

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Profundidad de la isoterma de Curie en zonas con
potencial geotérmico en Baja California:
integración de información aeromagnética y
percepción remota**

Que para obtener el título de
Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Mauricio Velasco Zúñiga

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Rosa María Prol Ledesma



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PARA MI MADRE

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, porque nunca dejo de apoyarme a pesar de estar tan lejos, por creer siempre en mí, por sus enseñanzas, por su paciencia, por haberme forjado como un hombre de bien, por su devoción y, sobre todo, por su ilimitado amor.

A mi abuela, por sus enseñanzas, por su incondicional apoyo, y por el cariño que me brindó a lo largo de los años.

En especial a la Dra. Rosa María Prol Ledesma, directora de este proyecto, por la orientación y seguimiento del mismo, sobre todo por la motivación, la paciencia, la confianza y el apoyo recibido.

Al jurado, al Dr. Osvaldo Sanchez Zamora, a la M.C.T. Alejandra Selene Membrillo Abad, a la Ing. Xochitl Flores Soto, al M.C. Juan Esteban Hernandez Quintero, por las asesorías y correcciones que hicieron posible este proyecto.

A mi alma mater, a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería, a mis profesores y a mis compañeros.

El presente trabajo se desarrolló gracias al apoyo otorgado por los siguientes proyectos: Proyecto de Fondo de Sustentabilidad SENER – CONACyT 152823 “Evaluación de los Recursos Geotérmicos de la Península de Baja California: Continentales, Costeros y Submarinos”. Y del Proyecto P-01 CeMIEGeo “Mapas de Gradiente Geotérmico y Flujo de Calor para la República Mexicana”.

Al Taller de Ciencia para Jóvenes 2011, proyecto PAPIME-PE103409 de la DGAPA de la UNAM, por su apoyo y la inducción para estudiar una carrera científica.

PROFUNDIDAD DE LA ISOTERMA DE CURIE EN ZONAS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO EN BAJA CALIFORNIA: INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN AEROMAGNÉTICA Y PERCEPCIÓN REMOTA

Mauricio Velasco Zúñiga*

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se planteó una estrategia de exploración combinando técnicas de percepción remota con análisis de datos aeromagnéticos en las localidades de San Felipe y Puertecitos, Baja California, con la finalidad de estimar la profundidad del punto de Curie y delimitar evidencias superficiales de minerales característicos de actividad hidrotermal. En los métodos de percepción remota se utilizaron: un modelo digital de elevación para identificar lineamientos estructurales e imágenes satelitales Landsat 5 sensor TM para el realce espectral con la finalidad de limitar zonas que presentan alteración hidrotermal. Los resultados mostraron que al menos ocho zonas presentan la posible ocurrencia de minerales propios de actividad hidrotermal y tienen características estructurales favorables para el desarrollo de una etapa de exploración. Se estimó la profundidad de la isoterma de Curie con el análisis de espectros de potencia usando datos aeromagnéticos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano. Las profundidades promedio obtenidas en Puertecitos mostraron valores aproximadamente de 5.3 km al sur y 6.5 km al norte. En el caso de San Felipe, la profundidad promedio fue alrededor de 4.7 km. Finalmente, se integraron los resultados de los métodos empleados para identificar zonas de interés geotérmico.

PALABRAS CLAVE: *energía geotérmica, isoterma de Curie, percepción remota*

* Facultad de Ingeniería — Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.3. OBJETIVOS.....	16
CAPÍTULO II. GENERALIDADES	17
2.1. SISTEMA GEOTÉRMICO.....	17
2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	19
2.3. GEOLOGÍA DE LAS ZONAS DE INTERÉS	19
2.3.1. Puertecitos	20
2.3.2. San Felipe.....	23
CAPÍTULO III. MÉTODOS MAGNÉTICO Y DE PERCEPCIÓN REMOTA	26
3.1. CAMPO GEOMAGNÉTICO INTERNACIONAL DE REFERENCIA (IGRF)	26
3.2. ISOTERMA DE CURIE	26
3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS.....	26
3.4. ANTECEDENTES DE PERCEPCIÓN REMOTA	27
3.5. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	28
3.6. INTERACCIONES CON LA ATMÓSFERA	28
3.6.1. <i>Dispersión</i>	28
3.6.2. <i>Ventanas atmosféricas</i>	29
3.7. INTERACCIONES CON LA SUPERFICIE.....	30
3.8. ADQUISICIÓN DE DATOS	32
3.9. FIRMAS ESPECTRALES.....	35
3.9.1. <i>Firmas espectrales de minerales con alteración hidrotermal</i>	36
3.10. CORRECCIONES DE LA IMAGEN	38
3.11. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	39
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	40
4.1. MAGNÉTICA.....	40

4.1.1. <i>Análisis de espectros de potencia</i>	40
4.2. REALCE ESPACIAL	43
4.3. REALCE ESPECTRAL	44
4.3.1. Cociente de bandas	44
4.3.2. Análisis de componentes principales.....	45
4.3.3. Análisis de componentes principales dirigidos	46
4.3.4. Análisis de vegetación	47
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1. RESULTADOS	49
5.1.1 <i>Resultados del Método Magnético</i>	49
5.1.2 <i>Resultados del método de Realce Espacial</i>	50
5.1.3 <i>Resultados del Método de Realce Espectral</i>	53
5.1.3.1. Cociente de Bandas	53
5.1.3.2. Análisis de Componentes Principales	55
5.1.3.2. Análisis de Componentes Principales Dirigidos	56
5.1.3.3. Análisis de la Vegetación	61
5.1.4. <i>Integración de Resultados</i>	68
5.2. DISCUSIÓN.....	70
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	74
REFERENCIAS	76

Índice de figuras y tablas

<i>FIGURA 1.1.</i> CAPACIDAD OPERATIVA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA POR PAÍS.	11
<i>FIGURA 2.1.</i> MODELO IDEALIZADO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO.	18
(MODIFICADO DE DICKSON Y FANELLI, 2004)	18
<i>FIGURA 2.2.</i> LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO.....	19
<i>FIGURA 2.3.1</i> COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA ZONA DE PUERTECITOS.....	20
(MODIFICADO DE CARTA LÁZARO CÁRDENAS H11-5-6, SGM)	20
<i>FIGURA 2.3.2</i> UNIDADES LITOLÓGICAS DE LA ZONA DE PUERTECITOS.	21
(MODIFICADO DE CARTA LÁZARO CÁRDENAS H11-5-6, SGM)	21
<i>FIGURA 2.4.</i> MAPA GEOLÓGICO DEL ÁREA DE PUERTECITOS.	22
(MODIFICADO DE NAGY, 2000)	22
<i>FIGURA 2.5.1</i> COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA ZONA DE SAN FELIPE.....	23
(MODIFICADO DE CARTA SAN FELIPE H11-3, SGM)	23
<i>FIGURA 2.5.2 A)</i> UNIDADES LITOLÓGICAS DE LA ZONA SUR DE SAN FELIPE.....	24
(MODIFICADO DE CARTA LÁZARO CÁRDENAS H11-5-6, SGM) B) UNIDADES LITOLÓGICAS DE LA ZONA NORTE DE SAN FELIPE (MODIFICADO DE CARTA SAN FELIPE H11-3, SGM).....	24
<i>FIGURA 2.6.</i> MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE SAN FELIPE.	25
(MODIFICADO DE SEILER <i>ET AL.</i> , 2010).....	25
<i>FIGURA 3.1.</i> SE MUESTRAN LAS LÍNEAS DE VUELO Y LAS DE CONTROL.....	27
(NETTLETON, 1973)	27
<i>FIGURA 3.2.</i> LA DISPERSIÓN DE TRES TIPOS DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS: A) PARTÍCULAS DE POLVO Y HUMO DE FORMA IRREGULAR; B) MOLÉCULAS QUE MUESTRAN SIMETRÍAS PARECIDAS; C) GOTAS DE AGUA QUE DISPERSAN LA ENERGÍA.	29
(MODIFICADO DE CAMPBELL <i>ET AL.</i> , 2011)	29
<i>FIGURA 3.3.</i> REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LAS VENTANAS ATMOSFÉRICAS. LA REGIÓN SOMBREADA REPRESENTA LA ABSORCIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	30
(MODIFICADO DE CAMPBELL <i>ET AL.</i> , 2011)	30
<i>FIGURA 3.4.</i> TRANSMISIÓN. LA RADIACIÓN INCIDENTE PASA A TRAVÉS DE UN OBJETO SIN ATENUACIÓN SIGNIFICATIVA (IZQUIERDA) O PUEDE SER UNA TRANSMISIÓN SELECTIVA (DERECHA). PARA EL CASO DE LA DERECHA, SE TRANSMITE TODA LA RADIACIÓN VISIBLE EXCEPTO EL AZUL.....	32
(MODIFICADO DE CAMPBELL <i>ET AL.</i> , 2011)	32
<i>FIGURA 3.5.</i> DE ACUERDO CON EL ORIGEN DE LA FUENTE DE RADIACIÓN:	33
A) SENSOR PASIVO; Y B) SENSOR ACTIVO.....	33

(PÉREZ, 2007).....	33
TABLA 3.3. SE PRESENTAN LOS SATÉLITES LANDSAT Y SUS SENSORES ORGANIZADOS CRONOLÓGICAMENTE. (MODIFICADO DE CAMPBELL ET AL., 2011).....	35
FIGURA 3.6. EL ESQUEMA MUESTRA LA FIRMA ESPECTRAL DE VEGETACIÓN (VERDE), SUELO (ROJO) Y AGUA (AZUL). LOS NÚMEROS 1, 2, 3, 4, 5 Y 7 CORRESPONDEN A LAS BANDAS DEL SENSOR TM DE LANDSAT. (MCCLOY ET AL., 2009).....	35
FIGURA 3.7. FIRMAS ESPECTRALES DE MINERALES PERTENECIENTES AL GRUPO DE ÓXIDOS DE HIERRO.	37
EN ESTE CASO, SE MUESTRAN BANDAS DEL SENSOR TM, DONDE SE APRECIAN LOS RASGOS DE ALTA REFLECTANCIA Y ABSORBANCIA DE LOS MINERALES.....	37
(HUNT Y ASHLEY, 1979).....	37
FIGURA 3.8. FIRMAS ESPECTRALES DE MINERALES PERTENECIENTES AL GRUPO DE HIDROXILOS. EN ESTE CASO, SE MUESTRAN BANDAS DEL SENSOR TM, DONDE SE APRECIAN LAS ALTAS REFLECTANCIAS Y ABSORBANCIAS DE LOS MINERALES.	38
(HUNT Y ASHLEY, 1979).....	38
FIGURA 4.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS PROFUNDIDADES Z_T Y Z_B EN UN ESTRATO MAGNÉTICO.	42
FIGURA 4.2. A) GRÁFICA DE LA PENDIENTE DE Z_0 ; B) GRÁFICA DE LA PENDIENTE DE Z_T	43
FIGURA 5.1. MAPA MAGNÉTICO DE PUERTECITOS. AL SURESTE SE TIENE UN CPD ≈ 5.3 KM. (REMARcado EN NEGRO) Y AL NORESTE UN CPD ≈ 6.5 KM. (REMARcado EN BLANCO).	49
FIGURA 5.2. MAPA MAGNÉTICO DE SAN FELIPE. SE TIENE UN CPD ≈ 4.7 [KM]. REALCE ESPACIAL.	50
FIGURA 5.3. A) DIRECCIÓN EN NW-SE Y BORDES; B) DIRECCIÓN N-S Y BORDES, PUERTECITOS.	51
FIGURA 5.4. A) DIRECCIÓN EN NE-SW Y BORDES; B) DIRECCIÓN E-W Y BORDES, PUERTECITOS.	51
FIGURA 5.5. A) DIRECCIÓN NW-SE Y BORDES; B) DIRECCIÓN N-S Y BORDES, SAN FELIPE.	52
FIGURA 5.6. A) DIRECCIÓN NE-SW Y BORDES B) DIRECCIÓN E-W Y BORDES, SAN FELIPE.	52
FIGURA 5.7. REALCE ESPECTRAL DE PUERTECITOS CON COCIENTE DE BANDAS. EN COLOR ROJO, SE TIENEN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.....	53
FIGURA 5.8. REALCE ESPECTRAL DE PUERTECITOS CON COCIENTE DE BANDAS. EN COLOR ROJO, SE TIENEN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.....	54
TABLA 5.1. MATRIZ DE CARGA DE LA ZONA DE PUERTECITOS, OBTENIDA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	55
TABLA 5.2. MATRIZ DE CARGA DE LA ZONA DE SAN FELIPE OBTENIDA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.....	56
TABLA 5.3. MATRICES DE CARGA DE LA ZONA DE PUERTECITOS OBTENIDAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDOS. A) MATRIZ DE CARGA DE HIDROXILOS B) MATRIZ DE CARGA DE VEGETACIÓN Y C) MATRIZ DE CARGA DE LOS ÓXIDOS. ...	57
FIGURA 5.9. COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA ZONA DE PUERTECITOS, EN COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.....	58
TABLA 5.4. MATRICES DE CARGA DE LA ZONA DE SAN FELIPE OBTENIDAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDOS. A) MATRIZ DE CARGA DE HIDROXILOS B) MATRIZ DE CARGA DE VEGETACIÓN Y C) MATRIZ DE CARGA DE LOS ÓXIDOS.....	59

<i>FIGURA 5.10.</i> COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDOS DE LA ZONA DE SAN FELIPE, EN COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.	60
<i>FIGURA 5.11.</i> COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR PARA VISUALIZAR LOS LUGARES DONDE EXISTE VEGETACIÓN, EN EL CAÑÓN DEL ROJO SE COLOCÓ LA BANDA 4, EN EL VERDE LA BANDA 3 Y EN EL AZUL LA BANDA 2. SAN FELIPE.	61
<i>FIGURA 5.12.</i> A) ÍNDICE DE VEGETACIÓN DE DIFERENCIA NORMALIZADA (NDVI) B) IMAGEN BOOLEANA DE CEROS Y UNOS, DONDE EL VALOR DE UNO ES LA VEGETACIÓN Y CERO OTROS MATERIALES. SAN FELIPE.	62
<i>TABLA 5.5.</i> MATRICES DE CARGA DE LA ZONA DE SAN FELIPE OBTENIDAS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDOS USANDO LA MÁSCARA DE LA VEGETACIÓN GENERADA POR EL NDVI. A) MATRIZ DE CARGA DE HIDROXILOS B) MATRIZ DE CARGA DE VEGETACIÓN Y C) MATRIZ DE CARGA DE LOS ÓXIDOS.....	63
<i>FIGURA 5.13.</i> COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DIRIGIDOS USANDO LA MÁSCARA NDVI DE LA ZONA DE SAN FELIPE, EN COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.....	64
<i>FIGURA 5.14.</i> A) MAPA DE LOS CLÚSTERES ENCONTRADOS, B) VERIFICACIÓN CON POLÍGONOS DE ENTRENAMIENTO, C) IMAGEN SATELITAL DE UNA ZONA CON VEGETACIÓN CON COORDENADAS (706260.35 M E, 3427499.12 M N), D) FIRMA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN. SAN FELIPE.	65
<i>TABLA 5.6.</i> MATRICES DE CARGA DE LA ZONA DE SAN FELIPE OBTENIDAS A PARTIR EL ACPD USANDO LA MÁSCARA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA. A) MATRIZ DE CARGA DE HIDROXILOS B) MATRIZ DE CARGA DE VEGETACIÓN Y C) MATRIZ DE CARGA DE LOS ÓXIDOS.....	66
<i>FIGURA 5.15.</i> COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR DEL ACPD USANDO LA MÁSCARA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA DE LA ZONA DE SAN FELIPE, EN COLOR ROJO SE MUESTRAN LOS ÓXIDOS, EN VERDE LA VEGETACIÓN Y EN AZUL LOS HIDROXILOS.	67
<i>FIGURA 5.16.</i> INTEGRACIÓN DE RESULTADOS ANOMALÍA MAGNÉTICA REDUCIDA AL POLO CON LINEAMIENTOS Y BORDES DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS; B) COMPOSICIÓN POR RGB EN FALSO COLOR, EL COLOR MAGENTA REPRESENTA ZONAS CON CONTRIBUCIÓN DE ÓXIDOS E HIDROXILOS ENCERRADAS POR RECTÁNGULOS AMARILLOS, A PARTIR DEL ACPD CON LINEAMIENTOS Y BORDES GEOLÓGICOS ENCONTRADOS, PUERTECITOS.	68
<i>FIGURA 5.17.</i> INTEGRACIÓN DE RESULTADOS A) ANOMALÍA MAGNÉTICA REDUCIDA AL POLO CON LINEAMIENTOS Y BORDES DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS; B) COMPOSICIÓN RGB EN FALSO COLOR A PARTIR DEL ACPD, EL COLOR MAGENTA REPRESENTA ZONAS CON CONTRIBUCIÓN DE ÓXIDOS E HIDROXILOS ENCERRADAS POR RECTÁNGULOS AMARILLOS, CON MÁSCARA DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA Y CON LINEAMIENTOS GEOLÓGICOS ENCONTRADOS, SAN FELIPE.	69

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El escenario actual de los precios de combustibles fósiles, junto con la volatilidad del mercado y sus implicaciones ambientales causadas por el uso excesivo de estos, han ocasionado que la mayoría de las naciones inviertan en el desarrollo de tecnologías eficientes para la exploración y la explotación de energías limpias. Estados Unidos presenta la mayor capacidad operativa instalada para producción de energía geotermoeléctrica en el mundo, igualmente, México se encuentra entre los primeros diez países con mayor capacidad geotérmica instalada a nivel mundial (Geothermal Energy Association, 2017).

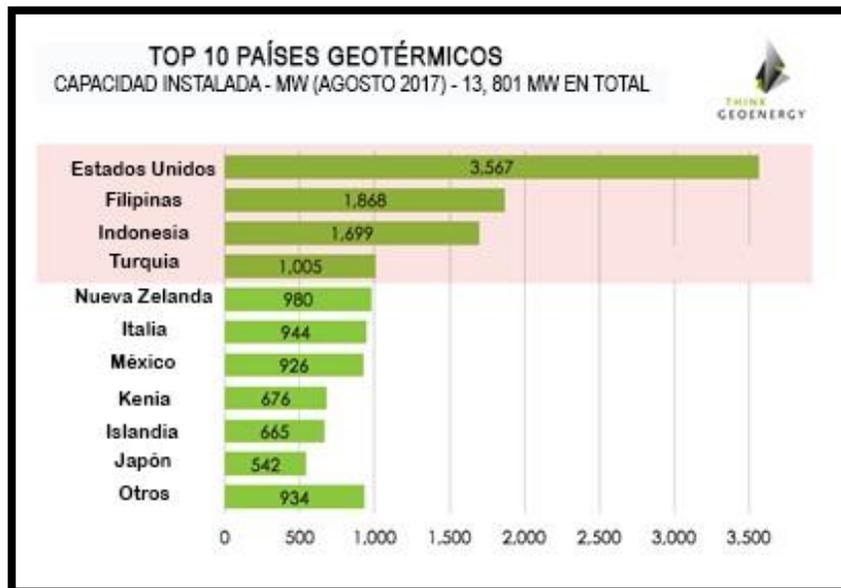


Figura 1.1. Capacidad operativa de energía geotérmica por país.
(Modificado de Geothermal Energy Association, 2017)

La energía geotérmica en México tiene un enorme potencial por ser explotado sobre todo en fuentes hidrotermales ubicadas generalmente en regiones de vulcanismo activo, donde las placas tectónicas se separan y forman fallas y fracturas geológicas. La presencia

de este recurso energético se extiende a lo largo de todo el país; por ejemplo, en Cerro Prieto y Las Tres Vírgenes en la península de Baja California. La actividad geotérmica también es abundante en la parte central del territorio nacional; en Michoacán, se encuentra el yacimiento Los Azufres; en Puebla, el campo geotérmico Los Humeros; y en Nayarit, el campo Domo San Pedro. Asimismo, existen zonas del territorio nacional que no han sido exploradas y que almacenan una cantidad considerable de este recurso como los poblados de Puertecitos y San Felipe (Baja California).

Los estudios de Gutiérrez-Negrín (2016) muestran la utilización de la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica en cinco campos geotérmicos para el mismo año (*Tabla 1.1*).

CAMPO	CAPACIDAD (MW)		DUEÑO / OPERADOR	POZOS EN PRODUCCIÓN	
	INSTALADA	EN OPERACIÓN		PRODUCCIÓN	INYECCIÓN
Cerro Prieto, BC	570.0	570.0	CFE Generación VI	150	30
Los Azufres, Mich.	247.8	224.8		44	6
Los Humeros, Pue.	93.6	68.6		23	3
Las Tres Vírgenes, BCS	10.0	10.0		3	2
Domo San Pedro, Nay.	35.5	25.5	Grupo Dragón	4	3
Total	956.9	898.9		224	44

Tabla 1.1. Generación de energía geotérmica a eléctrica para el año 2016 en cinco campos geotérmicos.

(Modificado de Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2016)

Sin embargo, en México, existen más de 500 mil viviendas sin electricidad, principalmente en comunidades indígenas y rurales. La Reforma Energética está pendiente de electrificar a más de 43 mil localidades en el país, donde habitan más de 2 millones 200 mil personas, San Felipe y Puertecitos en Baja California, son dos de las localidades que no se encuentran dentro de la red de la CFE (Aguirre C., 2016).

La red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) no abastece de energía a la mayoría de localidades de Baja California, sea por el alto costo de tendido de la red, o el uso de suelo de predios no regularizados. Sin energía eléctrica y sumando a esa situación temperaturas que en el verano llegan a los 50 °C, resulta en un escenario que hace casi

imposible el desarrollo de una comunidad. Por lo que una de las opciones más viables es usar electricidad proveniente de energías renovables, que puedan abastecer las necesidades de los locales.

En agosto de 2016 se inauguró la primer micro red sustentable de electricidad en la localidad de Puertecitos, realizado por el centro de estudios de las energías renovables de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), alimentada por energías renovables: solar y eólica. Se determinó una tarifa de 0.9 pesos mexicanos por kilowatts – hora. Pese a eso, no se logran cubrir todas las necesidades de los locales y turistas (Velázquez N., 2017).

En las zonas de San Felipe y de Puertecitos se han realizado estudios geofísicos y geoquímicos debido al alto interés por las manifestaciones hidrotermales reportadas. En los estudios geofísicos se realizaron: sondeos electromagnéticos transitorios, sondeos magnetotelúricos, sondeos eléctricos verticales, así como estudios de gravimetría y magnetometría; teniendo como resultados la presencia de cuerpos conductivos que pueden estar asociados con yacimientos geotérmicos (Slyker, 1970; CONAGUA, 1984; Flores C. *et al.* 1996, y por Pamplona U. 2007). Los estudios sobre las características geoquímicas de las manifestaciones hidrotermales de las zonas, reportados por Álvarez (1995), Barragán R.M., *et al* (2001) y más recientemente por Prol-Ledesma *et al.* (2010), muestran que las manifestaciones intermareales de Puertecitos son descargas de agua termal a través de fracturas en las rocas de la costa que tienen temperaturas que varían de 52 a 73 °C y se estimaron temperaturas de 250-300 °C, cerca de la superficie de la deposición de clinozoisita, para este sitio se reportó la presencia de baja resistividad causada probablemente por una intrusión salina y sugieren la ocurrencia de un posible conductor geotérmico al norte de Puertecitos. Los estudios geoquímicos reflejan que las manifestaciones hidrotermales de la zona de San Felipe tienen temperaturas en un rango de entre 31 a 74°C (la temperatura del agua de mar en esa zona es de 28°C). Debido a estos estudios, geofísicos y geoquímicos, surge el interés de explorar las zonas de estudio con métodos de percepción remota para delimitar y jerarquizar áreas que presentan alteraciones hidrotermales y estructuras geológicas asociadas, y usar datos aeromagnéticos para estimar las profundidades de la isoterma de Curie.

