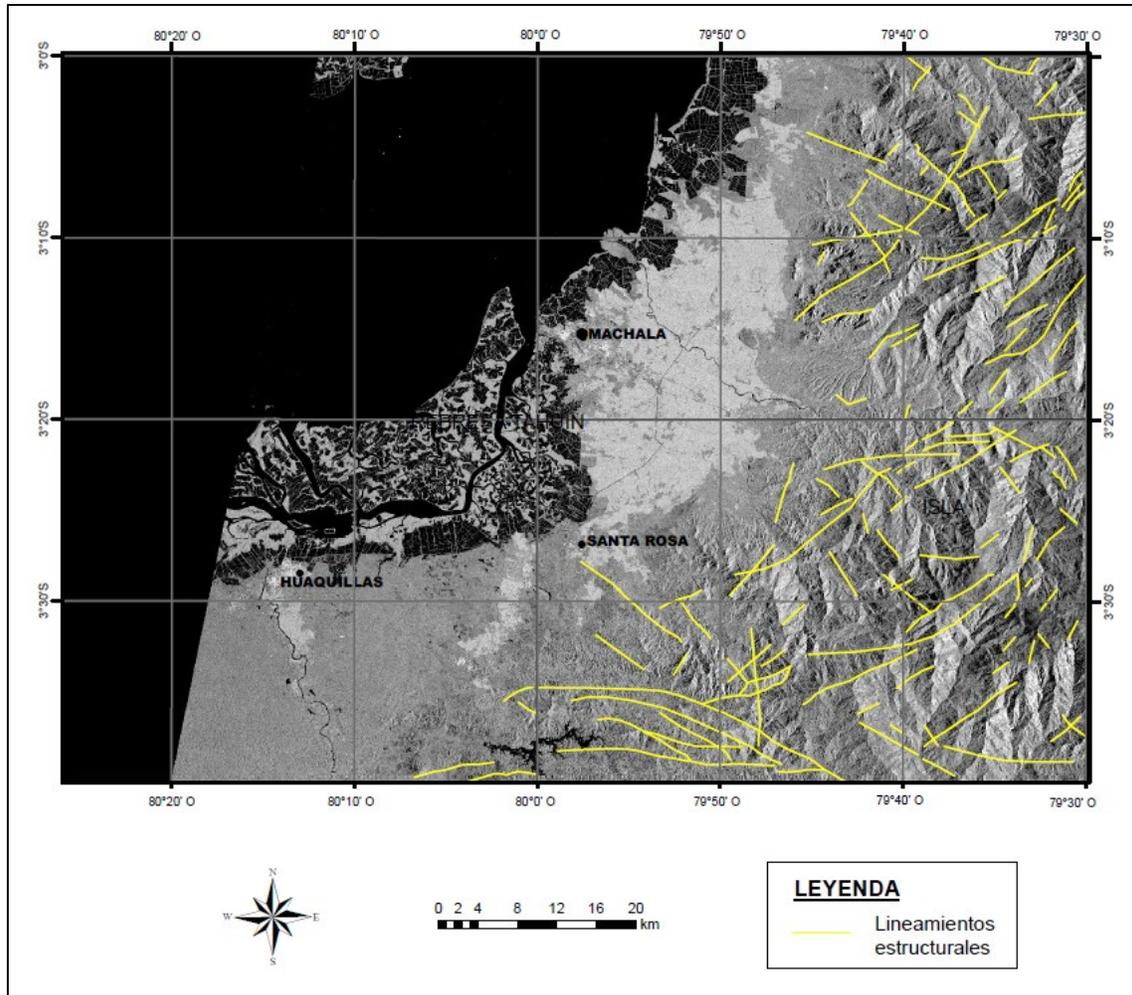
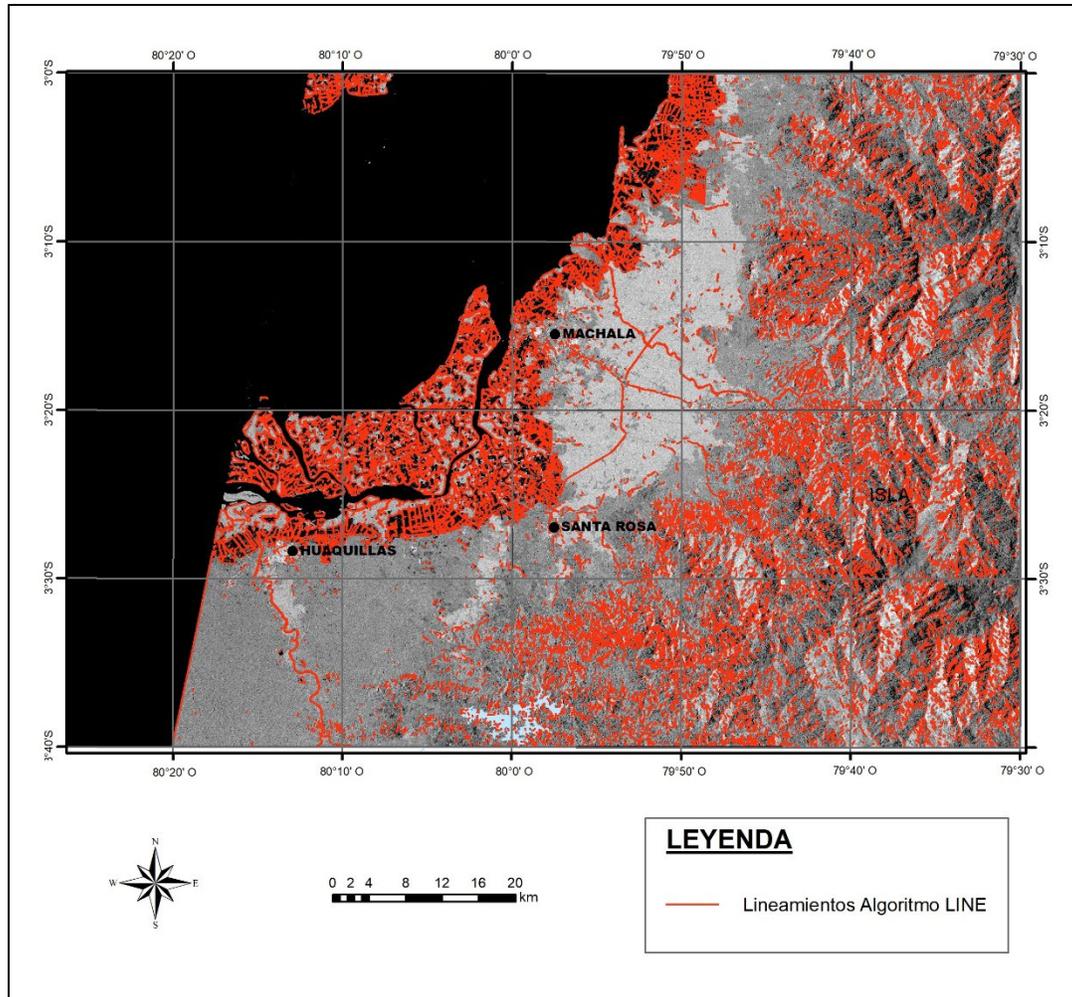
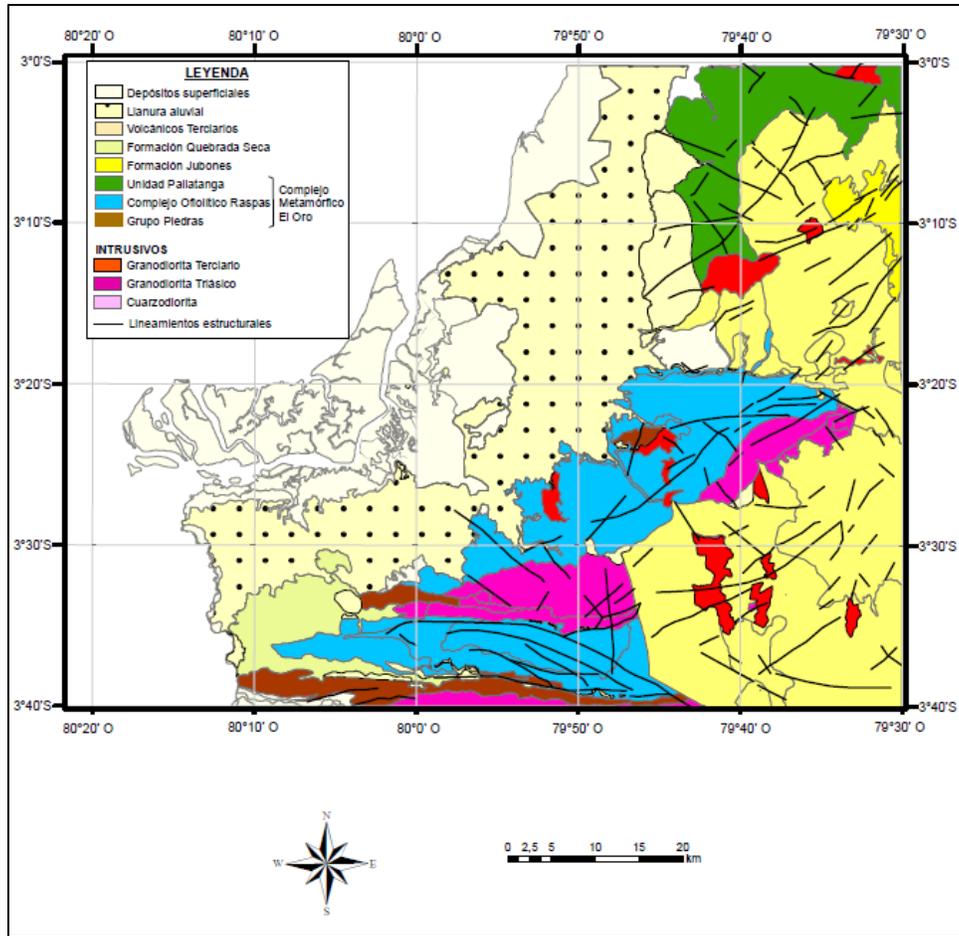


