



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Geofísica de Exploración  
para la evaluación preliminar  
del potencial geotérmico en  
Laguna Salada, Mexicali, B.  
C., México**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A**

Diego Fernando Ticó Montes de Oca

**ASESOR DE INFORME**

Ing. Marco Antonio Rubio Ramos



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**

## Agradecimientos

Al Ingeniero Marco Rubio por todo su apoyo, entendimiento y guía brindados para la realización de este reporte y mi desarrollo profesional personal.

A mis padres, quienes me han dado todo su apoyo toda mi vida, tanto académico, económico y moral. Muchas gracias por todo mamá y papá, porque sin ustedes yo no estaría escribiendo el día de hoy estas líneas.

A los miembros del jurado: M. C. David Escobedo Zenil, Dra. Iza Canales García, Ing. Alejandro Arroyo Carrasco e Ing. Alejandro García Serrano. Agradezco de todo corazón el tiempo dedicado a la revisión de este reporte, ya que gracias a estos, mi formación y este proyecto fue altamente enriquecido.

Al Ing. Carlos Pita, Ing. Uriel Luna, Ing. Tania García, Carlos Hernández y a todo el equipo de Geotem Ingeniería S.A. de C.V. por la guía, los consejos y el apoyo brindado.

A Jessica Moreno por resolverme con tanta paciencia mis dudas, estoy seguro que serás la mayor experta en métodos potenciales.

A Carlos Hidalgo, Alejandra, Xavier y a todo el equipo de Tiro con Arco de UNAM con los cuales llegue conocer un mundo deportivo completamente increíble.

A mi “familia disfuncional”: Danilo y Alejandro por siempre apoyarme y estar juntos en los buenos y malos momentos y a Karen que aunque intento ayudarme cada vez que terminaba de leer este reporte ya había hecho una nueva versión así que no me ayudo tanto, pero aun así le agradezco.

A la UNAM, mi alma mater, por brindarme además de conocimientos técnicos y científicos, cultura, deporte y diversión, factores que contribuirán directamente en mi realización profesional.

# 1. Contenido

2.	Resumen.....	5
3.	Abstract .....	5
4.	Introducción .....	6
5.	Objetivos .....	7
6.	Justificación .....	7
7.	Marco teórico.....	8
7.1.	Distribución geográfica de Baja California .....	8
7.1.1.	Geología de Baja California .....	8
7.1.2.	Hidrología de Baja California .....	14
7.1.3.	Marco geológico estructural .....	16
7.2.	Importancia económica de la explotación minera y energética de zonas con potencial geotérmico .....	19
7.3.	Formaciones salinas y salmueras geotérmicas .....	21
7.4.	Sistemas geotérmicos.....	24
7.4.1.	Sistema hidrotermal .....	25
7.4.2.	Sistema volcánico .....	27
7.4.3.	Sistema de Roca caliente.....	27
7.4.4.	Marcos tectónicos para sistemas geotérmicos .....	28
7.5.	Métodos potenciales.....	29
7.5.1.	Magnetometría .....	29
7.5.2.	Gravimetría.....	36
7.6.	Métodos electromagnéticos .....	38
7.6.1.	Percepción Remota mediante imágenes satelitales y UAV (Drone) .....	38
8.	Metodología de trabajo en campo.....	43
8.1.	Localización del área de estudio .....	46
8.2.	Equipo y software utilizado .....	49
8.2.1.	Magnetometría .....	49
8.2.2.	Percepción remota .....	49
8.3.	Procesamiento de datos geofísicos.....	51
8.3.1.	Magnetometría .....	51

8.3.2.	Percepción remota .....	55
9.	Análisis de resultados.....	66
9.1.	Magnetometría .....	67
9.1.1.	Anomalía magnética de campo total .....	68
9.1.2.	Reducción al Polo .....	69
9.1.3.	Señal Analítica .....	71
9.2.	Percepción Remota .....	73
9.2.1.	Satelital.....	73
9.2.2.	Levantamiento con Drone .....	82
9.3.	Discusión de resultados.....	84
10.	Conclusiones y recomendaciones .....	86
11.	Bibliografía.....	87

## 2. Resumen

Las modificaciones legales recientes en cuanto al uso de energías alternas para reducir la dependencia de los hidrocarburos y la progresiva disminución en la producción de gases de efecto invernadero (GEI) implica la explotación de recursos geotérmicos con los que cuenta el país, además de otras alternativas (solar, mareomotriz, etc.), con que cuenta el país. Desde las primeras etapas exploratorias de sistemas geotérmicos, los métodos geofísicos se complementan con estudios geológicos para una evaluación congruente de su potencialidad. El análisis de la información recabada en zonas termales mediante métodos potenciales, eléctricos y electromagnéticos tienen la finalidad de medir algunas de las propiedades físicas del subsuelo, así como, identificar, delimitar y conocer la distribución de objetos geológicos (intrusivos, cuencas sedimentarias, rocas conductivas/resistivas, etc.), y las alteraciones geoquímicas (minerales hidrotermales, anomalías elementales, suelos vaporizantes, suelo caliente, etc.) en zonas con determinado potencial geotérmico.

Este trabajo incluye la planeación y el fundamento teórico de las técnicas geofísicas aplicadas de Magnetometría y Percepción Remota. Se muestran y analizan los resultados obtenidos de estos métodos aplicados en la zona de estudio. Con los datos de adquisiciones se calcularon las variaciones del campo magnético generadas por posibles cambios mineralógicos, en subsuelo y en superficie. Los principales rasgos de reflectancias de los materiales superficiales (halos de alteración hidrotermal mineral) mediante el uso de imágenes multiespectrales es integrada.

## 3. Abstract

The recent legal modifications regarding the use of alternative energies to reduce dependence on hydrocarbons and the progressive emission reduction of greenhouse gases (GHG) production implies the exploration of geothermal resources, that Mexico holds, among others. Geophysical methods are complemented by geological studies from the very early exploratory stages. The analysis of the information collected in thermal zones by means of potential, electrical and electromagnetic methods have the purpose to measuring some of the subsoil physical properties, as well as in identifying, delimiting and knowing the distribution of geological objects (intrusive bodies, sedimentary basins, conductive / resistive rocks, etc.), and the geochemical alterations (hydrothermal minerals, elemental anomalies, steam ground, hot soil, etc.) in areas with a given geothermal potential.

This work includes the planning and theoretical basis of the applied techniques, the results obtained from various geophysical methods are shown and analyzed. With the acquisition data, the magnetic field variations generated by possible mineralogical changes is considered, in the subsoil and in the surface. The main surface materials reflectance's (of the hydrothermal alteration haloes) were calculated using multispectral images.

## 4. Introducción

La prospección geofísica está íntimamente relacionada con la física y la geología. Gracias a las propiedades físicas de las rocas se resuelven problemas planteados en términos geológicos, por lo que los métodos de prospección son utilizados para medir propiedades físicas en superficie y del subsuelo en una determinada zona de interés (área prospectiva). Los equipos utilizados por el explorador geofísico se basan en los principios y leyes de casi todas las ramas de la física clásica.

En exploración se consideran como métodos indirectos a aquellos propios de la ingeniería geofísica. Actualmente el campo de aplicación de la geofísica está enfocado hacia investigaciones particulares sobre la geometría y distribución litológica de la corteza terrestre, en presencia y distribución de diversos recursos energéticos y especialmente en zonas geotermales. Los estudios de gravimetría y magnetometría, conocidos como “métodos potenciales”, son herramientas utilizadas en una gran variedad de objetivos de exploración (geotérmica, minera, petrolera, hidrológica, etc.).

El caso de estudio de este proyecto se realizó en el Valle de Mexicali, Baja California, NW de México. A escala regional esta zona es reconocida por su potencial geotérmico ya que, junto con el Valle Imperial en el SW de Estados Unidos, conforman la Provincia de Salton Trough y que incluye a los campos geotérmicos activos de Salton Sea (USA) y Cerro Prieto (México), así como varias zonas de manifestaciones termales dispersas en ambos lados de la frontera E.U.-México. En el caso de la Laguna Salada, 32 Km al poniente del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, aún no se conoce su potencial geotérmico ni las posibilidades de aprovechar todo su potencial energético.

Las exploraciones en Laguna Salada se pueden llevar a cabo con diversos equipos y a través de diferentes vías, pudiendo ser terrestres, satelitales, o aéreas, obteniéndose medidas de campo potenciales o datos de variación de gravedad y magnetismo.

Los métodos potenciales de campo natural se han convertido en la principal herramienta para localizar, delimitar y conocer la distribución de objetos, anomalías o estructuras que están presentes en el subsuelo, mucho más allá de donde las herramientas convencionales geológicas pueden investigar. Entre las formas de llevar a cabo las estrategias de exploración, los estudios aéreos son los de mayor popularidad dada su rápida adquisición y la cobertura de áreas muy extensas.

Con el fin de fortalecer los resultados de algunos métodos, se consideraron dos técnicas por separado para su procesado y análisis, además de sustentar dichos resultados con mapas gravimétricos previamente trabajados por el CICESE en la tesis de maestría: “Sismica de reflexión en Laguna Salada”. Los métodos se analizaron integralmente, pero sólo donde aplica su convergencia. Para esto, se muestra en este trabajo una primera sección de los estudios

gravimétricos y magnéticos. La segunda sección del estudio comprende la técnica de percepción remota y, por último, la integración y valoración de coincidencias de los todos resultados de los métodos geofísicos aplicados.

Se optó por la técnica de firmas espectrales ya que la identificación inicial de manifestaciones termales es de suma importancia para una correcta caracterización de las anomalías geotérmicas locales, pudiendo ser realizados de diversas formas y en etapas iniciales exploratorias. Por ejemplo, su aplicación en zonas de potencial geotérmico donde la prospección de alteraciones arcillosas, silíceas o carbonatadas (“sinters”) están asociadas a salmueras superficiales de baja temperatura.

## **5. Objetivos**

El objetivo general del informe consiste en la interpretación y correlación de datos potenciales y de percepción remota con reconocimientos geológicos durante visitas de campo y compilación documental de literatura publicada.

Identificar zonas de intenso fallamiento lateral regional asociado a intrusiones ígneas y la identificación de alteraciones y anomalías que puedan guiar hacia una zona de favorabilidad geotérmica potencialmente explotable.

Realizar trabajo de campo para la parte de percepción remota y con datos tomados de fuentes tipo “open source” para imágenes satelitales y datos magnetométricos (Landsat 7, Emag2\_V2) y software de uso libre (QGis, LibreOffice), así como para el procesado de imágenes y análisis magnetométricos de la zona de estudio para la identificación de áreas con un potencial geotermico.

## **6. Justificación**

Las zonas térmicamente anómalas de la corteza terrestre (fuente de calor) que interactúan con un cierto grado de saturación de salmueras calientes (suficiencia de recursos hídricos) interactuando con las rocas encajonantes, pueden desarrollar intensos rasgos de alteración los cuales pueden dar como resultado posibles zonas de potencial geotérmico e incluso mineralizaciones, por lo que la integración de métodos potenciales y electromagnéticos complementan y son de gran apoyo para la interpretación geológica-geoquímica, así como para análisis de gradientes temperatura, para la determinación de zonas más favorables y de anomal de flujo de calor.

