



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Exploración de reconocimiento de zona con
potencial geotérmico en las localidades de
Loreto – San Cosme, Baja California Sur.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

María Fernanda Coria Buendía

DIRECTORA DE TESIS

Rosa María Prol Ledesma



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi directora de tesis la doctora Rosa María Prol por la paciencia y el apoyo ofrecido para el desarrollo de este trabajo. También agradezco a mis sinodales por tomarse el tiempo para revisar y dar comentarios que hicieron que este trabajo mejorara.

Al proyecto CeMIE-Geo P-01 "Mapas de Gradiente Geotérmico y Flujo de Calor para la República Mexicana" por el apoyo para la elaboración de mi tesis de licenciatura.

Agradezco a mi familia y principalmente a mis papás por darme siempre el apoyo para salir adelante.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 JUSTIFICACIÓN	3
1.2 OBJETIVO.....	4
1.3 GEOTERMIA.....	4
2. ÁREA DE ESTUDIO	8
2.1 LOCALIZACIÓN.....	8
2.2 ANTECEDENTES	9
2.3 GEOLOGÍA REGIONAL.....	10
2.4 GEOLOGÍA LOCAL	12
3. METODOLOGÍA	15
3.1 DESCRIPCIÓN DE IMÁGENES.....	16
3.2 PREPROCESAMIENTO	18
3.3 PROCESAMIENTO	19
3.3.1 Realce espectral	19
3.3.2 Realce espacial	22
4. RESULTADOS	25
4.1 PREPROCESAMIENTO	25
4.2 PROCESAMIENTO	26
4.2.1 Realce espectral. Análisis de Componentes Principales.	26
4.2.2 Realce espacial. Técnica de Moore y Waltz (1983) y Modelo Digital de Elevaciones	34
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
6. CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES.....	42
REFERENCIAS.....	43

RESUMEN

En esta tesis se hizo el procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales en forma de archivos ráster para identificar zonas con potencial geotérmico en la parte sur del municipio de Loreto, Baja California Sur en un área aproximada de 1000 km².

Se usaron las imágenes satelitales ASTER 1T y un modelo digital de elevaciones obtenido del INEGI, en los cuales se implementaron métodos de realce espectral y realce espacial para definir zonas de alteración hidrotermal y estructuras geológicas, respectivamente. La validación de los resultados se llevó a cabo con datos obtenidos en campo.

ABSTRACT

The main aim of this work is the identification of hydrothermal alteration and geological structures that may be related to the presence of a geothermal system in the Loreto area (Baja California Sur). Multispectral satellite images, ASTER 1T, were processed applying spectral and spatial enhancement techniques. Additionally, the digital elevation model was processed applying artificial illumination and spatial enhancement to characterize the main geological structures. Further comparison with field data was done to validate the data processing results.

1. INTRODUCCIÓN

Las grandes necesidades energéticas que demanda una población con una actividad productiva y una economía en desarrollo, sin que el medio ambiente resulte afectado en el intento de satisfacerlas, han hecho de las energías limpias una solución ideal para cubrir dichas necesidades.

La energía geotérmica es un tipo de energía limpia obtenida a partir del calor interno de la Tierra. México cuenta con potencial geotérmico en gran parte de su territorio. Dentro del territorio mexicano existen cinco campos de producción de electricidad a partir de energía geotérmica: Cerro Prieto, Los Azufres, Los Hornos, Las Tres Vírgenes y Domo San Pedro, además de que existen nuevas perspectivas geotérmicas en exploración (Arango- Galván *et al.*, 2015). En la figura 1.1 se muestra un mapa actualizado de flujo de calor del país, que fue generado a partir de la producción de calor en la corteza, se puede observar la localización de los campos geotérmicos en el territorio mexicano y las zonas con volcanismo reciente, principalmente la parte central y oeste del país están cubiertas por tonalidades rojizas y naranjas que indican zonas con mayor capacidad geotérmica.

La Península de Baja California ha sido identificada como una región con potencial geotérmico alto. En ella se encuentran dos de los campos productores de electricidad los cuales generan aproximadamente 750 MWe (Arango- Galván *et al.*, 2015). Existen nuevas perspectivas geotérmicas en esta región que incluyen: San Felipe, Puertecitos, Sansiquismunde, Los Volcanes, San Juan Londó-Centavito, Los Cabos, Comondú y San Cosme (Prol-Ledesma y Morán-Zenteno, 2019).

Como parte de la etapa de prefactibilidad y como primer acercamiento a la exploración, este trabajo se enfoca en el estudio de la localidad de San Cosme (incluyendo la zona sur del municipio de Loreto y parte de Comondú), a partir del procesamiento de archivos ráster, con la finalidad de proponer zonas con posible potencial geotérmico.

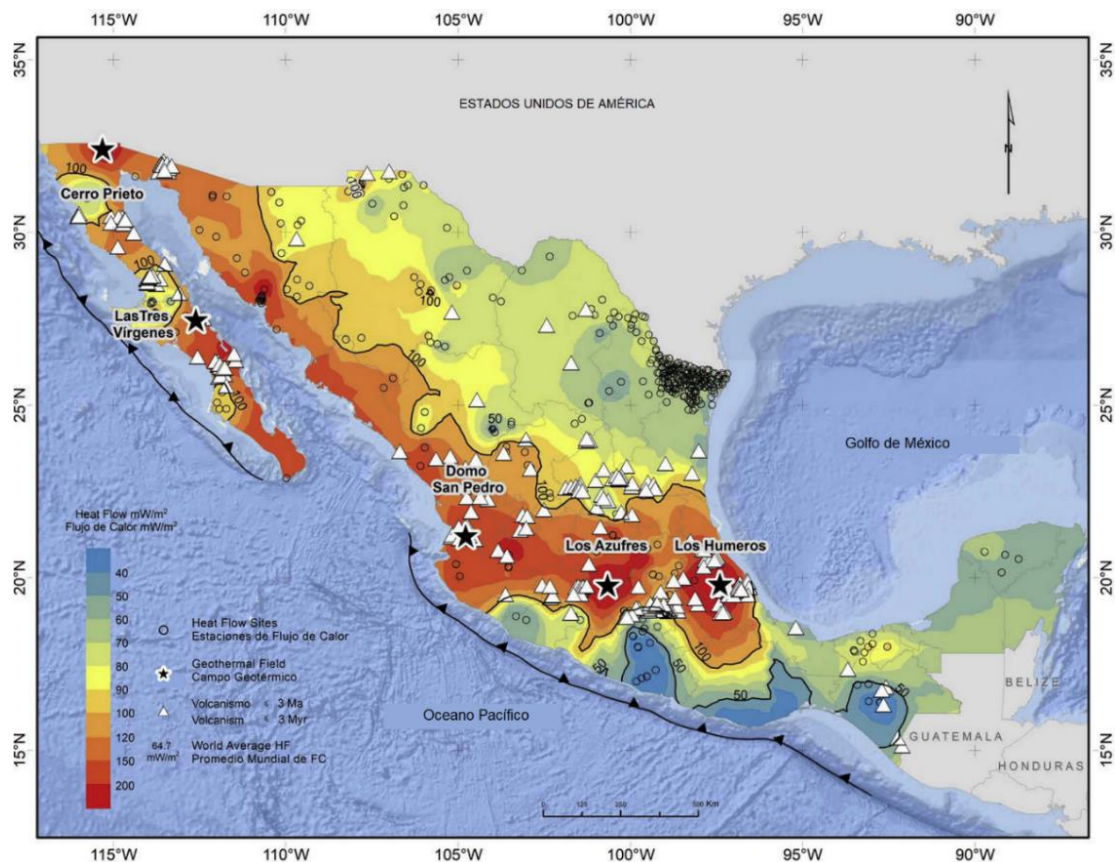


Figura 1.1: Mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos de México (Prol-Ledesma y Morán-Zenteno, 2019)

1.1 JUSTIFICACIÓN

En la localidad de San Cosme, al sur del municipio de Loreto se tienen reportes de termalismo realizados por el Instituto de Geofísica de la UNAM, de aproximadamente 60 °C en superficie, es por eso que la zona resulta atractiva para realizar un estudio geotérmico. Un estudio geotérmico detallado tiene como primer paso la etapa de reconocimiento, de la cual forma parte el contenido de esta tesis y que servirá como base para la realización de estudios posteriores que incluyen estudios: geofísicos, geoquímicos y geológicos.

El procesamiento de archivos ráster permite identificar rasgos superficiales característicos de una zona con potencial geotérmico cubriendo zonas de gran extensión o con acceso complicado (como es el caso de San Cosme) de forma muy económica.

1.2 OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es identificar zonas con potencial geotérmico en la localidad de San Cosme y sus alrededores a partir del procesamiento de imágenes de satélite multispectrales y del modelo digital del terreno para lo cual se realizarán los siguientes procedimientos:

Se procesarán imágenes satelitales ASTER 1T aplicando realce espectral con la técnica de análisis multivariado de componentes principales para identificar zonas con alteración hidrotermal y el realce espacial utilizará filtros direccionales para identificar lineamientos geológicos.

Para encontrar lineamientos que no pudieron ser observados en los resultados de filtros direccionales, o bien, para disponer de evidencia adicional de la existencia de estos, se aplicará iluminación artificial y realce espacial en un modelo digital de elevaciones de la zona.

1.3 GEOTERMIA

Los sistemas geotérmicos están compuestos principalmente por: una fuente de calor, un reservorio y un fluido que transfiere el calor. En la mayoría de los sistemas geotérmicos la fuente de calor está relacionada con cuerpos intrusivos o por actividad volcánica reciente. El reservorio es una capa de rocas permeables en donde el calor se almacena y está rodeado de rocas impermeables que no permiten que el calor escape de la capa permeable. Los fluidos que transfieren el calor se ponen en contacto con la roca permeable para absorber la temperatura, estos fluidos pueden ser expulsados a la superficie y ser reemplazados naturalmente por agua meteórica. En la figura 1.2 se puede observar un diagrama de las partes que conforman un sistema geotérmico.

Características de zonas con actividad geotérmica

Una zona con potencial geotérmico está sujeta a ciertas condiciones geológicas que deben cumplirse. Los rasgos estructurales son parte fundamental en un sistema

geotérmico, las manifestaciones superficiales (como manantiales, geiseres y fumarolas) se pueden llegar a presentar debido a la interacción con una falla o fractura permitiendo que los fluidos logren desplazarse y ascender a la superficie por medio de ellas.

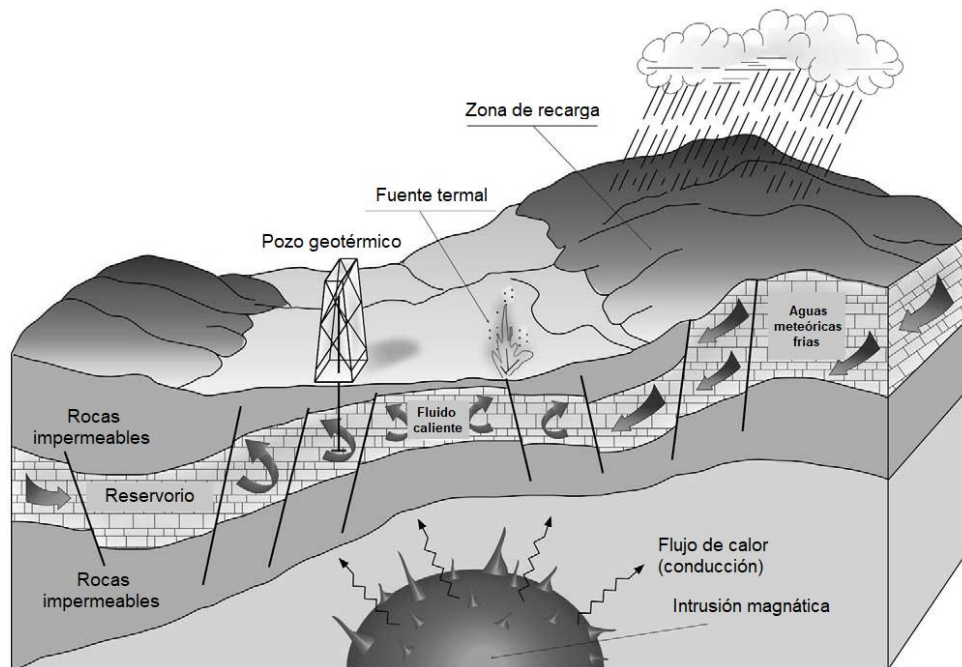


Figura 1.2: Un campo geotérmico con sus elementos: área de recarga, zona impermeable, depósito y fuente de calor. Tomada de Barbier, 2002.

Es común la existencia de actividad geotérmica en zonas con presencia de fallas, así como la interacción entre las mismas (Faulds y Hinz, 2015). Principalmente en zonas con actividad tectónica o en donde se presenta el acomodamiento de sistemas de fallas es más probable que existan vías por donde se desplace un fluido geotérmico, es por esta razón que en este trabajo se toma como característica principal la identificación de estructuras geológicas para la delimitación de zonas con potencial geotérmico.

Otro tipo de manifestaciones superficiales son las alteraciones hidrotermales. La alteración hidrotermal son los cambios en la composición mineralógica de la roca encajonante ocasionados por los cambios físicos y químicos producidos por fluidos hidrotermales. Los minerales nativos de la roca en ocasiones se convierten en otro

mineral completamente distinto que es producto de la alteración. Existen distintos grupos mineralógicos que generalmente se presentan en zonas con alteración hidrotermal: los hidroxilos (arcillas y micas), minerales de fierro (hematita, goethita y jarosita) y sulfatos hidratados (yeso y alunita). La tabla 1, muestra asociaciones mineralógicas presentes en la alteración hidrotermal, en los tipos de roca encajonante más comunes. Como resultado del contacto de los fluidos hidrotermales con la roca, es común la presencia de grupos mineralógicos como óxidos e hidroxilos, su identificación es una clave útil para definir áreas alteradas (Fernández *et al.*, 2001). Es en esta parte donde el procesamiento de imágenes satelitales multispectrales toma un papel importante debido a que los minerales de alteración presentan características espectrales destacables en las regiones del visible e infrarrojo del espectro electromagnético.

TIPO DE ALTERACIÓN	MINERALES
Argílica	Caolinita, illita, montmorillonita, pirita, clorita
Fílica	Cuarzo, sericita, pirita
Potásica	Feldespatos potásicos, biotita
Propilítica	Calcita, clorita, pirita, epidota, hematita
Silícica	Cuarzo

Tabla 1.1: Tipo de alteración hidrotermal. Tomada de Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995.

Clasificación de sistemas geotérmicos

Los recursos geotérmicos han sido clasificados como recursos de entalpía baja, intermedia o alta de acuerdo a las temperaturas del yacimiento. Los rangos de temperatura usados en estas clasificaciones son arbitrarios y la temperatura que se usa es la temperatura promedio del yacimiento medida en pozos exploratorios. Esta

clasificación es ambigua pues se requiere del uso de otras propiedades para poder clasificar un sistema geotérmico (Choon-Lee, 2001).