La alteración hidrotermal está consistentemente asociada a planos de fallas (orientación N-S a NNW) que se interpretan como los conductos principales de circulación hidrotermal, presentando alteraciones como oxidación, caolinización y silicificación, implicando que, por la acción hidrotermal, los componentes mineralógicos de las rocas sufran la destrucción total o parcial de la mineralogía original. Tal es el caso de los minerales ferromagnesianos que al estar sometidos a altas temperaturas cambian sus propiedades ferromagnéticas por paramagnéticas (Martin-Barajas A. y Stock J. M., 1993).

Por lo tanto, la temperatura de Curie es aquella a la cual los minerales magnéticos pierden sus propiedades ferromagnéticas, para la magnetita es aproximadamente a 580 °C, entonces los minerales magnéticos con temperaturas por encima de su punto de Curie tienen propiedades paramagnéticas. (Stacey F. D. y Banerjee S.K., 1974).

La profundidad de la isoterma de Curie es la profundidad donde se encuentra la superficie en el subsuelo que conforma la frontera entre unidades ferromagnéticas y paramagnéticas. La profundidad del punto de Curie depende principalmente del régimen térmico de la corteza y del manto superior, esperando profundidades someras del punto de Curie en regiones que tengan potencial geotérmico, volcanismo joven y zonas donde las placas tectónicas se separan (Íbrahim A. *et al.*, 2005).

La cuantificación de los recursos geotérmicos en México basados en estudios de modelación numérica requiere del conocimiento del flujo de calor, por lo que la estimación sistemática de la profundidad de la isoterma de Curie en el país representará una información de interés en la valoración de factibilidad de campos geotérmicos (Belmonte S. I., 2010).

Actualmente la prospección geotérmica es considerablemente asistida por medio de la percepción remota, ésta ha sido una importante herramienta de bajo costo para obtener información de la superficie del terreno, permitiendo estudiar áreas relativamente extensas

y de difícil acceso, siendo útil en las etapas tempranas de exploración con tal de delimitar la búsqueda terrestre en áreas específicas (Fernández de la Vega T. *et al.*, 2001).

La percepción remota es una técnica útil en etapas tempranas de exploración, puesto que permite la selección de sitios de interés y la jerarquización de blancos. Las técnicas de percepción remota son técnicas no invasivas y se realizan a distancia con la finalidad de estudiar áreas extensas, de difícil acceso y de alto riesgo, evitando el peligro del personal y delimitando la exploración de campo. De este modo, ayuda en la optimización de los recursos y del tiempo destinados en las campañas de exploración. Una de las diversas aplicaciones de la Percepción Remota es la detección y delimitación de áreas de la superficie terrestre con presencia de minerales característicos de actividad hidrotermal e identificar rasgos estructurales asociados a zonas hidrotermales (Sabins, 1999).

La importancia en realizar este proyecto es en beneficio para la sociedad, ya que proporciona información que puede ser utilizada de manera inmediata y directa en la exploración de recursos geotérmicos en las zonas de estudio.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las zonas de estudio se eligieron con base en: los sondeos geofísicos realizados por Slyker (1970), CONAGUA (1984), Flores C. *et al.* (1996) y por Pamplona U. (2007) dando como resultados las presencias de cuerpos conductivos que pueden estar asociados con yacimientos geotérmicos, y por la presencia de manifestaciones hidrotermales intermareales reportadas por Lynn (1978), Barragán *et al.* (2001) y por Prol-Ledesma *et al.* (2010).

El presente trabajo plantea una estrategia de exploración combinando técnicas de percepción remota con técnicas magnéticas. Ya que la percepción remota es útil para identificar evidencias superficiales sin estudios *in situ*, como la caracterización y jerarquización de lineamientos y minerales propios de actividad hidrotermal en las zonas de

interés (Fernández de la Vega T. *et al.*, 2001). Con el uso de datos aeromagnéticos es posible estimar la profundidad de la isoterma de Curie para conocer la superficie en el subsuelo que conforma la frontera entre unidades ferromagnéticas y paramagnéticas con la finalidad de conocer el estado térmico de la corteza en las zonas en cuestión, apoyando en la evaluación del potencial geotérmico a nivel regional o local (Belmonte S. I., 2010).

1.3. OBJETIVOS

Objetivo general:

El objetivo general del presente proyecto consiste en plantear una estrategia de exploración combinando técnicas de percepción remota con técnicas magnéticas en las localidades de San Felipe y Puertecitos, Baja California, usando imágenes Landsat 5 sensor TM y datos aeromagnéticos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano.

Objetivos específicos:

- Estimar la profundidad de la isoterma de Curie dentro de las áreas de estudio usando datos aeromagnéticos proporcionados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM).
- Delimitar las zonas que presentan alteración hidrotermal con el realce espectral de las imágenes satelitales Landsat 5 sensor TM.
- Identificar lineamientos estructurales asociados a la actividad hidrotermal de las zonas de estudio empleando el modelo digital de elevación (MDE) del estado de Baja California.
- Comparar los mapas de anomalía magnética reducida al polo con los mapas de realce espectral, integrando los resultados de los métodos empleados con el objetivo de identificar zonas de interés geotérmico.

CAPÍTULO II. GENERALIDADES

2.1. SISTEMA GEOTÉRMICO

El término *geotermia* se emplea para designar a los procesos industriales que explotan los sistemas geotérmicos para producir energía; asimismo, se emplea para nombrar a la disciplina científica que estudia las variaciones de temperatura dentro de la corteza terrestre y los fenómenos que intervienen en el comportamiento de flujos térmicos. El gradiente geotérmico promedio en la corteza es de 2–3 °C por cada 100 metros (Dickson y Fanelli, 2004), pero en los sistemas geotérmicos puede alcanzar un valor más alto. Por ello, un sistema geotérmico (*Figura 2.1*) es un sistema natural en el que se da un transporte de calor anómalamente alto, ya sea por medio de conducción y/o convección. En la formación de un sistema hidrotermal convectivo, se necesitan diversas variables, algunas de ellas son las siguientes:

- Una fuente de calor.
- Un área de recarga hídrica.
- Formaciones geológicas permeables que fungen como reservorio y permiten la circulación de fluidos.
- Cubiertas impermeables de estructuras geológicas que cierran el sistema y no permiten que el calor del yacimiento se disipe rápidamente.

Dependiendo de la temperatura existente en el reservorio, los campos geotérmicos se clasifican en grupos. El criterio más común para clasificar las fuentes geotérmicas es aquél basado en la entalpía de los fluidos que transportan el calor de las rocas. Por consiguiente, los recursos geotérmicos son divididos en tres grupos: baja, mediana y alta entalpía (Dickson y Fanelli, 2004). El estudio de los campos de alta, mediana y baja entalpía requiere de estrategias de exploración y explotación diferentes. Sin embargo, en todos los campos se utilizan estudios de geología estructural, estratigrafía, exploración geoquímica, hidrogeología, mineralogía, petrología, vulcanología y exploración geofísica.

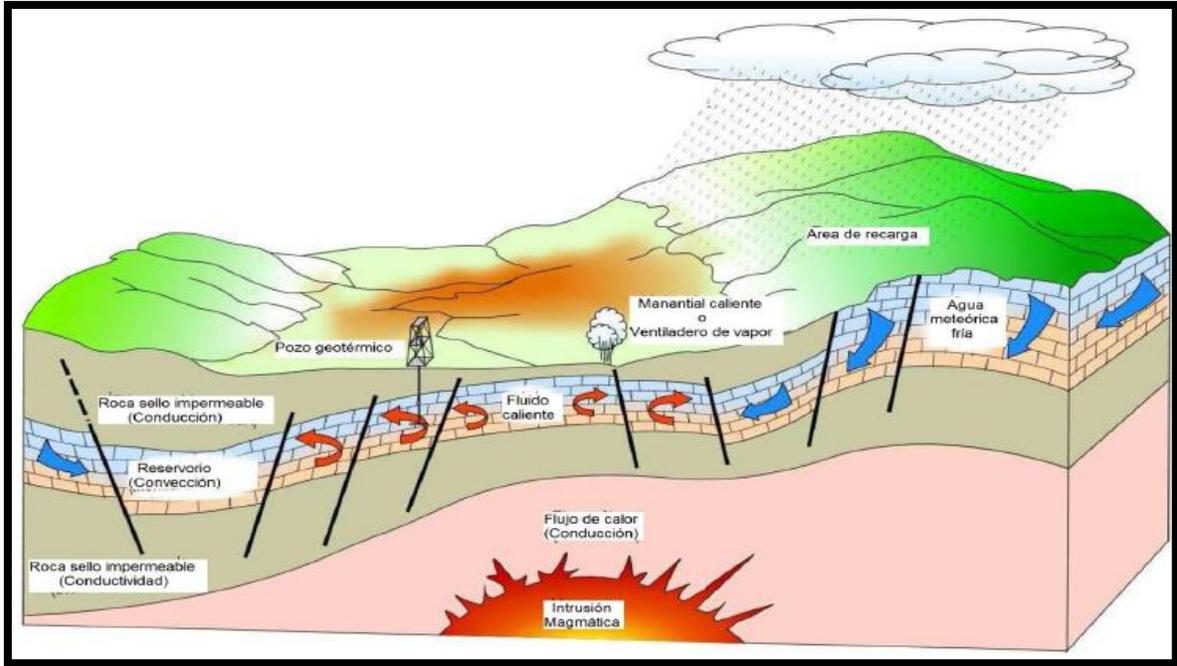


Figura 2.1. Modelo idealizado de un sistema geotérmico.
 (Modificado de Dickson y Fanelli, 2004)

2.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO

Las zonas de estudio están ubicadas en la costa este del Estado de Baja California. El poblado de San Felipe se localiza en las coordenadas $31^{\circ}01'39''$ N y $114^{\circ}50'07''$ W con una elevación de 38 msnm. Por su parte, el poblado de Puertecitos se encuentra 76 km. al sur del puerto de San Felipe entre las coordenadas $30^{\circ}21'02''$ N y $114^{\circ}38'30''$ W (Figura 2.2).

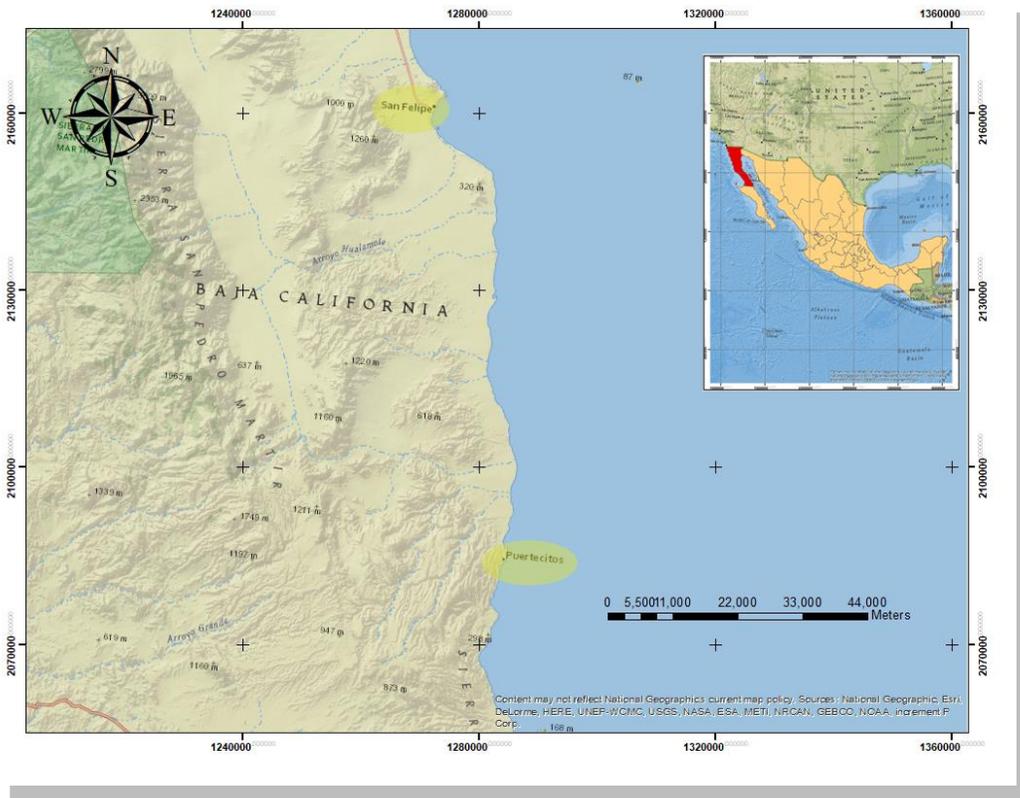


Figura 2.2. Localización de las zonas de estudio.

2.3. GEOLOGÍA DE LAS ZONAS DE INTERÉS

La geología de las zonas de San Felipe y de Puertecitos están dominadas por procesos asociados a la formación del Golfo de California. Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Alisitos y el Terreno de Cortés. El Terreno de Cortés se distribuye en la porción oriental del estado de Baja California, donde afloran las rocas más antiguas que conforman el basamento representadas por las formaciones (Carta Lázaro Cárdenas H11-5-6 SGM, 1999).

En el último grupo, se aprecia una secuencia de flujos piroclásticos, sobreyace discordantemente a los domos riolíticos y a las Tobas El Canelo, comprende a las Tobas Los Heme, la Toba de Valle Curbina y las Tobas de Mesa El Tabano. Incluye un paquete de ignimbritas del Plioceno con sedimentos marinos y no marinos interestratificados. Las unidades del Plioceno cubrieron el terreno y formaron las mesas en la franja oriental de la PVP (Martín-Barajas, 1993).

Las zonas de alteración hidrotermal se presentan en las rocas volcánicas del Plioceno principalmente en la zona costera. En dicha región se encuentran depósitos no metálicos con mineralización relacionada a rocas volcánicas, azufre, zeolitas y barita. La alteración en puertecitos es de tipo oxidación y silicificación y se presenta en riolitas y tobas riolíticas (SGM, 2000).

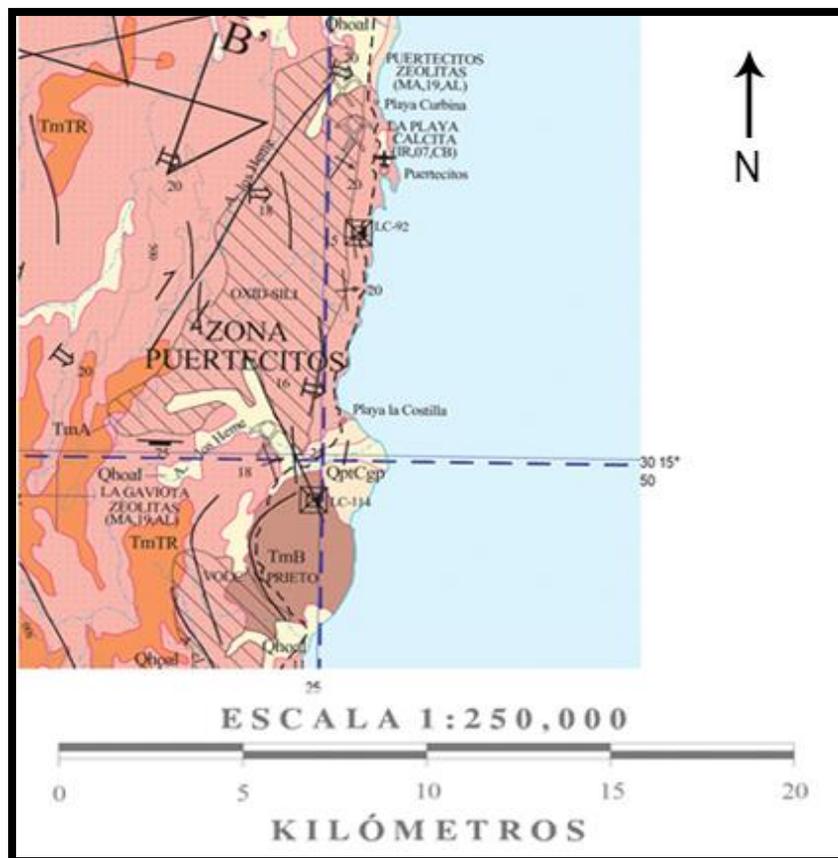


Figura 2.3.2 Unidades litológicas de la zona de Puertecitos. (Modificado de Carta Lázaro Cárdenas H11-5-6, SGM)

Geología estructural

La provincia volcánica de Puertecitos se encuentra afectada por una serie de fallas normales orientadas al N-NW, N-NE y NS. Las fallas normales también afectan a las ignimbritas del Plioceno en la parte oriental de Puertecitos. Los domos están alineados en las mismas direcciones que las fallas normales que cortan a las ignimbritas del Plioceno. Las fallas normales formaron estructuras de graben y medio graben que controlaron el flujo de las lavas y el depósito de los flujos piroclásticos (Martín-Barajas y Stock, 1993).

Parte del cono del Volcán Prieto está afectado por fallas normales y fracturas con orientación predominante al N-NW a N-NE, consistentes con la tendencia general de las fallas en las ignimbritas. Se puede concluir que el proceso de extensión se manifestó hasta finales del Plioceno en esta zona (Martín-Barajas y Stock, 1993) (Figura 2.4).

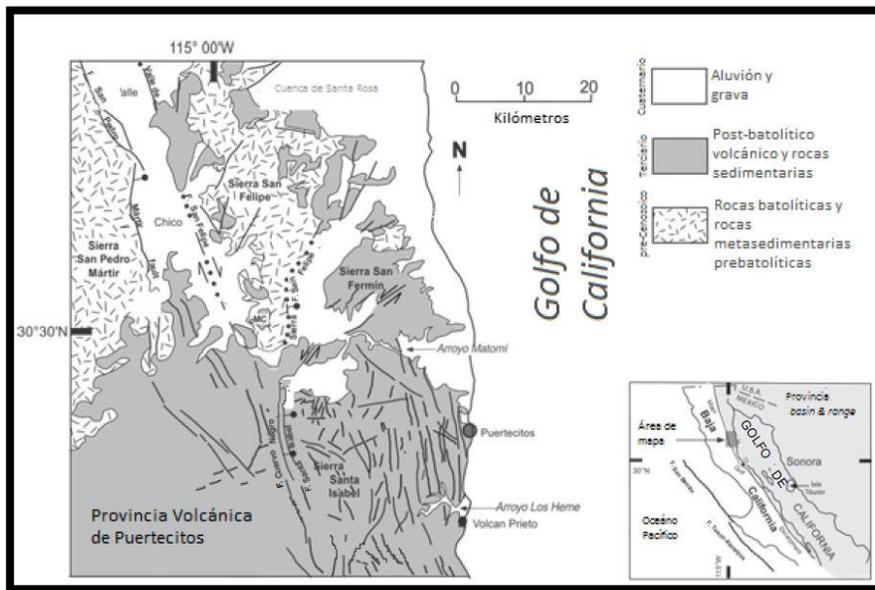


Figura 2.4. Mapa geológico del área de Puertecitos.
(Modificado de Nagy, 2000)

2.3.2. San Felipe

Estratigrafía

El basamento de San Felipe se conforma de rocas metamórficas (esquistos, cuarcitas, gneises, filitas y mármoles) correspondientes del Paleozoico al Mesozoico. Éstas han sido introducidas por grandes volúmenes de batolitos granodioríticos a tonalíticos durante el Cretácico. Se documenta que el basamento ocurrió en ~45–35 Ma (Seiler, 2009).

La región de San Felipe está cubierta por una extensa sección de sedimentos de relleno de cuenca con pequeñas intercalaciones de volcánicos. El rango de edad para estos sedimentos va del Mioceno tardío al Pleistoceno temprano (Seiler, 2009). A continuación, se presenta la columna estratigráfica de la zona de San Felipe modificada de la carta geológico-minera de San Felipe. Las descargas intermareales están localizadas en rocas graníticas (Álvarez, 1995). Algunos precipitados minerales encontrados en las descargas de Punta Estrella son pirita, hidrotroilita, barita, anhídrita y ópalo (Pearl, 1978).

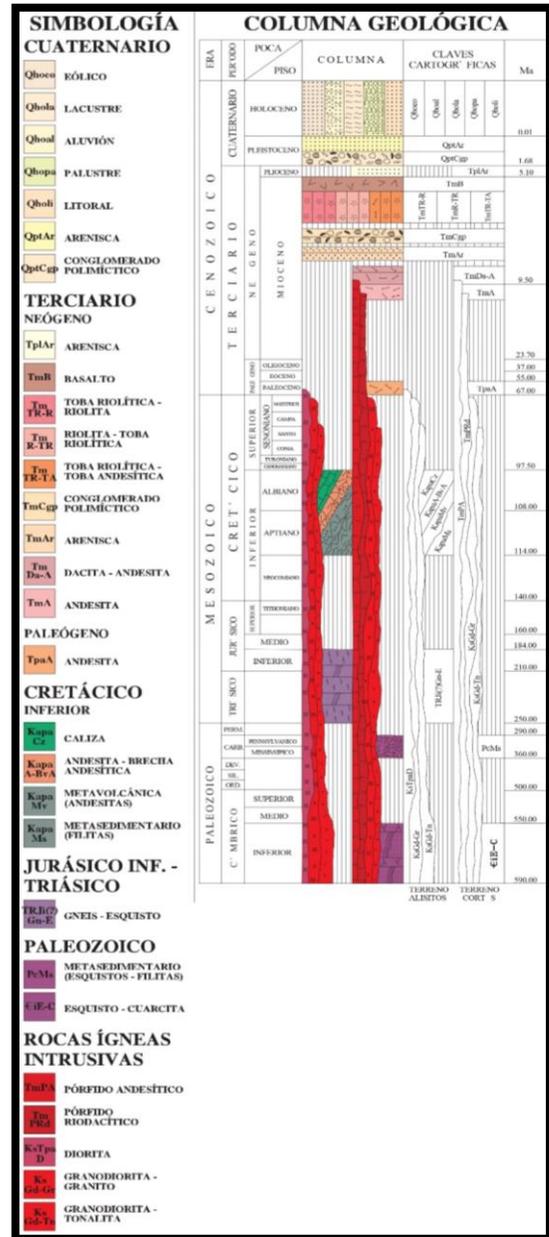
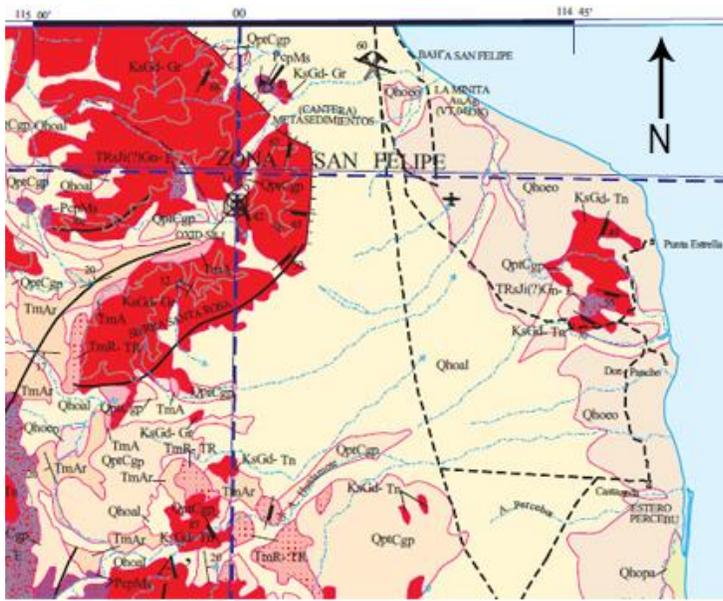
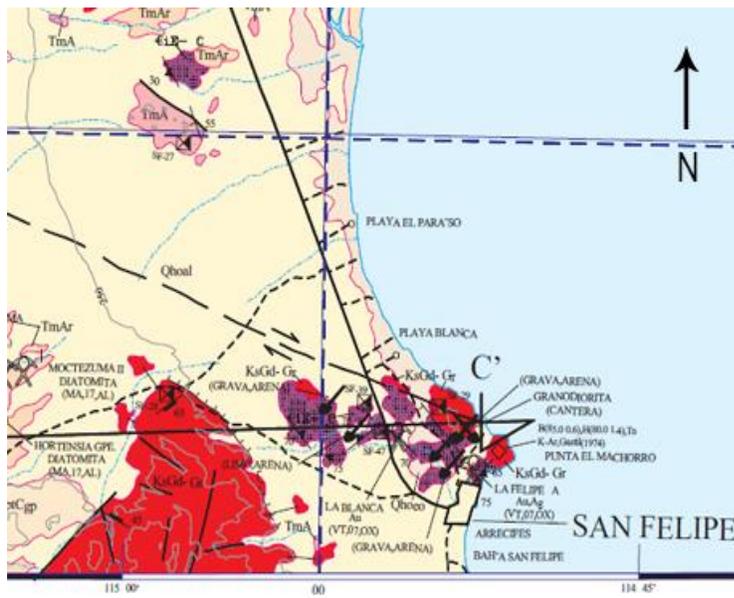


Figura 2.5.1 Columna estratigráfica de la zona de San Felipe. (Modificado de Carta San Felipe H11-3, SGM)



a) ESCALA 1:250,000
 0 5 10 15 20
 KILÓMETROS

Figura 2.5.2 a) Unidades litológicas de la zona sur de San Felipe.
 (Modificado de Carta Lázaro Cárdenas H11-5-6, SGM)
 b) Unidades litológicas de la zona norte de San Felipe
 (Modificado de Carta San Felipe H11-3, SGM)



b) ESCALA 1:250,000
 0 5 10 15 20
 KILÓMETROS

Geología estructural

Las fallas de la región tienen rumbo NW-SE y están truncadas por fallas NE-SW; esta orientación se atribuye al régimen distensivo. Las fallas mejor definidas son las fallas Agua Blanca (NW-SE) y San Pedro Mártir (NW-SE), además de estructuras circulares originadas por la intrusión de cuerpos de granodioríticos-tonalíticos y dioríticos (SGM, 1999).