El Valle de Mexicali en Baja California, México, es conocido por su potencial geotérmico, ya que junto con el Valle Imperial en Estados Unidos forma la provincia de Salton Trough, que incluye a los campos geotérmicos activos de Salton Sea y Cerro Prieto, así como varias zonas termales que no han sido aprovechadas por considerarlas de baja entalpía. El 4 de abril de 2010 ocurrió un

sismo de magnitud 7.2 con epicentro en la porción sur de la Sierra Cucapáh, cerca de las estribaciones de la Sierra El Mayor y poco después de este evento se reportaron fumarolas al NNW del epicentro y al SW de la manifestación termal Calderón, identificada desde 1952. Este suceso evidencia los regímenes tectónicos con sistemas de fracturamiento de rocas para un incremento en la permeabilidad de zonas geotérmicas (Álvarez, 2012).

En este contexto, el patrón estructural regional de la zona de estudio ha favorecido la generación progresiva de cuencas sedimentarias recientes tipo “pull apart” que reciben todo el material producto de intemperismo de las rocas graníticas que constituyen las sierras marginales de los depocentros. En el caso de Laguna Salada los bloques elevados (“horst”) limitan al este (Sierra de Cucapáh) y al oeste (Sierra de Juárez) con la cuenca (“graben tectónico”) de Laguna Salada.

## **7. Marco teórico**

### **7.1. Distribución geográfica de Baja California**

La Península de Baja California tiene una longitud de 1,300 Km y abarca un amplio gradiente latitudinal donde dos grandes divisiones climatológicas convergen: la Tropical y la Templada boreal. La fisiografía y el clima de la península como un todo, han sido dinámicos a través del tiempo. Tanto la parte emergida como el Golfo de California fueron probablemente reconocidos después de la orogenia Laramídica del Cretácico medio (ca. 100 millones de años), aunque eventos posteriores determinaron la configuración moderna de la actual línea de costa.

Durante el Cenozoico, los límites a ambos lados del Golfo de California se expandieron y contrajeron en armonía con el sumergimiento (época transgresiva) y la emersión (época regresiva) de la península y áreas contiguas en el margen oriental del Pacífico, y con sedimentación frecuente desde el norte en la desembocadura del Río Colorado.

La península estuvo confinada por periodos discretos a una pequeña área norteña con su parte meridional expresada como una serie de islas. Durante tiempos de emersión, la península se expandió ligeramente para incluir áreas más allá de sus costas actuales (Durham y Allison, 1960).

El estado de Baja California está dividido, como consecuencia de tal geodinámica, fisiográfica y litológicamente, en 2 subprovincias y 1 provincia. La provincia está formada por el Desierto de Altar, donde la Llanura Sonorense penetra al noroeste del estado, abarcando algunos terrenos costeros y deltaicos entre los que destaca el Valle de Mexicali en sus porciones nororiental y oriental.

#### **7.1.1. Geología de Baja California**

La provincia extensional del Golfo de California, que abarca la margen oriental de la península y la margen occidental de la parte continental de México, está definida por estructuras formadas



durante el Mioceno que inicialmente se produjeron a partir de un proceso extensional. El sistema evolucionó geodinámicamente a un patrón transtensional, con la definición del límite entre las placas del Pacífico y de Norteamérica (Stock y Hodges, 1989). Esta evolución dio lugar a un rift oblicuo, caracterizado geométricamente por el sistema de centros de dispersión y fallas transformes característicos del Golfo de California.

Los centros de dispersión se definen por un magmatismo Cuaternario y por actividad geotérmica reciente (Herzig y Jacobs, 1994). A partir del centro de dispersión, ubicado más al norte de la serie distribuida a lo largo del golfo, se inicia el complejo sistema de fallas NW-SE subparalelas de San Andrés, que representa la expresión norte del marco transtensional (Mitchell y Reading, 1986).

Algunos autores han propuesto que la parte norte del escarpe de la Sierra El Mayor y sur de la Sierra de Juárez, en la margen suroriental y occidental respectivamente de la Laguna de Tulecheck, es la placa superior de una falla de bajo ángulo (de tipo detachment) con raíz bajo las Sierras Peninsulares, formando la depresión de la Laguna Salada (Axen, 1995). El escarpe en esta región tiene más de 1000 metros y contiene una serie de fallas subparalelas de orientación NNW sintéticas y antitéticas a la Falla de bajo ángulo Cañada David -FCD- (Axen, 1995; Axen y Romero-Espejel, 1996).

En el límite oriental, la presencia de la zona de falla tipo detachment con deslizamiento al oeste o al WNW implica que el basamento granítico-metamórfico expuesto en las Sierras Cucapáh y El Mayor, forman el bloque de piso, levantado por erosión tectónica (Barnard, 1968; Axen, 1995).

En el borde SW de la Sierra Cucapáh existen zonas de fallamiento dextral-oblicuo con orientación NW y tendencia paralela al sistema de la Falla principal de San Andrés (Figura 1). Estos lineamientos corresponden a las estructuras de la Falla Cucapáh y la Falla Laguna Salada (Barnard, 1968; Gastil et al., 1975). La interacción de fallas de desplazamiento lateral y fallas normales de alto ángulo ha contribuido al desarrollo de la Cuenca de Laguna Salada y al levantamiento de las Sierras El Mayor y Cucapáh (Siem, 1992; Mueller y Rockwell, 1995).

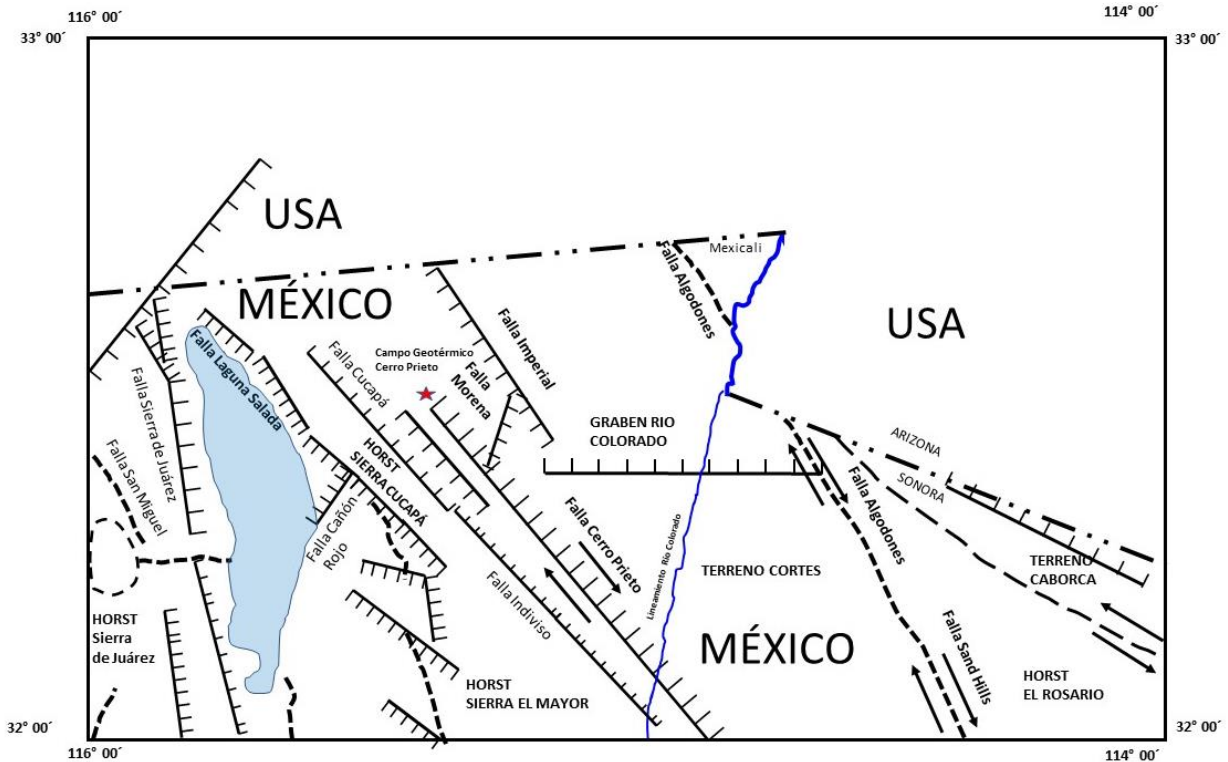


Figura 1. Distribución de estructuras regionales en la zona de Laguna Salada y el Valle de Mexicali (Cuenca de Tulecheck).

La descripción de la columna litológica peninsular de Baja California ha sido abordada por diferentes autores, de los cuales sobresale la síntesis elaborada por Blásquez (1959). De una manera general, las rocas están agrupadas en las siguientes formaciones:

- Esquistos, gneises, cuarcitas y rocas metamórficas asociadas con granitos, granodioritas, dioritas y monzonitas, cortadas por diques peridotíticos, gábricos, pegmáticos y de serpentina. Estas rocas afloran en el 57.6% de la superficie de la sierra peninsular y en el 43.6% de la superficie total de la Península.
- Areniscas, lutitas y calizas del Cretácico, las cuales ocupan el 6.1% de la superficie de la sierra Peninsular.
- Andesitas, riolitas y basaltos, asociados con sus correspondientes rocas piroclásticas, las cuales están muy extendidas en la parte central de la sierra, en la que ocupan el 42.4% de cobertura superficial.
- Rocas sedimentarias continentales y marinas, del Terciario y Cuaternario, consistentes en arenas, lutitas, margas, areniscas, conglomerados y arcillas. Se extienden, principalmente, en la Planicie Costera del Pacífico, ocupando el 25.2% del área peninsular, incluyendo las

provincias de Vizcaíno y Magdalena y, en la vertiente del Golfo de California, en el Delta del Río Colorado y el Valle de Mexicali (Figura 2).