Moeck (2014), clasificó los sistemas geotérmicos con base en su ambiente geológico y el régimen de transferencia de calor, existen sistemas convectivos y sistemas conductivos:

- Un sistema convectivo contiene recursos de alta entalpía en donde los fluidos son transportados por medio de convección desde las zonas más profundas hacia la superficie. Es necesario un gradiente de temperatura alto y una alta permeabilidad. Estos sistemas son comunes en zonas con expansión oceánica, subducción y de rifts.
- Un sistema conductivo se conforma por recursos de mediana y baja entalpía en donde el transporte de fluidos se rige por conducción y en zonas con baja permeabilidad. Estos sistemas generalmente se presentan en zonas donde existe tectonismo y volcanismo.

Usos de la energía geotérmica

El aprovechamiento de la energía geotérmica depende de la temperatura del yacimiento. Como uso más importante se tiene la utilización del vapor de un sistema de alta entalpía para generación de energía eléctrica. Además de la generación de energía eléctrica, la geotermia tiene otros usos que necesitan de menor temperatura para su aprovechamiento y que además implican una reducción en la generación de CO₂ (Prol-Ledesma y Nieva, 2013). A continuación, se enlistan algunos usos de energía geotérmica de mediana y baja entalpía:

- Implementación en procesos industriales.
- Calefacción de viviendas y aire acondicionado.
- Calefacción de invernaderos.
- Secado agrícola y deshielo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio se encuentra localizada en el estado de Baja California Sur, cubre el sur del municipio de Loreto y una parte del municipio de Comondú. Fue definida con base en los reportes de termalismo localizados en las coordenadas 25.59, 153°N y 111.17, 31.1°W en la localidad de San Cosme, en la costa del Golfo de California. A partir de este punto se establecieron 50 km al norte, sur, este y oeste, cubriendo un área aproximada de 1000 km². El procesamiento de archivos ráster únicamente se llevó a cabo en la parte continental, sin incluir las islas ni la zona marina.

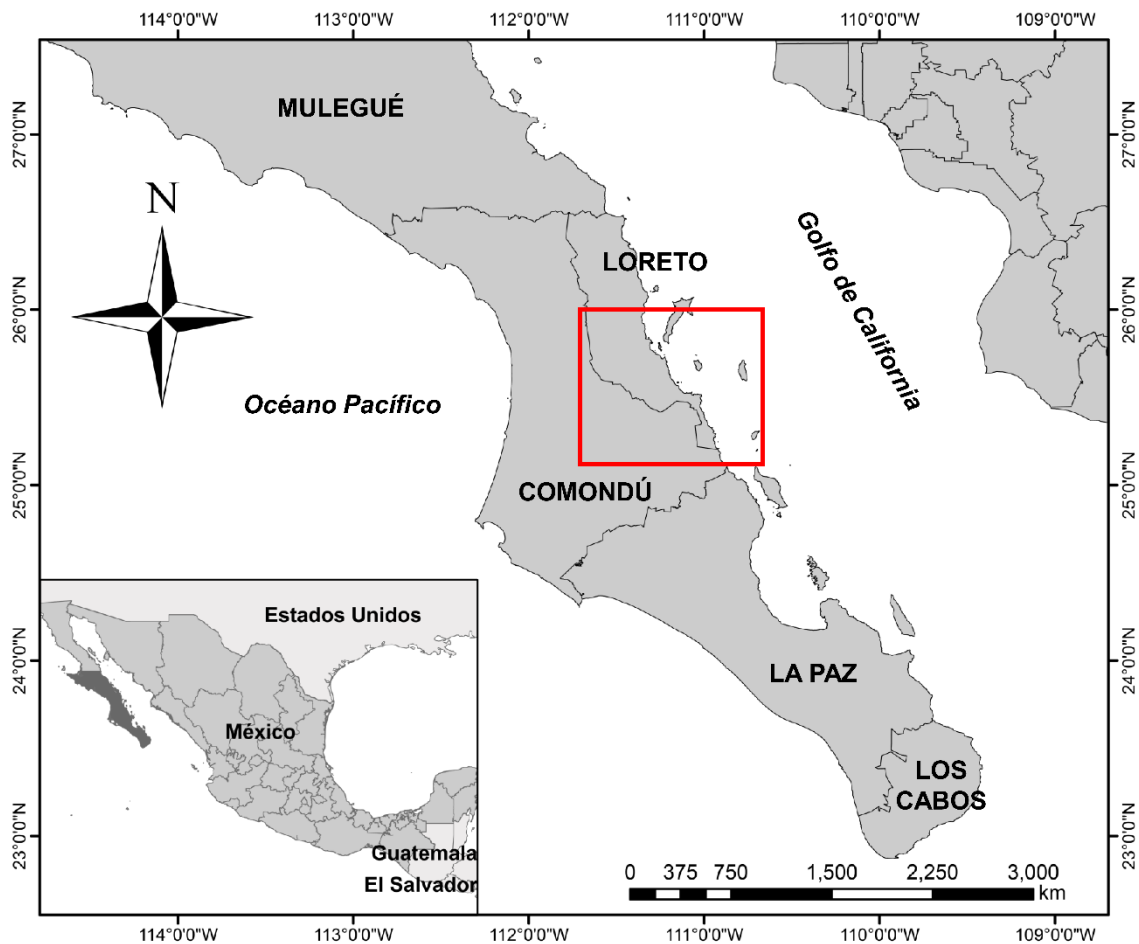


Figura 2.1: Ubicación de zona de estudio delimitada por la línea roja.

2.2 ANTECEDENTES

El estado de Baja California Sur ha experimentado un crecimiento gracias a la actividad turística que se desarrolla en tres de sus municipios: Los Cabos, La Paz y Loreto (Ibáñez, 2011). En el pasado, el municipio de Loreto se vio afectado por eventos que provocaron que dejara de ser la capital de Baja California Sur, entre estos destacan un ciclón en 1828 y un terremoto en 1878. Su actividad turística comenzó en la década de 1940 con pequeños lugares de alojamiento y comercio, también existían pistas privadas para avionetas y comunicación marina (Sicilia-Muñoz, 2000). En los años setenta, al igual que los Cabos, Loreto estuvo considerado por el Fondo Nacional al Turismo como un sitio para el desarrollo turístico a gran escala, sin embargo, el crecimiento no ha sido el esperado. En la actualidad Loreto forma parte de un corredor turístico que está conformado por la Zona Turística de Nopoló y la zona Marina de Puerto Escondido, en la figura 2.2 se puede ver la distribución de las localidades que conforman dicho corredor.

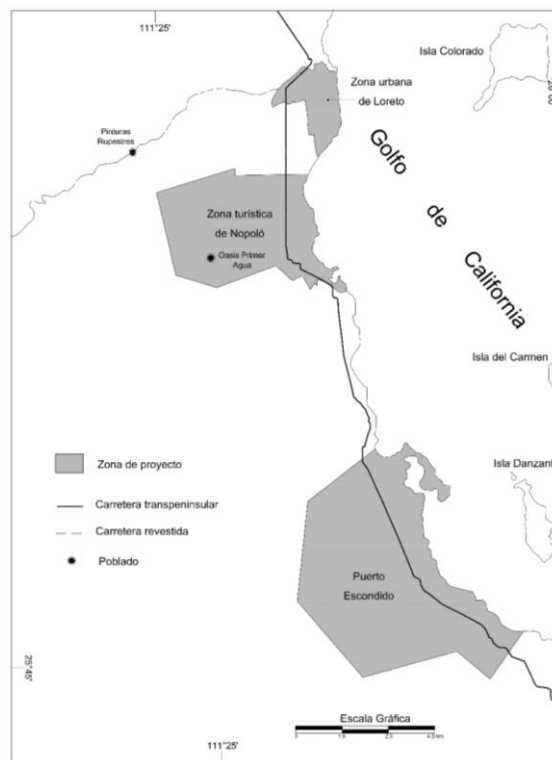


Figura 2.2: Esquema de ubicación de corredor turístico de Loreto, Baja California Sur. Tomada de Sicilia-Muñoz (2000).

El potencial turístico que tiene Loreto demanda recursos energéticos que pueden ser cubiertos con energía geotérmica, por lo que es una excelente oportunidad para explorar nuevas fuentes de obtención de recurso. Además, el satisfacer estas necesidades por medio de la energía geotérmica resulta amigable para el medio ambiente, lo cual se busca en cualquier población, pero principalmente en aquellas en las que el turismo está basado en sus atractivos naturales.

2.3 GEOLOGÍA REGIONAL

La península de Baja California ha estado afectada por una tectónica extensional que ha predominado sobre todo en los últimos 6 (Ma) la cual ocasionó la apertura del Golfo de California. En el Mesozoico y parte del Cenozoico, la subducción de la placa Farallón bajo la de Norteamérica predominó en la región que ahora conocemos como la península de Baja California (Valencia-Moreno y Ortega-Rivera, 2011). Durante el Cretácico, la subducción empezó a ser de alto ángulo, lo cual originó el emplazamiento de batolito que actualmente forma las sierras Peninsulares de Baja California, en el Cenozoico el ángulo de subducción fue menor y originó que la actividad magmática migrara hacia el este dando origen al volcanismo de la Sierra Madre Occidental. En el Mioceno se cree que el ángulo de subducción aumentó y la actividad volcánica migró nuevamente al oeste dando lugar al margen continental de la península de Baja California (Hausback, 1984). Al colisionar la cresta oceánica de la placa Farallón, la placa del Pacífico entró en contacto directo con la placa norteamericana con migración al norte, mientras que el contacto entre la placa Rivera y la del Pacífico comenzó a regirse con un desplazamiento hacia el sur.

El Golfo de California representa una de las principales zonas de *rift* del Cenozoico y la única en formarse en la proximidad de un margen continental donde hubo subducción por más de 100 Ma. Es un sistema de *rift* continental oblicuo cuyo proceso de *rifting* se ha desarrollado en un margen continental que tiene una historia

previa de subducción y que ha evolucionado a una zona de dispersión oceánica (Durán, 2016).

Existen dos principales teorías del proceso de apertura del Golfo de California. El primero fue propuesto por Stock y Hodges (1989) que sugiere que la formación del *rift* se dio en forma particionada después de que la subducción terminó. Proponen que una componente de extensión orthogonal se focalizó en donde actualmente se encuentra la Provincia Extensional del Golfo y dio lugar a la formación del proto-Golfo y un componente transtensional de la deformación, dada por el sistema de fallas lateral derecha Tosco-Abreojos, se desarrolló costa afuera al oeste de Baja California (Durán, 2016).

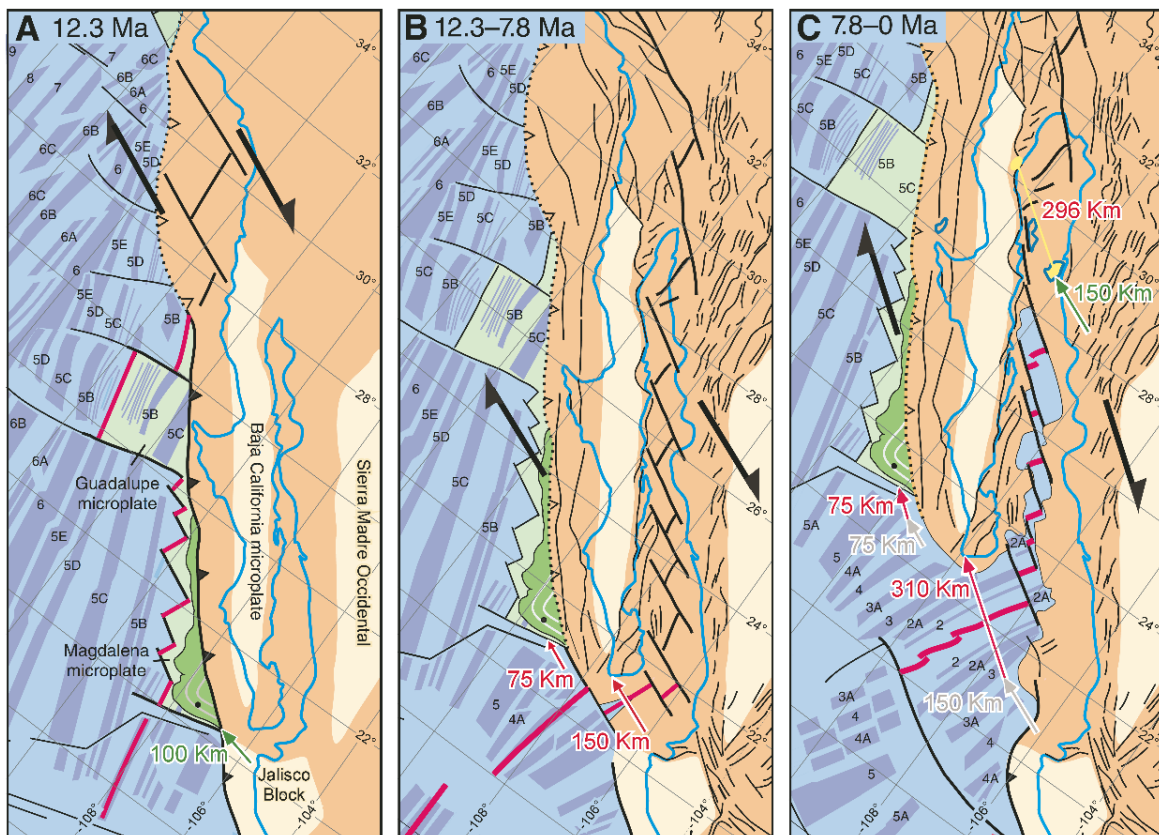


Figura 2.3: Esquema de reordenamiento de las placas y separación de parte de los estados de Baja California y Baja California Sur del macizo continental norteamericano. (Tomada de Fletcher *et al.*, 2007)

El segundo modelo, planteado por Fletcher *et al.* (2007), propone que a partir de un estudio de zircons detríticos, depositados en un abanico submarino en el margen Pacífico de Baja California Sur, la mayor parte de la cizalla en la frontera entre las placas fue causada por una deformación transtensional en la reorganización de las placas Pacífico y Norteamericana; es decir, extensión y cizallamiento lateral derecho a lo largo del Golfo de California. En la Figura 2.3 podemos observar la dinámica de la separación de la Península de Baja California del macizo continental. Entre los 12.3 a 7.8 Ma se acumula un desplazamiento de hasta 150 km de separación de manera que desde los 7.8 Ma el desplazamiento transtensional alcanza los 310 Km (Spelz, 2008).