Figura 10. Estructuras geológicas superpuestas en la imagen de radar de alta resolución TerraSAR X



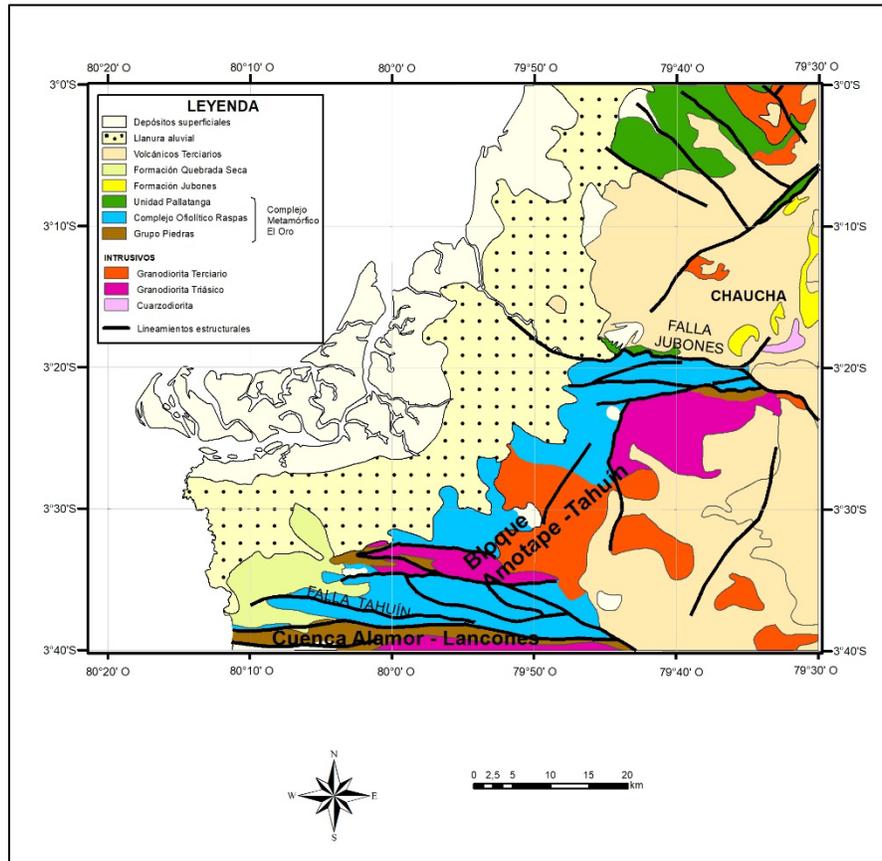
Figuras 11. Mapa de lineamientos estructurales detectados con LINE