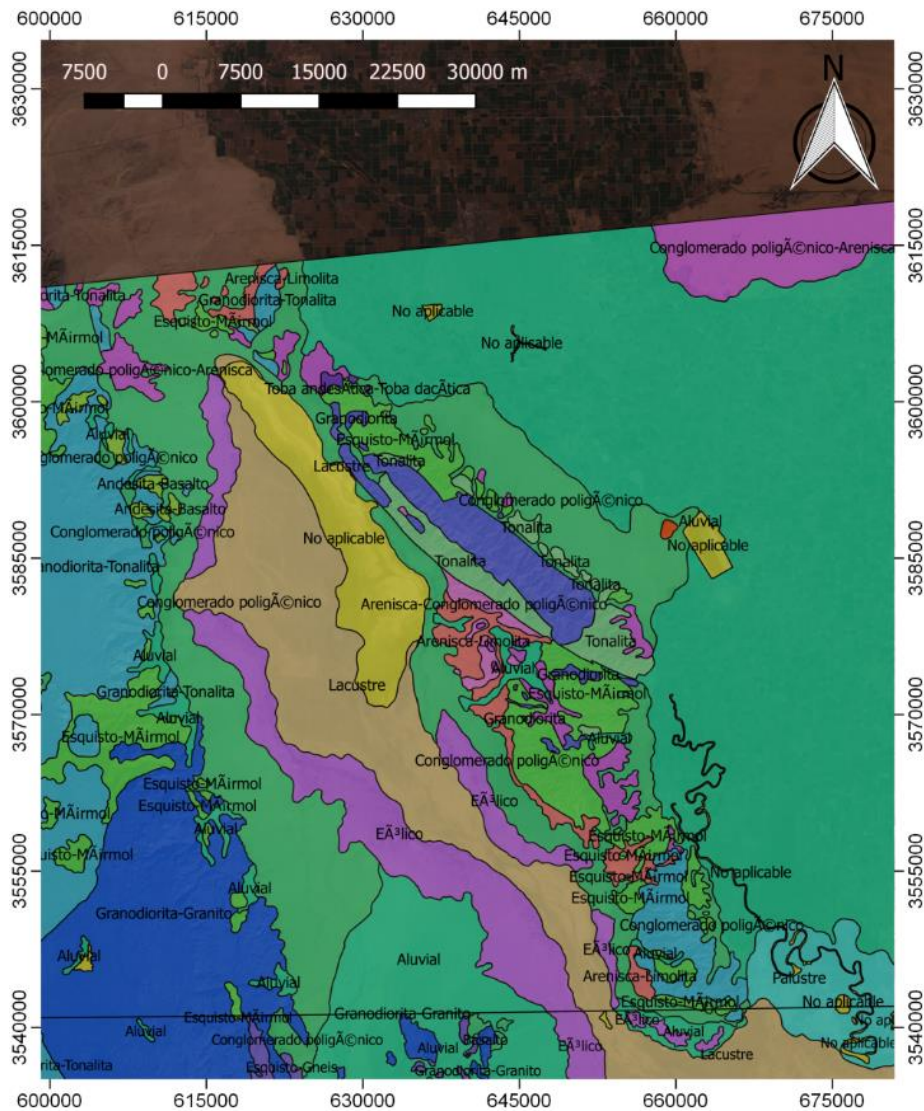


Figura 2. Distribución litológica de la zona de Laguna Salada, Baja California, NW de México. (Servicio Geológico Mexicano, 2018).

Las rocas pre-Cenozoicas de esta región son esencialmente metamórficas pre-batolíticas del Paleozoico y rocas batolíticas e intrusivos del Cretácico, que forman los rasgos más abruptos al oeste de la sierra. En la Sierra Cucapáh, afloran en la base rocas metasedimentarias del Pérmico-Jurásico en facies de silimanita, probablemente producto de metamorfismo regional de alta temperatura y relativamente baja presión; las litologías más comunes son gneis cuarzo-feldespáticos de hornblenda-biotita, gneiss de silimanita-almantino y calizas recristalizadas (Barnard, 1968). Es menos abundante la presencia de anfibolitas y raramente cuarcitas (Barnard, 1968).

Los batolitos son de tipo orogénico y se desarrollan en los arcos magmáticos continentales relacionados a procesos de subducción. Un ejemplo de esto es el batolito Patagónico que forma parte de algunos de batolitos más grandes que integran el Complejo Batolítico Andino y aflora mayoritariamente en la Cordillera Patagónica que comparten Argentina y Chile. Esta super estructura ígnea está compuesta por innumerables plutones cuyas edades se encuentran entre los 11 y 165 Ma, pero con un pico de actividad máxima entre los 70 y 120 Ma.

Estos batolitos forman parte del Cinturón de Fuego, que se desarrolla a lo largo de las costas occidentales del Océano Pacífico, extendiéndose hasta Alaska y su continuación en la margen occidental de la Placa Pacífica desarrolla el arco insular que dio lugar a las islas volcánicas de Japón, Indonesia y Filipinas (Figura 3). Esta geodinámica global en la que el desarrollo geológico de México está inmerso, es el resultado directo de la tectónica de placas reciente; el movimiento y la colisión de las placas de la corteza terrestre se concentran en algunas de las zonas de subducción que se consideran las más importantes del mundo (Zuñiga y Wyss Max et al., 2001).

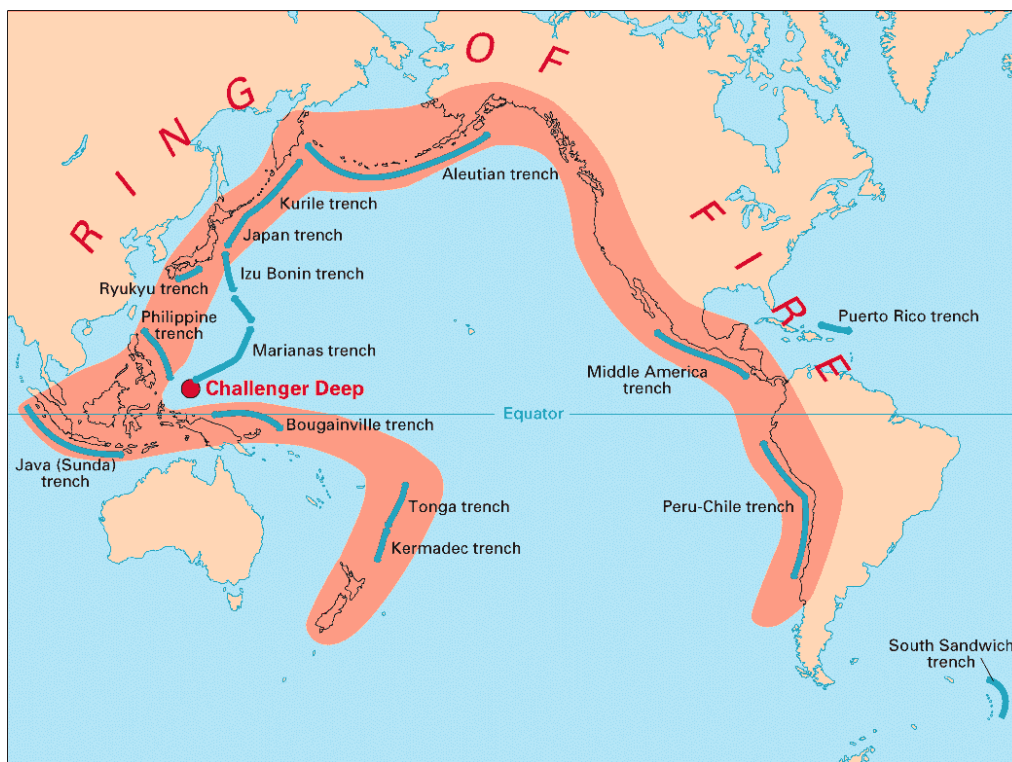


Figura 3. Distribución de actividad magmática del Cinturón de Fuego. El magmatismo batolítico de Baja California, NW de México se desarrolla como consecuencia de la subducción de la margen oriental de la Placa Pacífica y el limite oriental de la Placa de Norteamérica. Fuente: USGS (<https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/fire.html>).

En Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Holoceno. Para el Servicio Geológico Mexicano (SGM) el intervalo geocronológico abarca desde el Precámbrico inferior-medio hasta el Holoceno, aunque otros autores consideran que las rocas más antiguas en la margen occidental de México son de edad Paleozoica (Gonzales Eon, 1989) y las más jóvenes corresponden a secuencias detríticas del Reciente. Las unidades de la Fm Rosario están en contacto discordante y tectónico sobre las litologías de la Fm. Alisitos (Morán-Zenteno, 1994).

La distribución litoestratigráfica se puede definir en tres cinturones que corren a lo largo de la península y que muestra características petrográficas estructurales muy diferenciables. Al oeste se encuentran predominantemente unidades sedimentarias de ambiente marino del Cretácico superior y están representadas por la Fm. Rosario; en la parte central está emplazada una secuencia vulcanoclástica del Cretácico inferior representada por la Fm. Alisitos y; en la franja oriental se encuentran unidades metasedimentarias del Devónico-Carbonífero (esquistos, calizas recristalizadas, gneis, cuarcitas y horizontes anfíbolíticos) y el Complejo batolítico que tentativamente ha sido asignado al Cretácico superior (Gastil, et al., 1975; López-Ramos, 1979; Morán-Zenteno, 1990; Ferrari et al., 2005; Ferrari et al., 2007). Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera parcial, e independiente uno del otro, por depósitos sedimentarios y material volcánico del Terciario y Cuaternario (Morán-Zenteno, 1994).

Las cuencas tectónicas de Laguna Salada y de Mexicali se encuentran al este del tercer cinturón y el cual está constituido por afloramientos complejos de rocas intrusivas y rocas metamórficas derivadas principalmente del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A este cinturón pertenecen los batolitos Mesozoicos del norte de Baja California y las rocas metamórficas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos.

Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo se cartografiaron, en algunas localidades, pequeños plutones de diorita y gabros (Gobierno de Baja California, 2015).

Las diferentes etapas geológicas inician con el emplazamiento de las rocas prebatolíticas, que abarcan del Paleozoico al Cretácico medio (Albiano) y que flanquea longitudinalmente la provincia de Oeste a Este. El límite prebatolítico presenta una transición de rocas vulcanoclásticas de tipo flysh, donde el grado de metamorfismo es evidente y aumenta de intensidad en dirección Oeste a Este, mostrando una transición de mayor elevación y nivel de profundización por la intensa erosión del batolito y que se encuentra estrechamente relacionada con la evolución reciente de la margen continental. En esta región, el espesor de la corteza continental en el W de la península es de 15Km (Sierra de Juárez) mientras que al E (Sierra de Cucapáh) es de 30 Km (Todd y Shaw 1979).

### **7.1.2. Hidrología de Baja California**

La sustentabilidad de los recursos geotérmicos, además de la fuente de calor y el sistema de transferencia conductivo, requieren de suficiencia de recursos hídricos. Con excepción del Río Colorado en el límite fronterizo septentrional y considerando las características orográficas y morfológicas, hay dos vertientes hidrológicas en la Península de Baja California:

- Las que drenan directamente hacia el Océano Pacífico, cubriendo una superficie de 82,766 Km<sup>2</sup>.
- La del Mar de Cortés (53,100 Km<sup>2</sup>) y la endorreica de la Laguna Salada (4,386 km<sup>2</sup>) (Tamayo, 1962).

La principal corriente dentro del Municipio de Mexicali es el Río Colorado, que fluye en dirección noroeste a sureste. Su escurrimiento al territorio nacional es de 1,850,234, m<sup>3</sup>/año (Bernal 1995).

#### **7.1.2.1. Hidrología superficial**

El Municipio de Mexicali es la vertiente de dos regiones hidrológicas: la región del NE de Baja California y la región del Río Colorado. Esta última se distribuye en EE.UU. y en los estados de Sonora y Baja California. Geográficamente esta región es la de mayor importancia económica para la economía local.