2.4 GEOLOGÍA LOCAL

Gran parte de la zona este del sur de Baja California, se encuentra compuesta por depósitos volcánicos, volcanoclásticos y volcanosedimentarios del Oligoceno superior al Mioceno medio, los cuales han sido agrupados en el Grupo Comondú. La teoría que hasta hace poco había sido aceptada sobre la formación de Grupo Comondú lo define como el producto de un arco volcánico ubicado al este y que iba migrando hacia Baja California el cual está asociado a la subducción de los últimos remanentes de la placa Farallón por debajo de la Norteamericana. Actualmente se tienen nuevas teorías sobre la formación de este grupo en las cuales se asocia su origen a la extensión litosférica en las fases tempranas de la formación del *rift* del Golfo de California (Duran, 2016).

El grupo Comondú conforma gran parte de la Sierra de la Giganta y se distribuye siguiendo la dirección NW-SE. McFall (1968) planteó la división del Grupo Comondú para la zona de Bahía Concepción, mientras que Umhoefer (2001) retomó la misma división, pero en el área de Loreto. Ambos autores subdividen al grupo en tres unidades, considerando que esta división es válida desde la Paz hasta Loreto (Ferrari *et al.*, 2017):

- Unidad clástica inferior.

- Unidad media de brechas y flujos de lava.
- Unidad superior de flujos de lava y brecha.

La primera, de composición predominantemente silícica, está constituida por secuencias clásticas de areniscas fluviales y eólicas, areniscas tobáceas resedimentadas, conglomerados e intercalaciones de tobas. Fechamientos de las unidades volcánicas intercaladas y de circones detríticos de las areniscas, definen su emplazamiento o la edad máxima de depósito entre ~30 y ~19.5 Ma.

La unidad media está expuesta principalmente en la Sierra La Giganta, donde se pueden observar hasta 700 m de brechas volcanosedimentarias y flujos de lava (Umhoefer *et. al.* 2001). Esta unidad representa un cambio litológico y composicional muy marcado, con respecto a la unidad inferior. Está constituida principalmente por potentes capas de brecha sedimentaria masiva de origen volcánico, algunos flujos de lava y domos, en general de composición intermedia (dacítica-andesítica) (Hausback, 1984). Así mismo presenta abundantes diques, también de composición intermedia, siendo los dominantes diques de dacitas porfídicas con fenocristales de hornblenda, piroxeno y plagioclasa (Duran, 2016).

La unidad superior se compone principalmente por lavas y en menor porcentaje por brechas, esto la diferencia de las unidades media e inferior. La composición de las lavas es intermedia, dominando las andesitas. En la figura 2.4 se presenta una carta geológica que cubre la zona de estudio, desde la zona de Loreto hasta Timbabwe. En ella se puede observar que el Grupo Comondú predomina en gran parte de la zona de estudio, principalmente la unidad media y superior.

La geología estructural, está gobernada por la apertura del Golfo de California que da lugar a una morfología de fosas y pilares tectónicos. Las estructuras principales son fallas normales cuyos rumbos predominantes son N30° - 60°W con buzamientos de 78° a 85° al NE y SE, aproximadamente paralelas al sistema de apertura del Golfo de California (Carta Villa Constitución G-12-7-8, Baja California Sur, Servicio Geológico Mexicano). La figura 2.3 muestra un grupo de fallas reunidas por Drake (2017), que se

localizan principalmente en Rancho San Cosme y Agua Verde en las que domina la dirección NW-SE. Padilla y Sánchez (2013) publicó un mapa GIS que incluye datos geológicos estructurales de todo México, en ellos se muestran algunos lineamientos presentes en la zona que también presentan la dirección NW-SE.

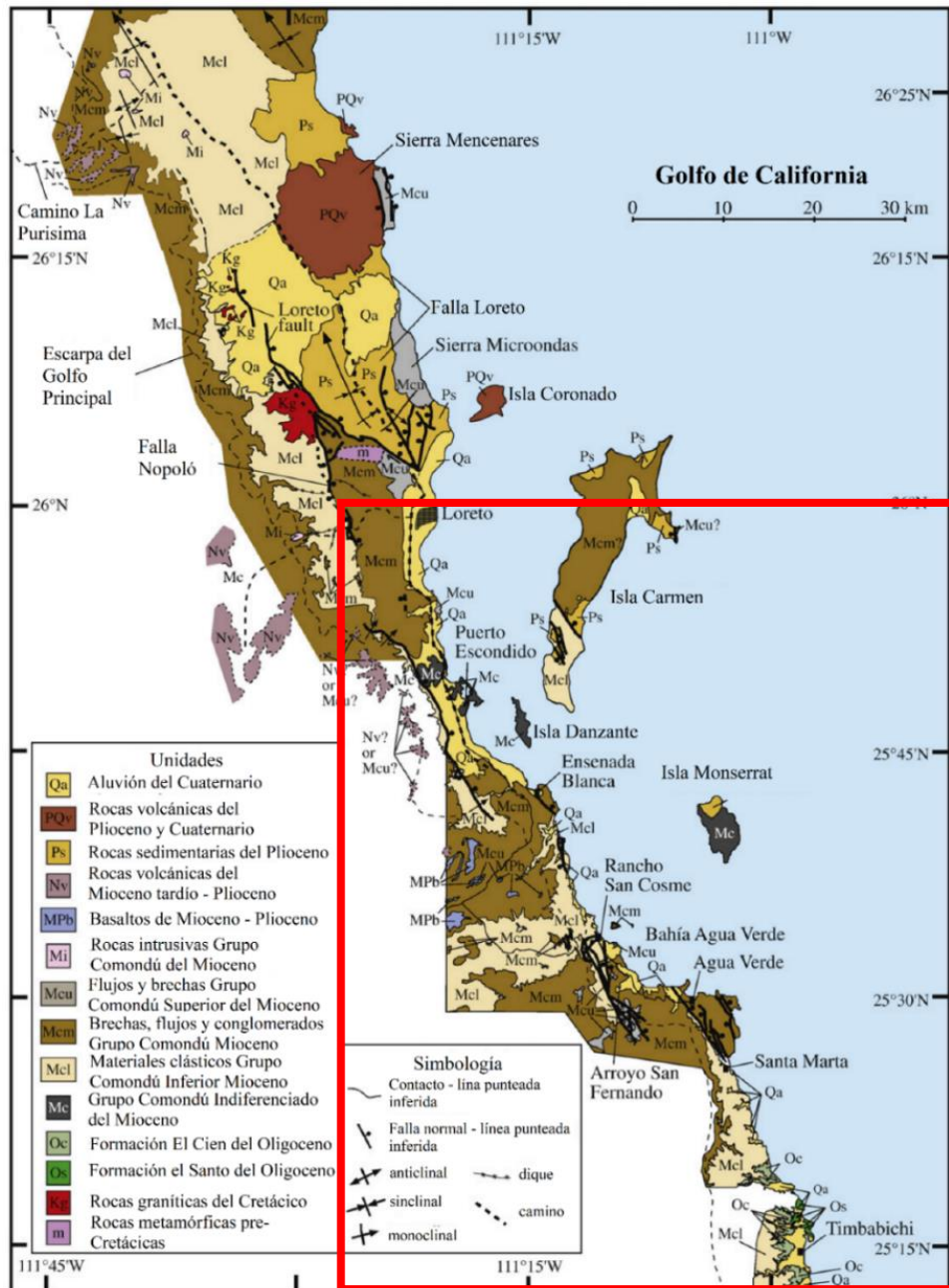


Figura 2.4: Carta geológica de la costa este de Baja California Sur. Principalmente muestra la distribución de las unidades del Grupo Comondú. La zona del recuadro rojo delimita la zona de estudio (Tomada de Drake et al., 2017).

3. METODOLOGÍA

El procesamiento y adquisición de imágenes satelitales tiene como base teórica la interacción de la radiación electromagnética con la superficie de la Tierra. Todos los objetos en la superficie terrestre emiten radiación electromagnética o reflejan la radiación que ha sido emitida por fuentes como por ejemplo el Sol (Campbell y Randolph, 2011). Existen sensores activos y pasivos, los primeros miden los niveles ambientales de las fuentes de energía existentes y los segundos poseen su propia fuente de energía. La mayoría de los sensores remotos son de tipo pasivo y utilizan al sol como fuente de energía.

Cada material presenta una firma espectral característica, la cual describe la intensidad con la que este material refleja la energía electromagnética que incide en él a diferentes longitudes de onda. En la Figura 3.1 se muestra un esquema del proceso de adquisición de las imágenes satelitales a partir de un sensor remoto pasivo en donde se observa al sol como fuente de energía y al sensor captando la energía electromagnética reflejada de algún material de la superficie terrestre. Una vez que los datos han sido tomados deben ser sometidos a un pre-procesamiento para eliminar perturbaciones de radiancia, geometría o causados por la atmósfera.

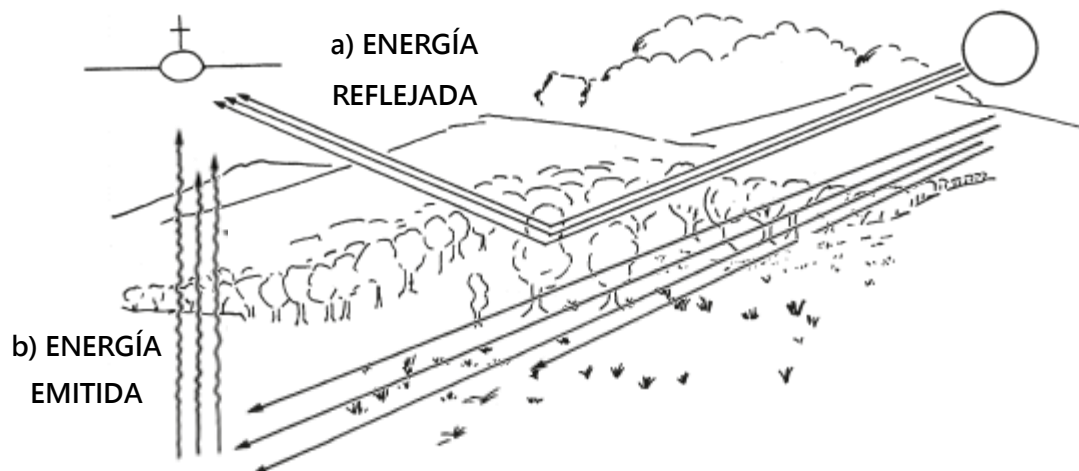


Figura 3.1: Esquema de la forma en que la energía electromagnética emitida y reflejada es captada por el sensor (Editada de Campbell y Randolph, 2011).

3.1 DESCRIPCIÓN DE IMÁGENES

Se usaron imágenes multiespectrales del sensor ASTER nivel L1T (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected*) que fue lanzado en el satélite Terra en diciembre del año 1999. Terra es un proyecto compartido entre la NASA y el Ministerio de Economía e Industria (METI) de Japón.

Los productos ASTER 1T son una mejora de los productos ASTER L1A y L1B pues incluye la corrección radiométrica y geométrica, además de incorporar una rotación al norte y una corrección por el fenómeno de *Crosstalk* (AST_L1T Product Users Guide, 2015). ASTER captura datos de alta resolución espacial en 14 bandas y proporciona otra herramienta para la creación de modelos digitales de elevación.

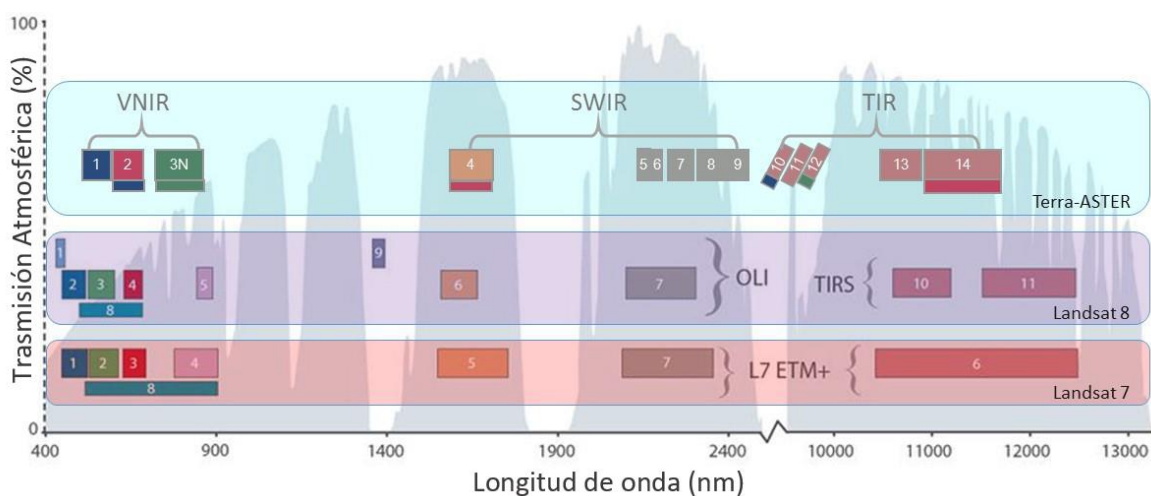


Figura 3.2: Esquema comparativo de la distribución de bandas del sensor ASTER con respecto a los satélites Landsat 7 y 8. Tomada de AST L1T Product Users Guide (2015).

Las 14 bandas están repartidas en tres subgrupos que cubren segmentos del espectro electromagnético. El primer grupo VNIR pertenece a la parte del visible e infrarrojo cercano con tres bandas de 15 m de resolución. El segundo grupo SWIR cubre la parte del infrarrojo de onda corta con seis bandas que tienen una resolución de 30 m. Y el tercer y último grupo TIR pertenece a la parte del infrarrojo térmico con 5 bandas de resolución de 30 m. En la Figura 3.2 se muestra la estructura de las 14 bandas

con respecto a los sensores OLI Y ETM del satélite Landsat. La tabla 3.1 muestra la estructura y característica del sensor ASTER.

NIVEL	BANDA	LONGITUD DE ONDA (μm)	DESCRIPCIÓN	RESOLUCIÓN (m)
VNIR	1	0.520–0.600	Visible Verde/ Amarillo	15 (8 bit)
	2	0.630–0.690	Visible Rojo	
	3N	0.760–0.860	Infrarrojo Cercano	
	3B	0.760–0.860		
SWIR	4	1.600–1.700	Infrarrojo de onda corta	30 (8 bit)
	5	2.145–2.185		
	6	2.185–2.225		
	7	2.235–2.285		
	8	2.295–2.365		
	9	2.360–2.430		
TIR	10	8.125–8.475	Infrarrojo de onda larga o infrarrojo térmico	90 (12 bit)
	11	8.475–8.825		
	12	8.925–9.275		
	13	10.250–10.950		
	14	10.950–11.650		

Tabla 3.1: Estructura y principales características de cada una de las bandas del sensor ASTER.

Modificada de AST_L1T Product Users Guide (2015).