Figuras 12. Mapa geológico interpretado del área de estudio: Contactos geológicos y lineamientos estructurales

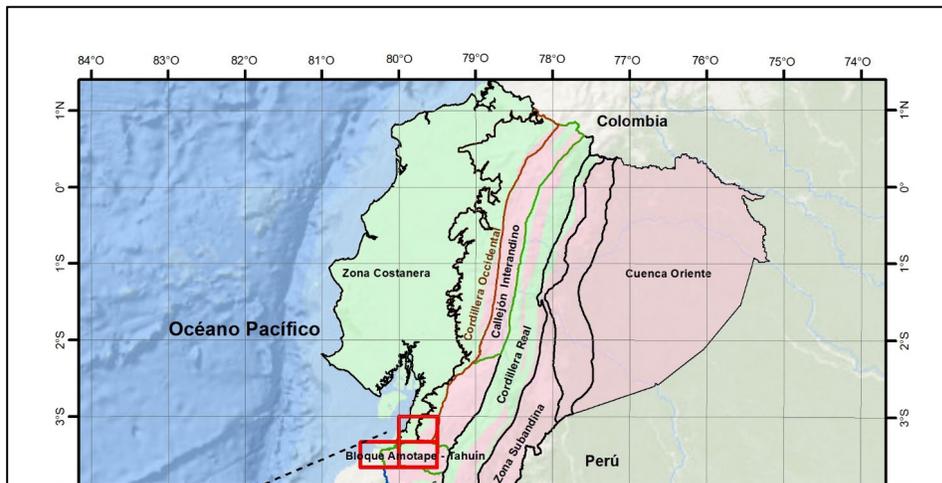
Figura 1

Figura 2



Fuente: IIGE, 2017

Figura 3