La región hidrológica del NE se ubica en la porción norte de la entidad, al este del Municipio de Mexicali y sus aguas son vertidas al Golfo de California y a la Laguna Salada, por lo tanto, la región hidrológica de interés para este proyecto es la del noreste de Baja California (Figura 4).

La región hidrológica del NE de Baja California está delimitada al norte por la bifurcación que tiene la Sierra de Juárez a partir del Cerro de Tres Pinos, y al sur, por las regiones Centro-Oeste y Centro-Este. Presenta escurrimientos superficiales en la Cuenca Arroyo Agua Dulce-Santa Clara, donde la corriente principal es el arroyo Agua Dulce, el cual no tiene cauce bien definido debido a las lluvias ocasionales; sin embargo, su desembocadura está focalizada hacia el frente de la Isla Miramar. La Cuenca Laguna Salada-Arroyo del Diablo está limitada por la vertiente este de la Sierra de Juárez y la vertiente Oeste de la Sierra Cucapáh que, en su interior, aloja una amplia llanura y altitudes que no son más que mínimamente superiores al nivel del mar, formando áreas de drenaje disperso y deficiente. Este patrón hídrico forma lagunas e innumerables médanos, pues ninguno de sus numerosos arroyos efímeros tiene posibilidad de llegar al Golfo de California, por lo que se puede considerar como una cuenca interna cerrada. En el resto de la región, los escurrimientos superficiales son casi nulos. El aprovechamiento del agua en esta región es principalmente agropecuario y doméstico, aunque para la región de Cerro Prieto parte del uso de agua es para los sistemas de enfriamiento y reinyección (Mederey-Rason 2011).

### 7.1.2.1. Hidrología subterránea

En la entidad no existen escurrimientos superficiales permanentes, lo que repercute en la recarga que reciben los acuíferos. La red hidrográfica de Baja California es, en realidad, muy reducida, la evaporación elevada y las condiciones geológicas son adversas, pues la mayoría de las unidades de roca permiten que el agua fluya libremente debido a las elevadas pendientes, y sólo una mínima parte de esos escurrimientos llegan a los acuíferos, por lo tanto, la distribución de los mantos acuíferos es heterogénea y se localiza en áreas relativamente pequeñas, a excepción del acuífero del Valle de Mexicali —uno de los distritos de riego más importantes del país, el Distrito de riego Río Colorado— que en algunos sitios presenta graves problemas por sobreexplotación.



Figura 4. Distribución de los principales recursos hídricos en la Cuenca de Laguna Salada, B. C., México. Lindero internacional norte 9; Río Colorado-Morelos 10; Lindero Internacional Sur-Río Colorado 12; El Marítimo-Río Colorado 13; Lindero Internacional Mar de Salton 14 y Línea Divisoria Mar de Salton 15. Fuente: Elementos hidrográficos y estaciones hidrométricas de la República Mexicana, Mederey-Rascon y Torres- Ruata, 2011.

### 7.1.3. Marco geológico estructural

El norte de Baja California está afectado por un extenso conjunto de fallas laterales que acomodan el movimiento de cizalla entre las placas Pacífico y Norteamérica. Cada una de estas fallas muestran variaciones sistemáticas en su orientación y, en su conjunto, definen una geometría en forma de trapezoidal. Esta porción de la frontera entre placas es parte de la compleja zona de transición en la que el sistema de fallas en abanico transfiere el desplazamiento que ocurre en el Golfo de California al que ocurre en el sector norte de la falla San Andrés.

Las condiciones geológicas y esfuerzos tectónicos a los que estuvo sometida la península dieron origen a su eje geológico estructural, que presenta la misma orientación NW-SE y está integrado por la cordillera batolítica cuyo núcleo granítico masivo aflora en el Norte y se oculta en el Sur, por debajo materiales volcánicos.

El desplazamiento del Batolito de Sierras Peninsulares (BSP) es debido probablemente a fallas importantes como el sistema de fallas Imperial está conformada por: Falla Cerro Prieto, Falla Cucapáh, y Falla Laguna Salada; en las Sierras Peninsulares de Baja California se encuentran las Fallas de Sierra Juárez, San Pedro Mártir, zona de fallas San Miguel-Vallecitos, Agua Blanca y Tres Hermanos. Frente a las costas de Baja California (Océano Pacífico) se encuentran: la Falla Coronado Banks, Falla San Diego y Falla San Clemente; por último, el sistema de fallas San Andrés está situado en una gran depresión de terreno en un área límite transformante; con desplazamiento derecho entre la Placa Norteamericana y la Placa Pacífico. Esta falla tiene una longitud de aproximadamente 1300 kilómetros y disecta a través de California, Estados Unidos, y Baja California, México.

Los terremotos producidos en la Baja California, son debidos a que la placa del Pacífico se mueve con respecto a la Placa Norteamericana por el Golfo de California y hacia el norte de la Falla de San Andrés, provocando que la península se desplace hacia el noroeste, separándose del continente y que se calcula llegara frente a Alaska en unos 50 Ma, considerando que cada año la Península de Baja California se separa aproximadamente 6 cm.

Los lineamientos más importantes para el área de Laguna Salada son: fallas, foliación, estructuras circulares y estratificación. Las estructuras de San Marcos se consideran un megabloque alóctono Ordovícico dentro de metasedimentos flysch del Triásico-Jurásico. La foliación se observa principalmente en los metasedimentos con rumbo predominante NWSE y echados al NE y SW. La estratificación en las secuencias de Cretácico superior y Terciarias presentan echados con tendencia al sur-oeste. Como resultado de las intrusiones cretácicas múltiples se tienen morfoestructuras circulares como los plutones “El Pinal”, “La Posta”, parte de “El Topo” y “El Testerazo”. La estructura más notoria es la falla de desplazamiento lateral derecho San Miguel-Vallecitos de rumbo NW-SE, actualmente activa, con un continuo movimiento sísmico registrado en las últimas



décadas (Figura 5), relacionada con el régimen tectónico del sistema de San Andrés-Golfo de California oriental (INEGI, 1996).

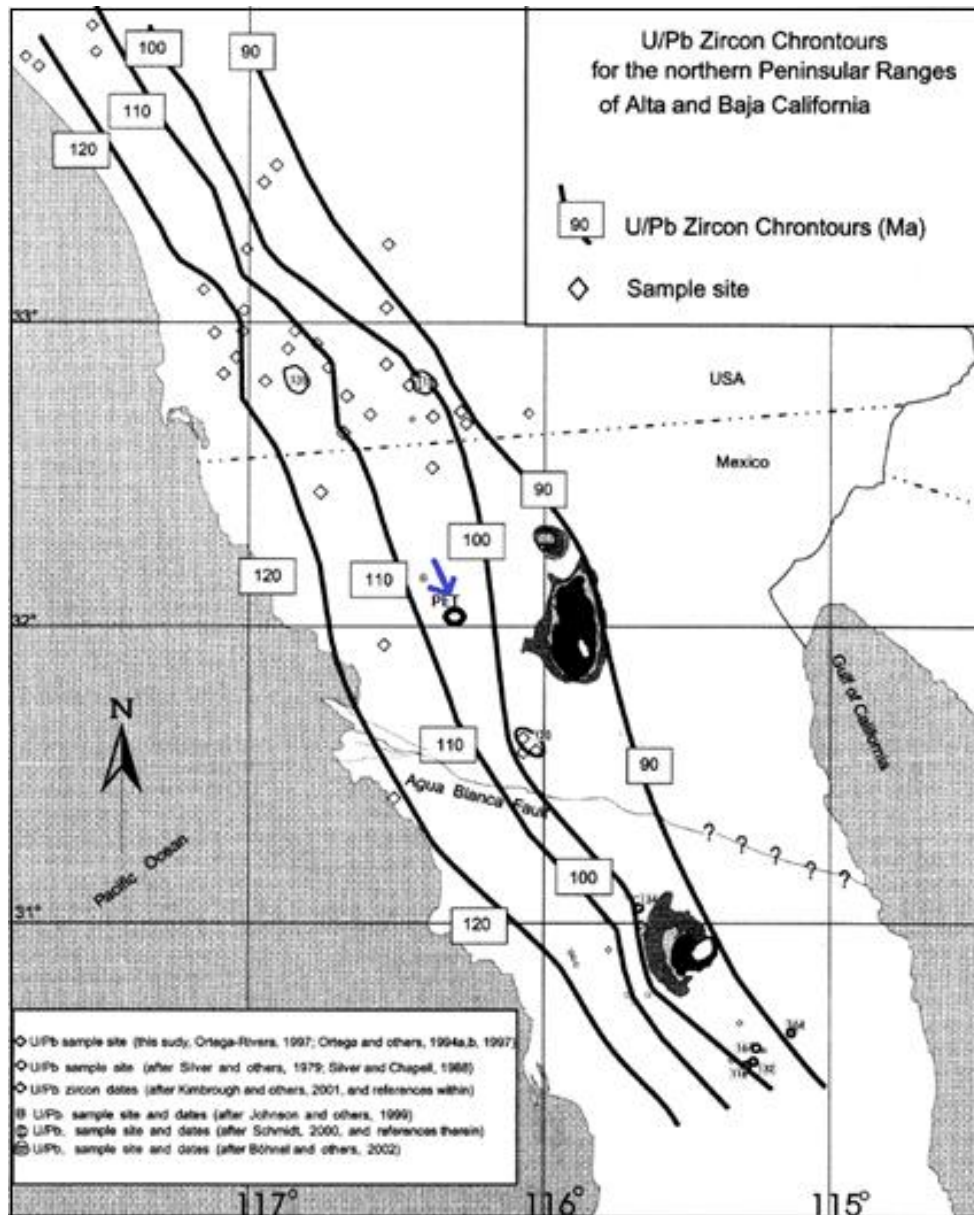


Figura 5. Contornos de U/Pb en zircones para la parte norte del Batolito Peninsular de Alta y Baja California (edades U/Pb en zircones según (Silver *et al.*, 1979; Silver y Chappell, 1988; Walawender *et al.*, 1990; en el trabajo de Kimbrough *et al.*, 2001). Plutón El Testerazo (PET).

La evolución tectónica de la región muestra que durante el Precámbrico Superior- Paleozoico Inferior la margen occidental del Cratón de Norte América registró una historia de sedimentación continua en un margen continental relativamente pasivo, donde se depositó una potente secuencia sedimentaria. Esta evolución se compara con el desarrollo de un margen tipo Atlántico.

Para el Paleozoico superior-Mesozoico se tiene un margen tipo japonés con desarrollo de un arco de islas sobre corteza oceánica. De tal manera se tuvo una convergencia de placas al oeste de dicho arco y un mar marginal al este del mismo.