La falla Agua Blanca con rumbo N 72° W es la falla activa más antigua y se considera que se ha desplazado 4 mm/año con baja sismicidad; va desde El Paso de San Matías hasta Bahía de Todos Santos. La falla San Miguel se encuentra al NW de San Felipe y es considerada una falla de desplazamiento lateral derecho y con rumbo N 60° W. Ésta se extiende desde el sur de San Miguel hasta el oriente del Valle San Rafael. Se supone como una de las fallas más activas de la región (Cruz-Castillo, 2002).

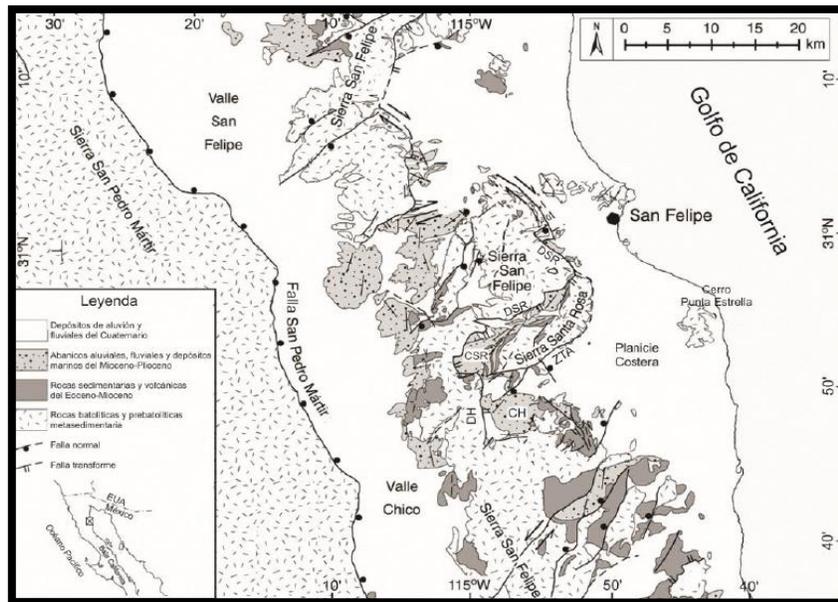


Figura 2.6. Mapa geológico de la zona de San Felipe.
(Modificado de Seiler *et al.*, 2010)

CAPÍTULO III. MÉTODOS MAGNÉTICO Y DE PERCEPCIÓN REMOTA

3.1. CAMPO GEOMAGNÉTICO INTERNACIONAL DE REFERENCIA (IGRF)

El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF, por sus siglas en inglés) es un modelo matemático del campo magnético terrestre y sus variaciones temporales. Consiste en los coeficientes de Gauss hasta de grado 13, representando gran parte del campo originado por el núcleo de la Tierra. El modelo fue desarrollado por la IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) y publican cálculos cada cinco años (Thébault *et al.*, 2015).

3.2. ISOTERMA DE CURIE

La temperatura de Curie es aquella a la cual los minerales magnéticos pierden su ferromagnetismo (aproximadamente 580 °C para la magnetita) (Stacey y Banerjee, 1974). Los minerales magnéticos a temperaturas por arriba de su correspondiente punto de Curie se comportan paramagnéticamente, con una susceptibilidad muy pequeña, y por lo tanto su contribución al magnetismo ambiental, a estas temperaturas, se puede despreciar.

La isoterma de Curie es la superficie en el subsuelo que materializa la frontera entre unidades geológicas magnéticas y amagnéticas, se dan dos posibles situaciones: se puede tratar simplemente del caso en donde una unidad litológica termina (aunque se encuentre por encima de la isoterma de Curie) y el otro caso corresponde a la isoterma de Curie (Belmonte S. I., 2010).

3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS

El avión vuela siguiendo líneas imaginarias llamadas líneas de vuelo; éstas son perpendiculares a las líneas de control. El espacio entre las líneas de vuelo es menor que el espacio entre las líneas de control, existiendo en las intersecciones diferencias en las medidas del campo magnético que se usan para eliminar los efectos de la deriva instrumental y de variaciones temporales. Sin embargo, los efectos de la variación diurna y deriva instrumental quedan reducidos al mínimo por la velocidad del trabajo.

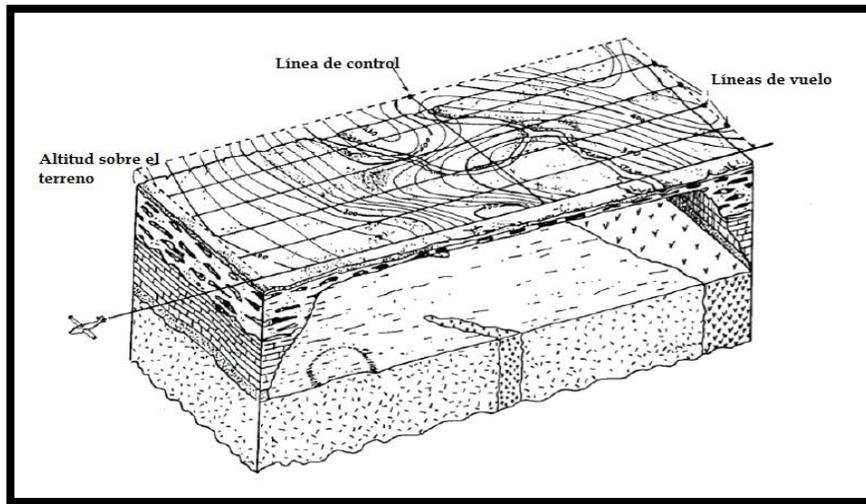


Figura 3.1. Se muestran las líneas de vuelo y las de control.
(Nettleton, 1973)

El espacio óptimo entre las líneas de vuelo depende de la estructura geológica que se desea estudiar. Si se dispone de levantamientos magnéticos anteriores, las líneas de vuelo se orientan perpendicularmente a la tendencia magnética (Nettleton, 1973).

3.4. ANTECEDENTES DE PERCEPCIÓN REMOTA

Generalmente, el término de *percepción remota* se define como el estudio de un objeto sin que exista un contacto físico con él (Lintz y Simonett, 1976). Estas técnicas involucran la obtención de información a partir de la medición de la energía electromagnética que proviene de los objetos distantes, compuestos por diversos materiales y de esta forma se pueden identificar y clasificar los objetos por clase o tipo, materiales que los componen y su distribución espacial.

3.5. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Las principales divisiones del espectro electromagnético según Campbell (2011) son las siguientes: el espectro ultravioleta, el espectro visible, el espectro infrarrojo y microondas.

DIVISIÓN	LONGITUD DE ONDA
Rayos gamma	<0.03 [nm]
Rayos X	0.03 - 300 [nm]
Radiación ultravioleta	
UV - C	<0.28 [μm]
UV - B	0.28 - 0.32 [μm]
UV - A	0.32 - 0.40 [μm]
Luz visible	0.38 - 0.72 [μm]
Radiación infrarroja	
Infrarrojo cercano	0.72 - 1.3 [μm]
Infrarrojo medio	1.3 - 3.0 [μm]
Infrarrojo lejano	7.1 - 1000 [μm]
Microondas	1 [mm] - 30 [cm]
Radio	>30 [cm]

Tabla 3.1. Principales divisiones del Espectro Electromagnético. En esta tabla, se presenta las subdivisiones para el caso de la radiación infrarroja (Campbell *et al.*, 2011)

3.6. INTERACCIONES CON LA ATMÓSFERA

La radiación usada en los sensores remotos debe pasar a través de la atmósfera terrestre causando efectos en la calidad de la imagen.

3.6.1. Dispersión

La *dispersión* es la redirección de la energía electromagnética debido a las partículas suspendidas en la atmósfera o por moléculas de gases atmosféricos (Campbell *et al.*, 2011).

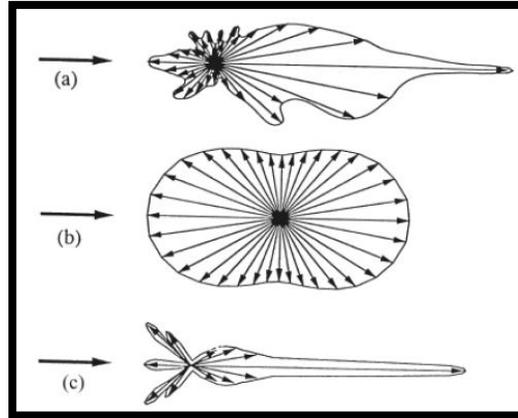


Figura 3.2. La dispersión de tres tipos de partículas atmosféricas: a) Partículas de polvo y humo de forma irregular; b) Moléculas que muestran simetrías parecidas; c) Gotas de agua que dispersan la energía.

(Modificado de Campbell *et al.*, 2011)

La *dispersión de Rayleigh* se produce cuando las partículas atmosféricas tienen diámetros muy pequeños en relación con la longitud de onda de la radiación. La *dispersión Mie* es causada por partículas atmosféricas de mayor tamaño, las cuales incluyen polvo, polen, humo y gotas de agua. La *dispersión no selectiva* es causada por partículas que son mucho más grandes que la longitud de onda de la radiación dispersada (Campbell *et al.*, 2011).

3.6.2. Ventanas atmosféricas

Los gases de la atmósfera atenúan la transmisión de la radiación electromagnética en algunas frecuencias, debido a este fenómeno la observación se reduce a determinadas bandas del espectro electromagnético denominadas *ventanas atmosféricas*, que son aquellos rangos de longitud de onda donde la radiación puede atravesar la atmósfera y llegar a la superficie terrestre (Campbell *et al.*, 2011).

Espectro	Medidas
Ultravioleta y Visible	0.30 – 0.75 μm
Infrarrojo Cercano	0.77 – 0.91 μm
Infrarrojo Medio	1.55 – 1.75 μm 2.05 – 2.4 μm
Infrarrojo Térmico	8.0 – 9.2 μm 10.2 – 12.4 μm
Microondas	7.5 – 11.5 mm >20.0 mm

Tabla 3.2. Mayores ventanas atmosféricas.

(Campbell *et al.*, 2011)

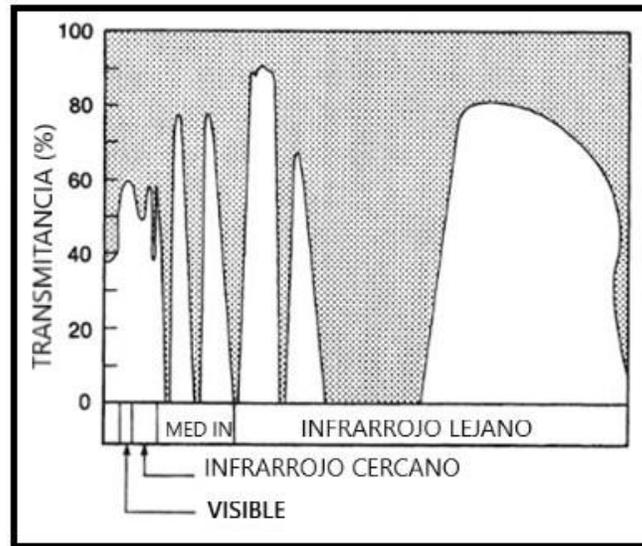


Figura 3.3. Representación esquemática de las ventanas atmosféricas. La región sombreada representa la absorción de la radiación electromagnética.

(Modificado de Campbell *et al.*, 2011)

3.7. INTERACCIONES CON LA SUPERFICIE

Al alcanzar la superficie de la Tierra, la energía electromagnética es reflejada, dispersada, absorbida o transmitida. Esto depende de la superficie, la longitud de onda de la energía y el ángulo de iluminación.

a) Reflexión

La reflexión es la modificación que se produce en la dirección de una onda. En este caso, es la redirección de un rayo de luz al impactar con una superficie no transparente.

b) Reflectancia

Para muchas aplicaciones de la percepción remota, la brillantez de una superficie está mejor representada no como irradiancia sino como reflectancia. La reflectancia es expresada como el brillo relativo de una superficie medido por un específico intervalo de longitud de onda (Campbell *et al.*, 2011). Se define la irradiancia como la densidad de potencia de la radiación incidente sobre una superficie, es decir, el cociente entre el flujo radiante incidente sobre la superficie y el área de esa superficie.

$$\text{Reflectancia} = \frac{\text{Brillantez observada}}{\text{Irradiancia}} \quad (\text{e. c. 3.1.1})$$

Como es un cociente, resulta en un número adimensional (entre 0 y 1) pero es comúnmente expresado como un porcentaje, la ecuación 3.1.1 representa la reflectancia en porcentaje y en función de la energía en la longitud de onda reflejada por desde el objeto y de la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto.

$$\rho(\lambda) = [E_R(\lambda) / E_I(\lambda)] \times 100 \quad (\text{e.c. 3.1.2})$$

Donde:

$E_R(\lambda)$ es la energía en la longitud de onda reflejada desde el objeto.

$E_I(\lambda)$ es la energía de la longitud de onda incidente sobre el objeto.

$P(\lambda)$ es la reflectancia espectral en una longitud de onda particular.

c) Transmitancia

La transmitancia ocurre cuando la radiación pasa a través de un cuerpo sin una atenuación significativa (Figura 3.4). Para una profundidad o espesor dado de un cuerpo, la habilidad de un medio para transmitir energía es medida como la transmitancia (t):

$$t = \frac{\text{Radiación transmitida}}{\text{Radiación incidente}} \quad (\text{e. c. 3.2})$$

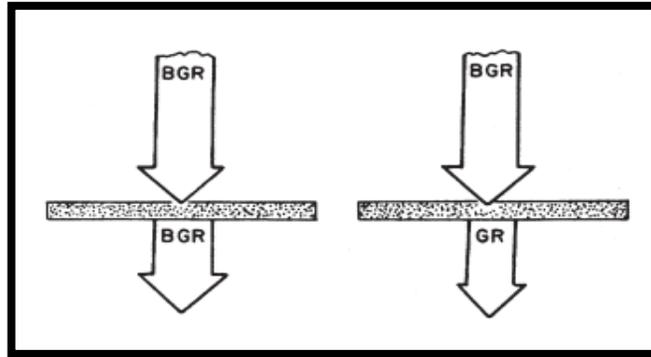


Figura 3.4. Transmisión. La radiación incidente pasa a través de un objeto sin atenuación significativa (izquierda) o puede ser una transmisión selectiva (derecha). Para el caso de la derecha, se transmite toda la radiación visible excepto el azul.

(Modificado de Campbell *et al.*, 2011)

3.8. ADQUISICIÓN DE DATOS

Plataformas

Una plataforma es un vehículo en movimiento, el cual generalmente es una aeronave o satélite donde es colocado un sensor. (Bakker *et al.*, 2009).

Sensores

Los sensores son dispositivos que reciben información y que están instalados en plataformas. Existen dos tipos de sensores: pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de una fuente externa; y activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía (*Figura 3.5*).

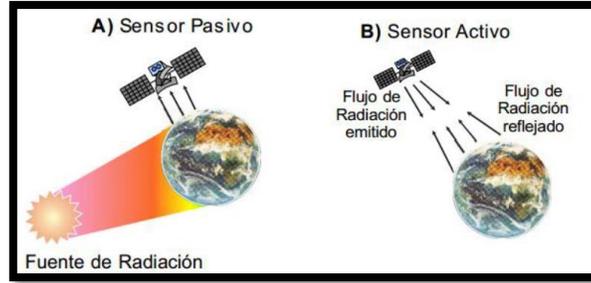


Figura 3.5. De acuerdo con el origen de la fuente de radiación:

A) Sensor pasivo; y B) Sensor activo.

(Pérez, 2007)

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: el sensor Operational Land Imager (OLI) y el sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS). Para fines de este proyecto, se utilizó el sensor OLI. Aunque similares al sensor Landsat 7 ETM +, las bandas espectrales del sensor OLI proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat gracias a la incorporación de dos nuevas bandas espectrales: un canal en el azul visible (banda 1) y un nuevo canal infrarrojo (banda 9). El primero está diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras y, el segundo, para la detección de nubes cirrus.

La relación de la señal en función del ruido de los datos (la calidad de los datos) y la resolución radiométrica (12 bits) del OLI es más alta que los anteriores instrumentos Landsat, del TM y ETM+ de 8 bits. Esto proporciona una mejora significativa en la capacidad para detectar cambios en la superficie terrestre (USGS, 2017). Las imágenes Landsat 8 obtenidas por los sensores OLI y TIRS constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9.

Satélite	Fecha de lanzamiento	Sensor	Resolución temporal [días]	Resolución espectral [µm]	Resolución espacial [m]	Resolución radiométrica [bits]
1, 2, y 3	23/07/1972, 22/01/1975,	RBV	18	B1 (verde) 0.475-0.575 B2 (rojo) 0.58-0.68 B3 (IR cercano) 0.69-0.83	80	6

	05/03/1978	MSS		B4 (verde) 0.5-0.6 B5 (rojo) 0.6-0.7 B6 (IR cercano) 0.7-0.8 B7 (IR cercano) 0.8-0.11		
4	16/07/82	MSS	16	B4 (verde) 0.5 - 0.6 B5 (rojo) 0.6 - 0.7 B6 (IR cercano) 0.7 - 0.8 B7 (IR cercano) 0.8 - 1.1	80	8
		TM		B1 (azul) 0.45 - 0.52 B2 (verde) 0.52 - 0.6 B3 (rojo) 0.63 - 0.69 B4 (IR cercano) 0.76 - 0.9 B5 (IR cercano) 1.55 - 1.75 B6 (IR térmico) 10.4 - 12.5 B7 (IR mid) 2.08 - 2.35	30 B6 - 120	
5	01/03/1984	MSS	16	B4 (verde) 0.5 - 0.6 B5 (rojo) 0.6 - 0.7 B6 (IR cercano) 0.7 - 0.8 B7 (IR cercano) 0.8 - 1.1	80	8
		TM		B1 (azul) 0.45 - 0.52 B2 (verde) 0.52 - 0.6 B3 (rojo) 0.63 - 0.69 B4 (IR cercano) 0.76 - 0.9 B5 (IR cercano) 1.55 - 1.75 B6 (IR térmico) 10.4 - 12.5 B7 (IR mid) 2.08 - 2.35	30 B6 - 120	
6	Lanzamiento fallido	-	-	-	-	-
7	05/04/1999	ETM+	16	B1 (azul) 0.45-0.52 B2 (verde) 0.52-0.6 B3 (rojo) 0.63-0.69 B4 (IR cercano) 0.76-0.9 B5 (IR medio) 1.55-1.75 B6 (IR térmico) 10.4-12.5 B7 (IR cercano) 2.08-2.35 B8 (Pancromática)0.5-0.9	B1 a B5 y B7 - 30 B6 - 60 B8 - 15	8
8	11/02/2013	OLI	16	B1 (Coastal) 0.433-0.453 B2 (azul) 0.45-0.515 B3 (verde) 0.525-0.6 B4 (rojo) 0.63-0.68 B5 (IR cercano) 0.845-0.885 B6 (SW IR) 1.56-1.66 B7 (SW IR) 2.1-2.3 B8(Pancromática)0.5-0.68 B9(Cirrus) 1.36-1.39	B1 a B7 y B9 - 30 B8 - 15	12
		TIRS		B10 (LWIR) 10.6-11.2	100	

Tabla 3.3. Se presentan los satélites Landsat y sus sensores organizados cronológicamente.

(Modificado de Campbell *et al.*, 2011)

Cada sensor posee distintos tipos de resoluciones de acuerdo con su diseño (Campbell *et al.*, 2011):

- *Resolución espacial.* Se refiere al tamaño del objeto más pequeño que puede ser identificado en una imagen.
- *Resolución espectral.* Indica la capacidad del sensor para definir intervalos de longitud de onda finos.
- *Resolución temporal.* Es la capacidad para grabar secuencias de imágenes, es decir, indica la periodicidad entre las observaciones.

3.9. FIRMAS ESPECTRALES

Los materiales reflejan la radiación de manera distinta en varias bandas. Cada material posee características espectrales únicas con las cuales se puede identificar. Una firma espectral define un patrón de respuesta espectral único.

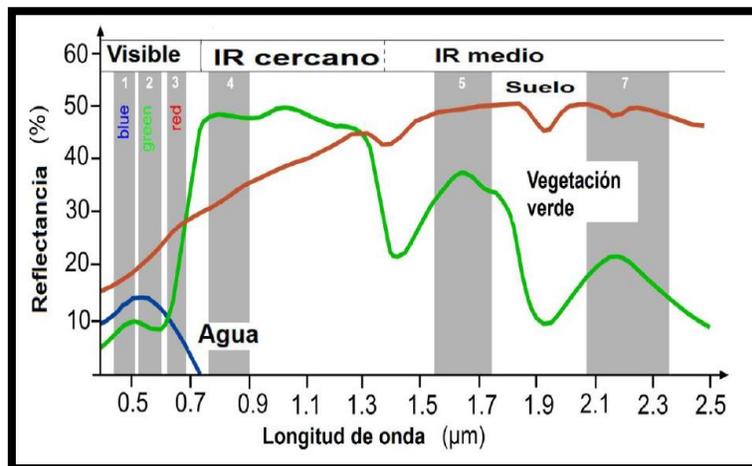


Figura 3.6. El esquema muestra la firma espectral de vegetación (verde), suelo (rojo) y agua (azul). Los números 1, 2, 3, 4, 5 y 7 corresponden a las bandas del sensor TM de Landsat.