Fuente: Paladines A., 1996; IIGE, 2017

Crédito Mapa Base: ESRI, Garmin, GEBCO, NOAA N GDC y otros

Figura 4

Autor

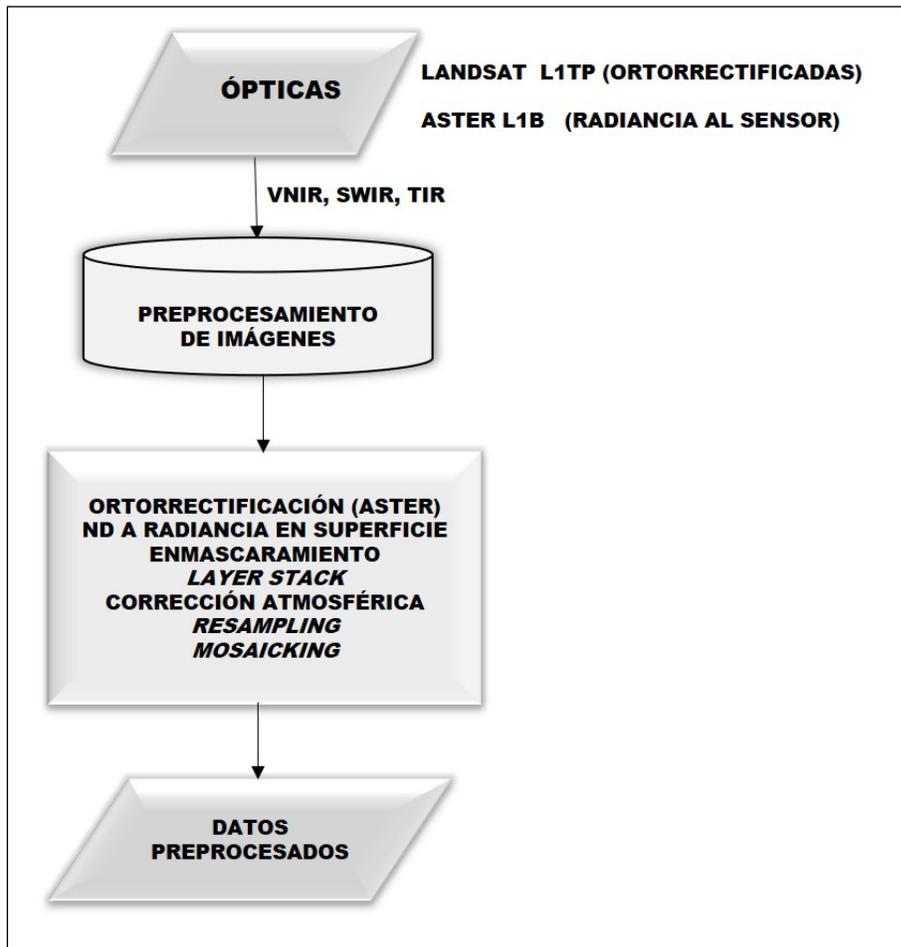


Figura 5

Autor

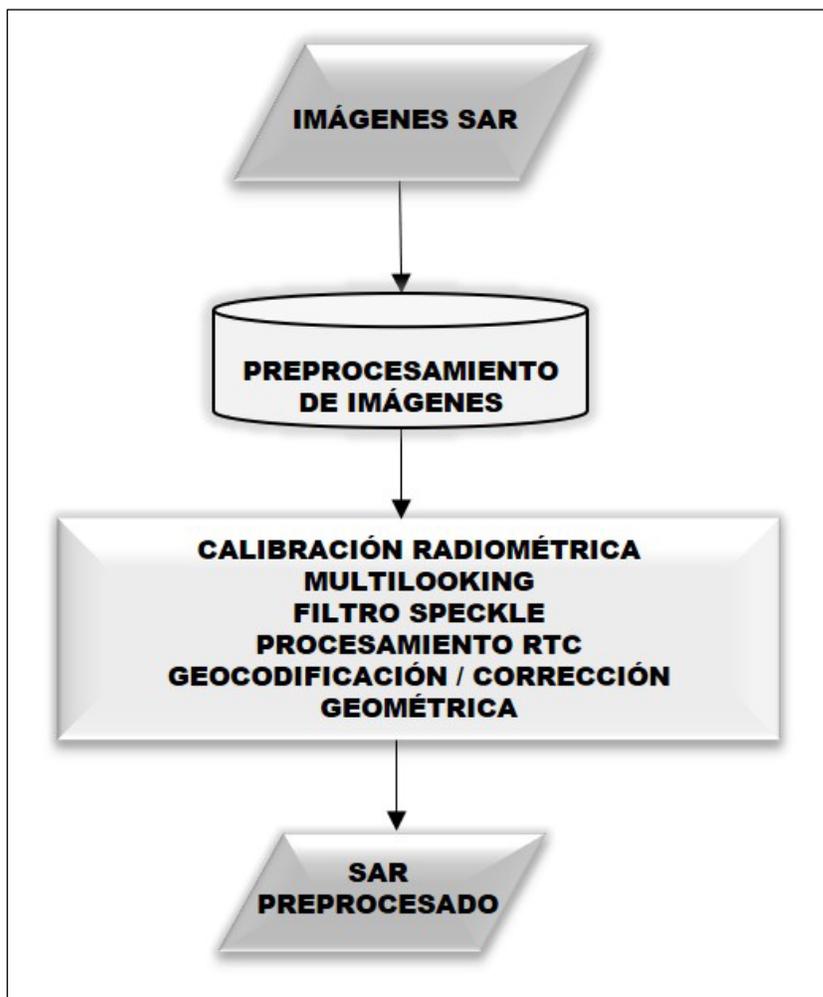