Desde finales del Paleozoico se llevó a cabo una acreción de terrenos e intrusiones plutónicas en la margen oriental de la cuenca Pacífica. Durante el Mesozoico-Cenozoico inferior el ambiente tectónico predominante fue de subducción a lo largo de un margen continental de tipo andino con una trinchera a la orilla occidental del continente. En el Jurásico Superior-Cretácico se creó el arco volcánico plutónico en la margen SW del Cratón Norte Americano, produciéndose el cinturón batolítico cordillerano oriental (Carta geológico-minera Tijuana I11-11 INEGI, segunda edición 1996). Actualmente en la península predomina un margen tipo California, el cual se ha trasladado hacia el noroeste desde su posición original adyacente al continente durante el desarrollo del Golfo de California a finales del Mioceno como una extensión de la dorsal del Pacífico oriental (Carta geológico-minera Tijuana I11-11 INEGI, segunda edición 1996).

En la porción NW del área de estudio se encuentran las Fallas las Calabazas y la Falla San Miguel-Vallecitos que tiene movimiento lateral derecho. Asociadas a estas importantes fallas se observan fallas y fracturas satélites que tienen dirección predominante NW (Figura 6). Böhnel y colaboradores (1998) proponen que la Falla San Miguel-Vallecitos pudo haber causado la rotación del Plutón "El Testerazo" (Figura 5). En el área de San Marcos se encuentra una gran cantidad de diques de diferentes tamaños, sin embargo, por medio del uso de imágenes satelitales, sólo se marcaron en este trabajo algunos de estos, ya que muchos son muy pequeños y no se apreciarían a la escala de trabajo utilizada (1:50 000). De esta manera se encontró una dirección promedio NE en los diques involucrados en este reconocimiento.

Los plutones San Marcos y el Testerazo están situados en una zona de cizalla, la cual está limitada por la falla con movimiento lateral derecho de San Clemente y el sistema de fallas de San Andrés-Golfo de California (Legg *et al.*, 1991 en el trabajo de Böhnel *et al.* 2002). Para el área de estudio se hicieron rosetas estructurales por medio del software Estereonet 2004, que se obtienen al medir el rumbo de estructuras, dando como resultado lo siguiente: las fallas tienen una dirección predominantemente NE y en algunos casos EW, los diques tienen la misma predominancia que las fallas NE (Figura 5) mientras que las fracturas se ubican preferentemente al NE y la mínima con dirección NNE. Los curvi-lineamientos corresponden a morfologías de plutones individuales, incluyendo el plutón el "Testerazo", cuyas formas varían de redondeadas a semi-redondeadas (Figura 2 y 6).

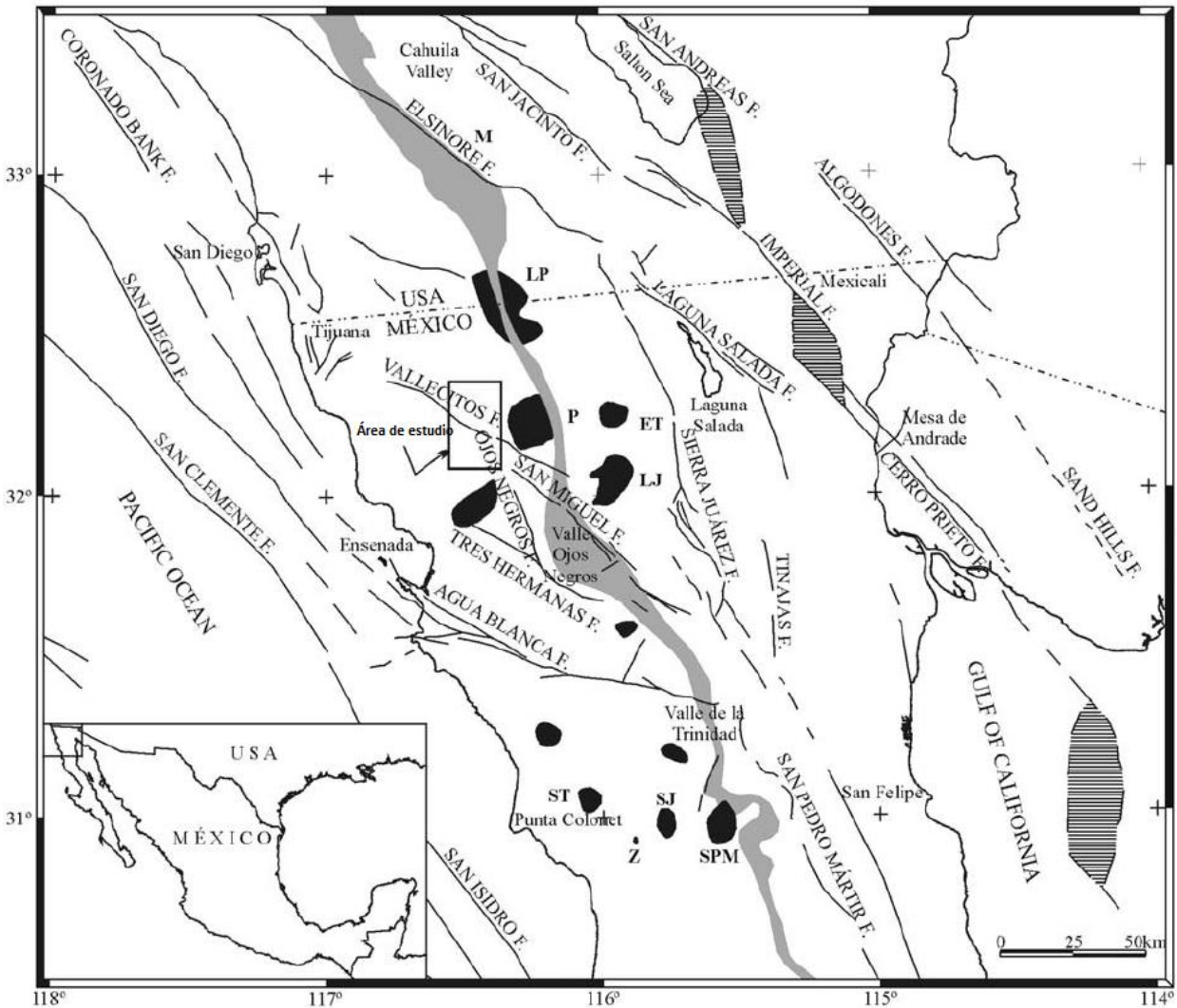


Figura 6. Principales características estructurales de Baja California (Böhnel et al 2002) En recuadro se indica la zona de estudio.

## 7.2. Importancia económica de la explotación minera y energética de zonas con potencial geotérmico

Actualmente México enfrenta una de las mayores demandas de energía dado su crecimiento poblacional e industrial y, para tener la posibilidad de completar los proyectos económicos con base a un crecimiento sustentable, hay que considerar que el 70% de la electricidad que se produce en el país corresponde a energías no renovables (hidrocarburos), mientras que el otro 30% se obtiene a partir del aprovechamiento de fuentes inagotables de energía. Debido a que los combustibles fósiles son un recurso muy limitado además de ser altamente contaminantes, se hace de vital importancia el desarrollo de nuevas fuentes de energía, principalmente a partir de recursos geotérmicos.

La zona comprendida entre las sierras de Cucapáh y Tulecheck, ha sido documentada con cierto potencial geotérmico. Actualmente la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con una planta geotérmica para el aprovechamiento del recurso geotérmico y generación de energía eléctrica. El proyecto Cerro Prieto se inició en Mayo de 1973 con la entrada en operación comercial de las dos primeras unidades, con una capacidad de 37.5 MW cada una, en la central Cerro Prieto 1 (CP1). En la actualidad la capacidad total es de 720 MW, distribuidos en cuatro centrales: CP1 con 180 MW, CP2 con 220 MW, CP3 con 220 MW y CP4 con 100 MW, lo que demuestra que la energía geotérmica es factible y confiable desde el punto de vista económico, social y ambiental.

Además del potencial geotérmico, el contenido de salino del fluido geotermal y la historia tectónica promueven la idea de la probable existencia de salmueras ricas en litio. El incremento en la demanda de este elemento y la inminente transición del uso de combustibles fósiles a uso de vehículos eléctricos con baterías de litio da pie a la búsqueda de este metal, considerando su escasez en concentraciones importantes en la corteza terrestre. El litio (Li) es un componente clave en la transferencia y almacenamiento eficiente de energía eléctrica. El contexto geológico de Laguna Salada (Figura 7) es importante considerando que los grandes depósitos de salmueras de litio se encuentran en contextos geodinámicos similares en Chile, Argentina y Bolivia (Triangulo del Litio), concentrando entre los 3, aproximadamente el 75% de la producción mundial de litio.



Figura 7. En primer plano el relleno de la Cuenca tectónica de Laguna Salada y al fondo el bloque levantado de la Sierra de Juárez. Vista de oriente a occidente.

### 7.3. Formaciones salinas y salmueras geotérmicas

La palabra sal se deriva del latín “sal” y el nombre de halita es derivado del griego “Hals” que significa mar. A los depósitos de litoral se les conoce con nombres específicos como halita, sal de roca, sal gema y sal fósil.

En la naturaleza la sal raramente es pura, aunque las de origen estrictamente marino llegan al 99.9% en el contenido de NaCl. Los análisis promedio de grandes cantidades de sal minada raramente pasan del 98% de pureza. Las impurezas son en su mayoría sólidas y líquidas, como gotas de salmuera, inclusiones de sustancias arcillosas u orgánicas, yeso, cloruros de potasio, cloruros de magnesio y otros (Tabla 1). Las inclusiones líquidas en la halita son comunes y representan salmueras atrapadas durante el proceso de cristalización.

Los cristales de la halita son cúbicos y el mineral es transparente e incoloro cuando es puro. Aunque generalmente se presenta en color blanco, la tonalidad varía desde amarillento, café, rosado, verde, violeta, púrpura, azul, anaranjado, gris y negro, dependiendo de la naturaleza de la salmuera e impurezas que le dieron origen.

Existen notables diferencias entre las secuencias salinas experimentales y las observadas en las series estratificadas naturales. Dado que muchos procesos evaporíticos quedan interrumpidos en los estadios iniciales e intermedios, las cantidades de carbonato y sulfato cálcicos del registro geológico son muy superiores a los de experimentación. Aunque proporcionales en abundancia, la halita está más representada en las series naturales y las zonas de K-Mg están más segregadas; particularmente los minerales de sulfato magnésico. En el registro estratigráfico existe también la silvita y la carnalita.

La analogía con depósitos evaporíticos asociados a campos geotérmicos responde a que las soluciones termales, al perder agua, dan lugar a la precipitación de series mineralógicas similares. Si la solución geotérmica está enriquecida en litio o magnesio, se esperará que los precipitados mineralógicos de sales complejas de litio, carbonatos ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ), boratos y sulfatos ( $\text{Li}_2\text{SO}_4$ ) y minerales arcillosos como la hectorita ( $\text{Na}_{0.3}(\text{Mg}, \text{Li})_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$ ), producto final del intemperismo de rocas ígneas que estén enriquecidos naturalmente en estos elementos.

Tabla 1. Minerales típicos de ambientes de cuencas evaporíticas.