Las imágenes se descargaron del sitio web Earth Explorer de la USGS con la consideración de que se pretendían obtener rasgos geológicos estructurales y detectar la presencia de alteración hidrotermal por lo que debían ser obtenidas de las fechas de épocas de secas de la región para evitar la interferencia con la vegetación que

dificultara la identificación de los rasgos estructurales y los minerales de alteración. Debido a las dimensiones de la zona de estudio, fue necesario el uso de imágenes de dos diferentes fechas correspondientes al 27 de diciembre de 2006 y al 3 de enero de 2007 usando únicamente las primeras 9 bandas que corresponden a la región del visible (VNIR) y a la del infrarrojo de onda corta (SWIR).

Debido a que la resolución espacial en las imágenes ASTER es distinta en la región del visible y la del infrarrojo, es necesario que se trabaje con la misma resolución. Por lo anterior, se hizo un remuestreo al subgrupo SWIR cambiando el tamaño del píxel de 30 a 15 m para que fuera posible hacer el procesado entre bandas del VNIR y SWIR. Para el preprocesamiento y procesamiento de los archivos ráster, se usaron tres softwares distintos: ENVI 5.2, TerrSet y ArcGIS.

3.2 PREPROCESAMIENTO

En la sección anterior se mencionó que las imágenes ASTER 1T ya contienen la corrección radiométrica y la geométrica que trata de compensar las distorsiones provocadas por factores externos; por lo tanto, únicamente es necesario aplicar un método de corrección atmosférica para eliminar los efectos de la atmósfera en las imágenes multiespectrales.

Existen distintos métodos de corrección atmosférica, uno de ellos es el método de sustracción del objeto oscuro (DOS, por sus siglas en inglés), que consiste en suponer que el mínimo valor de números digitales (ND) debe corresponder a las zonas oscuras presentes en la imagen y que en ausencia de efecto atmosférico ese valor debería ser cero. Partiendo de esa suposición, se deduce que las diferencias entre el cero y los valores mínimos de los histogramas de las distintas bandas afectadas se deben al incremento de la radiancia absorbida por el sensor como consecuencia de la radiación difusa de la atmósfera. El procedimiento del método DOS consiste en restar de todos los ND de cada banda, el ND mínimo de ella, de modo que se haga coincidir con el cero del origen del histograma (Campbell y Randolph, 2011). La Figura 3.2

explica de forma gráfica el procedimiento que se lleva a cabo en la corrección atmosférica y el efecto que tiene sobre el histograma.

Debido a la diferencia de fechas en las imágenes, la zona de estudio fue trabajada en dos partes, se realizó un mosaico uniendo las tres imágenes correspondientes a la fecha del 3 de enero de 2017 que cubren la parte norte y central de la zona. Por separado se procesó la imagen correspondiente a la fecha del 27 de diciembre de 2006 que abarca la parte sureste.

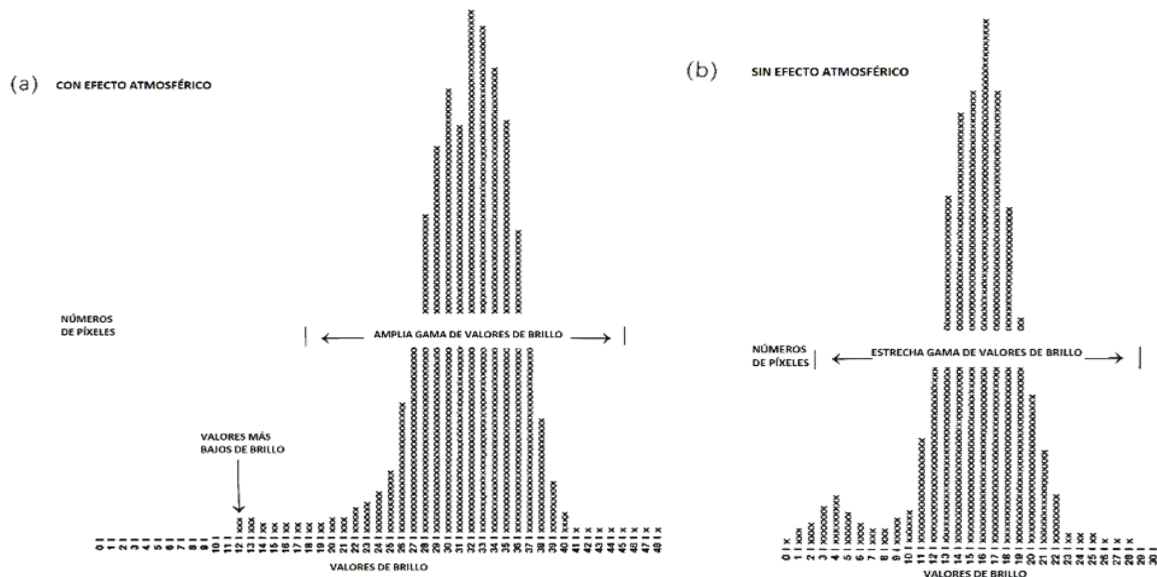


Figura 3.2: Esquema gráfico de efecto de la atmósfera sobre histograma de frecuencias de una imagen. En la derecha se observa el histograma original de la imagen y en la parte derecha se observa el histograma una vez aplicado del método DOS de corrección atmosférica. Tomada de Campbell (2011).

3.3 PROCESAMIENTO

3.3.1 Realce espectral

La identificación de zonas con alteración hidrotermal es posible implementando métodos que permiten resaltar los rasgos espectrales característicos de los materiales de alteración. En este caso se aplicó un Análisis de Componentes Principales para resaltar los grupos mineralógicos característicos de la alteración hidrotermal como son

los óxidos e hidroxilos. También fue identificada por separado la vegetación pues a pesar de que se buscaron imágenes en tiempos de secas, no es seguro que se encuentre completamente ausente sobre las imágenes, por lo que es necesario identificarla para obtener resultados más certeros sobre las zonas de alteración hidrotermal.

Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística multivariada la cual selecciona combinaciones lineales no correlacionadas de las variables en orden decreciente de varianza, lo cual ocasiona que se minimice o se resalte la respuesta espectral de ciertos materiales en superficie, por lo que ayuda a reducir el número de bandas para el análisis y por lo tanto disminuye la redundancia de información.

Crosta y Moore (1989) propusieron una técnica de ACP en la cual se examina la matriz de carga de los eigenvectores de una selección específica de seis o cuatro bandas, para decidir cuál de las componentes principales de la imagen concentra información directamente relacionada con la firma espectral teórica de los objetivos específicos. Haciendo el análisis con las firmas espectrales de algunos minerales pertenecientes a los grupos minerales de los óxidos e hidroxilos y para la identificación de la vegetación presente en la zona, se seleccionaron cuatro bandas representativas de absorbancia y reflectancia de los materiales a identificar.

MATERIAL	BANDAS USADAS
Vegetación	1, 2, 3, 4
Óxidos	1, 2, 3, 4
Hidroxilos	2, 3, 4, 5

Tabla 3.2: Bandas usadas en la técnica de Costa y Moore para identificación de óxidos, hidroxilos y vegetación.

Las bandas usadas para aplicar el método de Crosta y Moore (1989) se eligieron a partir de un análisis detallado de las firmas espectrales de los materiales de interés.

La vegetación presenta rasgos de absorción de 0.45 a 0.68 μm y alta reflectancia en el infrarrojo cercano (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995). Para el sensor ASTER absorbe principalmente sobre las bandas 1 y 2 y refleja sobre las bandas 3 y 4.

En las figuras 3.3 y 3.4 se tienen algunas firmas espectrales que pertenecen a los grupos mineralógicos de los óxidos y los hidroxilos respectivamente. La hematita y jarosita (minerales pertenecientes al grupo de los óxidos) refleja sobre las bandas 2 (0.630 a 0.690 μm) y 4 (1.600 a 1.700 μm) y absorbe en las bandas 1 (0.520 a 0.600 μm) y 3 (0.760 a 0.860 μm). La calcita, caolinita y montmorillonita (minerales pertenecientes al grupo de los hidroxilos) reflejan en las bandas 3 (0.760 a 0.860 μm) y 4 (1.600 a 1.700 μm) y absorben en las bandas 2 (0.630 a 0.690 μm) y 5 (2.145 a 2.185 μm). En la tabla 3.2 se presenta un resumen de las bandas usadas en la aplicación del método.

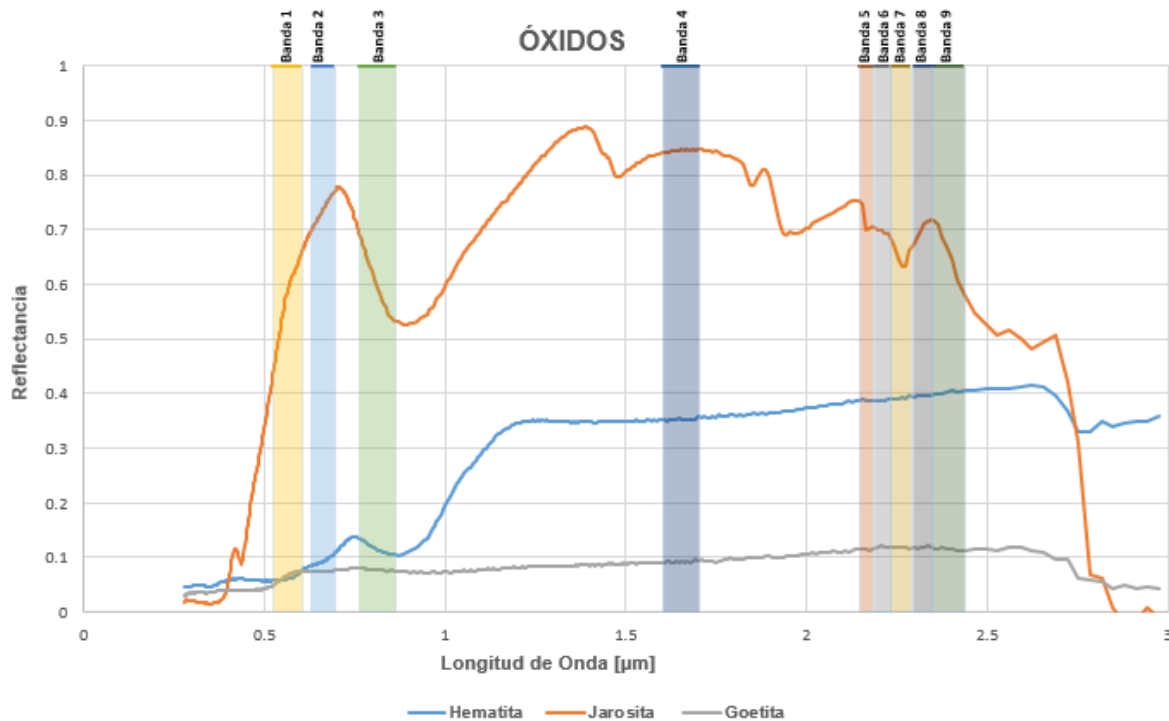


Figura 3.3: Firmas espectrales de minerales pertenecientes al grupo mineralógico de los óxidos y bandas correspondientes al sensor ASTER.

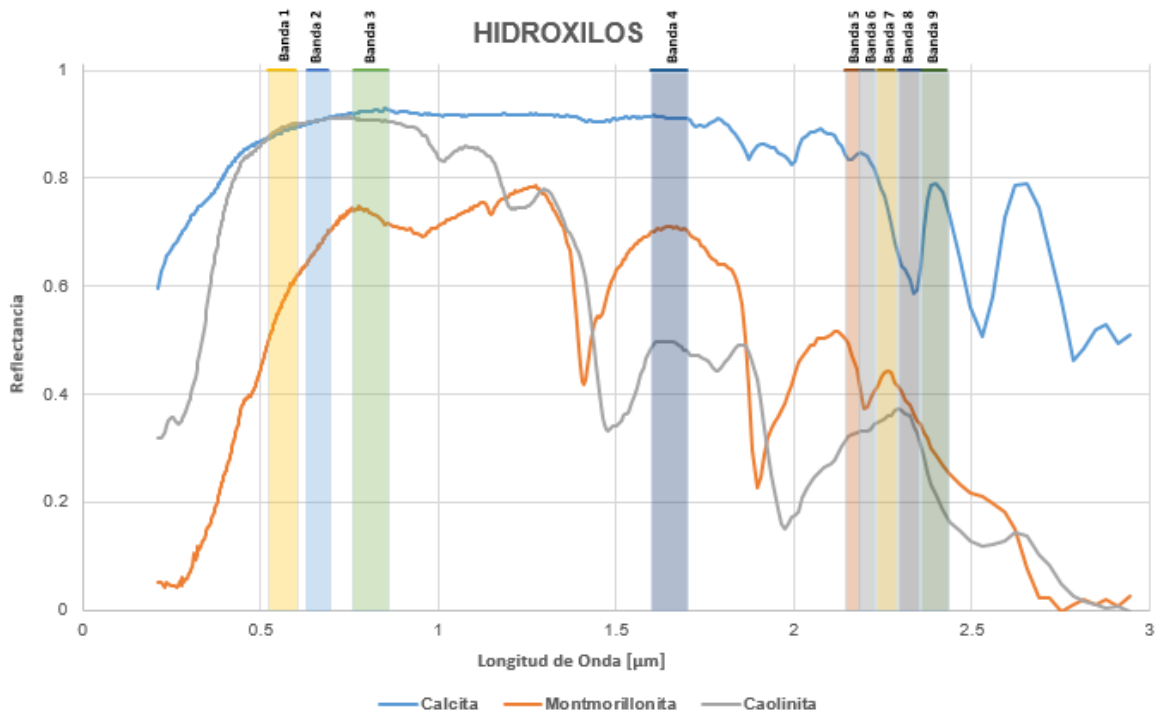


Figura 3.4: Firmas espectrales de minerales pertenecientes al grupo mineralógico de los hidroxilos y bandas correspondientes al sensor ASTER.

3.3.2 Realce espacial

El realce espacial es una técnica que incrementa el contraste de los píxeles dentro de una imagen. Considera la frecuencia espacial, que es la cantidad de cambios de brillo por unidad de distancia, de acuerdo con las diferencias entre los valores de mayor a menor brillo para un conjunto de píxeles (Campbell y Randolph, 2011). La aplicación de filtros direccionales es una técnica de realce espacial, en la cual se aplican filtros digitales espaciales los cuales funciona con operaciones de convolución implementando diferentes kernel para resaltar las direcciones buscadas.