Figura 6

Autor

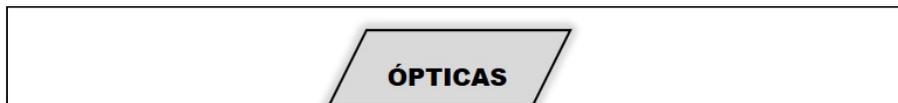


Figura 7

Autor

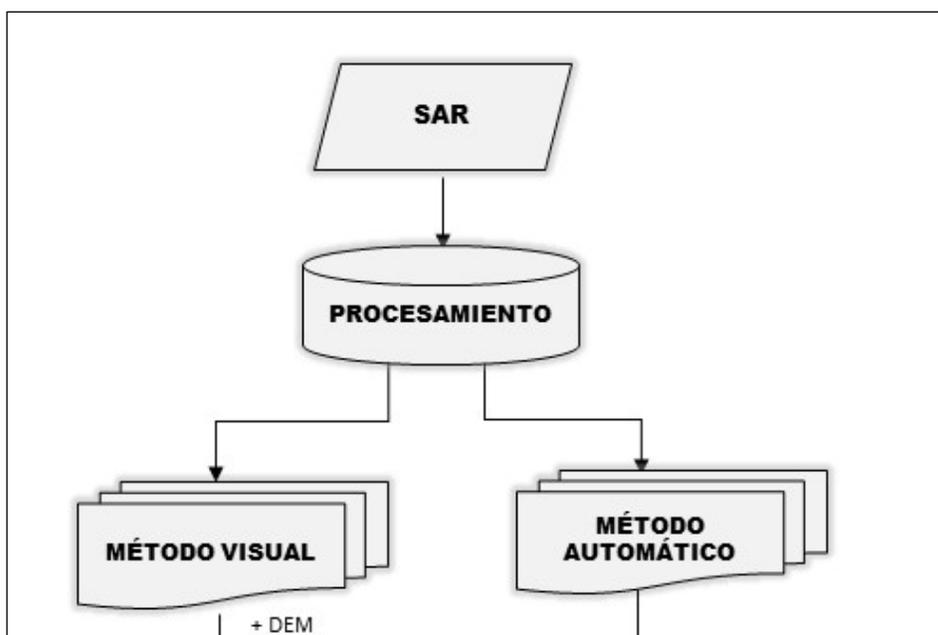


Figura 8

Autor

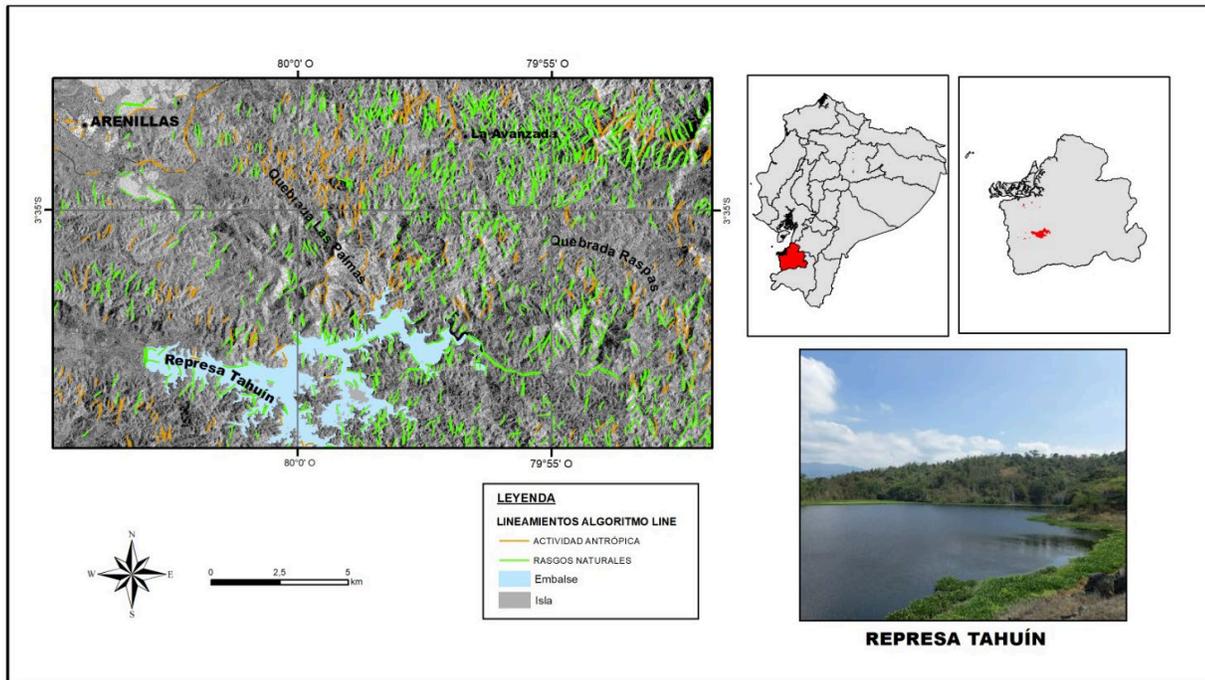


Figura 9

Autor