SAL	FORMULA QUIMICA
Halita	NaCl
Silvinita	KCl
Polihalita	$K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$
Carnalita	$KMgCl_3 \cdot 6H_2O$
Antarctocita	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$
Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>
Yeso	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Existen tres zonas principales en la secuencia de precipitación de salinas:

- De sulfato cálcico: En ella domina la anhidrita que a menudo es muy pura, en ocasiones se encuentra la polihalita secundaria entre ésta y el yeso secundario.
- De Cloruro sódico: En ella la halita o roca sal gema (halítica) puede ser muy pura, aunque también puede contener cantidades pequeñas de sulfatos y algo de material clástico, principalmente arenas y arcillas. Muchas de las potentes zonas de halita de los depósitos clorurados tienen ésta y la arcilla salífera, o las secuencias de anhidrita/polihalita.
- Potásica: La composición de la roca es extremadamente variable pero casi todas contienen halita. Las litologías principales son las capas de silvinita y carnalita. (Tabla 1).

Los depósitos de litio asociados a hidrotermalismo son acumulaciones de agua salina proveniente del sistema geotérmico que es enriquecida con litio disuelto (Figura 8). Un proceso de evaporación eficiente hace que se enriquezca relativamente la solución al perder agua en forma de vapor, dando lugar a la precipitación de salinas o “evaporatos”. Todos los depósitos de salmueras, incluyendo las de litio, comparten una serie de características genéticas de primer orden:

- Clima árido
- Cuenca endorreica que contiene un salar
- Subsistencia debido a la tectónica
- Actividad geotermal asociada
- Rocas fuente enriquecidas naturalmente en litio, como domos riolíticos/félsicos

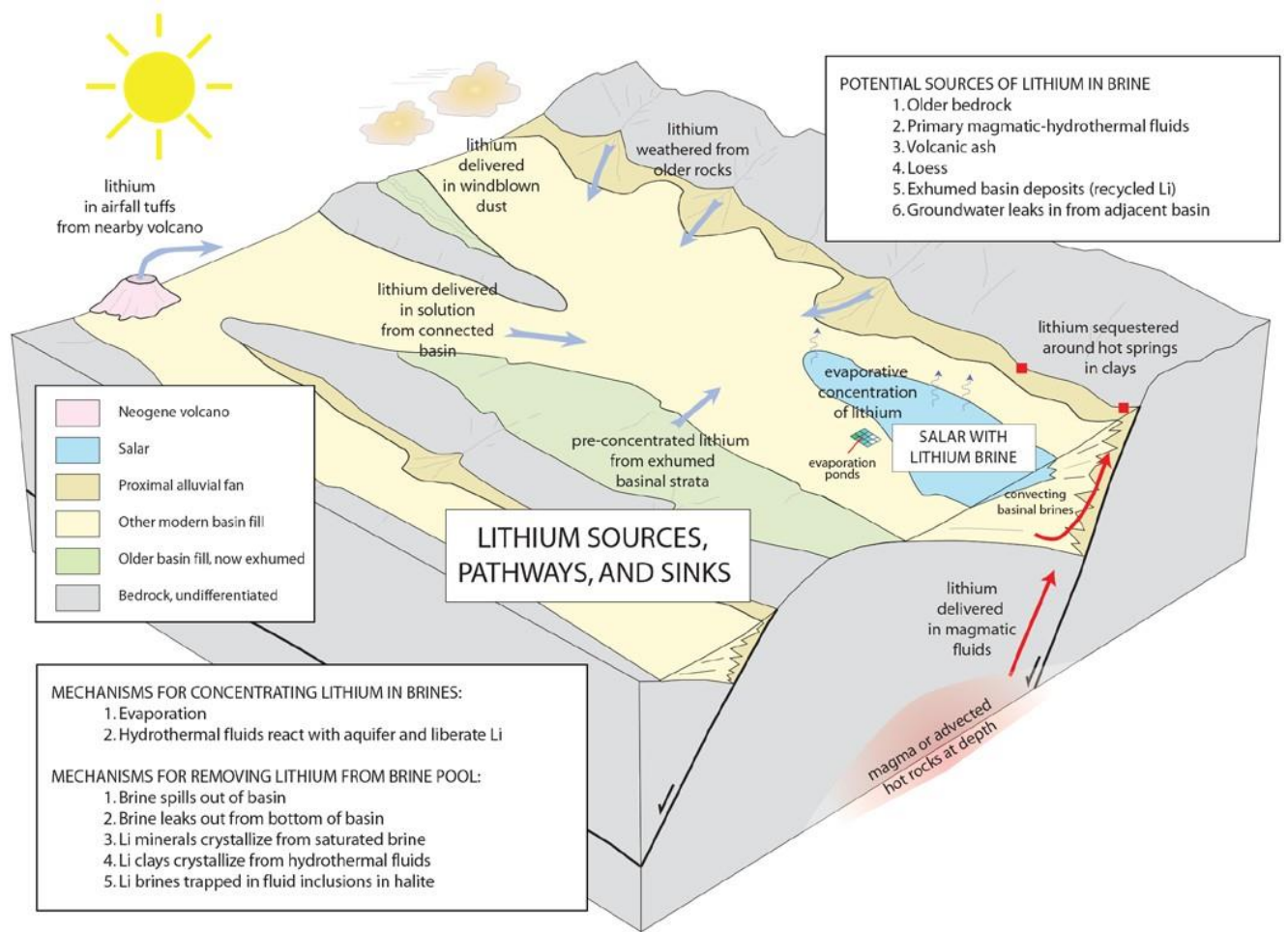


Figura 8. Esquema de un salar con formación de minerales de litio (Fuente: USGS, 2013).

El litio es muy soluble y al contrario del sodio o del potasio, no produce minerales evaporíticos cuando es concentrado por evaporación. En su lugar genera salmueras residuales en la subsuperficie somera dando lugar a carbonatos y sulfatos de litio. Alternativamente puede haber concentraciones de arcillas litíferas marginales a los depósitos evaporíticos.

Las salmueras en el espectro de tipologías de cuencas endorreicas pueden estar enriquecidas en cloruro de potasio (KCl), Cloruro de Calcio (CaCl<sub>2</sub>), y Yodo (I) cuyas diferencias reflejan la química del basamento rocoso y las contribuciones hidrotermales.

#### 7.4. Sistemas geotérmicos

La palabra geotermia viene de la palabra griega “*geo*”, que significa tierra, y “*thermo*” que significa calor. En su sentido amplio, la energía geotérmica es consecuencia de la transferencia del calor interno de la Tierra hacia la superficie.

Cuando el magma inicia su camino ascendente desde el manto superior y alcanza la corteza oceánica o continental, disminuye la presión y el calor, y ocurre el llamado proceso de diferenciación magmática, que consiste en la cristalización de minerales en una serie progresiva la cual es directamente proporcional a la disminución de la temperatura. Así se forman varios tipos de rocas partiendo del magma parental, separándose en la parte superior de la cámara magmática. Estos flujos magmáticos transportan elementos de mayor movilidad, comunes en todos los magmas, como son: cobre, plomo, zinc, plata, oro, litio, berilio, boro, rubidio, cesio, sodio, potasio y calcio.

Los yacimientos geotérmicos se encuentran en determinadas partes del subsuelo donde esta transferencia es más efectiva. Su energía puede extraerse por medio de pozos profundos, a través de los cuales ascienden fluido. El fluido geotérmico está compuesto generalmente por una mezcla de agua líquida con sales disueltas, o salmuera y una gama de gases, predominando el vapor de agua. Ya en la superficie, el vapor puede ser separado de esa mezcla y transportado hacia las centrales de generación.

Un yacimiento geotérmico típico se compone de una fuente de calor, un acuífero y la llamada “capa sello”. La fuente de calor es convencionalmente una cámara magmática en proceso de enfriamiento con temperaturas muy elevadas. Un acuífero es cualquier formación litológica con la permeabilidad primaria o secundaria (fallas) suficiente para alojar agua meteórica percolada desde la superficie o desde acuíferos menos profundos hacia niveles someros.

El elemento clave del yacimiento es la fuente de calor y el aporte continuo de agua, cuya existencia, a cientos o miles de metros de profundidad, solo puede deducirse a partir de evidencias indirectas que se aprecian en la superficie. La evidencia más notable es la presencia de volcanes geológicamente jóvenes, puesto que algunos de ellos, particularmente de composición ácida, suelen estar asociadas a cámaras magmáticas no demasiado profundas y que son capaces de actuar como fuentes de calor. Asociados a este contexto existen una serie de manifestaciones hidrotermales que pueden ser de muy distinta naturaleza, desde volcanes de lodo, hasta suelo caliente, manantiales termales, fumarolas y geisers.



### 7.4.1. Sistema hidrotermal

Se conoce como hidrotermalismo al conjunto de efectos producidos por el agua a una temperatura mayor que la ambiental. A los lugares donde emanan estos fluidos (líquido y vapor) se le conoce como manantiales termales. Entre los fenómenos naturales más espectaculares están los manantiales caliente con temperaturas cercanas a la del punto de ebullición del agua. Sin embargo, un géiser es todavía más espectacular y consiste en una fuente emergente dotada de un sistema especial de calentamiento y desfogue que da lugar a una columna de agua y vapor que es expulsada con gran fuerza que, ocasionalmente, puede alcanzar entre 30 y 60 metros de altura.

Antes y después de que el chorro del geiser cese, sobreviene un estruendo, ruido que es provocado por la expulsión rápida y violento de una columna de vapor, seguida por un periodo de calma al terminar la erupción. Recientes estudios han asociado estos eventos a un progresivo enriquecimiento de  $\text{CO}_2$  disuelto en la salmuera. Al llegar a niveles de saturación y e incremento de temperatura se libera repentinamente el  $\text{CO}_2$ , dando lugar a una solución diluida, hasta que el ciclo se reinicia dando lugar a otra emanación súbita (Watson et al., 2014).

La analogía entre los patrones de alteración y depósitos minerales de campos geotérmicos y los sistemas mineralizados ha sido definida desde hace tiempo por diversos autores. Los procesos y productos de mineralización y alteración hidrotermal (i.e.: metales preciosos) puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos (Figura 9). Los de “baja sulfuración” son reducidos y tienen un pH cercano a neutro (la medida de concentración de iones de hidrógeno) y los fluidos de “alta sulfuración”, los cuales son más oxidados y ácidos. Los términos de alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist (1987) y se refieren al estado de oxidación del azufre. En los de alta sulfuración el azufre se presenta como  $\text{S}^{4+}$  en forma de  $\text{SO}_2$  (oxidado) y en los de baja sulfuración como  $\text{S}^{-2}$  en forma de  $\text{H}_2\text{S}$  (reducido).

Es importante conocer estos fundamentos dado que los productos de alteración en zonas geotérmicas serán función de la química de fluidos dominantes y su interacción con rocas a través de las cuales fluye. Los fluidos de baja sulfuración (BS, LS por sus siglas en inglés) son una mezcla de percolación dominante de agua de lluvia (aguas meteóricas) que han penetrado a profundidad subsuperficial y aguas magmáticas (derivadas de la fuente de calor o material fundido a mayor profundidad en la corteza terrestre) y que han ascendido hacia la superficie (Figura 9).