(McCloy *et al.*, 2009)

En la Figura 3.6 se observa la firma espectral de la vegetación sana donde tiene una alta reflectancia en el rango espectral de la banda 4 (sensor TM), mientras tiene una muy baja reflectancia en las bandas 2 y 3 del mismo sensor. También se observa que la firma espectral del suelo desnudo presenta una alta reflectancia en las bandas 5 y 7 (sensor TM) y que el agua no presenta reflectancia en las bandas 4 5 y 7.

3.9.1. Firmas espectrales de minerales con alteración hidrotermal

Un buen indicador de una zona con alteración hidrotermal es la presencia de óxidos de hierro e hidroxilos (Fernández De La Vega-Márquez y Prol-Ledesma, 2001).

Se ha observado en las gráficas de reflectancia para minerales pertenecientes al grupo de óxidos de hierro que la región del espectro cubierta por la banda 3 del sensor TM muestra una alta reflectancia para óxidos de hierro y una fuerte absorción para la vegetación, esta característica puede ser usada para diferenciar óxidos de la vegetación.

Analizando la firma espectral de los óxidos (Fig. 3.7) se observa que la jarosita, la hematita y la goethita muestran rasgos de baja reflectancia en las bandas 1, 2 y 4 del sensor TM. (Hunt y Ashley, 1979).

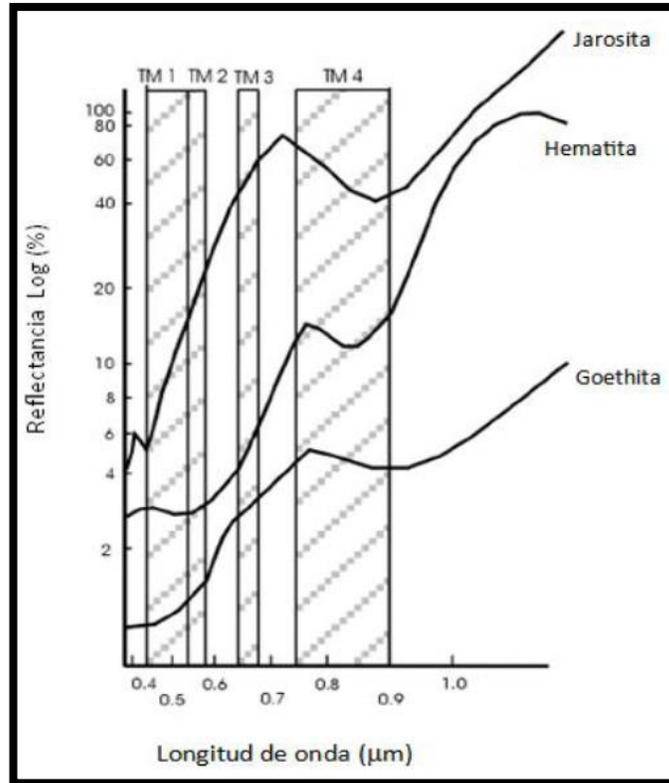


Figura 3.7. Firmas espectrales de minerales pertenecientes al grupo de óxidos de hierro.

En este caso, se muestran bandas del sensor TM, donde se aprecian los rasgos de alta reflectancia y absorbancia de los minerales.

(Hunt y Ashley, 1979)

El siguiente grupo corresponde a los hidroxilos que, al igual que los óxidos de hierro, presentan características espectrales definidas. Se tiene una alta reflectancia para un rango espectral de 1.56-1.66 μm que corresponde a la banda 5 del sensor TM y una alta absorbancia en el rango de 2.1-2.3 μm de la banda 7 (*Figura 3.8*)

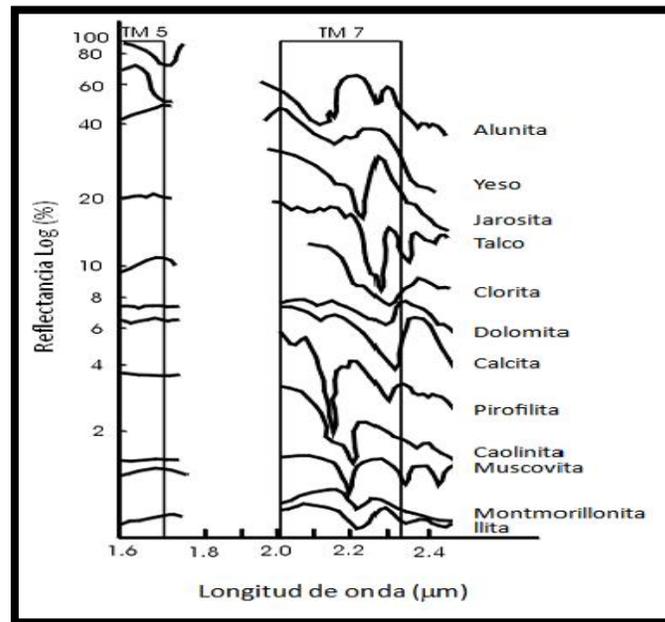


Figura 3.8. Firmas espectrales de minerales pertenecientes al grupo de hidroxilos. En este caso, se muestran bandas del sensor TM, donde se aprecian las altas reflectancias y absorbancias de los minerales.

(Hunt y Ashley, 1979)

3.10. CORRECCIONES DE LA IMAGEN

a) Corrección atmosférica

Tiene como objetivo identificar y separar la brillantez generada por la superficie terrestre de los efectos de la dispersión atmosférica (Campbell *et al.*, 2011).

b) Corrección geométrica

Corrige las distorsiones de una imagen causadas por la adquisición de los datos por los movimientos orbitales de la plataforma, la rotación y la forma de la Tierra (Schowengerdt, 2006).

3.11. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Elevación (MDE) es la representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos con base en la obtención de puntos con coordenadas conocidas referenciadas a un sistema de coordenadas bidimensionales (INEGI, 2016).

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

4.1. MAGNÉTICA

Los estudios enfocados en cartografiar la isoterma de Curie tienen como objetivo establecer el estado térmico de la corteza apoyando la evaluación del potencial geotérmico a nivel regional o local (Belmonte S. I., 2010).

Se describen las bases del análisis espectral de datos aeromagnéticos, para que con estos fundamentos se puedan presentar de manera reducida las técnicas a emplear y también se presenta de forma resumida la secuencia que se seguirá para obtener las estimaciones de las profundidades de la isoterma de Curie.

Se trabajó con datos aeromagnéticos obtenidos por el SGM, donde la altura del vuelo fue de 315 metros respecto a la topografía. El servicio geológico editó las líneas de vuelo ruidosas, realizó la corrección por variación diurna y por IGRF.

4.1.1. Análisis de espectros de potencia

El método para estimar la profundidad del punto de Curie fue introducido por A. Spector y F. Grant (1970), donde asumieron una distribución aleatoria de fuentes y con el espectro radial de potencia llegaron a la relación de que la mitad de la pendiente del logaritmo del espectro de potencia representa la profundidad donde se encuentra la cima Z_t de la fuente magnética, esta relación se encuentra en la ecuación planteada por los mismos autores.

La ecuación que relaciona la cima Z_t de la fuente magnética con el espectro radial de potencia es la siguiente:

$$\ln \left[P(s)^{\frac{1}{2}} \right] = \ln B - 2\pi |s| Z_t \quad (e. c. 4.1)$$

Donde:

$P(s)$ es el espectro radial de potencia de la anomalía.

S es el número de onda.

B es una la suma de constantes independientes del número de onda.

Z_t es la profundidad de la cima de nuestra fuente.

Por otro lado, se relaciona el espectro radial de potencia y el centroide del estrato magnético Z₀:

$$\ln \left[\frac{P(s)^{\frac{1}{2}}}{|s|} \right] = \ln A - 2\pi |s| Z_0 \quad (\text{e. c. 4.2})$$

Donde:

P(s) es el espectro radial de potencia de la anomalía.

S es el número de onda.

A es la suma de constantes independientes del número de onda.

Z₀ es la profundidad del centroide del cuerpo magnético.

Al graficar los espectros, se calcula la profundidad promedio de la cima Z_t y el centroide Z₀ a partir de la pendiente de sus gráficas:

$$Z = -\frac{m}{4\pi} \quad (\text{e. c. 4.3})$$

Con los resultados obtenidos (Z₀ y Z_t), se procede a estimar la profundidad del cuerpo magnético (Z_b) (Okubo, 1985). La expresión siguiente relaciona la cima del estrato magnético hipotético y el centroide del mismo:

$$Z_b = 2Z_0 - Z_t \quad (\text{e. c. 4.4})$$

Donde:

Z_b es la profundidad de la base de la fuente magnética.

Z₀ es la profundidad del centroide de la fuente.

Z_t es la profundidad de la cima de nuestro cuerpo magnético.

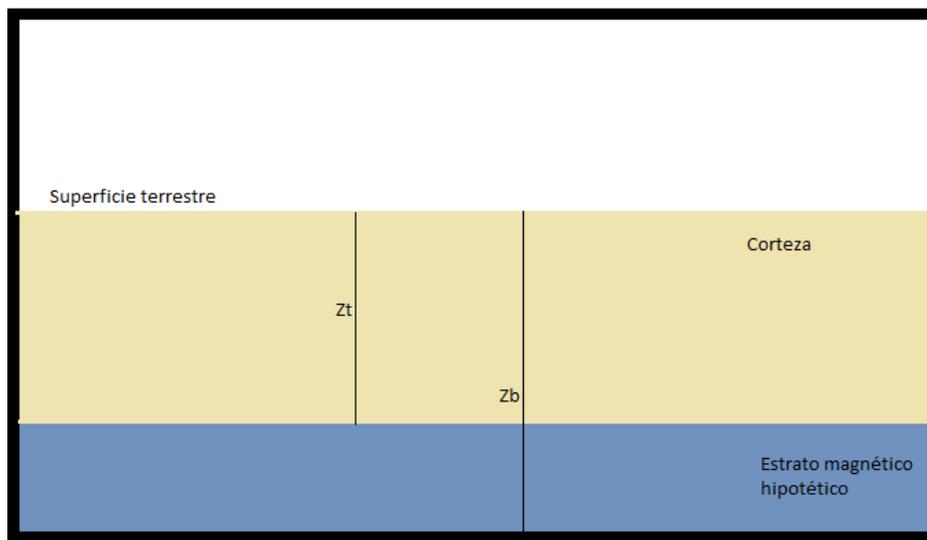


Figura 4.1. Representación gráfica de las profundidades Z_t y Z_b en un estrato magnético.

Se trabajó con áreas geométricas regulares de 50 x 50 km., cubriendo las zonas de interés de Puertecitos y San Felipe. Las mallas magnéticas se encuentran como Anomalía Magnética de Campo Total, por lo que se procedió a realizar la transformada de Fourier 2D en el programa de computo especializado Oasis Montaj. Teniendo las mallas en el dominio del número de onda procedemos a calcular el espectro radial de potencia, al calcularlo el programa genera una tabla donde la primera columna muestra el número de onda, en la segunda columna el número de muestras tomadas para el cálculo, la tercera columna muestra el logaritmo del espectro radial de potencia, la cuarta columna tiene valores de profundidades estimadas con tres puntos y la última muestra profundidades estimadas con cinco puntos.

A partir de esta tabla se obtienen los términos de las *ecuaciones 4.1 y 4.2*, se procedió a graficar las pendientes correspondientes de Z_0 y Z_t (*Figura 4.2*). Posteriormente, se calculó la profundidad Z_b de la *ecuación 4.4*. Para finalizar, se realizó la reducción al polo en las mallas seleccionadas, buscando que los lineamientos y bordes geológicos coincidan con las anomalías magnéticas.

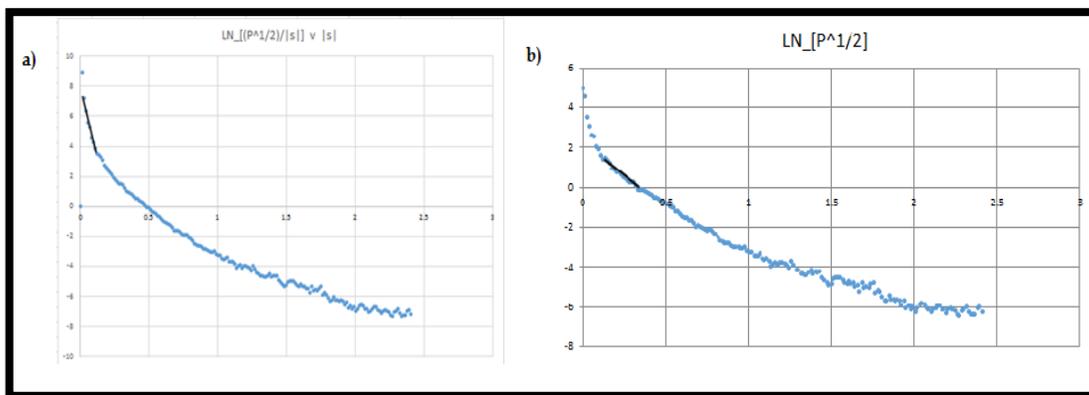


Figura 4.2. a) Gráfica de la pendiente de Z_0 ; b) Gráfica de la pendiente de Z_t .

4.2. REALCE ESPACIAL

El realce espacial comprende un conjunto de operaciones que mejoran la calidad visual de una imagen permitiendo realzar las características de brillo y contraste, reducir su contenido de ruido, o agudizar o intensificar detalles presentes en ella. Pretenden suavizar o reforzar los contrastes espaciales de forma tal que, los valores de brillo en cada pixel de la imagen se asemejen o diferencien más de los correspondientes a los pixeles que los rodean (Aldadur *et. al* 2002). Usando el realce espacial se identifican lineamientos geológicos que pueden estar asociados a zonas hidrotermales.

Se utilizó la técnica de *iluminación artificial*, donde se obtiene la iluminación hipotética de una superficie mediante la determinación de valores de iluminación para cada

celda en un raster. Establece la posición de una fuente de luz hipotética y el cálculo de los valores de iluminación de cada celda en relación con las celdas. El azimuth es la dirección angular del sol, se mide del norte 0° en sentido horario. La altitud es la pendiente o ángulo de la fuente de iluminación sobre el horizonte de 0 y 90 (cenit). Se trabajó con el Modelo Digital de Elevación (MDE) del Estado de Baja California.

La metodología utilizada para el procesamiento del MDE fue la siguiente:

- El MDE fue reproyectado a coordenadas UTM.
- Se recortaron las zonas de estudio (San Felipe y Puertecitos) del MDE.
- Se aplicó la técnica de *sombreado* en las direcciones: N, NE, E, SE, S, SW, W y NW con altitud de 45°.
- Se identificaron los lineamientos obtenidos en las diferentes direcciones.

4.3. REALCE ESPECTRAL

Usando las imágenes del Landsat 5 sensor TM se procede a identificar la presencia de óxidos e hidroxilos. Estos son indicadores de actividad hidrotermal; la vegetación es un factor importante para la identificación de estas zonas. Para identificar dichos cuerpos, se usaron las técnicas de: cocientes de bandas y análisis de componentes principales dirigidos (ACPD).

4.3.1. Cociente de bandas

Se utiliza para realzar información espectral con la finalidad de identificar cierto material, pero espectralmente. En el numerador se encuentra una banda que presenta alta reflectancia, mientras que, en el denominador una banda que presenta alta absorbancia. De esta manera se incrementarán los valores altos de brillantez y se atenúan más los valores bajos, como resultado se pueden diferenciar que los pixeles brillantes son rasgos atribuibles a la respuesta espectral del material geológico de interés. Sin embargo, al tratarse de un cociente, se considera que el valor del denominador no puede ser cero, por ello se hace una

reclasificación de valores digitales, en donde se le asigna un nuevo valor de uno, para todos los valores desde cero hasta menos que uno de la banda colocada en el denominador.

$$\text{Cociente de bandas} = \frac{\text{Banda con patrón de alta reflectancia}}{\text{Banda con patrón de alta absorción}}$$

(e. c. 4.5)

Metodología del Realce Espectral por cociente de bandas:

- Se realiza la corrección atmosférica.
- Se utilizan las bandas {1, 2, 3, 4, 5 y 7}, para resaltar cualquier material a partir de esta técnica se analiza su firma espectral, en el apartado 3.9 se analizaron las firmas espectrales de los materiales en cuestión.
 - Para resaltar los óxidos se utilizó el cociente de la banda 3 (rojo) sobre la banda 1 (azul).
 - Para la vegetación se usó el cociente de la banda 4 (infrarrojo cercano) entre la banda 3 (rojo).
 - para los hidroxilos el cociente de la banda 5 (infrarrojo medio) sobre la banda 7 (infrarrojo medio).
- Se realizaron composiciones de RGB en falso color con una deformación lineal del histograma con saturación del 1 % para dar una mejor discriminación visual entre los tipos de materiales de interés.

4.3.2. Análisis de componentes principales

Análisis de Componentes Principales (ACP) conocida por sus siglas en inglés como *Principal Component Analysis* (PCA), es una técnica estadística multivariada, donde selecciona sucesivamente combinaciones lineales no correlacionadas (matriz de carga de los vectores característicos) de las variables en orden decreciente de varianza, implicando una disminución en la distribución espacial de la cantidad de la respuesta espectral de ciertos materiales en superficie, ayudando a reducir el número de bandas para el análisis y por lo tanto la redundancia (Loughlin, 1991).

Metodología del análisis de componentes principales:

- Para eliminar cualquier ruido generado por la influencia del mar, es necesario crear una máscara. Para ello, se usó la banda del infrarrojo cercano. Con lo anterior se obtiene una imagen booleana, donde los valores del mar tienen ND=0 y resto ND=1.
- Se realiza la corrección atmosférica (sustracción del cuerpo oscuro)
- Se aplicó el ACP usando la máscara.
- Se analizó la matriz cargada de las seis componentes principales con la finalidad de determinar las componentes que son apropiadas para el realce de los materiales en cuestión.

Sin embargo, en esta técnica no es posible diferenciar en la matriz de carga las componentes que sirven para resaltar los materiales en cuestión, por lo que se recurre a otra técnica donde se eligen las bandas que concentran la información de la firma espectral.

4.3.3. Análisis de componentes principales dirigidos

Se utiliza la técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidos (ACPD), con la finalidad de examinar la matriz de carga de los eigenvectores de cuatro bandas, para elegir la componente principal de la imagen donde concentra la información directamente relacionada con la firma espectral del material en cuestión (Crosta & Moore, 1989).

Metodología del análisis de componentes principales dirigidos:

- Se aplicó el ACPD utilizando las bandas características de las firmas espectrales de los materiales:
 - En el caso de los óxidos se utilizaron las bandas {1, 3, 4 y 5}.
 - Para la vegetación se utilizó las bandas {2, 3, 4 y 5}.
 - Y para los hidroxilos las bandas {1, 4, 5 y 7}
- A partir de la matriz de carga se seleccionó las nuevas componentes principales que aportan mayor información para el realce de los materiales.
- Se realizaron composiciones de RGB en falso color con una deformación lineal del histograma con saturación del 1 % para mejorar la visualización.

4.3.4. Análisis de vegetación

Las imágenes de la composición RGB en falso color del ACPD de San Felipe muestran que existe una mayor respuesta espectral de la vegetación. Sin embargo, la zona de estudio es desértica por lo que la mayoría de la vegetación se compone de chamizos.

Se tiene que disminuir la influencia de la vegetación ya que su firma espectral es muy parecida a la firma espectral de otros materiales (hidroxilos) en el rango del infrarrojo medio. Para llevar acabo esto, se encontraron las siguientes técnicas:

- Se crea una composición a color para visualizar las zonas en donde existe vegetación, para ello se coloca en el cañón del rojo la banda 4 (infrarrojo cercano), en el cañón verde la banda 3 (rojo) y en el azul la banda 2 (verde). Las zonas con vegetación se mostrarán en color rojo.
- Realizar un Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI):
 - Con las bandas 4 y 3 se crea el NDVI, la imagen resultante muestra valores de -1 a 1, bajo el criterio de Robert Simmon (2009) los valores negativos corresponden principalmente a las nubes, el agua y la nieve. Los valores cercanos a cero corresponden a rocas y terrenos desnudos o sin vegetación. Los valores por debajo de 0,1 a áreas yermas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados (0,2 a 0,3) representan terrenos con arbustos y prados. Y los valores altos indican bosques de zonas templadas y tropicales (0,6 a 1).
 - Se reclasificaron los valores de la imagen obtenida por el NDVI, donde los valores mayores a 0.2 son 1 y los valores inferiores son 0, creando una imagen booleana (máscara) de ceros y unos.
 - Se hizo el ACPD para la vegetación usando la máscara.
 - Se analizó la nueva matriz de carga de la vegetación
 - Y se realizó la composición de RGB en falso color con una deformación lineal del histograma con saturación del 1 % para mejorar la visualización.

- O realizar una Clasificación No Supervisada:

La clasificación no supervisada explora diferentes tipos de atributos o clases por medio del análisis estadístico multivariado, este proceso identifica los valores de cada píxel de una o varias bandas de una imagen, crea y evalúa las clases o clúster (firmas) y al final reclasifica de acuerdo a las probabilidades de cada clúster (Joaquín Meliá Miralles, 1991).

- Se realizó una clasificación no supervisada fina.
- Se encontró el clúster que corresponde a la vegetación (apoyado de una imagen satelital).
- Se comprobó con polígonos de entrenamiento que el clúster corresponde a la vegetación
- Se obtuvo una imagen booleana de ceros y unos para el clúster seleccionado.
- Con la máscara se hizo el ACPD para la vegetación.
- Se analizó la nueva matriz de carga de la vegetación
- Y se realizó la composición de RGB en falso color con una deformación lineal del histograma con saturación del 1 % para mejorar la visualización.

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESULTADOS

5.1.1 Resultados del Método Magnético

Se muestran los resultados de la estimación de la profundidad del punto de Curie para las zonas de Puertecitos y San Felipe.