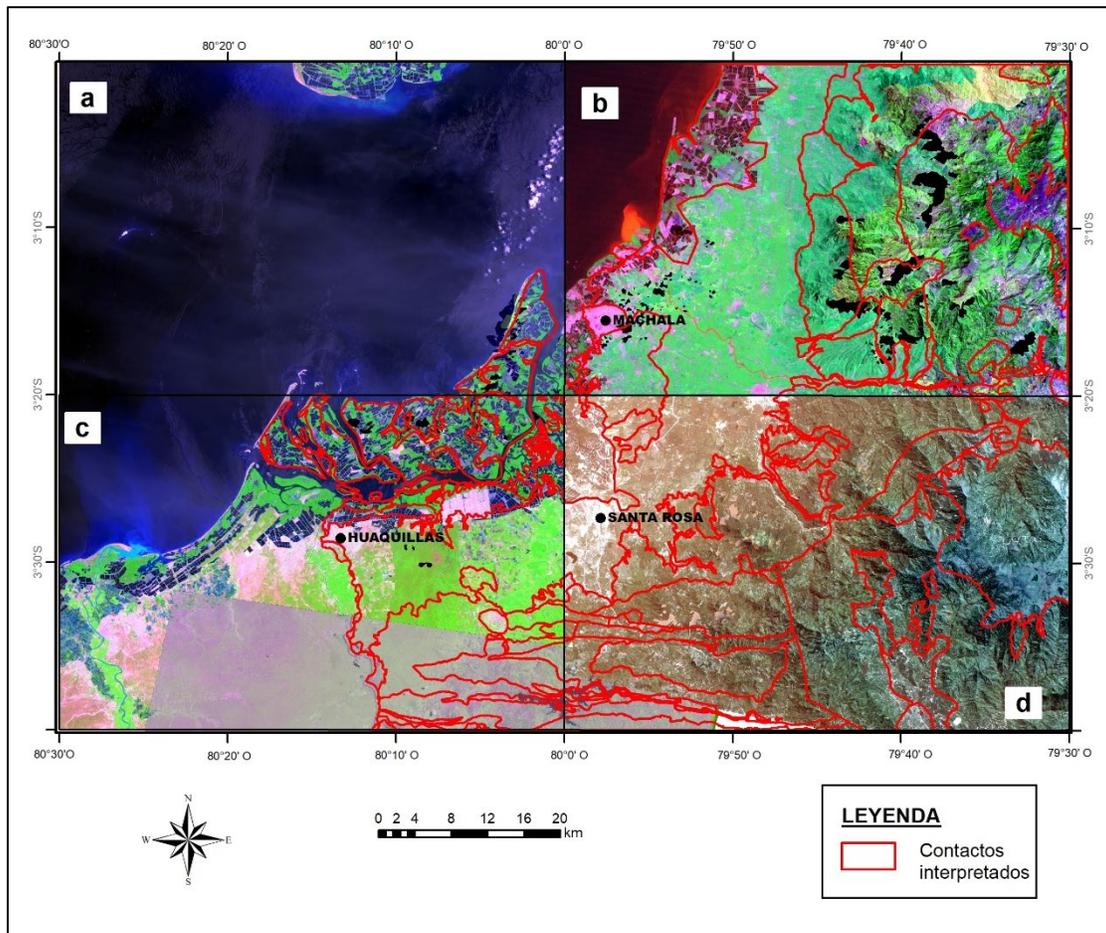


Figura 10
Autor

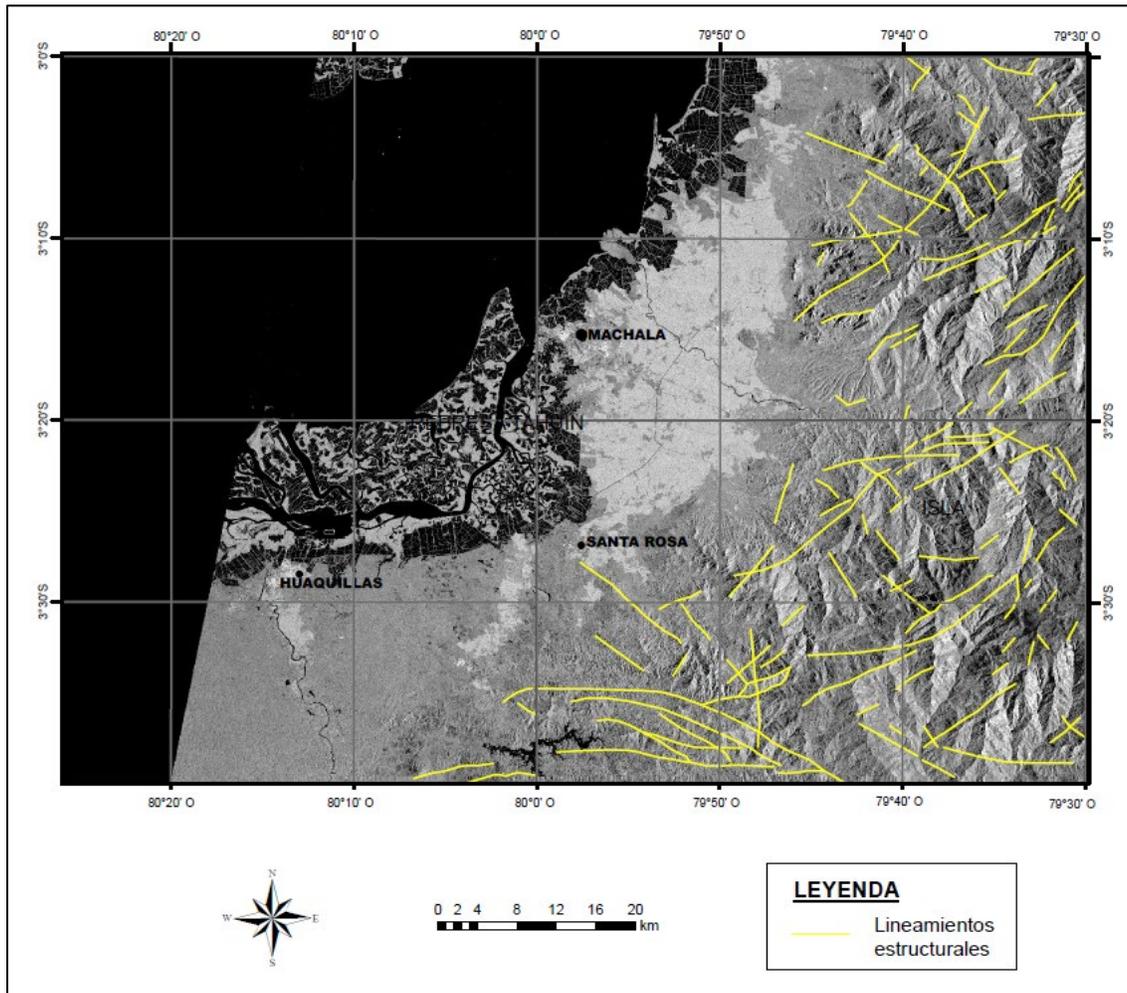


Figura 11

Autor

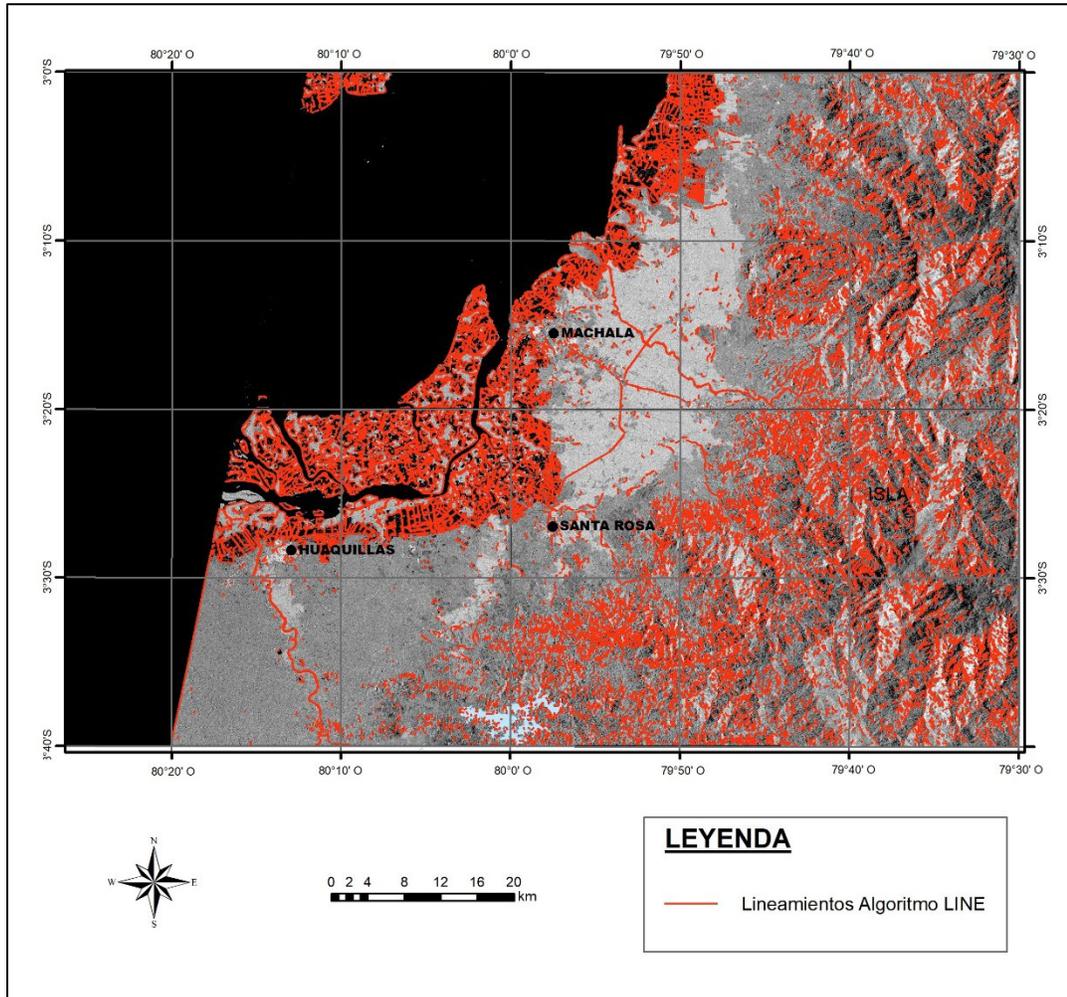
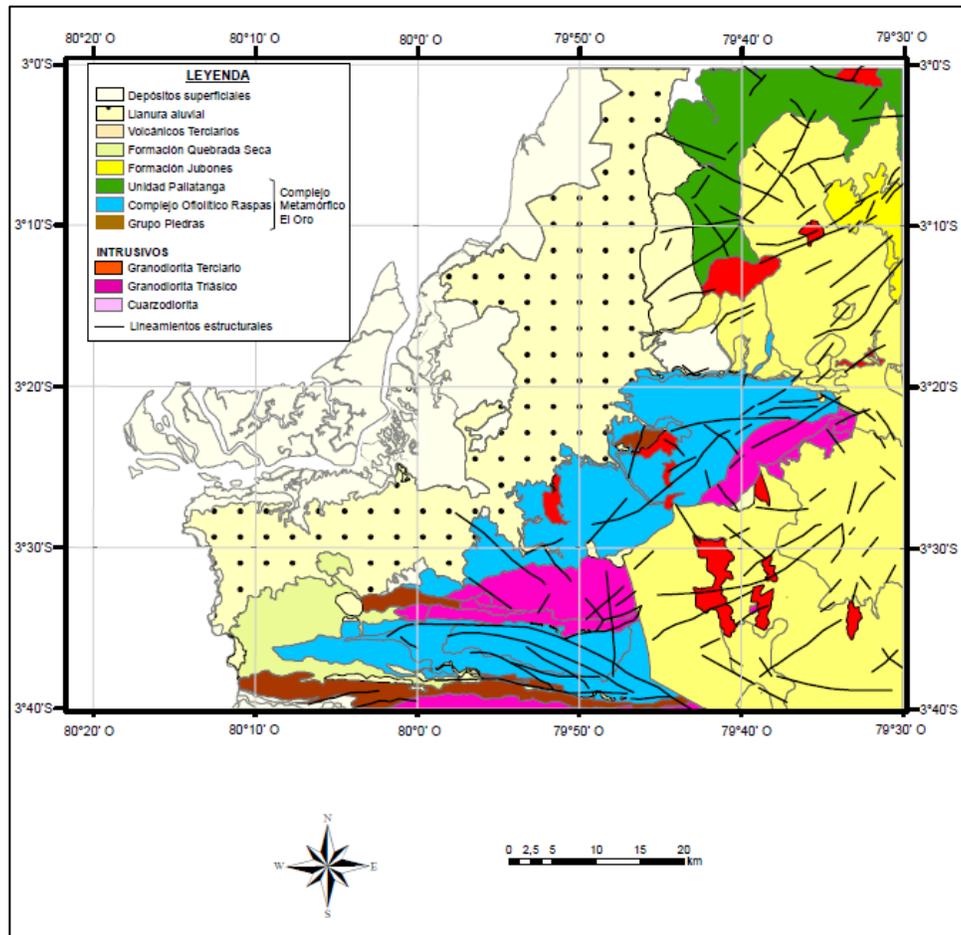