Filtros direccionales. Técnica de Moore y Waltz

Moore y Waltz (1983) propusieron una técnica en la cual se aplican filtros direccionales para el mejoramiento de la técnica de realce espacial. En este caso se trabajó sobre la componente uno (C1) obtenida de un ACP usando la mayor información disponible, es

decir, utilizando las nueve bandas de las imágenes ASTER nivel 1T seleccionadas pertenecientes al visible e infrarrojo cercano. A continuación, se describe la metodología utilizada para la aplicación de la técnica:

1. Aplicación de filtro pasa-bajas a la imagen de entrada C1 para remover el ruido de las altas frecuencias espaciales (ruido).
2. A la imagen resultante del filtro pasa bajas se le aplican individualmente filtros direccionales con algoritmos de convolución (N, S, E, W, NE, NW, SE y SW) que se muestran a continuación. El contraste de bordes y segmentos de líneas aumenta solo para los lineamientos perpendiculares al núcleo aplicado (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995).

$$\begin{aligned}
 N &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} & S &= \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} & E &= \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \\
 W &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} & NE &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix} & NW &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \\
 SE &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} & SW &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

3. Las imágenes obtenidas con los algoritmos de convolución se suman para obtener un filtro direccional total.
4. Se aplica nuevamente un filtro pasa bajas para eliminar posibles lineamientos no existentes.
5. El último paso consiste en sumar la imagen obtenida del paso 4 y la imagen de C1 obtenida de ACP. Puede aplicarse un realce de contraste para mejorar la

visualización de los rasgos estructurales, en este caso se aplicó una deformación lineal del histograma con saturación del 1 %.

Se marcaron los filtros direccionales que se observaron en la imagen resultante de la aplicación del método de Moore y Waltz. Se tiene como antecedente que la geología estructural de la zona se rige principalmente por las direcciones NE – SW y NW – SE.

Realce espacial con Modelo Digital de Elevaciones

Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, el cual permite identificar formas de relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. En el MDE existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos.

El realce espacial en un MDE se realiza mediante la implementación de alguna técnica de sombreado la cual funciona mediante el establecimiento de una posición de una fuente de luz hipotética y el cálculo de los valores de iluminación de cada celda en relación con las celdas vecinas. Funciona como técnica de comparación para los resultados obtenidos en la técnica de Moore y Waltz o bien para identificar lineamientos que no se observaron en la misma. El MDE a procesar en este caso se obtuvo de la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018).

Para realizar el realce espacial se usó la herramienta *hillshade* del Software ENVI 5.2 bajo el parámetro de elevación de 45° y con un azimut variado desde 0 hasta 360° obteniendo un MDE procesado cada 45° en donde se pudieron identificar los lineamientos estructurales perpendiculares correspondientes a las direcciones E-W, NW-SE, N-S, NW-SW, E-W, NW-SE, N-S, NE-SW y E-W

4. RESULTADOS

4.1 PREPROCESAMIENTO

Las imágenes fueron procesadas por separado debido a la diferencia de fechas, se realizaron dos mosaicos: el primero formado por las tres imágenes correspondientes a la fecha del 27 de diciembre de 2006 el cual será nombrado más adelante como ZN1 y el segundo integrado por las dos imágenes correspondientes al 3 de enero de 2007 que más adelante se menciona como ZN2.

Las imágenes ASTER nivel L1T son un producto que incluye las correcciones radiométrica y geométrica, por lo tanto, a las imágenes procesadas en el presente trabajo únicamente se les aplicó la corrección atmosférica por el método DOS. Las figuras 4.1 y 4.2 representan los histogramas de cada una de las bandas correspondientes a ZN1 y ZN2, a la izquierda se muestran los histogramas de cada una de las bandas y a la derecha se muestran los histogramas una vez aplicada la corrección atmosférica.

Una vez realizada la corrección atmosférica por el método de sustracción del píxel oscuro se hizo un recorte de las partes de mar para evitar problemas o interferencias de ruido con procesamiento posteriores, la imagen fue recortada a partir de un archivo de tipo *shape* de la República Mexicana obtenido de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO).

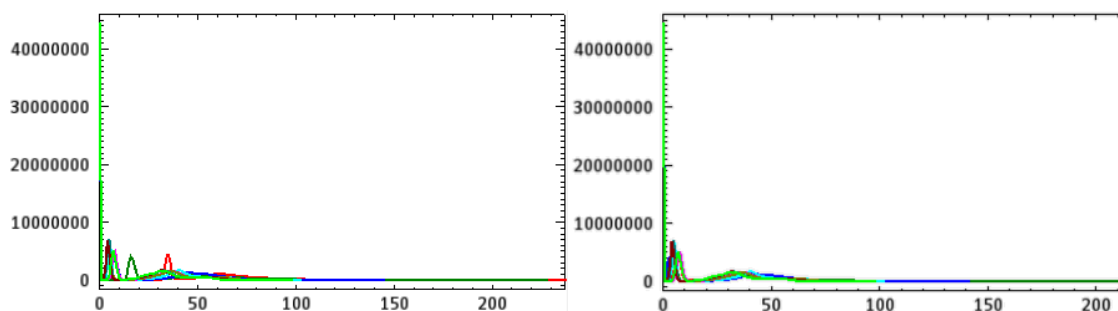


Figura 4.1: Grafico de histogramas de las 9 bandas usadas del mosaico de imágenes ZN1. A la izquierda se pueden observar los histogramas sin efecto de la corrección atmosférica; a la derecha se observan los histogramas de las mismas bandas una vez corregidas por el efecto de la atmósfera.

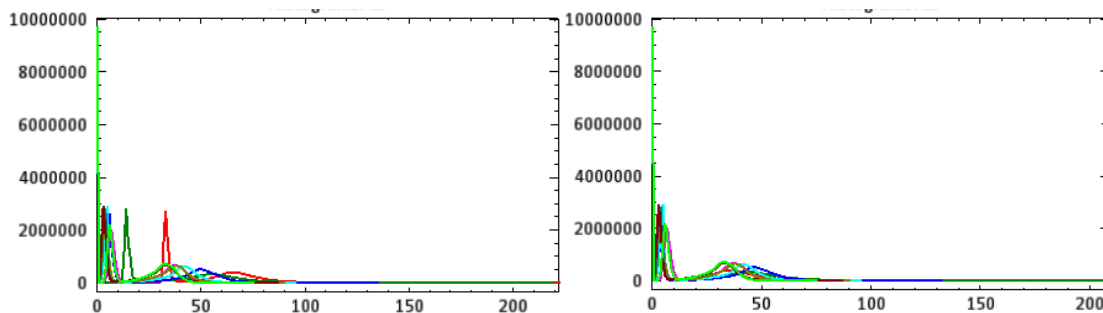


Figura 4.2: Gráfico de histogramas de las 9 bandas usadas del mosaico de imágenes ZN2 (parte SE de la zona de estudio). A la izquierda se pueden observar los histogramas sin efecto de la corrección atmosférica; a la derecha se muestran los histogramas de las imágenes con corrección atmosférica.

4.2 PROCESAMIENTO

4.2.1 Realce espectral. Análisis de Componentes Principales.

Los resultados del análisis de componentes principales para ZN1 y ZN2 implementando la técnica de Crosta y Moore se muestran por separado al igual que en la corrección atmosférica. Se buscó obtener las zonas con presencia de materiales de interés para una zona con posible potencial geotérmico, identificando óxidos, hidroxilos y vegetación. A continuación se muestran las tablas de matriz de carga generadas a partir de los análisis de componentes principales aplicando la técnica de Crosta y Moore, las celdas remarcadas en tonos oscuros hacen referencia a las bandas de reflectancia consideradas en el análisis de la matriz de carga, mientras que los colores claros representan las bandas de absorbancia.

La tabla 4.1 representa la matriz de carga del ACP con las bandas 1, 2, 3 y 4 realizado para la identificación de óxidos y vegetación de ZN1. Analizando la firma espectral de la vegetación se obtiene que la banda 3 representa mayormente los valores de reflectancia, mientras que la banda 2 los de absorbancia. Haciendo el ACP se obtiene que la componente tres es la representativa de la vegetación. En la identificación de óxidos se consideró que la banda que abarca principalmente los puntos de reflectancia es la banda 2, mientras que la de absorbancia la banda 1. A partir

del ACP se obtiene que la componente representativa para óxidos es la componente cuatro negativa.

Banda	C1	C2	C3	C4
B1_ZN1	0.990	-0.130	-0.011	0.045
B2_ZN1	0.988	-0.144	-0.036	-0.031
B3_ZN1	0.983	0.089	0.157	-0.004
B4_ZN1	0.974	0.192	-0.116	0.001

Tabla 4.1: PCA por el método de Crosta y Moore del mosaico de imágenes multiespectrales de la parte ZN1 obtenido a partir de las bandas 1,2,3, y 4 para identificar óxidos y vegetación.

En la tabla 4.2 se muestra la matriz de carga del ACP con las bandas 2, 3, 4 y 5 realizado para la identificación de hidroxilos en ZN1. Analizando la firma espectral de algunos minerales del grupo de los hidroxilos se obtiene que la banda 4 representa mayormente los valores de reflectancia, mientras que la banda 5 la de absorbancia. Haciendo el ACP se obtiene que la componente cuatro negativa es la representativa para hidroxilos.

Banda	C1	C2	C3	C4
B2_ZN1	0.978	-0.184	-0.098	-0.005
B3_ZN1	0.982	-0.055	0.178	0.007
B4_ZN1	0.987	0.152	-0.019	-0.048
B5_ZN1	0.986	0.142	-0.064	0.055

Tabla 4.2: PCA por el método de Crosta y Moore del mosaico de imágenes multiespectrales de la zona obtenido a partir de las bandas 1,2,3, y 4 para identificar hidroxilos

A continuación, se muestran las tablas de resultados del método de Crosta y Moore para la segunda parte de la zona de estudio (ZN2) la cual cubre la parte SE de la zona de estudio total. La tabla 4.3 representa la matriz de carga del ACP obtenido a partir de las bandas 1, 2, 3 y 4. Al igual que en la ZN1 con estos datos se obtuvo la componente representativa de los óxidos y la vegetación, dando como resultado que

la componente tres es la representativa de la vegetación y la componente cuatro contiene la información de los óxidos, pero con una respuesta negativa.

Banda	C1	C2	C3	C4
B1_ZN2	0.988649	-0.130824	-0.054007	0.050416
B2_ZN2	0.990826	-0.118047	-0.054712	-0.036543
B3_ZN2	0.987165	0.024653	0.157788	-0.000034
B4_ZN2	0.954182	0.289212	-0.076746	0.001688

Tabla 4.3: PCA por el método de Crosta y Moore de la parte SE (ZN2) de la zona obtenido a partir de las bandas 1,2,3, y 4 para identificar óxidos y vegetación.

La tabla 4.4 representa la matriz de carga del ACP obtenido a partir de las bandas 2, 3, 4 y 5. Haciendo el análisis de los datos de forma similar que en la parte ZN1 se obtuvo que la componente representativa para hidroxilos es la componente cuatro con signo negativo.

Banda	C1	C2	C3	C4
B2_ZN2	0.978446	-0.181205	-0.099035	0.000834
B3_ZN2	0.986061	-0.087158	0.141726	-0.000550
B4_ZN2	0.973472	0.219209	-0.027338	-0.059608
B5_ZN2	0.971365	0.223262	-0.023666	0.077740

Tabla 4.4: PCA por el método de Crosta y Moore de la parte SE (ZN2) de la zona obtenido a partir de las bandas 2,3,4, y 5 para identificar hidroxilos.

Las componentes representativas de cada material se muestran en la tabla 4.5, en ambas partes se hizo el mismo análisis para aplicación del método de Crosta y Moore en la búsqueda de cada material de interés.

Material	Bandas usadas (Crosta)	Componente representativa ZN1	Componente representativa ZN2
Vegetación	1, 2, 3, 4	C3	C3
Óxidos	1, 2, 3, 4	-C4	-C4
Hidroxilos	2, 3, 4, 5	-C4	-C4

Tabla 4.5: Resumen de bandas usadas y resultados de componente representativa en los ACP.

Una vez obtenidas las componentes representativas de cada material se les aplicó un filtro pasa bajas para eliminar el ruido existente. En las imágenes 4.3, 4.4 y 4.5 se pueden observar las componentes representativas de cada material en la zona de estudio completa, es decir, juntando ZN1 y ZN2. Las imágenes resultantes están en escala de grises en un intervalo de color de 0 a 255, donde el valor de cero o tonalidad negra representa la ausencia del material de interés y el valor 255 o colores brillantes, representan la presencia del mismo. Para poder tener una mejor visualización de los resultados de las componentes representativas de cada material se les aplicó una deformación lineal del histograma del 1%. En la Figura 4.3 se presenta la componente representativa de la vegetación, la Figura 4.4 representa la componente representativa de los óxidos y la Figura 4.5 representa la componente representativa de los hidroxilos.

Posterior a la aplicación del filtro pasa bajas, se realizó una composición a color (RGB por sus siglas en inglés), la cual nos ayuda a visualizar de mejor manera las zonas de alteración asignando una tonalidad a las componentes representativas y arrojando resultados en combinaciones de los colores rojo, verde y azul (Figura 4.6). Se estableció en color rojo la componente representativa de vegetación, en color verde la de óxidos y en color azul la de hidroxilos. También podemos observar colores como cian, magenta y amarillo, esto se debe a la combinación de ciertos materiales que reflejan en los mismos colores, pero en distintos porcentajes y distintas combinaciones.