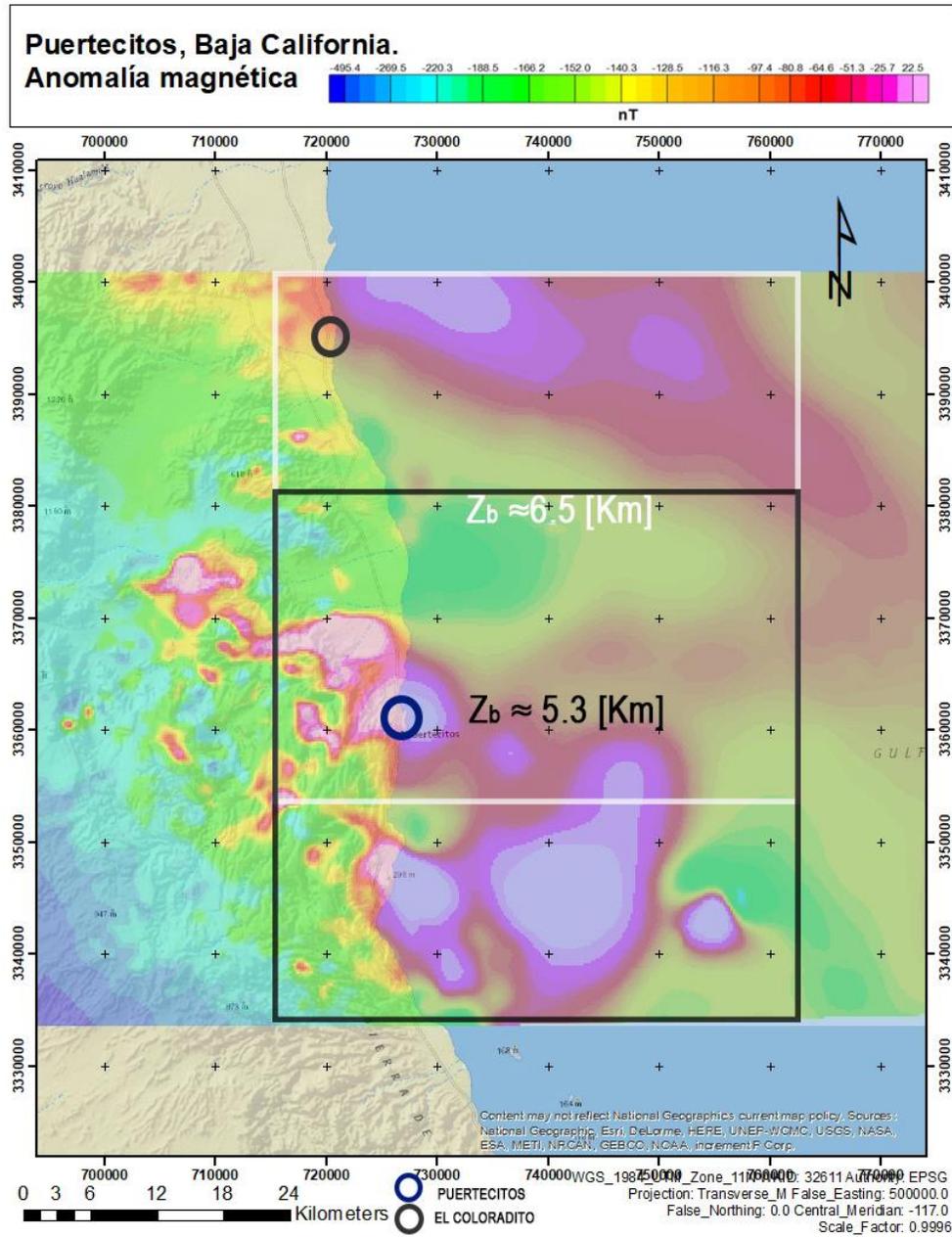


Figura 5.1. Mapa magnético de Puertecitos. Al sureste se tiene un CPD ≈ 5.3 km. (remarcado en negro) y al noreste un CPD ≈ 6.5 km. (remarcado en blanco).

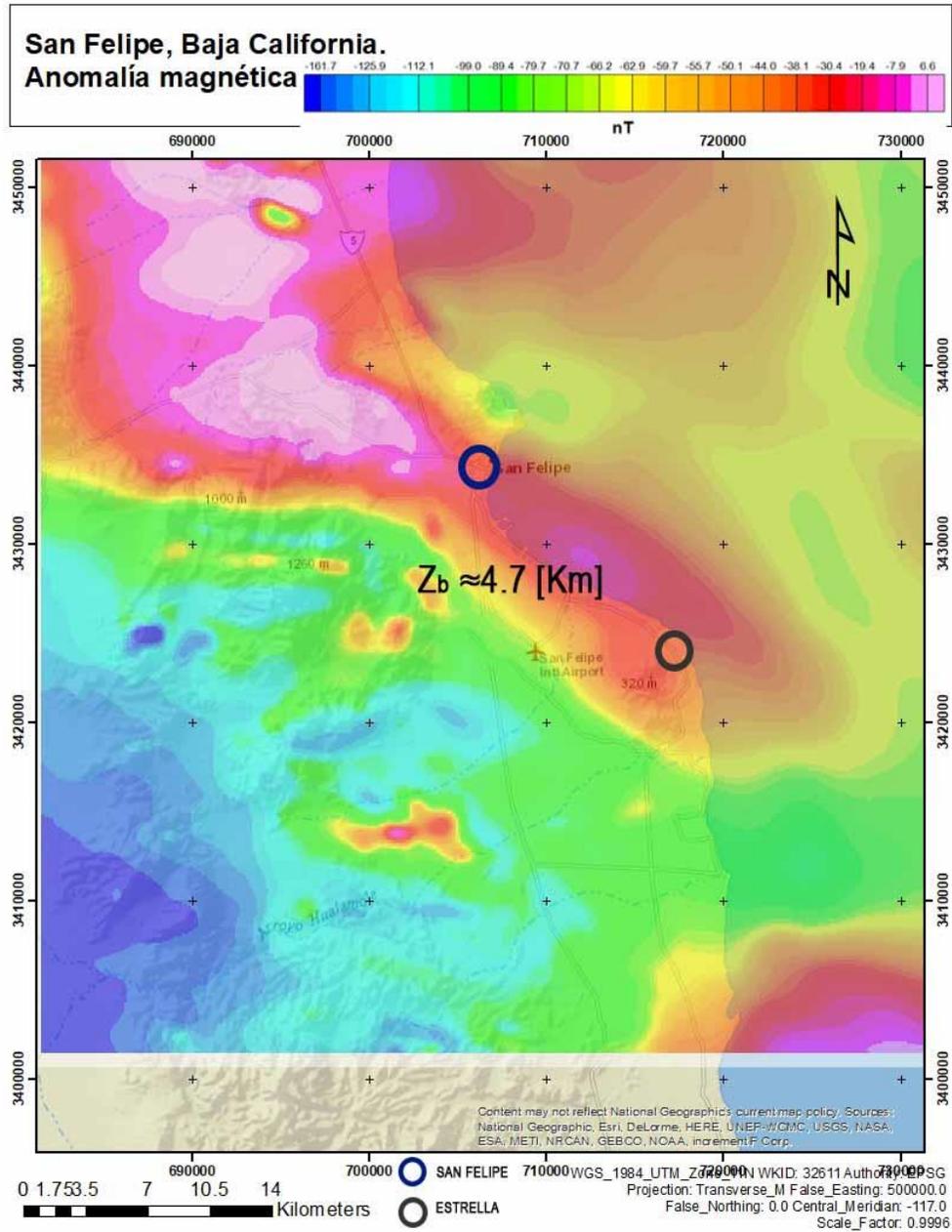


Figura 5.2. Mapa magnético de San Felipe. Se tiene un CPD ≈ 4.7 [km]. Realce Espacial.

5.1.2 Resultados del método de Realce Espacial

Se presentan los mapas de iluminación artificial con realce espacial de las zonas de estudio.

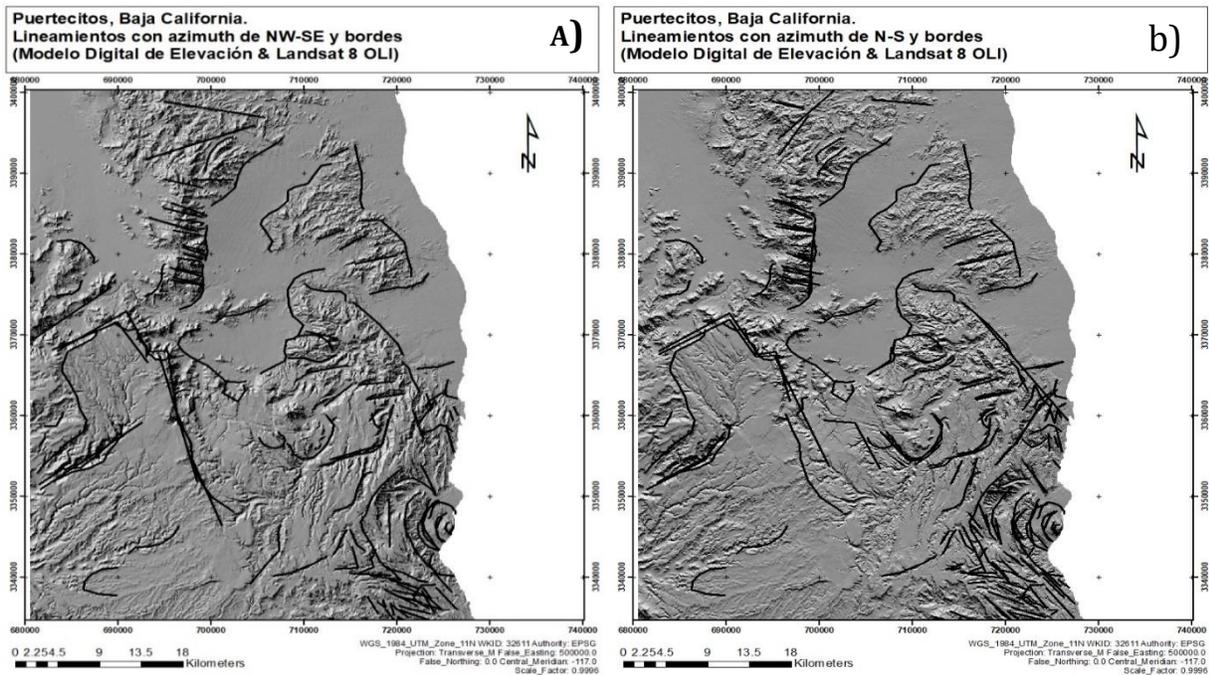


Figura 5.3. a) Dirección en NW-SE y bordes; b) dirección N-S y bordes, Puertecitos.

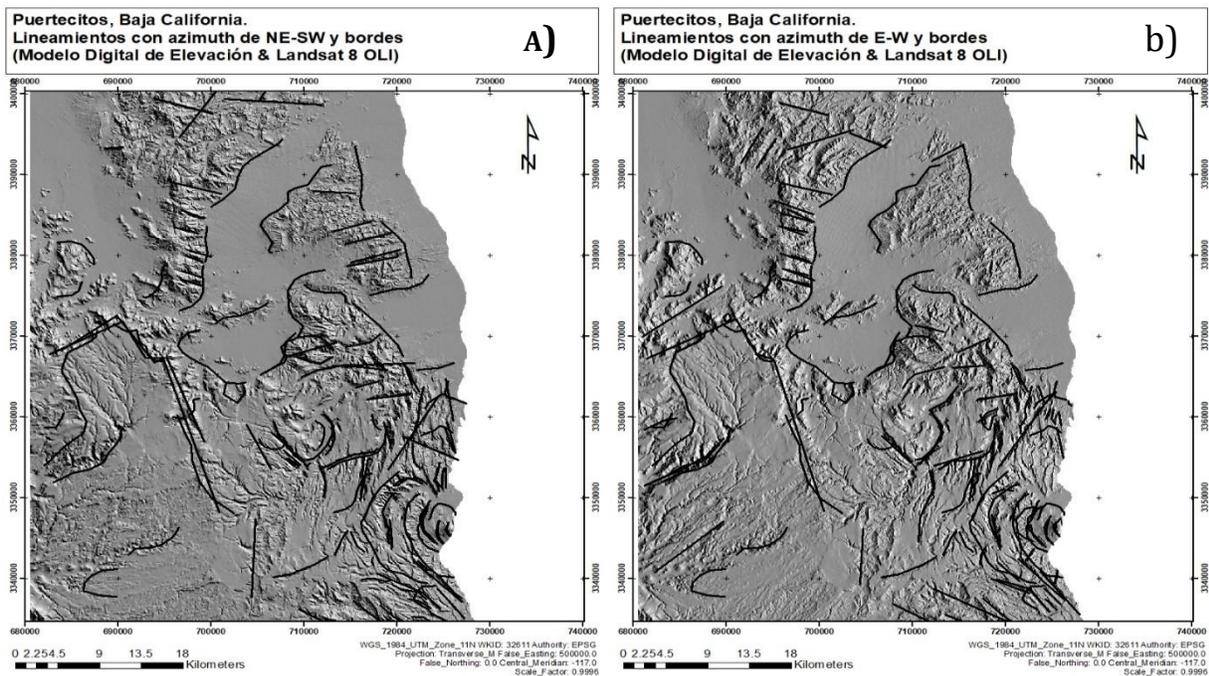


Figura 5.4. a) Dirección en NE-SW y bordes; b) dirección E-W y bordes, Puertecitos.

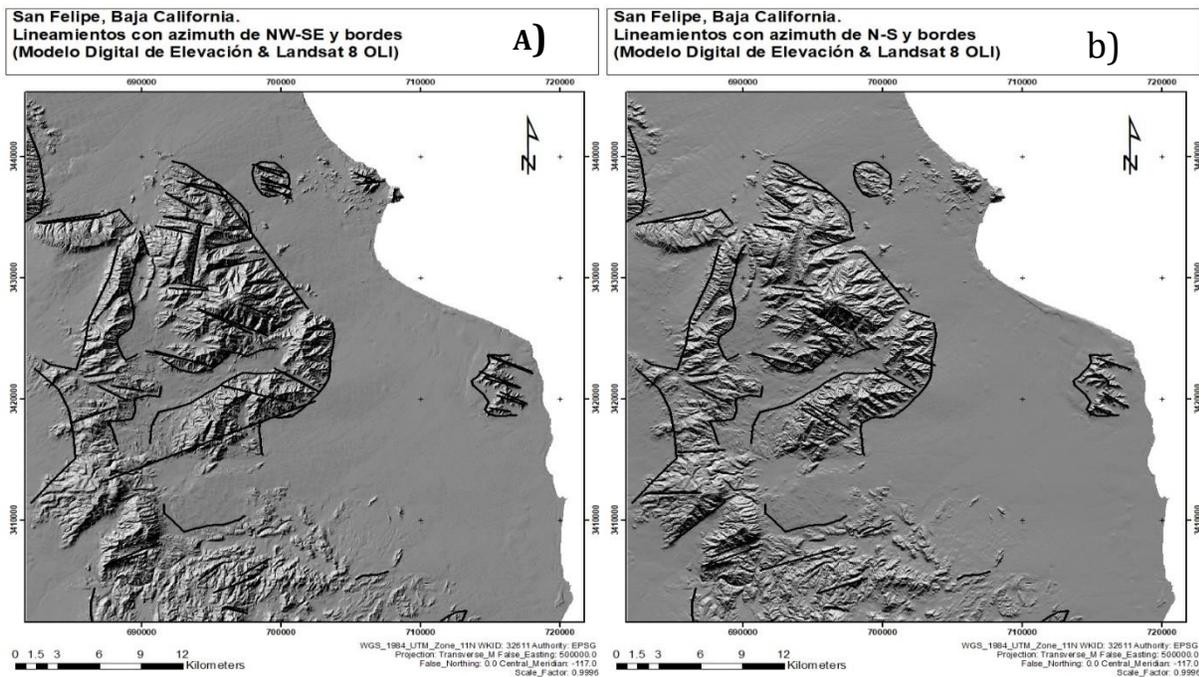


Figura 5.5. a) Dirección NW-SE y bordes; b) dirección N-S y bordes, San Felipe.

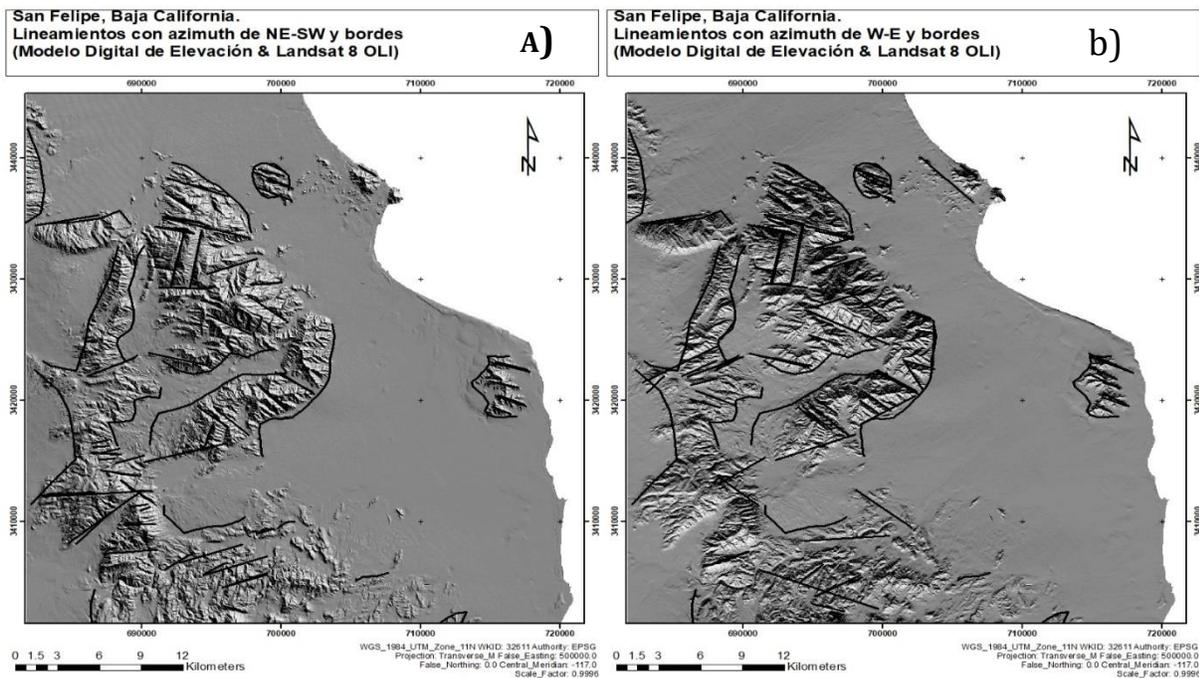


Figura 5.6. a) Dirección NE-SW y bordes b) dirección E-W y bordes, San Felipe.

5.1.3 Resultados del Método de Realce Espectral

5.1.3.1. Cociente de Bandas

Puertecitos

Para la zona de Puertecitos, se tienen en color rojo los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos. Por ende, la contribución de los óxidos e hidroxilos se presenta como superficies de color magenta, en color cian la contribución de los hidroxilos con la vegetación, en color amarillo los óxidos con la vegetación y en color blanco la contribución de los tres cuerpos (*Figura. 5.7*).

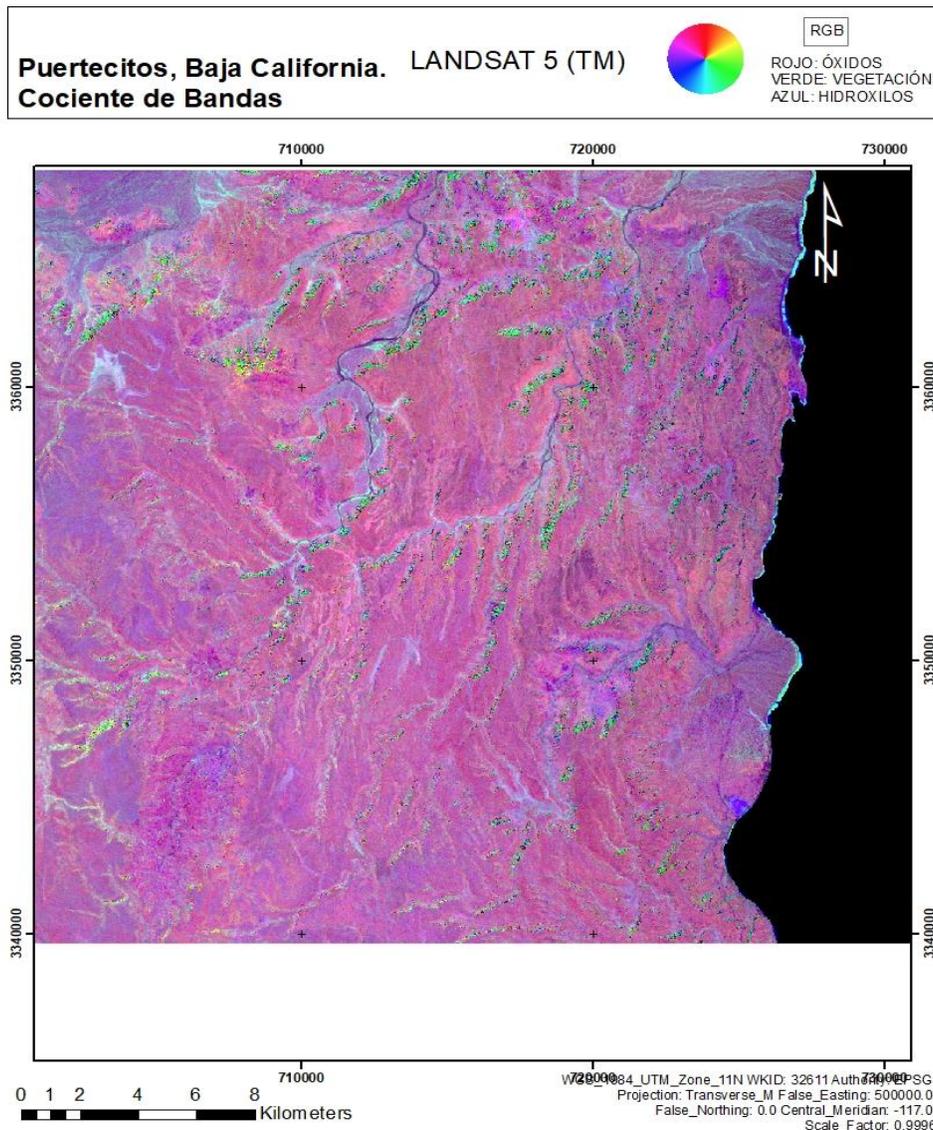


Figura 5.7. Realce espectral de Puertecitos con cociente de bandas. En color rojo, se tienen los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

San Felipe

Los resultados de la zona de San Felipe muestran superficies en donde el color rojo corresponde exclusivamente a los óxidos, en verde a la vegetación y en azul a los hidroxilos. Sin embargo, la contribución de óxidos e hidroxilos es de color magenta, en color cian la contribución de los hidroxilos con la vegetación y en color blanco la contribución de los tres materiales (Figura 5.8).