Figura 12

Autor



TABLAS

Tabla 1a. Imágenes satelitales ópticas Landsat-8 OLI

| CÓDIGO | PATH | ROW | NIVEL DE PROCESAMIENTO | COBERTURA NUBOSA (%) | FECHA DE TOMA |
|--|------|-----|------------------------------|-------------------------|------------------|
| LC08_L1TP_011062_20140802_20170420_01_T1 | 11 | 62 | | 38 | 20-04-2017 |
| LC080100622014191LGN00 | 10 | 62 | | 34 | 2017-04-27 |
| LC08_L1TP_010062_20170920_20200903_02_T1 | 10 | 62 | L1TP | 35 | 2020-09-03 |
| LC08_L1TP_010062_20180907_20180912_01_T1 | 10 | 62 | | 35 | 2018-09-12 |
| LC08_L1TP_010063_20180907_20180912_01_T1 | 10 | 63 | | 11 | 2018-09-12 |

Tabla 1b. Características imágenes Landsat-8 OLI

| BANDAS | RANGO ESPECTRAL (μm) | RESOLUCIÓN ESPACIAL (m) | DENOMINACIÓN | SENSOR |
|--------|---|-------------------------------|-------------------------|--------|
| 1 | 0.435 - 0.451 | 30 | Costera/Aerosol Visible | OLI |
| 2 | 0.452 - 0.512 | 30 | Blue Visible | OLI |
| 3 | 0.533 - 0.590 | 30 | Green Visible | OLI |
| 4 | 0.636 - 0.673 | 30 | Red Visible | OLI |
| 5 | 0.851 - 0.879 | 30 | NIR | OLI |
| 6 | 1.566 - 1.651 | 30 | SWIR 1 | OLI |
| 7 | 2.107 - 2.294 | 30 | SWIR 2 | OLI |
| 8 | 0.503 - 0.676 | 15 | Pancromática | OLI |
| 9 | 1.363 - 1.384 | 30 | Para nubes (cirrus) | OLI |
| 10 | 10.60 - 11.19 | 100 | Térmico 1 | TIRS |
| 11 | 11.50 - 12.51 | 100 | Térmico 2 | TIRS |

Fuente: USGS, 2019; NASA, 2022

Tabla 2a. Imágenes satelitales ópticas ASTER

| CÓDIGO | FORMATO | FECHA DE TOMA | COBERTURA TEMPORAL | EXTENSIÓN ESPACIAL | SUPERFICIE |
|---------------|-----------|---------------|------------------------|--------------------|---------------|
| AST-L1B-14139 | | | | | |
| AST-L1B-49486 | | | | | |
| AST-L1B-09883 | | | | | |
| AST-L1B-22386 | HDF / DAT | 2001 -2007 | 2000-03-04 al presente | Global | 60 km x 60 km |
| AST-L1B-22381 | | | | | |
| AST-L1B-10897 | | | | | |
| AST-L1B-14654 | | | | | |

Tabla 2b. Características imágenes ASTER

| BANDA | RANGO ESPECTRAL μm | SUBSISTEMA | RESOLUCIÓN ESPACIAL (m) | RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA (bits) | RESOLUCIÓN TEMPORAL (días) |
|-------|-------------------------------|------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.52-0.60 | | | | |
| 2 | 0.63-0.69 | | | | |
| 3N | 0.78-0.86 | VNIR | 15 | 8 | |
| 3B | 0.78-0.86 | | | | |
| 4 | 1.600-1.700 | | | | |
| 5 | 2.145-2.185 | | | | |
| 6 | 2.185-2.225 | SWIR | 30 | 8 | |
| 7 | 2.235-2.285 | | | | 16 |
| 8 | 2.295-2.365 | | | | |
| 9 | 2.360-2.430 | | | | |
| 10 | 8.125-8.475 | | | | |
| 11 | 8.475-8.825 | | | | |
| 12 | 8.925-9.275 | TIR | 90 | 12 | |
| 13 | 10.25-10.95 | | | | |
| 14 | 10.95-11.65 | | | | |