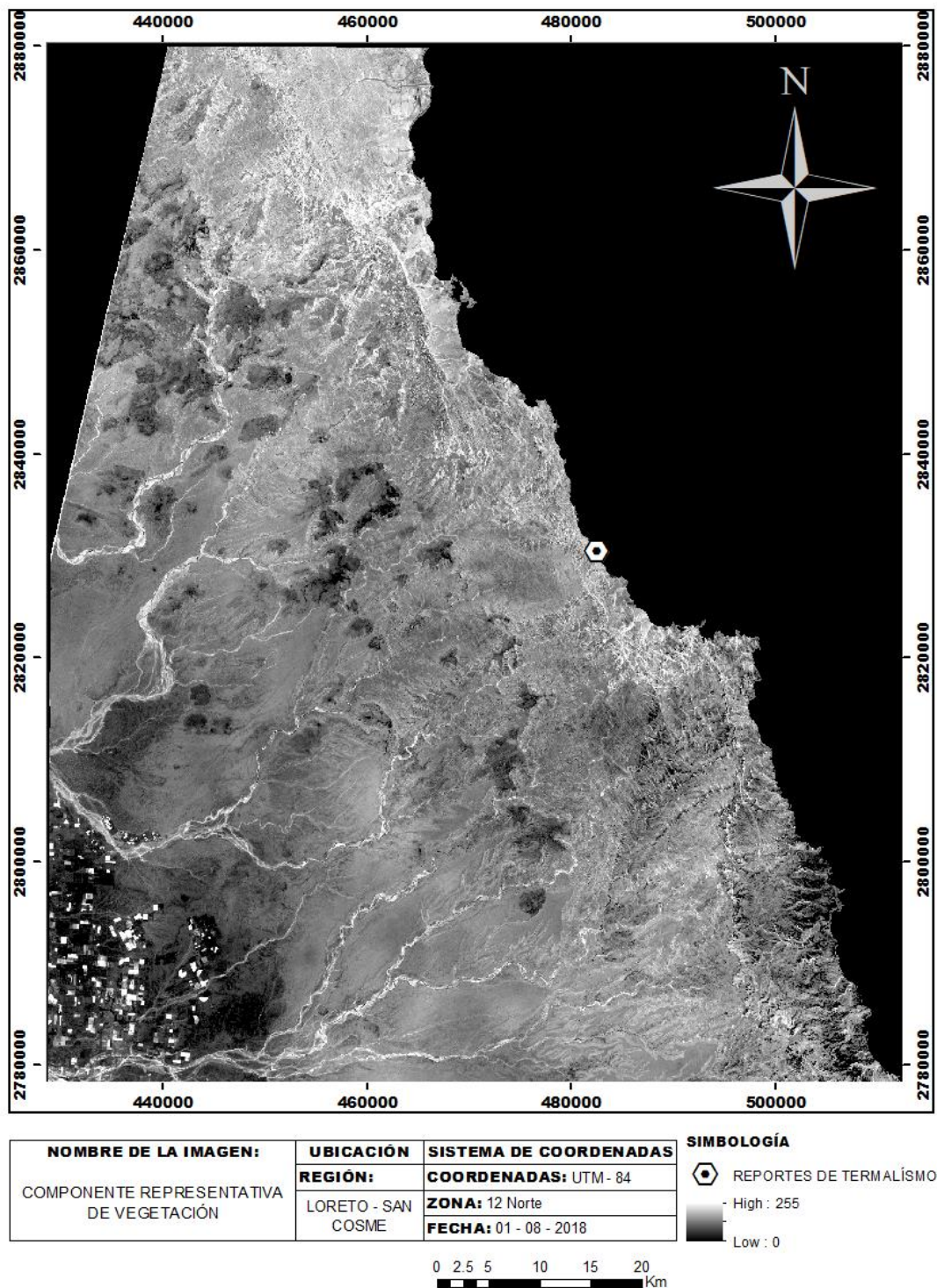


Figura 4.3: Componente representativa de la vegetación de la zona con deformación lineal del histograma con saturación del 1%. Los píxeles en colores blancos, o en general los más brillantes, representan la presencia de vegetación mientras que los oscuros o negros representan la ausencia de esta.

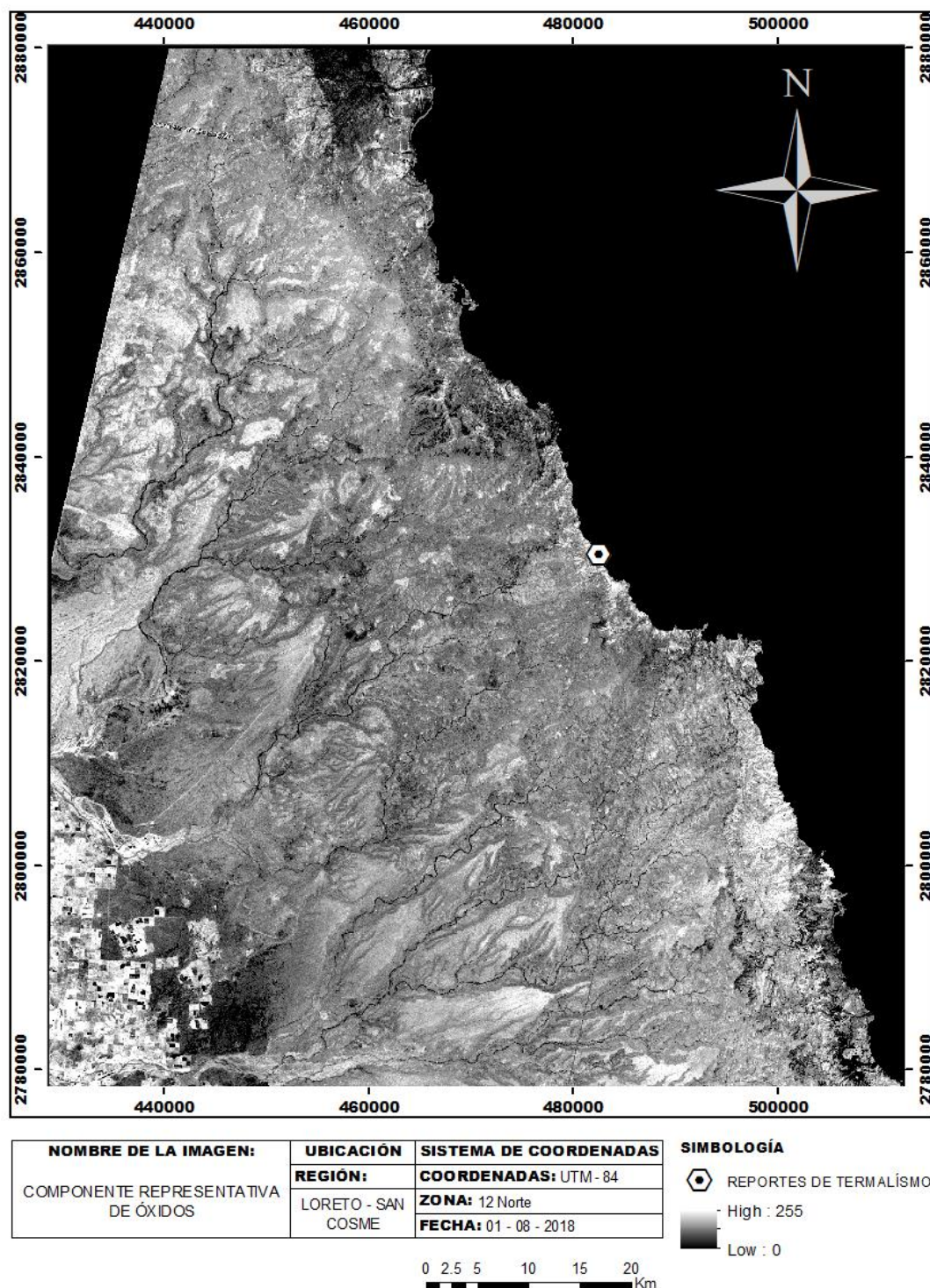


Figura 4.4: Componente representativa de los óxidos con deformación lineal del histograma con saturación del 1%. Los píxeles en colores blancos, o más brillantes, representan la presencia de óxidos mientras que los negros u oscuros representan la ausencia de estos.

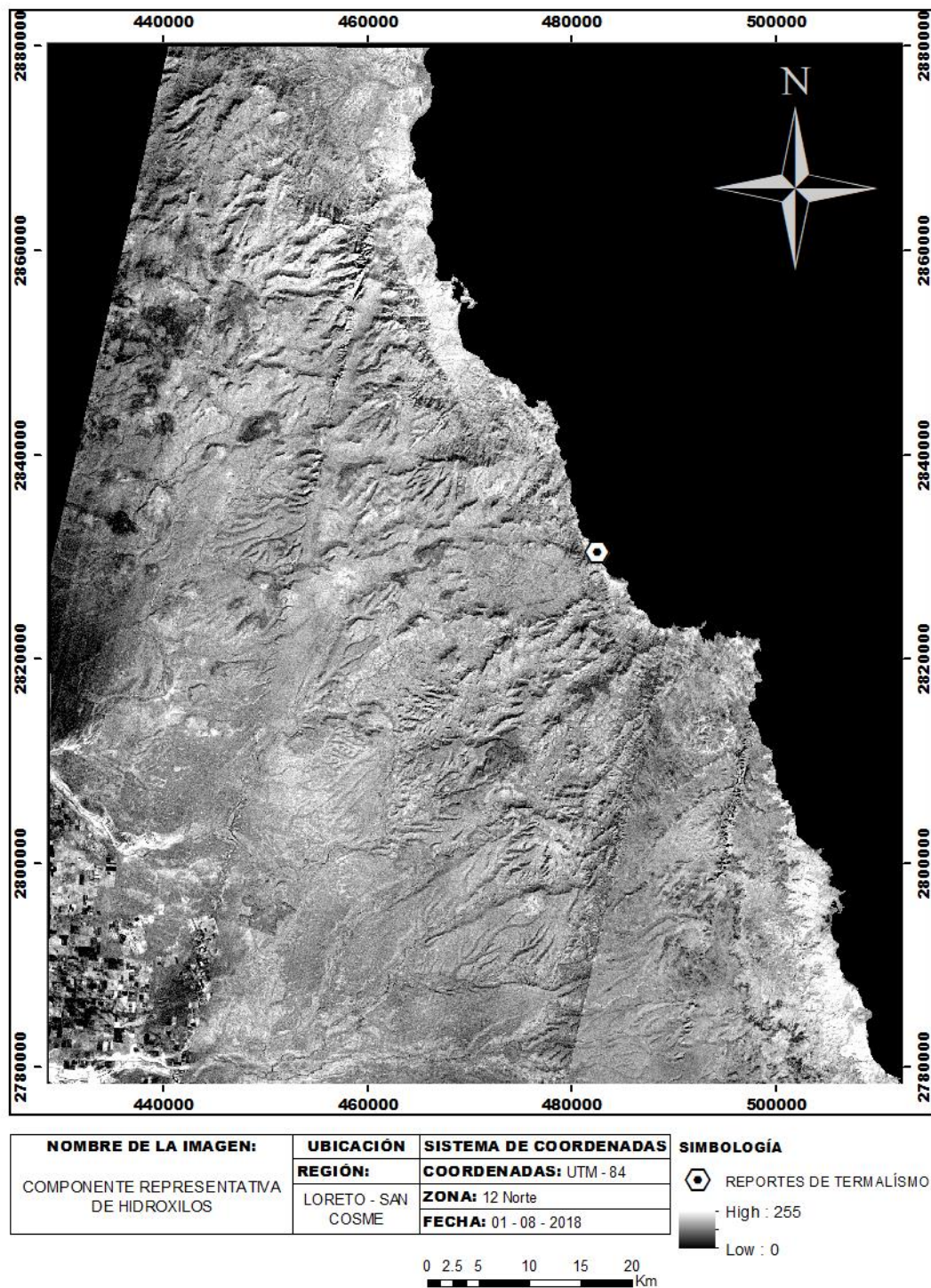


Figura 4.5: Componentes representativa de los hidroxilos con deformación lineal del histograma con saturación del 1%. Los píxeles en colores blancos, o más brillantes, representan la presencia de hidroxilos mientras que los negros u oscuros que no están presentes.

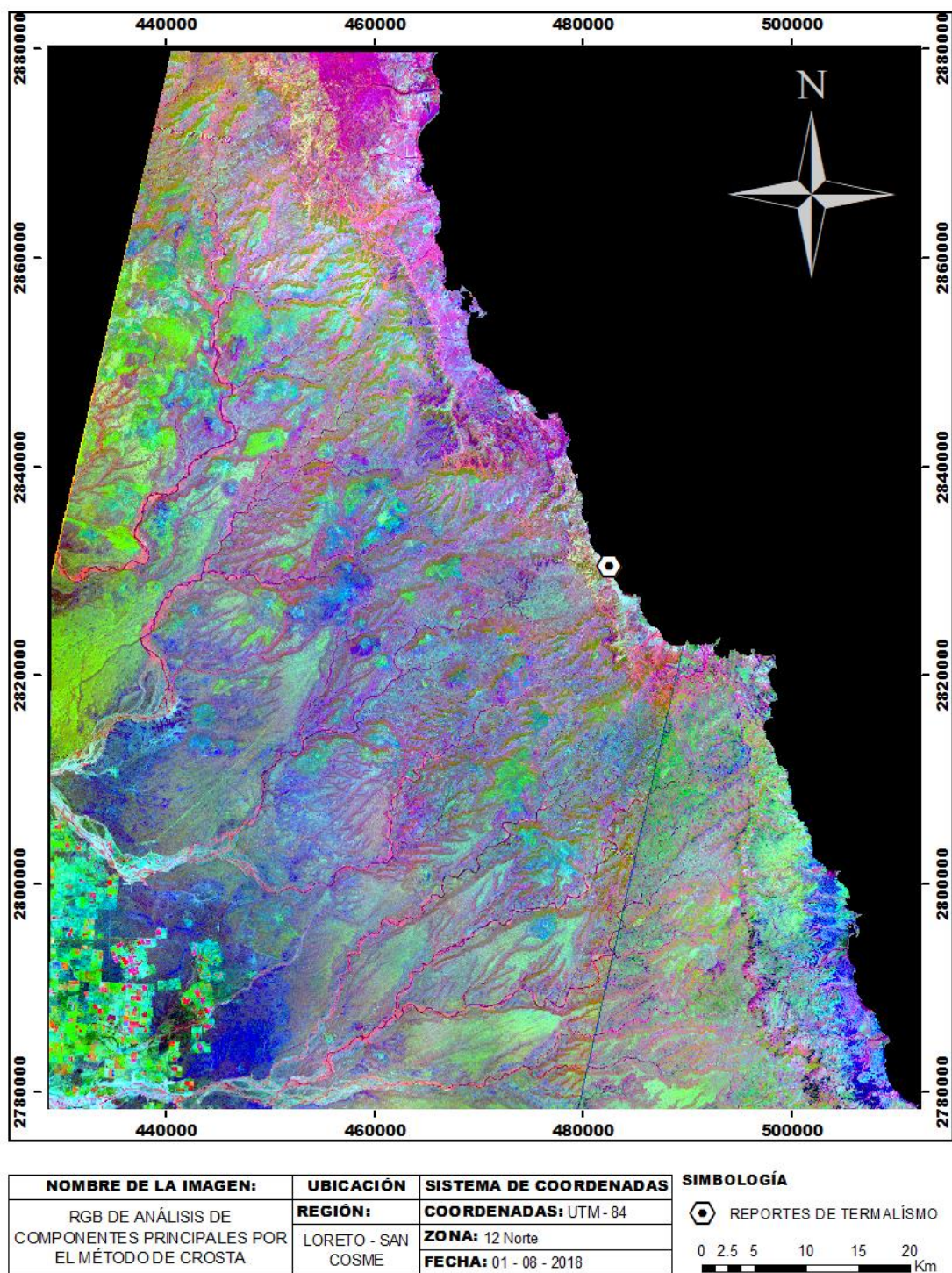


Figura 4.6: Composición a color de las componentes representativas obtenidas en los PCA por el método de Crosta y Moore. Los tonos rojos establecen la presencia de vegetación, los verdes la de los óxidos y los azules la de los hidroxilos.

4.2.2 Realce espacial. Técnica de Moore y Waltz (1983) y Modelo Digital de Elevaciones

A continuación, en la Figura 4.7 se muestran los resultados obtenidos a partir de la técnica de Moore y Waltz, representa la imagen total de filtros direccionales aplicados en la cual se visualizaron lineamientos estructurales en las direcciones NS, NE-SW y NW-SE. Las líneas negras representan los lineamientos identificados, se puede observar que las direcciones preferenciales son NE-SW y NW-SE.