Los metales preciosos han sido transportados en solución como iones complejos (en general bi-sulfurados a niveles epitermales; clorurados a niveles más profundos) y para fluidos de baja sulfuración la precipitación de metales ocurre cuando el fluido hierve al acercarse a la superficie (ebullición).

Los fluidos de alta sulfuración (AS) se derivan principalmente de una fuente magmática y depositan metales preciosos cerca de la superficie cuando el fluido se enfría o se diluye mezclándose con aguas meteóricas. Los metales preciosos en solución derivan directamente del magma o pueden ser lixiviados de las rocas volcánicas huésped, a medida que los fluidos circulan a través de ellas.

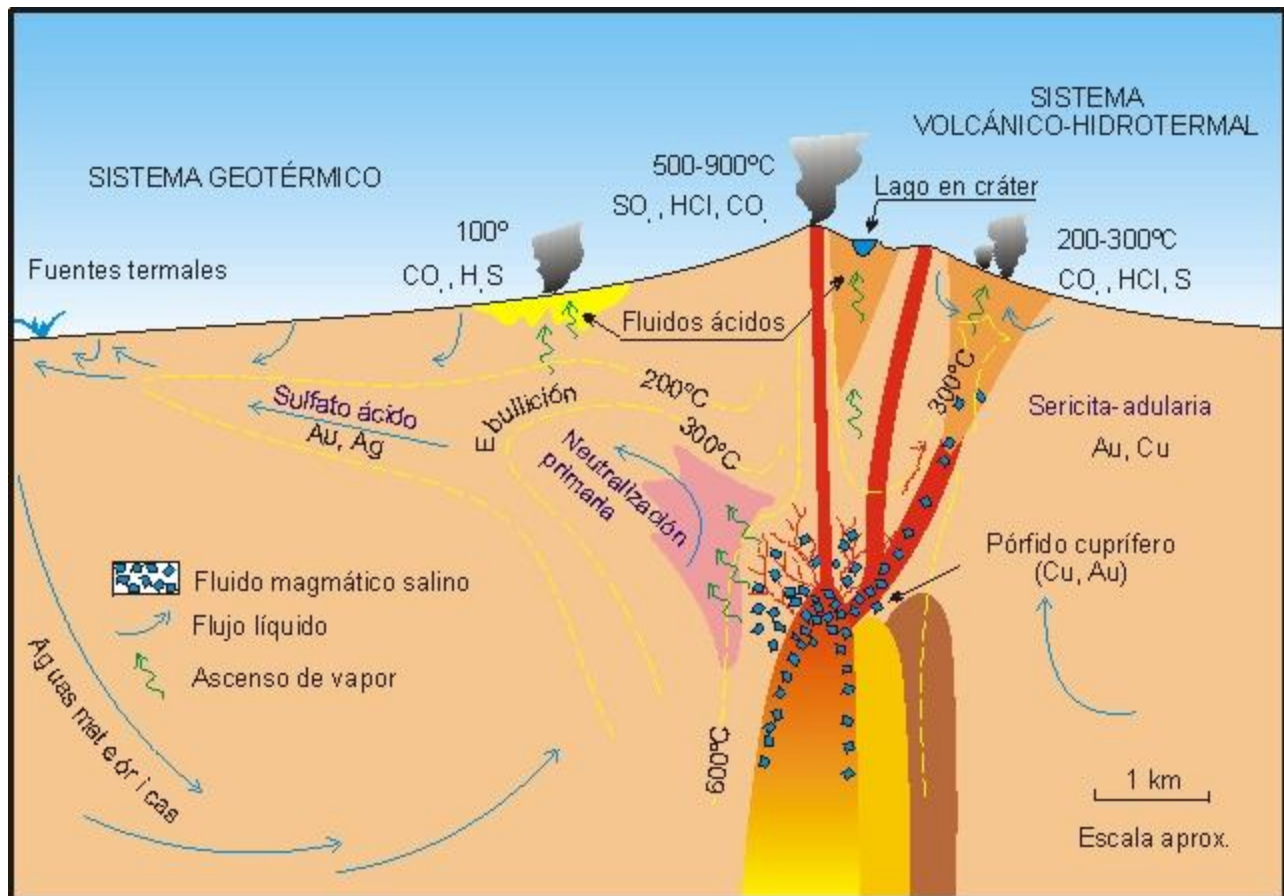


Figura 9. Esquema de un sistema hidrotermal (tomada de la UNAL, 2015).

#### 7.4.2. Sistema volcánico

La separación de placas tectónicas permite que la lava ascienda progresivamente hacia la superficie de la Tierra. La consecuencia es la creación de volcanes y campos geotérmicos aledaños.

La mayor parte del territorio mexicano, excepto la Península de Yucatán y parte de la Sierra Madre Occidental y áreas de la Sierra Madre del Sur, está caracterizado por una gran actividad tectónica y volcánica que ha tenido lugar desde hace decenas de millones de años hasta el presente. Esta actividad invariablemente ha dejado su huella a lo largo de todo el país en forma de sistemas volcánicos y sistemas hidrotermales, tanto fósiles como activos. La evidencia de esto está representada por la distribución de muchos sistemas mineralizados epitermales de México.

Por tanto, la actividad tectono-volcánica, aunque tiene resultados catastróficos en muchos de los fenómenos que genera, como sismos y erupciones volcánicas, también ha sido la fuente de una gran riqueza como lo son los recursos minerales y geotérmicos. La presencia de estos recursos se extiende por todo el país, siendo especialmente abundante en parte de la Mesa Central (Altiplano Mexicano).

#### 7.4.3. Sistema de Roca caliente

Para la determinación de un campo geotérmico es esencial que la litología de interés presente altas temperaturas. El calor en la masa de roca a una profundidad del orden de varios kilómetros puede ser asignado cualitativamente a tres fuentes:

- Áreas volcánicas y magmas asociados en zonas de subducción.
- Áreas en zonas de apertura (“rifting”), caracterizadas por una estructura tectónica tipo graben continental, con adelgazamiento de corteza y magmatismo asociado.
- Zonas donde ocurre fisión nuclear o decaimiento radioactivo de elementos trazadores intrínsecas a la masa fundida de roca y altas temperaturas.

Los sistemas de roca caliente seca (Figura 10) son aquellos formados por unidades de roca impermeables a muy alta temperatura por lo que carecen de un acuífero, siendo necesario aportar agua de forma artificial para poder extraer el calor. Existe por tanto la necesidad de crear grandes superficies para transmisión eficiente de calor por medio de la fracturación artificial de la roca (“fracking”). Los yacimientos más comunes se encuentran a unos 5 km de profundidad y están formados por rocas impermeables con temperaturas en el orden de los 150°C y hasta los 300°C.

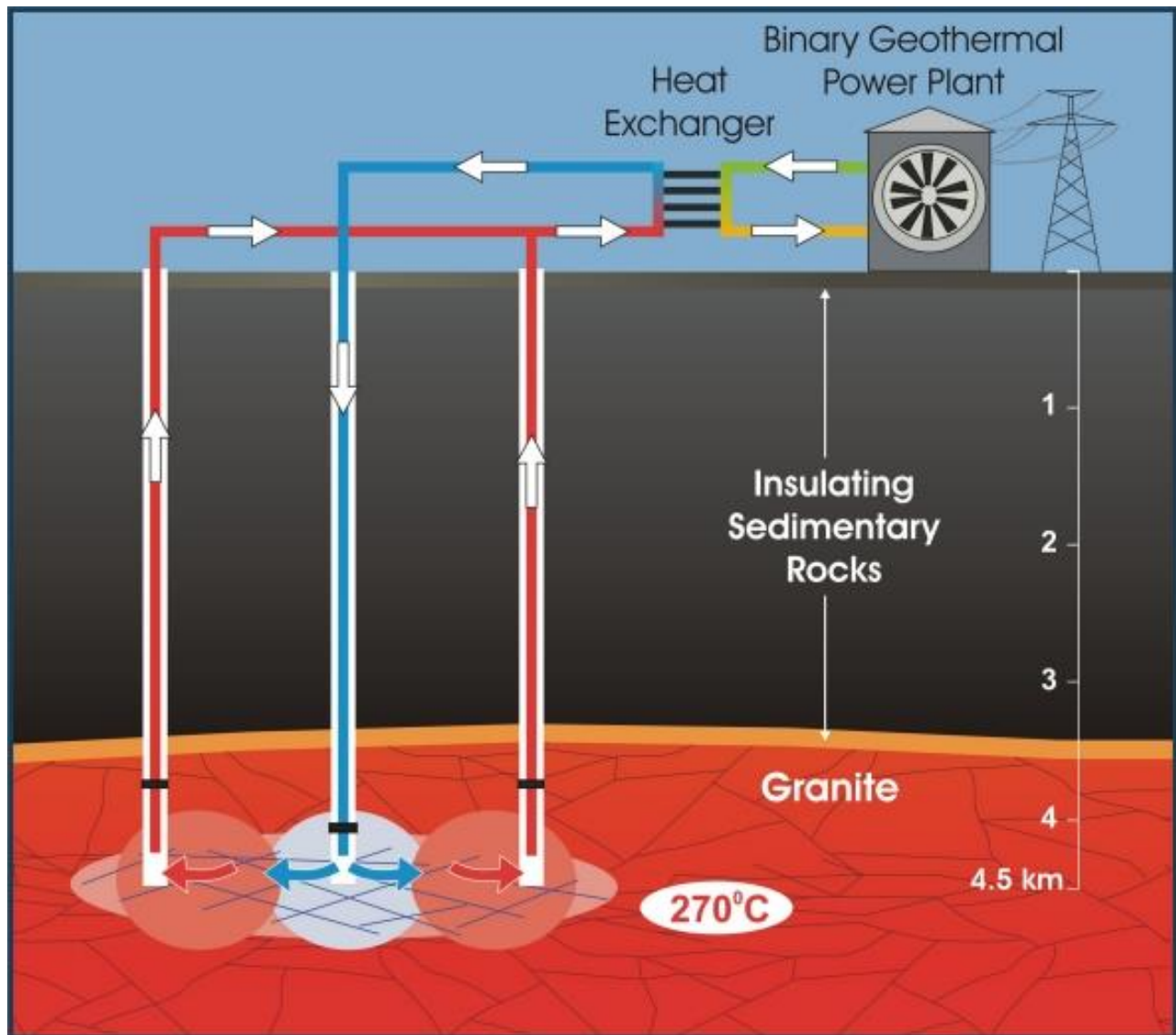


Figura 10. Esquema de un yacimiento geotérmico de roca caliente (tomado de <http://www.hotrockenergy.com/images/hot-rock-energ-power-plant.jpg>).