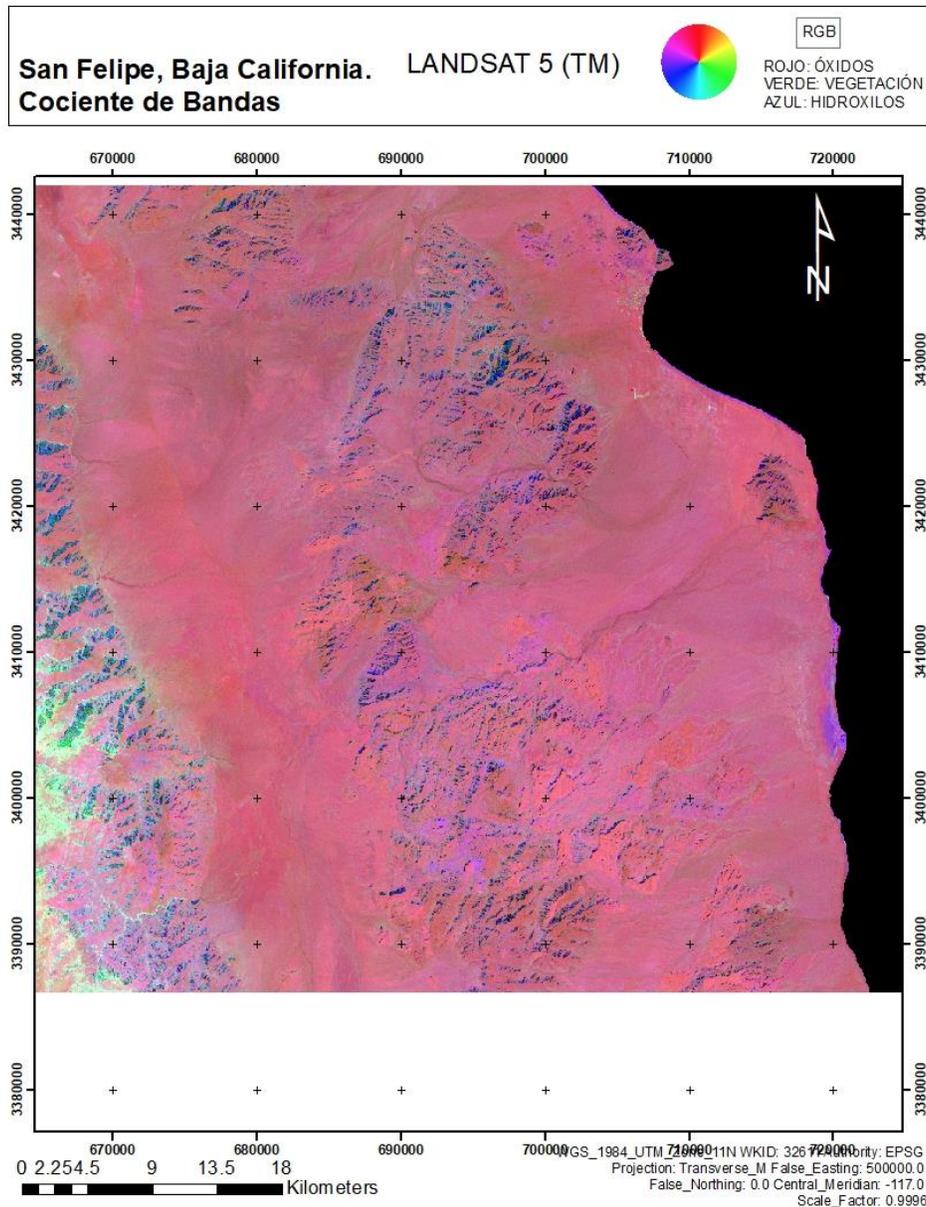


Figura 5.8. Realce espectral de Puertecitos con cociente de bandas. En color rojo, se tienen los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

5.1.3.2. Análisis de Componentes Principales

Puertecitos

La Tabla 5.1 muestra la matriz de carga de la zona de Puertecitos como resultado del análisis de componentes principales. Se utilizaron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, y se obtuvieron seis nuevas componentes.

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% VAR.	96.472415	2.456816	0.814924	0.177575	0.052465	0.025806
EIGENVAL.	2117.841083	53.934027	17.889878	3.898268	1.151760	0.566525

Carga	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
b1_sco	0.636298	0.750580	-0.171267	-0.016110	-0.036911	-0.028297
b2_sco	0.895268	0.432629	-0.002940	0.001165	0.058434	0.088900
b3_sco	0.984008	0.101214	0.135460	0.030063	0.042126	-0.021360
b4_sco	0.986369	0.028333	0.157428	-0.010555	-0.036294	0.007814
b5_sco	0.997115	-0.054614	-0.042185	-0.031300	0.004195	-0.001235
b7_sco	0.993214	-0.054405	-0.065062	0.078916	-0.009835	0.003067

Tabla 5.1. Matriz de carga de la zona de Puertecitos, obtenida a partir del análisis de componentes principales.

La componente 1 (C1) muestra información de la topografía y del albedo del área de estudio con una varianza del 95.09548 %.

No obstante, es difícil diferenciar en la matriz de carga las componentes que sirven para resaltar los hidroxilos, vegetación y óxidos, por lo que se recurre a otra técnica.

San Felipe

La Tabla 5.2 muestra la matriz de carga obtenida en el análisis de componentes principales con seis bandas (1, 2, 3, 4, 5 y 7) para el realce de óxidos, hidroxilos y vegetación.

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
% VAR.	96.358198	2.889512	0.516167	0.131700	0.080297	0.024129
EIGENVAL.	3498.727133	104.917022	18.741814	4.781974	2.915540	0.876116

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
b1_sco	0.851149	0.518703	-0.061541	0.035654	0.031479	-0.021047
b2_sco	0.929724	0.359501	-0.009990	0.005352	-0.027378	0.074120
b3_sco	0.984034	0.138391	0.080544	-0.047595	-0.059756	-0.014191
b4_sco	0.986477	-0.023610	0.157090	0.005219	0.039888	0.003206
b5_sco	0.995274	-0.089792	-0.023773	0.026742	-0.009283	-0.001023
b7_sco	0.994600	-0.047506	-0.066750	-0.059052	0.023843	0.001807

Tabla 5.2. Matriz de carga de la zona de San Felipe obtenida a partir del análisis de componentes principales.

La componente 1 (C1) representa información de la topografía y del albedo con una varianza del 96.9728%.

Al igual que en la matriz de carga de Puertecitos, en la matriz de carga de San Felipe es difícil elegir las componentes principales para los materiales en cuestión, por lo que se utiliza la técnica de Análisis de Componentes Principales Dirigidos.

5.1.3.2. Análisis de Componentes Principales Dirigidos

Puertecitos

La Tabla 5.3 muestra las matrices de carga de la zona de Puertecitos como resultado del análisis de componentes principales dirigidos.

a) Matriz de carga de hidroxilos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	96.924279	2.209263	0.677675	0.188784
EIGENVAL.	1853.069158	42.238297	12.956288	3.609304

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.621793	0.780777	-0.061018	-0.006137
b4_sco	0.982896	0.029719	0.181088	0.015480
b5_sco	0.998746	-0.027869	-0.026713	-0.031890
b7_sco	0.994907	-0.026284	-0.059952	0.076643

b) Matriz de carga de vegetación

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	98.212263	1.293575	0.435497	0.058667
EIGENVAL.	1690.314322	22.263501	7.495264	1.009706

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b2_sco	0.892478	0.315665	0.318663	-0.047872
b3_sco	0.985317	0.162908	-0.010890	0.049925
b4_sco	0.989039	0.115937	-0.085898	-0.031341
b5_sco	0.996793	-0.078748	0.014241	0.000321

c) Matriz de carga de óxidos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	96.475574	2.526847	0.927825	0.069754
EIGENVAL.	1678.542264	43.963668	16.142876	1.213619

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.635255	0.757565	-0.149066	-0.018040
b3_sco	0.985582	0.094547	0.129371	0.054328
b4_sco	0.988762	0.020671	0.142696	-0.039509
b5_sco	0.996625	-0.054371	-0.061498	0.000550

Tabla 5.3. Matrices de carga de la zona de Puertecitos obtenidas a partir del análisis de componentes principales dirigidos. a) Matriz de carga de hidroxilos b) matriz de carga de vegetación y c) matriz de carga de los óxidos.

La componente 4 (C4) de a) está relacionada con los hidroxilos, debido a los rasgos de reflectancia en la banda 5, con una contribución negativa de -0.031 y los rasgos de absorción en la banda 7, con una contribución de 0.766, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente para detectar hidroxilos.

La componente 4 (C4) de b) está relacionada con la vegetación, teniendo una contribución negativa de -0.031 en la banda 4, mientras que la banda 3 presenta rasgos de absorción con una contribución de 0.049. Por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente para detectar vegetación.

Y para los óxidos se utiliza la componente 4 (C4) de c), contando con una contribución positiva en la banda 3 de 0.054 y una negativa en la banda 1 de -0.018.

La Figura 5.9 muestra un mapa de composición RGB en falso color utilizando las componentes de la Tabla 5.3; en rojo los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos. Por lo tanto, la contribución de óxidos e hidroxilos está en zonas de color

magenta, en color cian la contribución de los hidroxilos con la vegetación, en color amarillo los óxidos con la vegetación y en color blanco la contribución de los tres cuerpos.

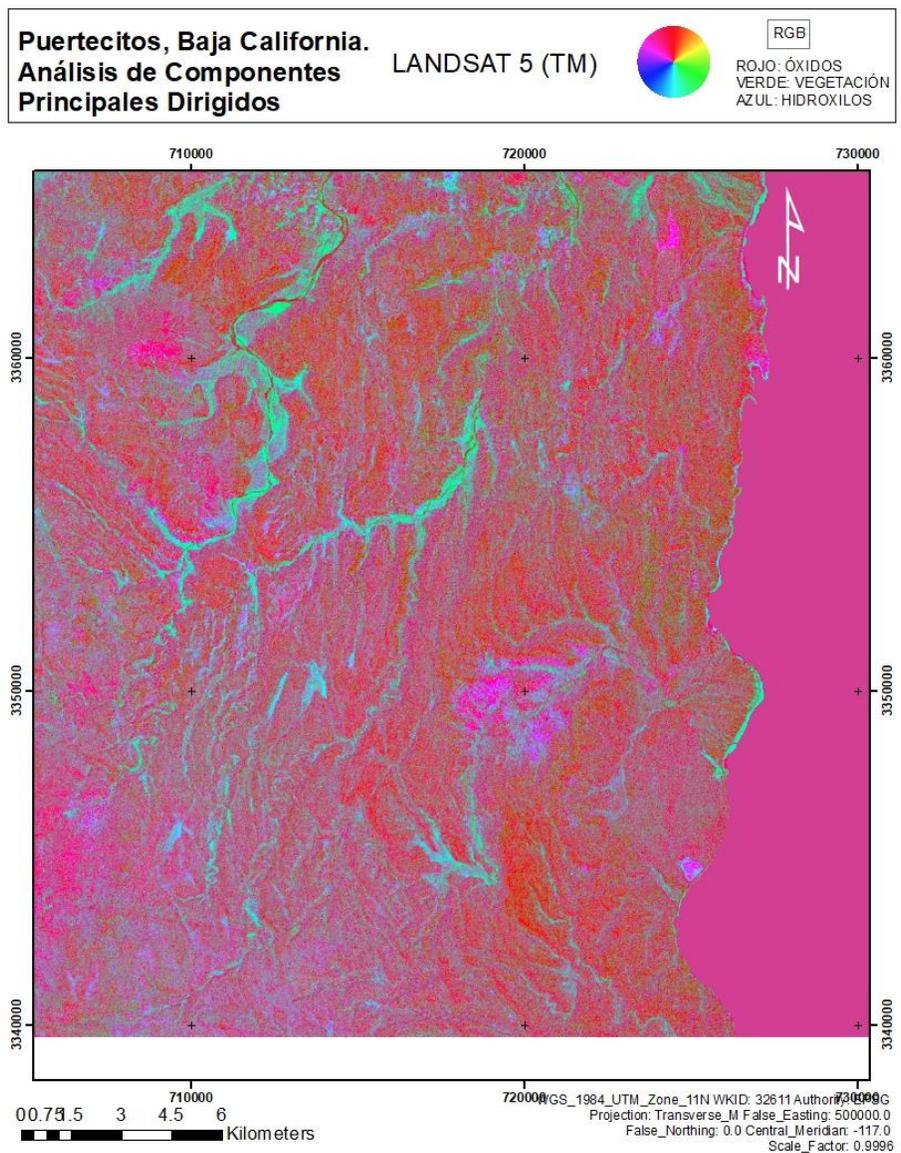


Figura 5.9. Composición en falso color del análisis de componentes principales para la zona de Puertecitos, en color rojo se muestran los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

San Felipe

La Tabla 5.4 muestra las matrices de carga de la zona de San Felipe como resultado del análisis de componentes principales dirigidos.

a) Matriz de carga de hidroxilos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	98.798717	1.060280	0.108445	0.032554
EIGENVAL.	15090.987911	161.952244	16.564412	4.972529

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.969950	0.243123	-0.008944	-0.002700
b4_sco	0.996990	-0.010889	0.075713	0.012622
b5_sco	0.998587	-0.050593	-0.007016	-0.014697
b7_sco	0.998043	-0.043036	-0.032586	0.031562

b) Matriz de carga de vegetación

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	98.027253	1.441528	0.456938	0.074282
EIGENVAL.	2652.472203	39.005599	12.364075	2.009968

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b2_sco	0.918751	0.362040	-0.138662	0.074809
b3_sco	0.980931	0.186520	0.003786	-0.054503
b4_sco	0.989567	0.039796	0.136702	0.022058
b5_sco	0.996994	-0.072443	-0.027464	0.000512

c) Matriz de carga de óxidos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	96.231428	3.095343	0.558230	0.114998
EIGENVAL.	2719.436969	87.472354	15.775226	3.249775

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.848411	0.523532	-0.069911	0.035004
b3_sco	0.984284	0.141070	0.073563	-0.076630
b4_sco	0.988854	-0.021845	0.141274	0.041623
b5_sco	0.995355	-0.085700	-0.043866	0.000742

Tabla 5.4. Matrices de carga de la zona de San Felipe obtenidas a partir del análisis de componentes principales dirigidos. a) Matriz de carga de hidroxilos b) matriz de carga de vegetación y c) matriz de carga de los óxidos.

La componente 4 (C4) de a) está relacionada con los hidroxilos, debido a los rasgos de reflectancia en la banda 5, con una contribución negativa de -0.014 y los rasgos de absorción en la banda 7, con una contribución de 0.031, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente para detectar hidroxilos.

La componente 4 (C4) de b) está relacionada con la

vegetación, teniendo una contribución de 0.022 en la banda 4, mientras que la banda 3 presenta rasgos de absorción con una contribución negativa de -0.054.

Y para los óxidos se utiliza la componente 4 (C4) de c), contando con una contribución negativa en la banda 3 de -0.076 y una contribución positiva en la banda 1 de 0.035, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente.

La Figura 5.10 muestra un mapa de composición RGB en falso color; en rojo los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos. Por lo tanto, la contribución de óxidos e hidroxilos están en color magenta, en color cian la contribución de los hidroxilos con la

vegetación, en color amarillo los óxidos con la vegetación y en color blanco la contribución de los tres cuerpos.

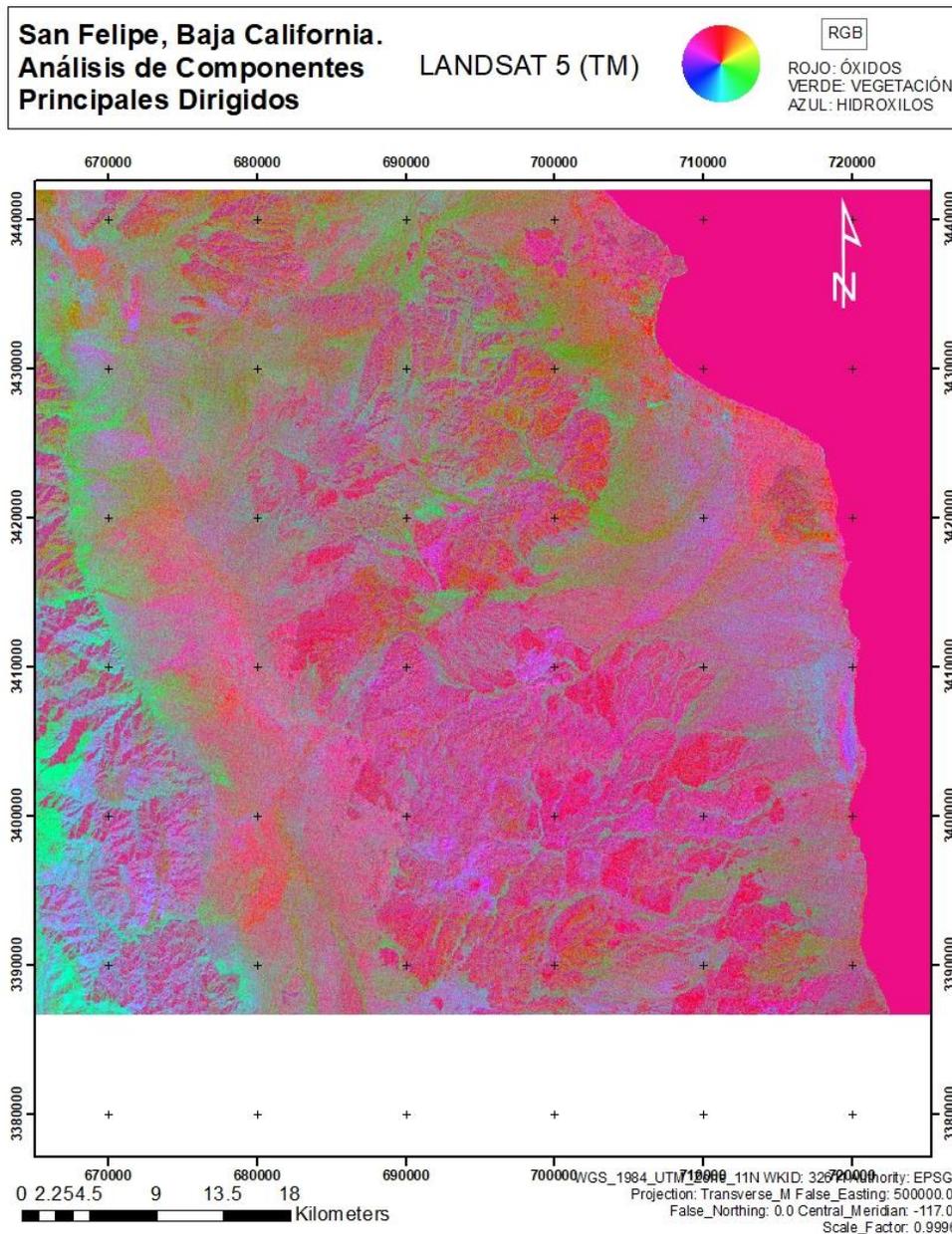


Figura 5.10. Composición en falso color del análisis de componentes principales dirigidos de la zona de San Felipe, en color rojo se muestran los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

La zona de San Felipe es desértica, aunque la Figura 5.10 muestra lo contrario, se observa en esta imagen una gran influencia de la vegetación. Ya que existen materiales como los

hidroxilos que tienen una respuesta similar a la vegetación en el infrarrojo medio, por lo tanto, se tiene que reducir la influencia de la vegetación en esta zona.

5.1.3.3. Análisis de la Vegetación

La Figura 5.11 es un mapa de composición en falso color, en el cañón del rojo se encuentra la banda del infrarrojo cercano (banda 4), en el verde la banda del rojo (banda 3) y en el azul la banda de verde (banda 2). Este arreglo ayuda a visualizar las zonas donde existe vegetación.

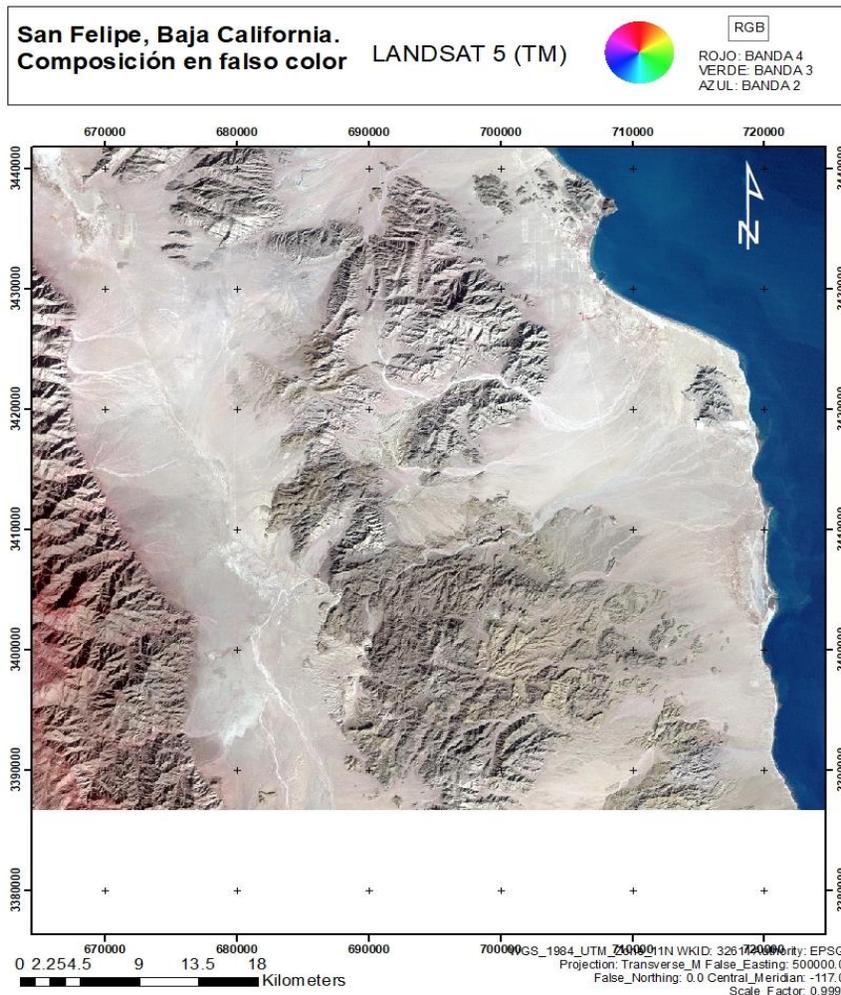


Figura 5.11. Composición en falso color para visualizar los lugares donde existe vegetación, en el cañón del rojo se colocó la banda 4, en el verde la banda 3 y en el azul la banda 2. San Felipe.

Existen diversos procedimientos para reducir la influencia de la vegetación en una imagen, en esta tesis se trabajó con dos:

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

La Figura 5.12 muestra el NDVI y la imagen booleana, donde el valor de 1 representa la vegetación y el cero representa materiales distintos.

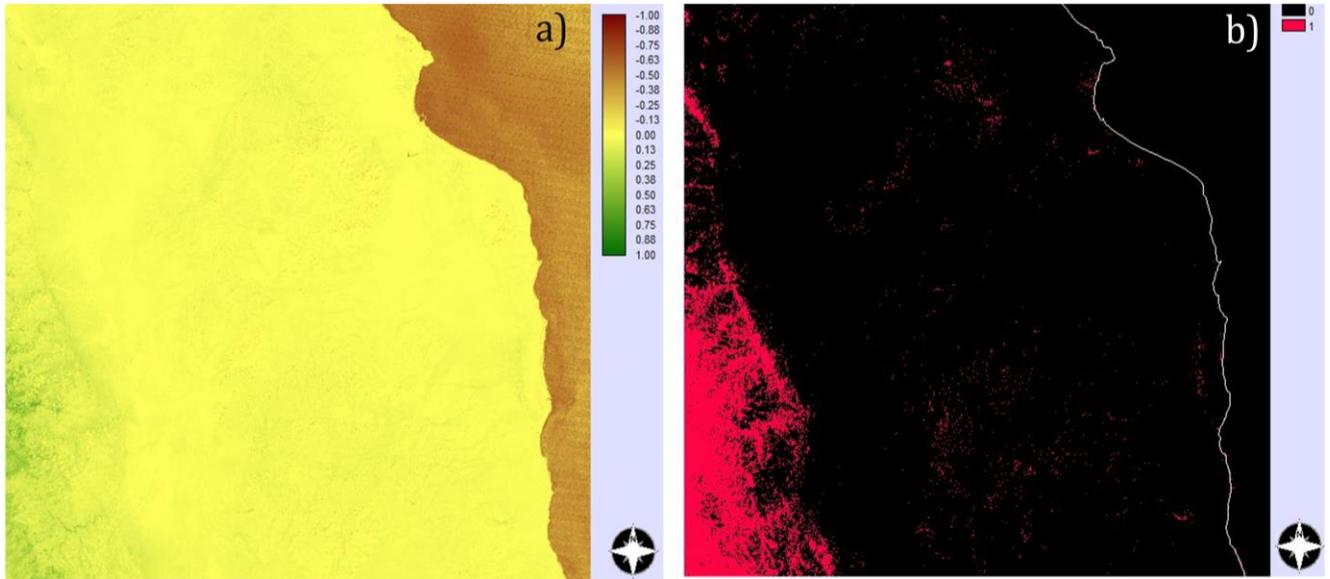


Figura 5.12. a) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) b) imagen booleana de ceros y unos, donde el valor de uno es la vegetación y cero otros materiales. San Felipe.