La Figura 4.8 contiene los resultados obtenidos a partir del realce espacial del modelo digital de elevaciones, para visualización de los resultados se muestra como fondo el *hillshade* con elevación y azimuth de 45°. Las líneas negras, al igual que en la técnica de Moore y Waltz representa los lineamientos identificados implementando diferentes azimuths, sus direcciones preferenciales son NE-SW y NW-SE. Las líneas azules presentan las estructuras mapeadas por Padilla y Sánchez (2013), mientras que las rojas representan las estructuras mapeadas por Drake *et. al.* (2017). Los resultados obtenidos en el realce espacial arrojaron lineamientos parecidos a los ya reportados anteriormente que siguen la dirección NW-SE.

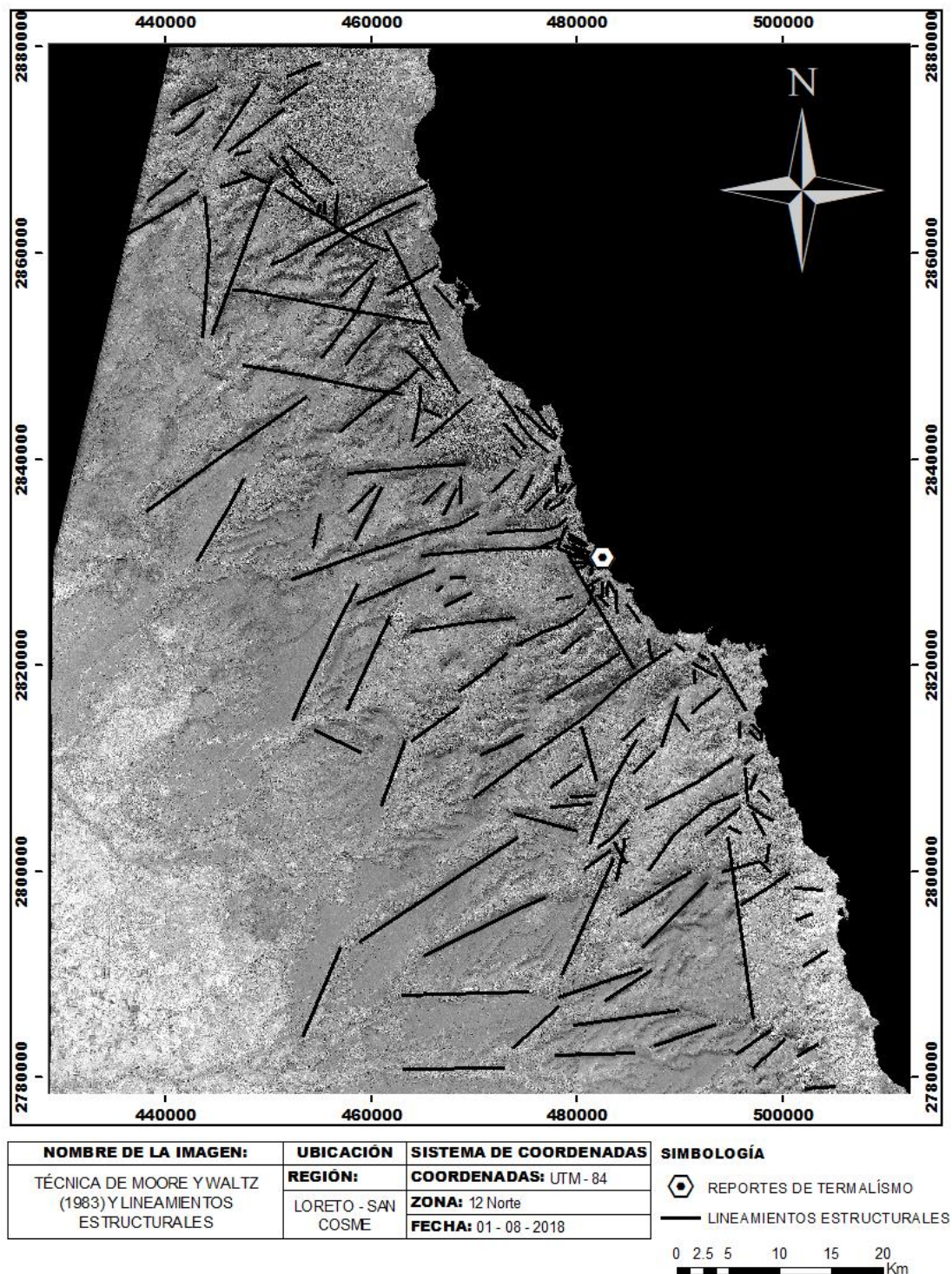


Figura 4.7: Resultados de realce espacial con la técnica de Moore y Waltz, las líneas negras representan los lineamientos estructurales identificados por esta misma técnica.

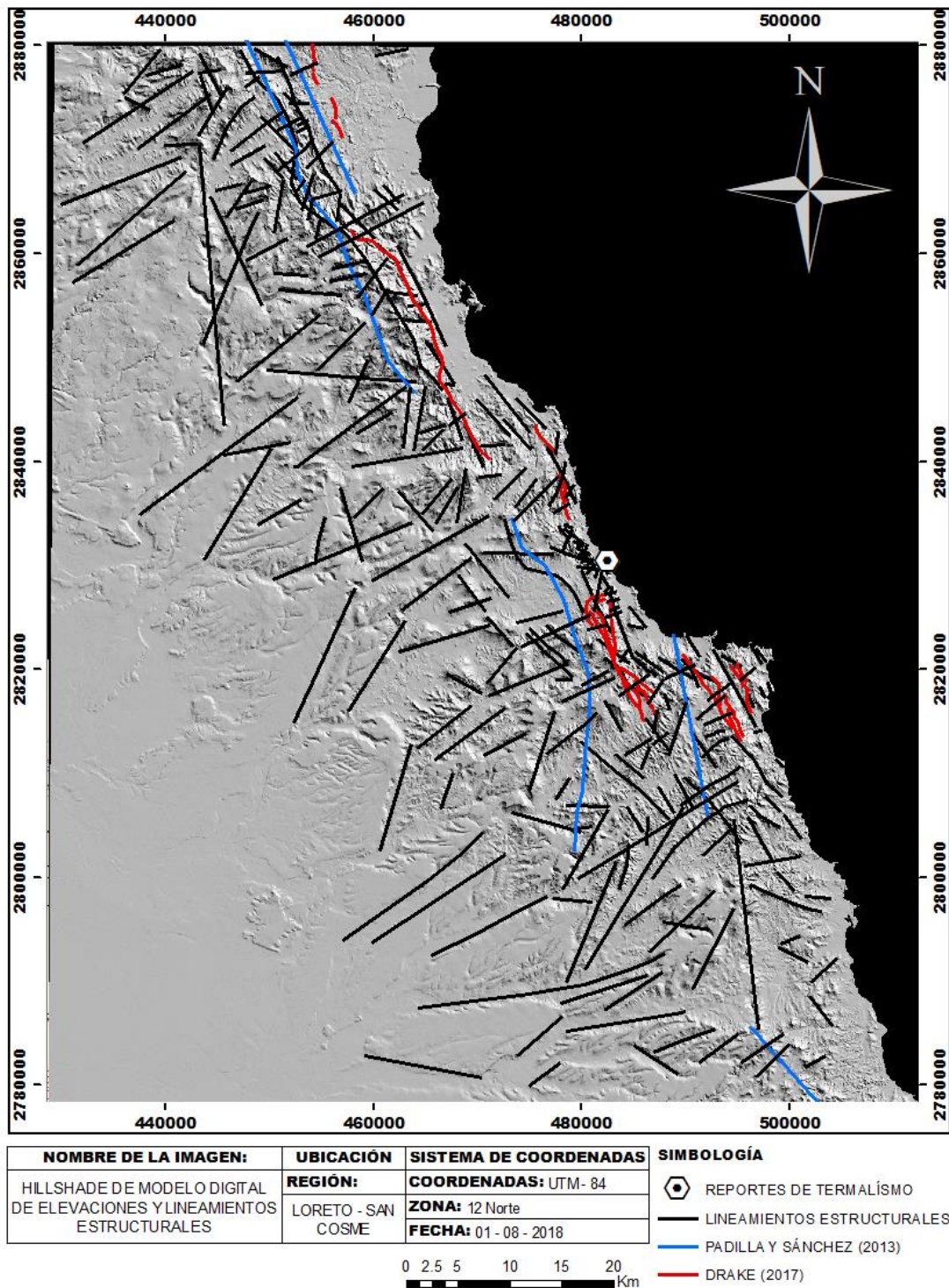


Figura 4.8: Resultados de realce espacial con la herramienta *hillshade*, las líneas negras representan los lineamientos estructurales identificados por esta misma técnica. Las líneas azules presentan las estructuras mapeadas por Padilla y Sánchez (2013), mientras que las rojas representan las estructuras mapeadas por Drake (2017).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tanto el realce espectral como el espacial son procesos útiles para identificar una zona con posible potencial geotérmico. El realce espectral permite identificar zonas de alteración hidrotermal y el realce espacial ayuda a identificar estructuras geológicas, ambas características permiten el reconocimiento a nivel superficial de zonas geotérmicas.

El realce espacial con el modelo digital de elevaciones inicialmente fue implementado para realizar una comprobación de las estructuras identificadas por el método de Moore y Waltz, sin embargo, observando los resultados de ambos métodos se puede decir que el MDE permite mayor visualización de estructuras. A pesar de que los lineamientos de ambos métodos coinciden en gran mayoría, el modelo digital de elevaciones permitió identificar nuevos lineamientos estructurales y además detectar algunos otros que ya habían sido reportados por autores que fueron mencionados en capítulos anteriores.

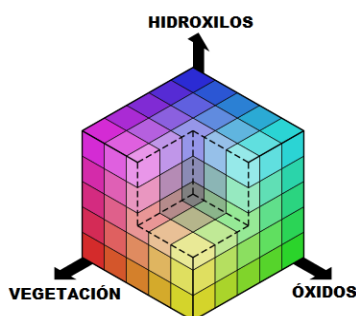


Figura 5.1: Esquema de acomodamiento de componentes principales en composición a color (RGB).

En el color rojo se estableció la componente representativa de la vegetación, en el verde la de los óxidos y en la azul la de los hidroxilos.

La Figura 5.1 se trata de un cubo de colores que ejemplifica la distribución de colores que se hace en una composición a color. Las tonalidades rojas significan presencia de vegetación, las verdes la de óxidos y las azules la de hidroxilos. Los colores como el amarillo representan la presencia de vegetación combinada con minerales pertenecientes al grupo mineralógico de los óxidos, mientras que los rosados y

magenta contienen una mezcla de vegetación con hidroxilos. Las zonas de interés para cumplir el objetivo de esta tesis son las que contengan óxidos e hidroxilos a la vez, es decir, la presencia de tonalidades cian.

Considerando lo anteriormente mencionado acerca del acomodamiento de componentes en el RGB y buscando relacionarlo con la presencia de estructuras geológicas se definieron dos zonas de interés representadas como *Zona A* y *Zona B* en la Figura 5.2. La *Zona A* resulta ser posiblemente la más atractiva debido a que cuenta con estructuras muy particulares que interactúan sobre ella, las cuales siguen las direcciones NE-SW y NW-SE además de que en repetidas ocasiones se interceptan lineamientos con diferentes direcciones. Los resultados del realce espectral reflejan que las componentes representativas de los óxidos e hidroxilos tiene valores altos de brillantez (es decir, tonalidades blancas) dentro de la misma zona, lo cual expresa la presencia abundante de dichos materiales. En la composición a color se tiene el color cian esperado a lo largo de la costa y hasta 10 km al interior de la masa continental. Es importante mencionar que dentro de esta misma zona están los reportes de termalismo que se mencionaron en capítulos anteriores.

El realce espacial de la *Zona B* presenta mayor contribución en la componente de los hidroxilos, sin embargo, la componente de los óxidos también refleja su presencia, pero en menor porcentaje. La composición a color refleja tonos cian y azulados principalmente. En esta parte, al igual que en la *Zona A* se tiene presencia de lineamientos estructurales en las direcciones NE-SW y NW-SE, pero en menor cantidad.

Las zonas delimitadas por recuadros color amarillo en la Figura 5.2, representan zonas que cumplen con las mismas características que las *zonas A* y *B*, pero con menor proporción, por ejemplo, la alteración no es tan marcada o su extensión es menor, por lo que se definen como zonas con interés intermedio.

En la figura 5.3 se muestra la imagen de resultados finales con la geología generada por Drake et. al 2017, en ella se puede ver que la zona de principal alteración y mayor presencia de lineamientos se conforma principalmente por rocas volcánicas,

volcaniclasticas y volcanosedimentarias pertenecientes al Grupo Comondú y aluvión del cuaternario.