Fuente: ERSDAC

Tabla 3. Principales características de las imágenes radar empleadas

| | ALOS 1 | Sentinel-1B | TerraSAR X |
|-----------------------------------|---------------------------------|---|--|
| Agencia | JAXA – Cross Restec | Agencia Espacial Europea (ESA) | Centro Alemán de Datos de Teledetección (DFD) y EADS Astrium |
| Instrumento | PALSAR | SAR | SAR |
| Banda | L | C | X |
| Longitud de onda | 30 - 15 | 7.5 - 3.8 | 3.8 - 2.4 |
| Fecha | 2011-03-13 2011-04-05 | 2019-03-25 | 2016-02-25 |
| Frecuencia (GHz) | 1 - 2 | 4 - 8 | 8 - 12 |
| Ciclo de repetición (días) | 46 | 6 | 11 |
| Polarización | Cuadratura | VV + VH | HH |
| Dirección de órbita | Ascendente | Ascendente | Descendente |
| Modo del haz | PLR | <i>Interferometric Wide Swath (IW)</i> | <i>ScanSAR (SC)</i> |
| Resolución espacial (m) | 30 | 5 | 18 |
| Tipo de producto | 1.1 Complex | SLC | L1B |
| Nivel de producto | <i>Hi-Res Terreno Corregido</i> | <i>L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD)</i> | EEC* |

*Enhanced Ellipsoid Corrected

Fuente: ASF, ESA, GEOSPATIAL, AIRBUS

Tabla 4. Combinaciones de bandas RGB de ASTER

| R | G | B | CARACTERÍSTICA | SENSOR | FUENTE |
|----------|----------|----------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| 12 | 7 | 2 | Geología | ASTER | INIGEMM, 2013 |
| 14 | 5 | 1 | Contactos geológicos | ASTER | INIGEMM, 2013 |
| 3 | 2 | 1 | Contactos geológicos | ASTER | INIGEMM, 2013 |
| 3 | 4 | 5 | Contactos geológicos | ASTER | INIGEMM, 2013 |
| 6 | 3 | 1 | Litología | ASTER | Pérez et al., 2007 |
| 4 | 6 | 8 | Indicios minerales | ASTER | SEGEMAR, 2005 |
| 7 | 4 | 1 | Interpretación geológica | Landsat | Marchionni y Tessone, 2009 |
| 7 | 4 | 2 | Estructuras | ASTER | Abrams et al., 1988 |
| 7 | 3 | 1 | Litología | ASTER | SEGEMAR, 2005; |
| 7 | 3 | 1 | Interpretación geológica | ASTER | Marchionni y Tessone, 2009 |
| 6 | 5 | 4 | Alteraciones hidrotermales | ASTER | SEGEMAR, 2005 |
| 3/1 | 4/6 | 7/5 | Alteraciones hidrotermales | ASTER | Rodríguez y Martínez, 2012 |
| 4/1 | 3/1 | 12/14 | Geología | ASTER | Aboelkhair et al., 2020 |
| 4/5 | 4/6 | 4/8 | Alteraciones hidrotermales | ASTER | Marquetti et al., 2005 |
| 4/5 | 4/6 | 4/7 | Alteraciones hidrotermales | ASTER | SEGEMAR, 2005 |
| 4/8 | 4/2 | 8/9 | Zonas de alteración | ASTER | Pour y Hashim, 2011 |
| 3/1 | 5/4 | 5/7 | Contactos geológicos | ASTER | INIGEMM, 2013 |

Tabla 5. Parámetros del algoritmo LINE predeterminados y calculados

| Nro. | Name | Description | Unit | Data range | Value | Range default |
|------|------|-------------------------------------|--------|------------|-----------|---------------|
| 1 | RADI | Radio de filtro en píxeles | pixels | 0 - 8192 | 5 | 5-100 |
| 2 | GTHR | Umbral de gradiente de borde | pixels | 0-255 | 50 | 5-255 |
| 3 | FTHR | Umbral del error de ajuste de línea | pixels | 0 - 8192 | 20 | 5-100 |
| 4 | LTHR | Umbral de la longitud de la curva | pixels | 0 - 8192 | 3 | 1-100 |
| 5 | ATHR | Umbral de diferencia angular | pixels | 0 - 90 | 30 | 0-90 |
| 6 | DTHR | Umbral para vincular la distancia | pixels | 0 - 8192 | 20 | 5-100 |

Fuente: PCI Geomatics

Tabla 6. Objetos obtenidos con método automático

| No. LINEAMIENTOS | BORDE - CATEGORÍA OBJETO |
|------------------|--|
| 20480 | Total de líneas detectadas |
| 6652 | Cuerpo de agua, camaronera (infraestructura antrópica), ríos, embalse, isla, manglar, pasto cultivado, urbano, vías. |
| 13828 | Lineamientos, fallas, líneas de crestas |

Tabla 7. Similitud entre las áreas de las unidades geológicas interpretadas y publicadas para el área de estudio

| | Contactos Interpretados | Mapa publicado | Porcentaje similitud | Promedio similitud |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| | Área (km ²) | Área (km ²) | (%) | (%) |
| Complejo Ofiolítico Raspas | 640,7 | 520,4 | 81 | |
| Grupo Piedras | 113,1 | 116 | 98 | |
| Llanura aluvial | 945,7 | 988,6 | 96 | |
| Granodiorita Triásico | 240,5 | 247 | 97 | 81 |
| Formación Quebrada Seca | 129 | 125,2 | 97 | |
| Granodiorita Terciaria | 65,4 | 343,6 | 19 | |