La Tabla 5.5 muestra las matrices de carga de la zona de San Felipe como resultado del análisis de componentes principales dirigidos usando la máscara de la vegetación generada por el NDVI.

a) Matriz de carga de hidroxilos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	97.260883	2.159504	0.453891	0.125720
EIGENVAL.	3087.949206	68.562385	14.410658	3.991498

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.843964	0.534813	-0.038672	-0.014273
b4_sco	0.987127	0.027719	0.156425	0.018522
b5_sco	0.998127	-0.052696	-0.016055	-0.026613
b7_sco	0.996370	-0.025886	-0.054173	0.060341

b) Matriz de carga de vegetación

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	98.085157	1.182656	0.686129	0.046054
EIGENVAL.	1327.930310	16.011439	9.289182	0.623505

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b2_sco	0.969309	0.124310	0.198267	0.075345
b3_sco	0.983060	0.079510	0.160380	-0.039374
b4_sco	0.976900	0.189522	-0.098733	-0.000639
b5_sco	0.997018	-0.075612	-0.015347	0.001546

c) Matriz de carga de óxidos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	96.231428	3.095343	0.558230	0.114998
EIGENVAL.	2719.436969	87.472354	15.775226	3.249775

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.848411	0.523532	-0.069911	0.035004
b3_sco	0.984284	0.141070	0.073563	-0.076630
b4_sco	0.988854	-0.021845	0.141274	0.041623
b5_sco	0.995355	-0.085700	-0.043866	0.000742

La componente 3 (C3) de b) está relacionada con la vegetación, teniendo una contribución negativa de -0.098 en la banda 4, mientras que la banda 3 presenta una contribución de 0.16, se utiliza la inversa de la componente 3 para visualizar la vegetación.

Y para los óxidos se utiliza la componente 4 (C4) de c), contando con una contribución negativa en la banda 3 de -0.076 y una contribución positiva en la banda 1 de 0.035, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente.

En la Figura 5.13 se muestra una imagen en composición RGB en falso color utilizando las componentes inversas del análisis de la Tabla 5.5; en rojo los óxidos, en verde la vegetación

Tabla 5.5. Matrices de carga de la zona de San Felipe obtenidas a partir del análisis de componentes principales dirigidos usando la máscara de la vegetación generada por el NDVI. a) Matriz de carga de hidroxilos b) matriz de carga de vegetación y c) matriz de carga de los óxidos.

La componente 4 (C4) de a) está relacionada con los hidroxilos, debido a los rasgos de reflectancia en la banda 5, con una contribución negativa de -0.026 y los rasgos de absorción en la banda 7, con una contribución de 0.06, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente para detectar hidroxilos.

y en azul los hidroxilos. En color cian la contribución de los hidroxilos con la vegetación, la contribución de óxidos e hidroxilos están en color magenta.

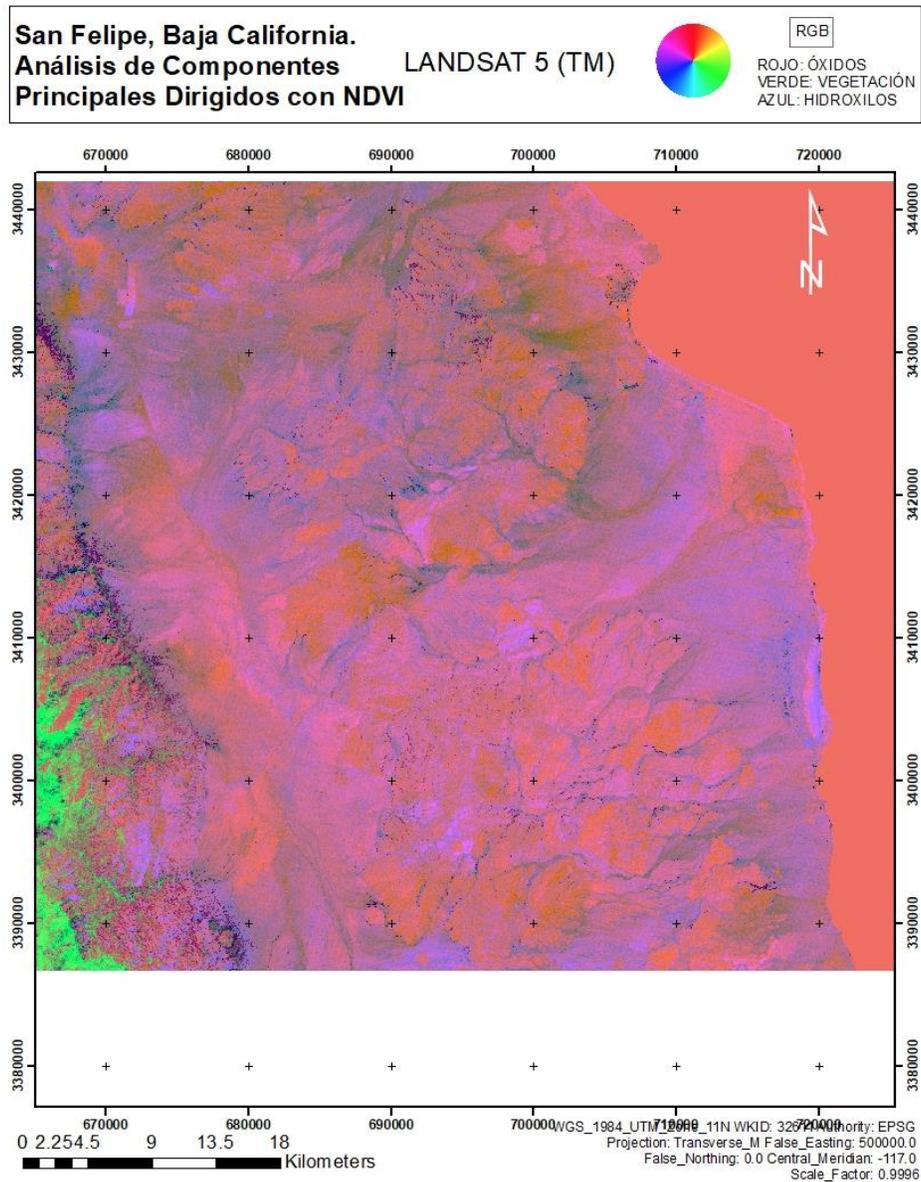


Figura 5.13. Composición en falso color del análisis de componentes principales dirigidos usando la máscara NDVI de la zona de San Felipe, en color rojo se muestran los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

Clasificación No Supervisada

La Figura 5.14 corresponde a una serie de imágenes donde se muestran los resultados de la técnica de clasificación no supervisada, este proceso es de acuerdo a Morton J. Canty (2014).

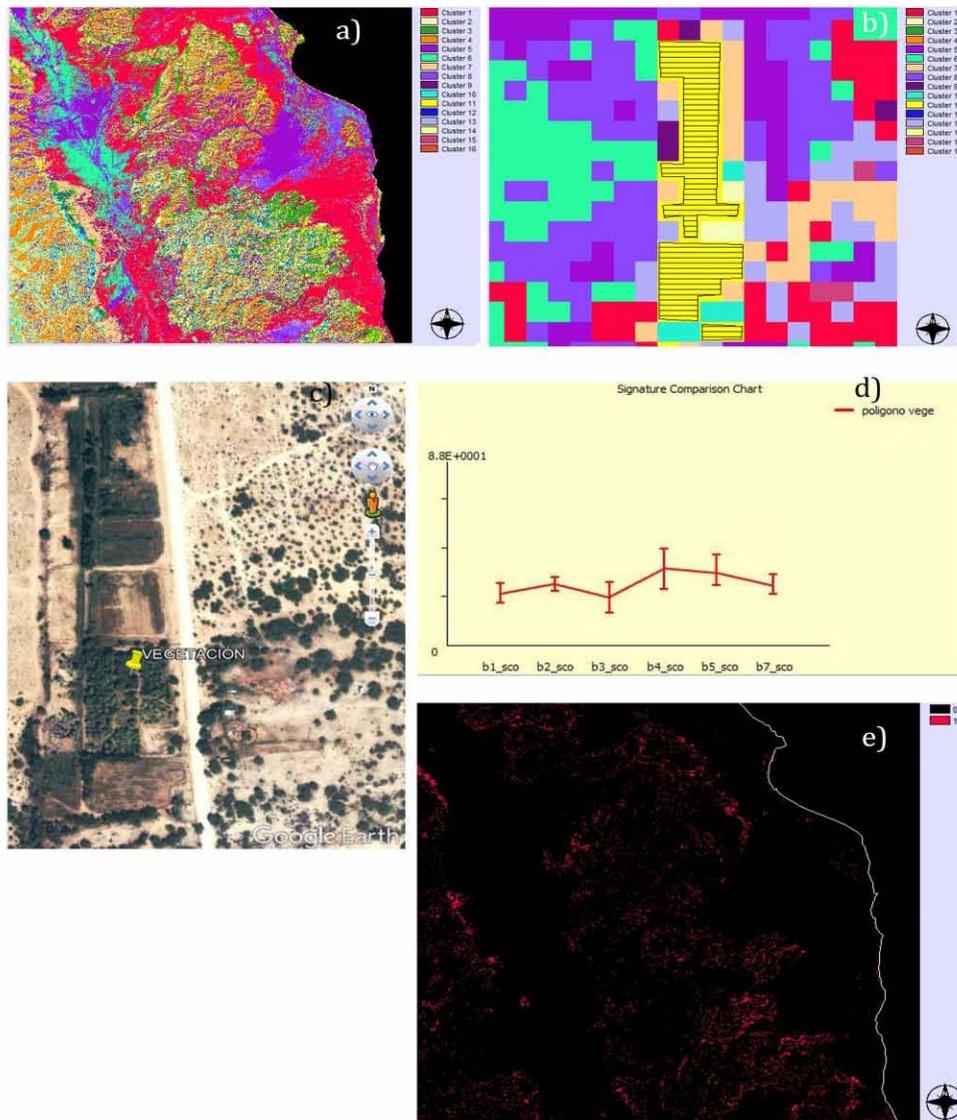


Figura 5.14. a) Mapa de los Clústeres encontrados, b) Verificación con polígonos de entrenamiento, c) Imagen satelital de una zona con vegetación con coordenadas (706260.35 m E, 3427499.12 m N), d) firma espectral de la vegetación. San Felipe.

La Tabla 5.6 muestra las matrices de carga de la zona de San Felipe como resultado del ACPD usando la máscara de la Clasificación No Supervisada.

a) Matriz de carga de hidroxilos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	97.081714	2.303658	0.488313	0.126321
EIGENVAL.	3181.914341	75.503846	16.004753	4.140250

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.844785	0.534469	-0.021253	-0.015141
b4_sco	0.986430	0.004206	0.162829	0.020629
b5_sco	0.998010	-0.054476	-0.016974	-0.026827
b7_sco	0.996265	-0.017582	-0.059618	0.059942

b) Matriz de carga de vegetación

T-MODE COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	72.667586	20.328907	6.392351	0.611162
T-MODE EIGENVAL.	57.119432	15.979279	5.024626	0.480396

T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4
b2_sco	0.216186	-0.303965	0.811960	0.448987
b3_sco	0.261964	-0.359933	0.880908	-0.160696
b4_sco	0.848115	0.527914	0.044807	-0.000437
b5_sco	0.916901	-0.392429	-0.072735	0.000876

c) Matriz de carga de óxidos

COMPONENTE	C 1	C 2	C 3	C 4
% VAR.	96.231428	3.095343	0.558230	0.114998
EIGENVAL.	2719.436969	87.472354	15.775226	3.249775

CARGA	C 1	C 2	C 3	C 4
b1_sco	0.848411	0.523532	-0.069911	0.035004
b3_sco	0.984284	0.141070	0.073563	-0.076630
b4_sco	0.988854	-0.021845	0.141274	0.041623
b5_sco	0.995355	-0.085700	-0.043866	0.000742

Tabla 5.6. Matrices de carga de la zona de San Felipe obtenidas a partir el ACPD usando la máscara de la Clasificación No Supervisada.

a) Matriz de carga de hidroxilos b) matriz de carga de vegetación y c) matriz de carga de los óxidos.

La componente 4 (C4) de a) está relacionada con los hidroxilos, debido a los rasgos de reflectancia en la banda 5, con una contribución negativa de -0.026 y los rasgos de absorción en la banda 7, con una contribución de 0.059, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente para detectar hidroxilos.

La componente 2 (C2) de b) está relacionada con la

vegetación, teniendo una contribución de 0.052 en la banda 4, mientras que la banda 3 presenta una contribución negativa de -0.035, se utiliza la inversa de la componente 3 para visualizar la vegetación.

Y para los óxidos se utiliza la componente 4 (C4) de c), contando con una contribución negativa en la banda 3 de -0.076 y una contribución positiva en la banda 1 de 0.035, por lo tanto, se utiliza la inversa de esta componente.

La composición RGB en falso color del ACPD usando la máscara generada por la técnica de Clasificación No supervisada muestra en rojo los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos. En color cian la contribución de los hidroxilos con la vegetación, la contribución de óxidos e hidroxilos están en color magenta (Figura 5.15).

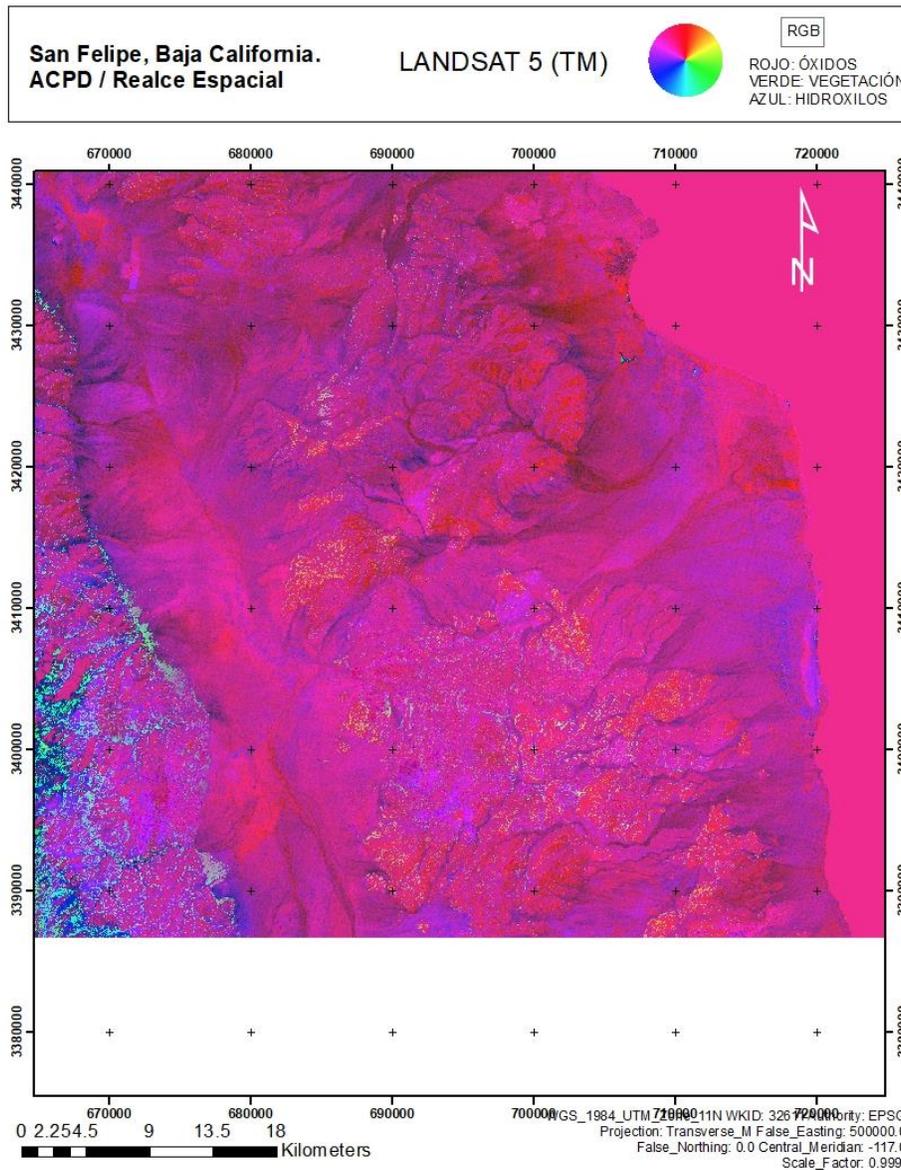


Figura 5.15. Composición en falso color del ACPD usando la máscara de la Clasificación No Supervisada de la zona de San Felipe, en color rojo se muestran los óxidos, en verde la vegetación y en azul los hidroxilos.

5.1.4. Integración de Resultados

Se integran los mapas de realce espacial con los mapas de anomalías geomagnéticas reducidas al polo y los mapas de realce espectral.

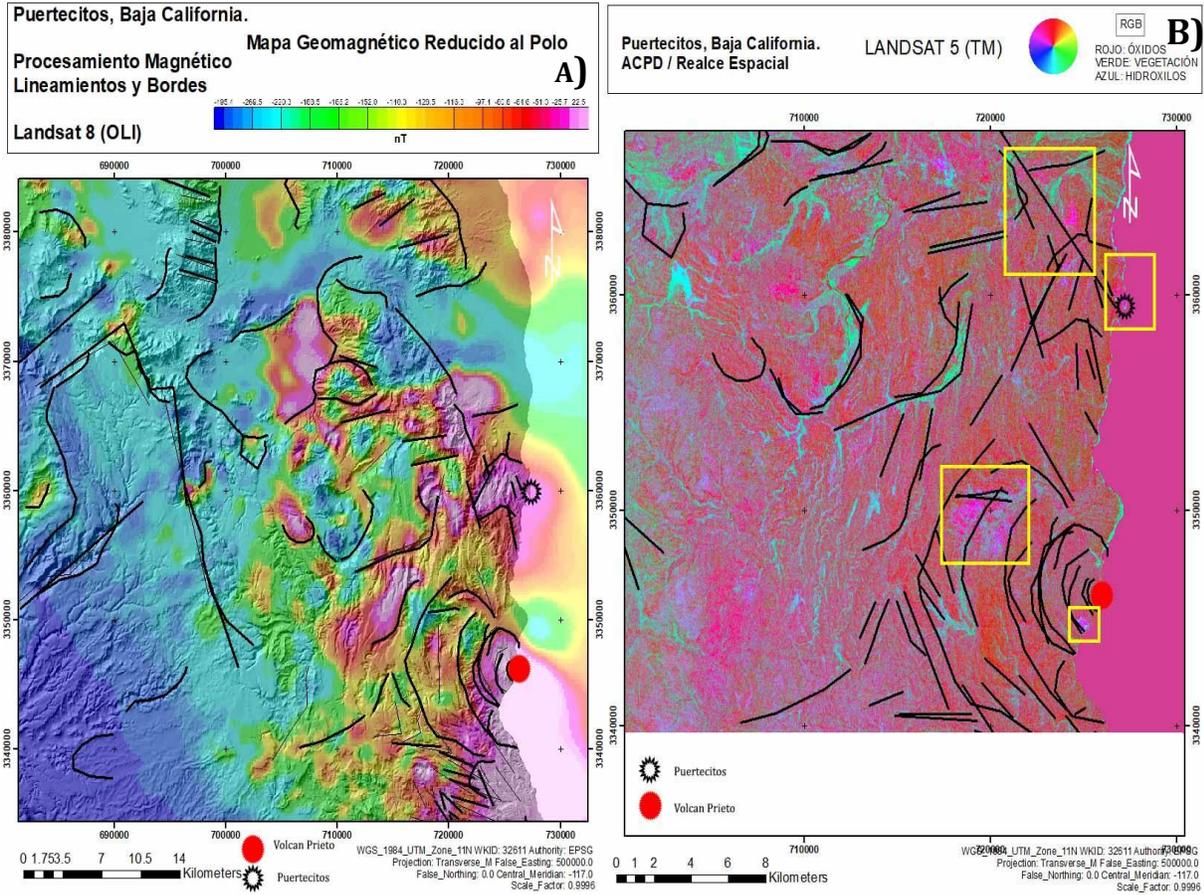


Figura 5.16. Integración de resultados anomalía magnética reducida al polo con lineamientos y bordes de estructuras geológicas; b) Composición por RGB en falso color, el color magenta representa zonas con contribución de óxidos e hidroxilos encerradas por rectángulos amarillos, a partir del ACPD con lineamientos y bordes geológicos encontrados, Puertecitos.

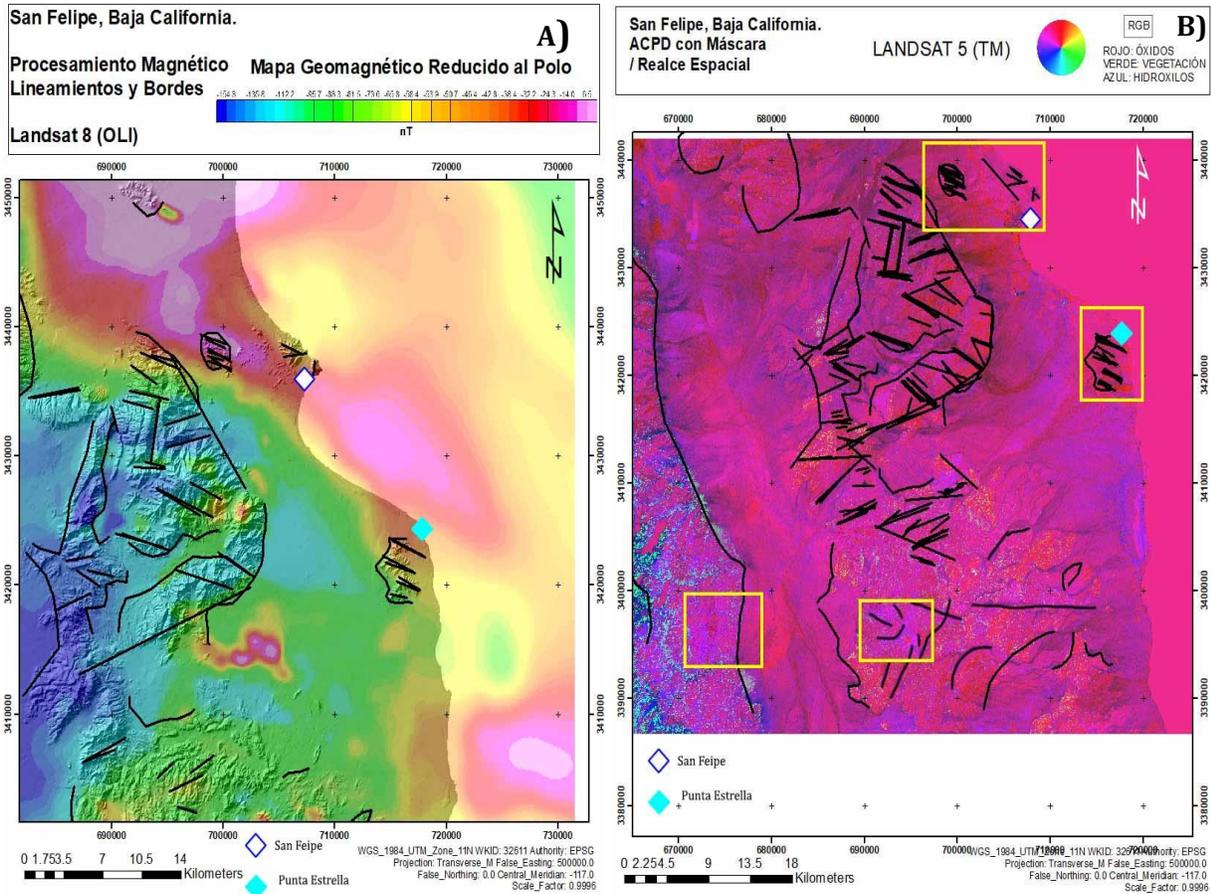


Figura 5.17. Integración de resultados a) anomalía magnética reducida al polo con lineamientos y bordes de estructuras geológicas; b) composición RGB en falso color a partir del ACPD, el color magenta representa zonas con contribución de óxidos e hidroxilos encerradas por rectángulos amarillos, con máscara de la Clasificación No Supervisada y con lineamientos geológicos encontrados, San Felipe.