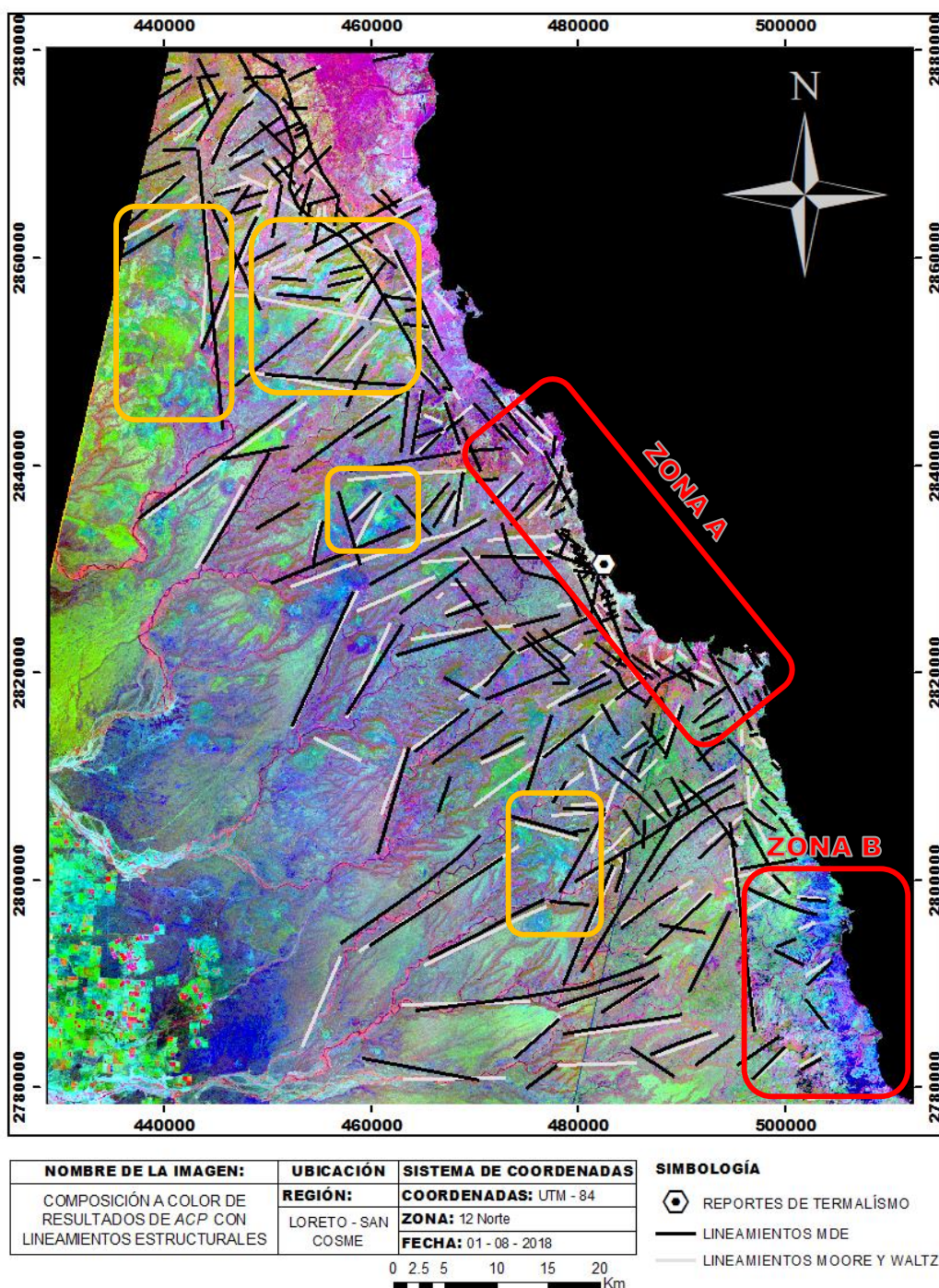


Figura 5.2: Integración de resultados de realce espectral y realce espacial. Las líneas negras representan los lineamientos a partir del modelo digital de elevaciones y las líneas grises representan los encontrados aplicando la técnica de Moore y Waltz. Los recuadros delimitan las zonas de interés.

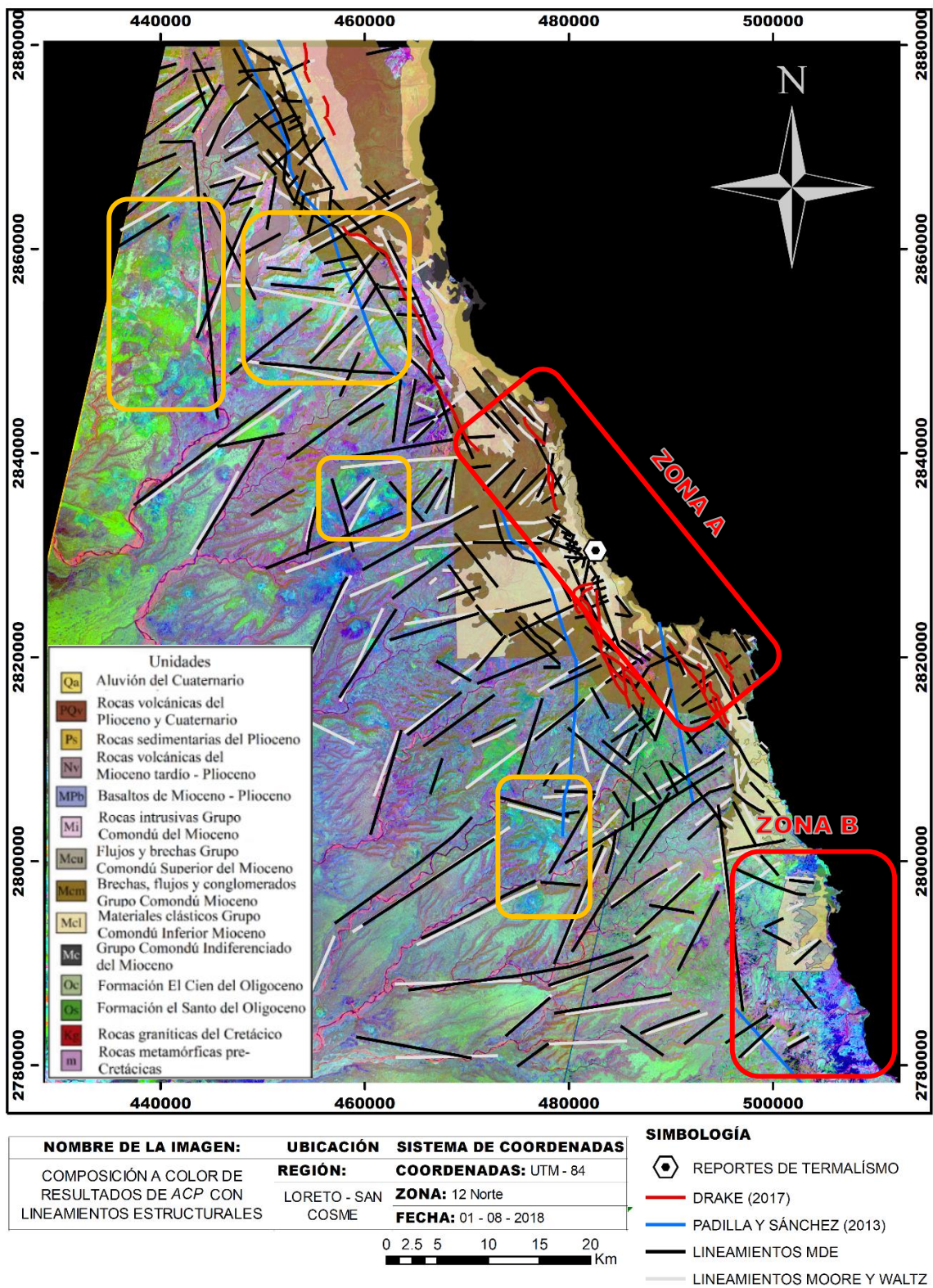


Figura 5.3: Integración de resultados y mapa geológico tomado de Drake et al., 2017

6. CONCLUSIONES

Con el procesamiento de archivos ráster, fue posible reconocer zonas con posible potencial geotérmico identificando características presentes en su superficie, al noroeste del estado de Baja California Sur. El análisis de componentes principales implementando la técnica de Crosta y Moore, permitió identificar las zonas de alteración mineral con presencia de grupos minerales como los óxidos y los hidroxilos, los cuales presentan características destacables en las zonas del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta del espectro electromagnético.

El realce espacial a las imágenes ASTER 1T por medio de la aplicación de filtros direccionales y al MDE con la aplicación de la técnica *hillshade* con diferentes azimuts permiten identificar los lineamientos estructurales, que también forman parte importante de una zona con potencial geotérmico.

La implementación de técnicas de realce espectral con técnicas de realce espacial hace posible una delimitación más consistente de las zonas con potencial a partir de sus características superficiales, es decir, una zona con alteración mineralógica que a su vez presenta rasgos geológicos estructurales que pudieran permitir la liberación de calor en la superficie terrestre son un primer acercamiento a la zona como candidata a tener potencial geotérmico. Las dos zonas identificadas en esta tesis como *Zona A* y *Zona B* presentan ambas características, por lo tanto, se pueden definir como dos prospectos para estudios posteriores.

La zona de interés identificada como *Zona A* coincide con los reportes de termalismo realizados por el Instituto de Geofísica. Estos estudios reportan la presencia de estructuras que siguen un patrón NE-SW y NW-SE, estas mismas direcciones fueron las preferenciales encontradas en el realce espacial realizado en esta tesis, por lo que se tiene mayor certeza en los resultados obtenidos.

Las zonas definidas con mayor interés son las que presentan alteración más notoria y lineamientos estructurales, pero existen algunas otras partes dentro de la

imagen que también presentan rasgos importantes pero en menor cantidad. Es importante tomar en cuenta que el tamaño de la imagen es de aproximadamente 1000 km² y las zonas no se logran ver con gran detalle.

Las zonas identificadas en esta tesis son prospectos interesantes para exploración geotérmica a detalle y su explotación a futuro. La utilización de energía geotérmica en zonas turísticas, como lo es corredor turístico de Loreto, es importante pues permite obtener energía que no contamina ni afecta los atractivos de la zona, sin ser agresiva con el medio ambiente.

RECOMENDACIONES

Se recomienda que el estudio posterior a esta tesis sea un estudio de tipo geológico en las zonas de interés, en el cual se hagan investigaciones de campo y se tenga un registro más detallado de las estructuras geológicas de la zona, así como de las zonas con alteración mineralógica. Si el estudio geológico de campo resulta dar mayores indicios de actividad geotérmica, es recomendable continuar con estudios geoquímicos y geofísicos para definir la zona identificada como apta para ser explotada.

REFERENCIAS

- Arango-Galván, C., Prol-Ledesma, R. M., & Torres-Vera, M. A. (2015). *Geothermal prospects in the Baja California Peninsula*. Geothermics, Vol. 55, 39 – 57.
- Barbier, E., (2002). *Geothermal energy technology and current status: an overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, 3 – 65.
- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Hecker, C., Janssen, L. (2009). *Principles of Remote Sensing: An introductory textbook*. Netherlands: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing. (5th Ed)*. The Guilford Press. New York, USA. 55
- CONABIO, (2008). División política estatal 1:250000. Catálogo de metadatos geográficos(http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/destdv250k_2gw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no).
- Crosta, A. P., & Moore, J. (1989). *Enhancement of Landsat Thematic Mapper Imagery for Residual Soil Mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain*. Proceedings of the Seventh Thematic Conference of Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada., ERIM, 1173-1187.
- Crosta, A. P., & Moore, J. (1989). *Geological mapping using Landsat Thematic Mapper imagery in Almeria Province, south-east Spain*. Remote Sensing, Vol. 10, 505 – 514.
- Drake, W. R., (2017). *Tectono-stratigraphic evolution of the Comondú Group from Bahía de La Paz to Loreto, Baja California Sur, Mexico*. Tectonophysics, 719 – 720, 107 – 134.
- Durán-Calderón, J. I. (2016). *Estratigrafía Regional y significado tectónico del Grupo Comondú en Baja California Sur, México* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Elizalde-Guerrero, D. J. (2017). *Identificación de zonas de exploración con potencial geotérmico utilizando percepción remota y sistemas de información*

geográfica, en el Occidente del Volcán Ceboruco, Nayarit (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.

- Faulds, E. J. & Hinz, N.H. (2015). *Favorable tectonic and structural settings of geothermal systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for discovering blind geothermal systems*. Proceedings World Geothermal Congress.
- Fernández De la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R. M., & Orozco, G. (2001). *Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico)*. Geofísica Internacional, 40(3), 147 - 162.
- Ferrari *et al.*, (2017). *Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift*. Earth Science Reviews, Vol. 183, 115 – 152.
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., & Gehrels, G. E. (2007). *Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf*. Geological Survey of America Bulletin. Vol. 119, 1313-1336.
- Hausback, B.P., (1984). *Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, México*. Frizzel, V. A., Jr. (ed.) Geology of the Baja California Peninsula. Pacific Section, SEPM Special Publications, Tulsa, 39, 219–236
- Ibáñez Pérez, R., (2011). *Crecimiento económico, desarrollo sustentable y turismo: Una aproximación del posicionamiento de Baja California Sur (BCS) en el Barómetro de Sustentabilidad*.
- Lee, K. C. (2001). *Classification of geothermal resources by exergy*. Geothermics, Vol. 30, 431 – 442.
- Lopez-Lara, K. A. (2017). *Localización de zonas con potencial geotérmico usando técnicas de percepción remota, en el Centro-Oriente de Sonora, México* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.

- McFall, C.C., (1968). *Reconnaissance geology of the Concepcion Bay area, Baja California, Mexico*. Stanford University Publications in Geological Sciences, Vol. 10, 1-25.
- Moeck, I. S. (2014). *Catalog of geothermal play types based on geologic controls*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 37, 867 – 882.
- Moore, G. K., & Waltz, F. A. (1983). *Objective produce for lineaments enhancement and extraction*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 79, No. 5, 641 – 647.
- Padilla y Sánchez, R. J. *et al.*, (2013). *National Autonomous University of Mexico Tectonic Map of Mexico GIS Project*. American Association of Petroleum Geologists GIS Open Files series (<http://www.datapages.com/gis-map-publishing-program/gis-open-files/geographic/tectonic-map-of-mexico-2013>).
- Prol-Ledesma, R. M. (2000). *Evaluation of the reconnaissance results in geothermal exploration using GIS*. Geothermics, Vol. 29, 89 – 103.
- Prol-Ledesma, R. M. & Morán-Zenteno, D. J., (2019). *Heat flow and geothermal provinces in Mexico*. Geothermics, Vol. 78, 183 – 200.
- Ruiz-Armenta, J. R. & Prol-Ledesma, R. M., (1995). *Técnicas de procesamiento de imágenes en exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal*. Universidad Complutense. Física de la Tierra, Vol. 7, 105- 137.
- Ruiz-Armenta, J. R. & Prol-Ledesma, R. M., (1998). *Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico*. International Journal of Remote Sensing, 19:10, 1981-2000.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). Carta Geológico-Minera. *Villa Constitución G-12-7-8, Baja California Sur*.
- Sicilia-Muñoz, R. A., (2000). *El corredor turístico Loreto- Nopoló- Puerto Escondido, Baja California Sur, en el contexto de los centros integralmente planteados*. Cuadernos de Turismo, Vol. 5, 56-68.

- Spelz-Madero, R. M. (2008). *Geomorfología tectónica de una falla normalactiva de bajo ángulo en las Sierras Cucapa y el mayor, Baja California, México* (Tesis de Doctorado). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Stock, J. M. & Hodges K. V., (1989). *Pre-pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the pacific plane*. Tectonics, Vol. 8, 99 – 115.
- Umhoefer el al., (2002). *Evolution of the margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Peninsula, México*. GSA Bulletin, Vol. 14, 879 – 868.
- U.S. Geological Survey, (2015). *AST_L1T Product User's Guide*. Version 1.0.
- Valencia-Moreno, M., & Ortega-Rivera, A. (2011). *Cretácico Tardío-Eoceno Medio en el noroeste de México–evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide)*, in Calmus, Thierry, ed., *Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 7*.

Referencias Electrónicas

- Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. Consultado el 27/04/18
- Earth Explorer
<https://earthexplorer.usgs.gov/>. Consultado el 18/01/18
- Portal electrónico de CeMIEGeo
<http://cemiegeo.org/index.php/geotermia?id=6>. Consultado el 20/04/2018
- INEGI
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/resolucion.aspx>. Consultado el 26/04/2018