5.2. DISCUSIÓN

Método Magnético

Puertecitos

La isoterma de Curie en la zona de Puertecitos fue más somera al sur en donde se encuentran las estructuras volcánicas de edad Neógeno, como la caldera del Volcán Prieto, con una profundidad de ≈ 5.3 km y se profundiza al norte donde existen depósitos de mayor edad, Paleozoico – Mesozoico como las series de intrusiones de composición granodiorita – tonalita, granodiorita – granito y diorita, pertenecientes a la Sierra San Felipe con una profundidad de ≈ 6.5 km (Figura 5.1).

San Felipe

Por su parte, la isoterma de Curie en la zona de San Felipe fue más superficial que las estimadas en Puertecitos con una profundidad de ≈ 4.7 km, parte de la zona está cubierta por depósitos de edad cuaternario y por intrusiones ígneas pertenecientes a la Sierra San Felipe de mayor edad, Paleozoico – Mesozoico (Figura 5.2).

Realce Espacial

En cuanto a la información estructural, por medio del realce espacial fue posible identificar bordes y lineamientos (Figura 5.3 – 5.6). En las zonas de estudio los sistemas de fallas y fracturas tienen rumbo preferencial NW – SE atribuyéndose al régimen distensivo *Basin and Range* (SGM, 1999).

Realce Espectral

El método de realce espectral que brindó mejores resultados fue el método de ACPD aplicado a cuatro bandas (Loughlin, 1991), ya que no mostró información redundante, y que la alta variabilidad de la información de las bandas creó un mejor contraste entre materiales.

Con la composición RGB en falso color, se desplegaron las componentes principales dirigidas que fueron útiles para el análisis. El color rojo se asoció al grupo de los óxidos, el verde a la vegetación y el azul al grupo de los hidroxilos.

Puertecitos

En la zona de Puertecitos se identificaron al menos cuatro áreas, que presentan evidencias superficiales de concentraciones de minerales característicos de actividad hidrotermal (Figura 5.9), se eligen estas áreas con base en los estudios hechos por Barragán *et al.*, (2001) y por Álvarez (1995), además de estos trabajos, datos recientes fueron obtenidos por Prol-Ledesma *et al.* (2010). En la parte noreste del mapa, en la localidad de Puertecitos y sus alrededores, se muestran áreas de color magenta, que corresponden a la contribución de los óxidos e hidroxilos, y que están ligadas a la alteración de tipo oxidación y silicificación. Al sur de la localidad de Puertecitos se observa la evidencia de la contribución de óxidos e hidroxilos, donde está la región del Volcán Prieto. Al sur del volcán se observó una zona color magenta en depósitos de aluvi3n del cuaternario limitada por el basalto y por riolitas – tobas riolíticas del Terciario. Al este del volcán se presentaron zonas magentas en riolitas limitadas por tobas riolíticas del Terciario.

San Felipe

La Figura 5.15 mostró un mejor contraste entre los materiales y se identificaron al menos cuatro áreas con la evidencia superficial de óxidos e hidroxilos, se eligen estas áreas con base en los estudios hechos por Pearl (1978), Lynn (1978), Álvarez (1995) y Barragán *et al.*, (2001). En la localidad de San Felipe y sus alrededores, las zonas color magentas están ubicadas mayormente en depósitos de litoral y aluvi3n de edad Cuaternario, y por rocas ígneas intrusivas, donde se encuentra el depósito epitermal de tipo ventiforme con mineralización de Au – Ag La Felipeña (SGM, 1999). En la parte este del mapa (Punta Estrella), se mostraron zonas magentas ubicadas en rocas de composici3n granodiorita –

tonalita y por rocas metamórficas de gneis – esquistos de edad Triásico Superior – Jurásico inferior. En la parte sur del mapa, cerca de Valle Chico se localizan áreas con contribución de óxidos e hidroxilos, donde se encuentran los conglomerados polimícticos del cuaternario limitadas por rocas ígneas intrusivas del tipo granodiorita – granito y granodiorita – tonalita (SGM, 1999). Las superficies magentas localizadas en Valle Chico coinciden con manifestaciones termales que están localizadas al pie de la Sierra de San Pedro Mártir, hay dos manantiales, ambos sitios comparten características termales similares, pero sólo uno presenta alteración hidrotermal superficial (Barragán *et al.*, 2001).

Integración de Resultados

La información magnética, de realce espacial y de realce espectral se sobreponen en las figuras 5.16 y 5.17, en las que ayudaron a proponer zonas de interés. Estas figuras son el producto final de la tesis, siendo los resultados de técnicas magnéticas y de procesamiento de imágenes, las cuales sirvieron para identificar la presencia de anomalías magnéticas, de zonas con contribución de óxidos e hidroxilos y de debilidad estructural.

Se encontró la relación entre las anomalías magnéticas con las superficies que presentan contribución de óxidos e hidroxilos y con los lineamientos estructurales. Puesto que la presencia de estas anomalías está asociada a regiones con potencial geotérmico, esperando profundidades someras del punto de Curie (Ibrahim A. *et al.*, 2005).

Puertecitos

La Figura 5.16 –a es la combinación del mapa de anomalía geomagnética reducida al polo con el mapa de lineamientos y bordes. En los límites de la anomalía magnética de Puertecitos, que según Flores Luna *et al.* (1996) es un posible conductor geotérmico, se encontraron planos de debilidad con dirección preferencial NW – SE. Al sur, en la zona del Volcán Prieto, se descubrió que los bordes estructurales del volcán coinciden con los límites de la anomalía magnética y que esta se propaga hacia el mar.

La Figura 5.16 –b, es la combinación del mapa de realce espectral por el método ACPD con el mapa de lineamientos y bordes, mostró que las zonas color magenta están limitadas por planos de debilidad. En la superficie magenta que se localiza en Puertecitos existen lineamientos estructurales con dirección NW –SE. La zona color magenta que se encuentra a un costado de Puertecitos está limitada por una falla del tipo normal con dirección NW – SE, muy cerca de la cantera de toba riolítica de la Mesa el Tabano (SGM, 1999). En la parte sur del mapa, cerca del Volcán Prieto, las zonas color magenta están limitadas por bordes estructurales que corresponden al volcán.

San Felipe

Se combinó el mapa de anomalía geomagnética reducida al polo con el mapa de lineamientos y bordes de la zona de San Felipe (Figura 5.17 – a), se observó que existen lineamientos (con dirección preferencial NW –SE) que coinciden con la anomalía que atraviesa el poblado de Puertecitos y de Punta Estrella.

En la Figura 5.17 – b se combinó la información generada por el ACPD de la zona de San Felipe con el mapa de lineamientos y bordes, esto mostró que las zonas magentas están limitadas por lineamientos estructurales. Las zonas magentas localizadas en San Felipe y en Punta Estrella tienen lineamientos con dirección NW – SE. En la superficie magenta ubicada al pie de la Sierra de San Pedro Mártir se encuentra la falla normal del mismo nombre, la cual se muestra en el mapa. Finalmente, la superficie magenta que se encuentra cerca de Valle Chico al sur del mapa se encuentra limitada por lineamientos con direcciones NE – SW y NW – SE.

Capítulo VI. Conclusiones

En el presente trabajo de tesis, se estimó la profundidad de la isoterma de Curie en las regiones de Puertecitos y San Felipe, Baja California. Para la región de Puertecitos, al centro - sureste la profundidad promedio de la isoterma fue aproximadamente 5.3 Km., donde se encontraron las anomalías del Volcán Prieto y de Puertecitos. Por su parte, en el noreste la profundidad promedio de la isoterma fue mayor con aproximadamente 6.5 Km. Mientras que, en San Felipe, la profundidad promedio fue alrededor de 4.7 Km., más somera que las anteriores.

Las profundidades estimadas del punto de Curie en este proyecto ayudarán a conocer el flujo de calor en México. Además, el conocimiento del estado térmico de la corteza es fundamental en estudios geodinámicos, en vulcanología, en sismología y en exploración de recursos mineros y geotérmicos.

La mayoría de los lineamientos identificados con el Modelo Digital de Elevación tuvieron dirección NW – SE, lo que corresponde al sistema de fallas y fracturas que se atribuye al régimen distensivo *Basin and Range*.

A través del análisis de imágenes satelitales Landsat 5 del sensor remoto TM de las regiones de Puertecitos y San Felipe del estado de Baja California, fue posible la identificación de zonas que presentan características geológicas y estructurales indicadoras de actividad geotermal.

Fueron cuatro los sitios propuestos en Puertecitos y cuatro en San Felipe con base en los resultados obtenidos al aplicar el análisis de imágenes satelitales, coincidiendo con las manifestaciones hidrotermales reportadas por Pearl (1978), Lynn (1978), Álvarez (1995), Barragán et al., (2001) y Prol-Ledesma *et al.* (2010).

Las cuatro zonas propuestas en la región de Puertecitos se localizaron en el poblado del mismo nombre, cerca de la Mesa el Tabano, al oeste y al sur del Volcán Prieto. En estas

zonas existen prospectos de zeolitas y una cantera de toba riolítica a un costado de la Mesa el Tabano (SGM, 1999). Se tienen manifestaciones hidrotermales intermareales reportadas en varias publicaciones (Álvarez, 1995; Barragán *et al.*, 2001), donde las descargas de agua termal a través de fracturas en las rocas de la costa tienen temperaturas que varían de 52 a 73 °C.

Mientras que las zonas propuestas en la región de San Felipe se localizaron junto al poblado del mismo nombre, en Punta Estrella, al pie de la Sierra de San Pedro Mártir y al sur de la región (cerca de Valle Chico). Al sur del poblado de San Felipe se encuentra la mina abandonada La Minita de Au – Ag. Las manifestaciones hidrotermales de la zona de San Felipe, reportadas por Barragán *et al.* (2001), tienen temperaturas en un rango de entre 31 a 74°C, las temperaturas más altas corresponden a los manantiales termales de Valle Chico.

Las técnicas empleadas en este trabajo son especialmente útiles en grandes áreas alejadas y de difícil acceso, donde la manifestación de actividad geotermal en superficie no ha sido localizada por métodos convencionales. Estas técnicas han demostrado ser herramientas útiles en la búsqueda de recursos energéticos y mineros.

REFERENCIAS

- Abraham, E. M., Lawal, K. M., Ekwe, A. C., Alile, O., Murana, K. A., Lawal A. A. (2014). Spectral Analysis of Aeromagnetic Data for Geothermal Energy Investigation of Ikogosi Warm Spring - Ekiti State, Southwestern Nigeria. *Geothermal Energy*, 2, 1-21.
- Aldalur B. y Santamaría M. (2012). Realce de imágenes: filtrado espacial. *Teledetección*, 17, 31 - 42.
- Álvarez, J., 1995. Reconocimiento geotérmico del noreste de la Península de Baja California proyecto Puertecitos. Reporte de avance. Internal report, Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto, Residencia de Estudios, Cerro Prieto, México, p.15.
- Avery, T. E., Berlin, G. L. (1985). *Interpretation of Aerial Photographs*. Minnesota: Burgess Publishing Company, 4ª edición.
- Belmonte-Jiménez S.I. (2010). Estudio de la Isoterma de Curie en una zona de Oaxaca, Modelado Numérico de datos magnéticos. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR Unidad Oaxaca), Instituto Politécnico Nacional.
- Blakely, R. (1996). *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- Barragán, R. M., Birkle, P. R., Portugal, M. E., Arellano, G. V. M, Álvarez, R. J. (2001). Geochemical Survey of Medium Temperature Geothermal Resources from the Baja California Peninsula and Sonora, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 110, 101-119 pp.
- Bhattacharyya, B. K., Leu Lei-Kuang. (1975). Analysis of Magnetic Anomalies Over Yellowstone National Park: Mapping of Curie Point Isothermal Surface for Geothermal Reconnaissance. *Journal of Geophysical Research*, 80, 4461-4465 pp.
- Bhattacharyya, B. K., Leu Lei-Kuang. (1977). "Spectral Analysis of Gravity and Magnetic Anomalies Due to Rectangular Prismatic Bodies". *Geophysics*, 42(1), 41-50 pp.
- Bakker, W. H., Tempfli, K., Huurneman, G. C., Janssen, L. L. F., Feringa, W. F., Gieske, A. S. M., Woldai, T. (2009). *Principles of Remote Sensing: An Introductory Textbook*. Enschede: ITC Educational Textbook Series, (2).
- Baranov, V. (1957). A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps Pseudogravimetric Anomalies: *Geophysics*, 22, 359-383 pp.
- Breiner, S. (1973). *Applications Manual for Portable Magnetometers*. Sunnyvale: GeoMetrics.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. New York: The Guilford Press.
- Cantos, F. (1974). *Tratado de Geofísica Aplicada*. España: Litoprint.
- Celis Aguirre Juan Manuel. (2016). Boletín N°. 1343. Boletines Cámara de Diputados, 2.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2009b). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 0238 Matomí-Puertecitos, Estado de Baja California. Ciudad de México: Subdirección General Técnica — Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2008). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 0222 San Felipe-Punta Estrella en el Estado de Baja California. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua — Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos.
- Consejo de Recursos Minerales (CRM). (1999). Monografía Geológico Minera del Estado de Baja California. ISBN 9686710027.
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de la Baja California. México: Geos, Unión Geofísica Mexicana, 38-42 pp.
- De La Puente, G. (2015). "Estimación de la Profundidad de la Isoterma de CURIE en el Estado de Querétaro, México". Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dickson, M., Fanelli, M. (2004). What is Geothermal Energy. Pisa: Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR.
- Dobrin, M. B. (1960). Introduction to Geophysical Prospecting. New York: McGraw Hill.
- Dobrin, M. B., Savit, C. H. (1998). Introduction to Geophysical Prospecting. New York: McGraw-Hill, 4^a edición.
- Dubrov, A. P. (1978). The Geomagnetic Field and Life: Geomagnetobiology. New York: Springer Science & Business Media.
- 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.
- Flores-Luna, C., Romo-Jones, J. M., Vázquez-González, R., y López-Tipa, A., 1996. Exploración Geoeléctrica con sondeos por transitorio electromagnético en la zona de Puertecitos, B.C. Residencia General de Cerro Prieto, CFE
- Geothermal Energy Association. (2016). Primer informe semestral de estudios geotérmicos.
- Geosoft Inc. "Oasis Montaje Versión 6.4.2. (2007)" Copyright, Geosoft Inc.
- Glaßmeier, K. H., Soffel, H. (2009). Geomagnetic Field Variations Advances in Geophysical and Environmental Mechanics and Mathematics. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2015). Mexican Geothermal Plays. En Proceedings World Geothermal Congress, Melbourne, Australia, 10.
- Hsieh, H. H., Chen, C. H., Lin, P. Y., Yen, H. Y. (2014). Curie Point Depth from Spectral Analysis of Magnetic Data in Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, Elsevier, 90, 26-33 pp.
- Hunt, G. R., Ashley, R. P. (1979). Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared. Economic Geology, 74, 1613-1629 pp.
- İbrahim Aydın Halil İ. Karat Ali Koçak. (Agosto 2005). Curie-point depth map of Turkey . Geophysical Journal International, 162, 633-640.
- Iglesias, E. R., Torres, R. J., Martínez-Estrella, J. I. (2005). Medium-to low-temperature Geothermal Reserves of the State of Aguascalientes, Mexico: A Partial Assessment., Antalya: Proceedings World Geothermal Congress, 24-29 pp.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2013). Modelo Digital de Elevación, Baja California.
- Joaquín Meliá Miralles . (1991). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura. Universitat de València: Universitat de València.
- Lillesand, T., Kiefer, R. (1999). Remote Sensing and Image Interpretation). USA: John Wiley and Sons, Inc., 4ª edición.
- Lintz J., Simonett, D. S. (1976). Remote Sensing of Environment. Michigan University: Addison-Wesley Pub. Co., Advanced Book Program.
- Lynam, J. T. (1986). "Airborne Geophysics-potential Developments". Extract from the Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Applied Earth Science, 95, Section B, 57-63.
- Lynn, S. M., 1978. Coastal warm spring systems along Northeastern Baja California, San Diego State University.
- Manual Montaj MAGMAP Filtering. (2010).
- Manual ArcMap 10.1 ArcGis (2011).
- Manual IDL ENVI 5.3. (2015).
- Manual TerrSet. (2016).
- Martín-Barajas, A., Stock, J. M. (1993). Estratigrafía y petrología de la secuencia volcánica de Puertecitos, noreste de Baja California. Transición de un arco volcánico a rift. Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México: Monografías de la Unión Geofísica Mexicana, 1, 66-89 pp.
- McCloy, K., Severiens, T. (2009). Classification Algorithms and Methods. Recuperado enero 2018 de: <http://www.seos-project.eu/modules/classification/classification-c00-p00.html>
- Mercado, S., Arellano, V., Barragán, D., Hurtado, R., Nieva, D., Iglesias, E. (1982) Diagnósticos y pronósticos sobre los aspectos científicos y tecnológicos de la geotermia como fuente de energía en México. Informe del Instituto de Investigaciones Eléctricas IIE/FE-G37/1767/3, 510.
- Mercado, S., Sequeiros, J., Fernández, H. (1985). Low Enthalpy Geothermal Reservoirs in Mexico and Field Experimentation on Binary-Cycle Systems. Geothermal Resources Council Transactions, 9, 523-526 pp.
- Moreno, B. (2015). "Identificación de lineamientos y minerales asociados a alteraciones hidrotermales en la Bahía de la Paz, Baja California Sur, México, mediante imágenes satelitales Landsat ETM. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Motz, L., Hane, W. J. (2013). The Concepts of Science from Newton to Einstein. New York: Springer.
- Nagy, E. A. (2000). Extensional deformation and paleomagnetism at the western margin of the Gulf extensional province, Puertecitos Volcanic Province, northeastern Baja California, Mexico. Geological Society of America Bulletin, 112, 857-870.

- Nettleton, L. L. (1973). *Elementary Gravity and Magnetism for Geologists and Seismologists*. Tulsa: Soc. of Exp. Geophys.
- Nicolás Velázquez Limón, Rodrigo Cota Soto, Edgar González San Pedro, J. Armando Aguilar Jiménez. (Octubre 2016). MICRORRED AISLADA PARA UNA COMUNIDAD PESQUERA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO: CASO DE ESTUDIO. Microrredes con generación Distribuida, IV Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, 8.
- Ordaz-Méndez, C. A., Flores-Armenta, M. y Ramírez-Silva, G. (2011). Potencial geotérmico de la República Mexicana, Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. *Morelia: Geotermia*, 24, 50–58 pp.
- Pamplona-Pérez Uriel, 2007. Perfil Magnetotelúrico a través de la Sierra San Pedro Mártir Baja California, México. Tesis Maestría, Ensenada, Baja California. CICESE.
- Pérez, D. J. (2007). Introducción a los sensores remotos - Aplicaciones en geología. Dpto. Cs, Geológicas, F.C.E.N., U.B.A.
- Pearl, J. E., 1978. Deposits of sulfur hot spring along the northeast coast of Baja California. Master of Science, San Diego State University.
- Prol-Ledesma, R. M., Arango-Galván, C., Flores-Márquez, E. L., Villanueva Estrada, R. E., 2010. Energía geotérmica para desalación de agua de mar. Proyecto IMPULSA IV Desalación de agua de mar con energías renovables. Instituto de Ingeniería, UNAM. México, D.F. [DVD]
- Prol-Ledesma, R.M., Arango-Galván, C., Torres-Vera, M. A. (2015). Geothermal Prospects in the Baja California Peninsula. Ciudad de México: Instituto de Geofísica, UNAM, *Geothermics*, 55, 39-57 pp.
- Prol-Ledesma, R. M. (2016). Presentaciones de la clase de Percepción Remota. Ciudad de México.
- Prol-Ledesma, R.M., Arango-Galván, C. (2017). Sistemas Geotérmicos de la Península de Baja California, Ciudad de México: Monografía Instituto de Geofísica—UNAM, 185.
- Sabins, F. F. (1999). Remote Sensing for Mineral Exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, 157-183 pp.
- Sabins, F. F. (1996). *Remote Sensing, Principles and Interpretation*. Illinois: Waveland Press, Inc., 3ª edición.
- Sanyal, S.K., 2005. Classification of Geothermal Systems – A possible scheme. *Transactions of the Thirtieth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, p. 8
- Seiler, C., Fletcher, J. M., Quigley, M. C., Gleadow, A. J. W., Kohn, B. P. (2010). Neogene Structural Evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for Proto-gulf Transtension in the Gulf Extensional Province? *Tectonophysics*, 488, 87-109 pp.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1999). Carta geológico-minera de San Felipe 11-3 Baja California.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (2000). Carta geológico-minera Lázaro Cárdenas H11-5-6 Baja California.
- Slyker, R. G., 1970. Geologic and geophysical reconnaissance of the valle de San Felipe region, Baja California, Mexico, Faculty of San Diego State College.
- Spaldin, A. (2010). *Magnetic Materials Fundamentals and Applications*. Santa Barbara, California: Cambridge.
- Spector, F. (1970). Statistical Model for Interpreting Aeromagnetic Data. *Grant, Geophysics*, 35, 293-302 pp.

- Schowengerdt, R. (2006). Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. California: Academic Pres, 3ª edición.
- Simmon Robert (2009). NDVI: Satellites Could Help Keep Hungry Populations Fed as Climate Changes. julio 2018, de NASA Sitio web: https://www.nasa.gov/topics/earth/features/obscure_data.html
- Stacey, F.D., y S.K. Banerjee, 1974, The physical principles of rock magnetism: Elsevier Science Publ. Co. Inc.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., Keys, D. S. (1990). Applied Geophysics. New York: Cambridge University Press, 2ª edición.
- Trifonova P., Zhelev Zh., Petrova T., Bojadgieva K., (Agosto 2009). Curie point depths of Bulgarian territory inferred from geomagnetic observations and its correlation with regional thermal structure and seismicity. ELSEVIER, Volumen 473, páginas 362-374.
- Thébault E., Finlay C., Beggan C., Alken P. Aubert J., Barrois O. (Mayo 2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. Springer, *Earth, Planets and Space*, 67 – 79.
- U.S. Geological Survey. (2015). LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook.
- Okubo, Y., Graft, R. J., Hansent, R. O., Ogawa, K., Tsu, H. (1985). Curie Point Depth of the Island of Kyushu and Surrounding Areas. Japan: Geophysics, 53, 481-494 pp.