#### 7.4.4. Marcos tectónicos para sistemas geotérmicos

Diversos autores reconocen un vínculo entre la distribución espacial de arcos magmáticos y las zonas de cizalla dúctil. Sin embargo, la naturaleza de esta relación, en lo que se refiere a la correcta determinación de causas y efectos, ha resultado ser un tópico con muchas aristas y difícil de solucionar hasta el punto de ser considerado paradigmático. Esto es debido a la existencia de algunos ejemplos donde el emplazamiento y ascenso de fluidos están efectivamente asociados a

sistemas de cizalla y otros donde, aparentemente, la localización del magmatismo no estaría vinculada a la presencia de patrones estructurales.

Desde un punto de vista geotérmico, comprender esta relación entre lineamientos favorables asociados a sistemas estructurales y cuerpos magmáticos es fundamental, pues la presencia de fallas y fracturas favorecen el ascenso de magmas y, en zonas más someras de la corteza pueden actuar facilitando el transporte eficiente de fluidos hidrotermales por medio de redes interconectadas de fracturas (Figura 9 y 10). Los fenómenos físicos y químicos que los fluidos experimentan durante su transporte, idealmente deberían concordar con los modelos de mecánica de fluidos termales, donde la formación de un vórtice puede dar origen a una celda convectiva o pluma de material ascendente.

Debido a que en la naturaleza se presentan generalmente flujos caóticos, turbulencias y sistemas convectivos anidados, es inevitable que se produzcan, a diferentes niveles, reorganizaciones reológicas. El ascenso de magmas o fluidos a través de redes de fracturas es el modelo que se ha propuesto por los autores antes mencionados como una alternativa al ascenso y emplazamiento de cuerpos magmáticos someros. Numerosos factores influyen en este sistema y los parámetros principales de las propiedades físicas y químicas del material afectan invariablemente las rocas fracturadas y deformadas.

## **7.5. Métodos potenciales**

Los métodos geofísicos potenciales comprenden técnicas que emplean los campos potenciales terrestres (magnetometría o gravimetría) para el estudio del subsuelo. Estos métodos miden un campo natural presente en el medio mediante perfiles o mallas de datos.

Son métodos muy aplicados en diversos programas exploratorios, son los más antiguos, y el protocolo de aplicación es relativamente práctico, por lo que existe una alta relación costo/beneficio en etapas iniciales prospectivas y de desarrollo.

### **7.5.1. Magnetometría**

El estudio magnetométrico es una técnica geofísica que consiste en medir las variaciones del campo magnético terrestre y con base a ellas, inferir la geología del subsuelo. Los levantamientos magnetométricos consisten en realizar mediciones del campo magnético sobre la superficie terrestre con magnetómetros, en intervalos de distancia aproximadamente constante y a lo largo de una línea o perfil orientado de acuerdo con la geometría del objetivo exploratorio. Es necesario que las mediciones se realicen lejos de zonas que puedan generar un campo magnético de gran magnitud (fuentes cercanas).

La unidad en la que se mide el campo magnético es el nano tesla (nT) y los valores de campo para una localidad determinada pueden variar entre 30000 nT en el ecuador y 65000 nT en los polos.

#### 7.5.1.1. *Historia de la prospección magnetometría*

El magnetismo es un fenómeno físico natural conocido desde la antigüedad, donde se consideraba a cierto tipo de rocas que poseían la propiedad de atraer partículas de hierro. Se trataba primordialmente del mineral magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4 = \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). El nombre procede del pastor Magnes (800 a.C.) que según la leyenda “*quedó fijado al suelo por las tachuelas de sus sandalias y la punta de su cayado*” (Plinio, 30 A.C.). Desde entonces se sucedieron los descubrimientos relacionados con el magnetismo y la existencia de un campo magnético terrestre y, aunque en Asia era conocido desde mucho antes, no fue sino hasta el S. XII que empezó a conocerse en Europa el empleo de la aguja magnética como método de orientación. Gilbert, en 1600 fue el primer físico en estudiar los fenómenos magnéticos, asimilando el magnetismo terrestre a una esfera uniformemente magnetizada. En 1820 Oersted, Volta y Ampere emitieron teorías relacionando el magnetismo con la corriente eléctrica, validas en la actualidad. Gauss en 1939 encuentra que la magnetización regular de la esfera terrestre de origen interno se le sumaba otra magnetización irregular, también de origen interno.

Hasta la fecha, las causas y variación del campo magnético terrestre no se han demostrado. Sin embargo, de entre varias teorías, las más aceptadas son las de Elsasser (1946) y Bullard (1948), quienes propusieron que el campo magnético puede ser atribuido a las intensas corrientes eléctricas generadas en el interior del núcleo de la Tierra (fluido de hierro y níquel).

### 7.5.1.2. *Fundamento teórico-matemático*

La teoría magnética clásica se basa en el concepto de polos magnéticos puntuales análogos a cargas puntuales, con una ley cuadrática inversa para las fuerzas entre polos. En el sistema internacional (SI) se basa en el hecho de que un campo magnético es de origen eléctrico. Para explicar esto, se parte de la ley de Coulomb:

$$F = \left( \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \right) r_1 \quad (1)$$

Dónde:

F = fuerza del polo magnético

m = masa

r = distancia de separación entre la masa 1 y la masa 2

$\mu$  = permeabilidad magnética

La fuerza magnética puede verse reflejada a través de un campo magnético que existe en cualquier punto del espacio, como resultado de un polo de fuerza de campo “m” localizado a una distancia “r” de tal punto, esta fuerza se defina como:

$$H = \frac{F}{m'} = \frac{m}{\mu r^2} r_1 \quad (2)$$

La intensidad del campo magnético H, produce en un cuerpo compuesto por materiales con propiedades magnéticas, un campo de intensidad magnética  $H_i$ . Este campo crea dentro de cada cuerpo una magnetización (M), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M = X_N H_i \quad (3)$$

Dónde:

M: Magnetización

$X_N$ : Susceptibilidad magnética

$H_i$ : Campo de intensidad magnética

De acuerdo con la teoría electromagnética, el campo  $H_i$  es la contribución del campo de la Tierra más el que origina la propia magnetización del campo debido a la magnetización de un cuerpo  $H_m$  de la siguiente manera:

$$H_i = H_0 + H_m \quad (4)$$

Dónde:

$H_m$ : Campo debido a la magnetización  $M$ .

$H_0$ : Campo magnético terrestre

El campo magnético debido a la magnetización está directamente relacionado a un factor de demagnetización el cual depende de la geometría del cuerpo.

Para campos magnéticos de baja magnitud,  $M$  es proporcional a  $H$  y se relacionan a través de la susceptibilidad magnética “ $k$ ” (grado con que se magnetiza un cuerpo).

$$M = kH \quad (5)$$

En el exterior de un cuerpo magnetizado, la magnetización  $M$  crea un campo secundario  $H_s$ , que se suma al terrestre ya existente, dando como resultado un campo de intensidad magnética en cualquier punto del espacio.

$$H_p = H_0 + H_s \quad (6)$$

A partir de la ecuación (7) obtenemos el campo magnético secundario, el cual, para fines de exploración es el de mayor importancia. Para su determinación partimos del gradiente de una función potencial. Podemos definir  $\phi$  como:

$$H_s = -\nabla\phi \quad (7)$$

Dónde:

$$\phi = \frac{1}{4\pi} \int \bar{M} \nabla \frac{1}{R} dv' \quad (8)$$

Siendo  $B$  un vector de permeabilidad magnética directamente proporcional al campo de intensidad magnética expresado como:



$$B = \mu H \quad (9)$$

La permeabilidad magnética escalar puede ser expresada como:

$$\mu = \mu_0(1 + X_n) \quad (10)$$

Una idea del comportamiento del campo terrestre está representarlo en la Figura 11.

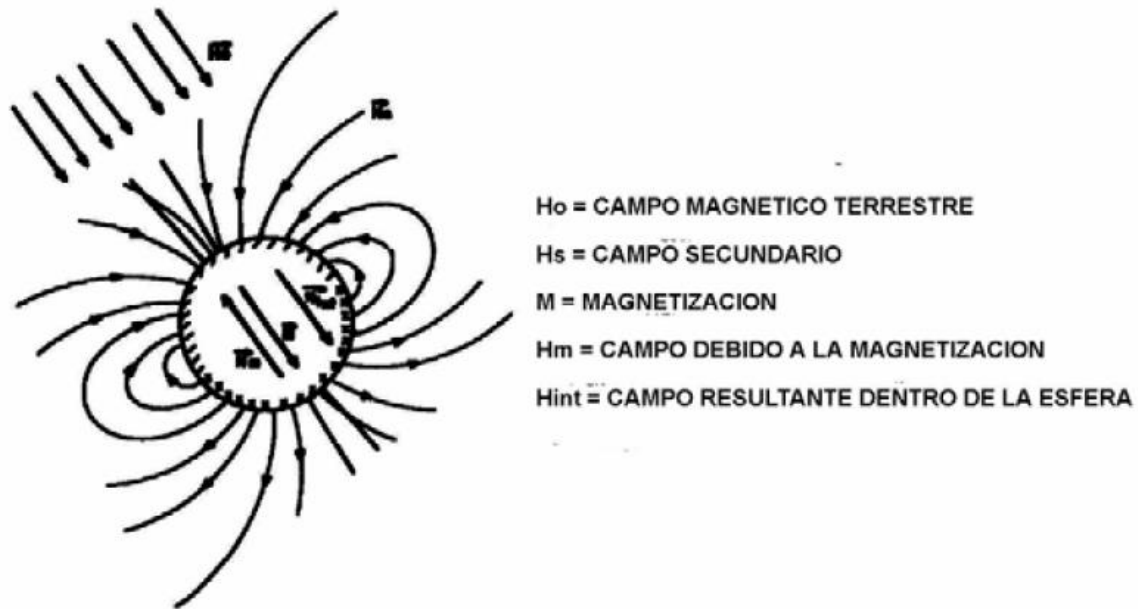


Figura 11. Representación de una esfera magnetizada por  $H_0$ .

En el interior de la esfera existe un campo  $H_m$ , contrario al campo externo, producido por la magnetización  $M$ . El campo resultante en el interior es  $H_i$  y en el exterior es  $H_s$ , que son la suma vectorial del campo exterior más el campo secundario (CNA, 2007).

### 7.5.1.3. *El campo magnético terrestre*

Numerosos estudios sobre el campo magnético de la Tierra, cuyos antecedentes se remontan a más de cuatro siglos, han permitido establecer que su intensidad es de carácter vectorial (Figura 12). Como primera aproximación, se puede considerar el campo magnético terrestre (CMT) como el de una esfera magnetizada según un eje inclinado respecto al eje de rotación unos  $11.5^\circ$  y cuyo momento magnético es del orden de  $8.3 \cdot 10^{25}$  [CGS].

Las componentes del campo magnético terrestre se pueden distinguir de acuerdo a sus aportaciones. El mayor componente (80-90%) es aquel que se origina de la convección de hierro líquido en el núcleo externo de la Tierra, este campo es dipolar y tiene una fuerza de aproximadamente 50 000 nT. Las interacciones del campo magnético externo, como lo son la variación, el electro jet ecuatorial y tormentas solares tienen un gran efecto en las mediciones magnéticas de exploración, por lo cual se tienen que remover durante el procesado de los datos.

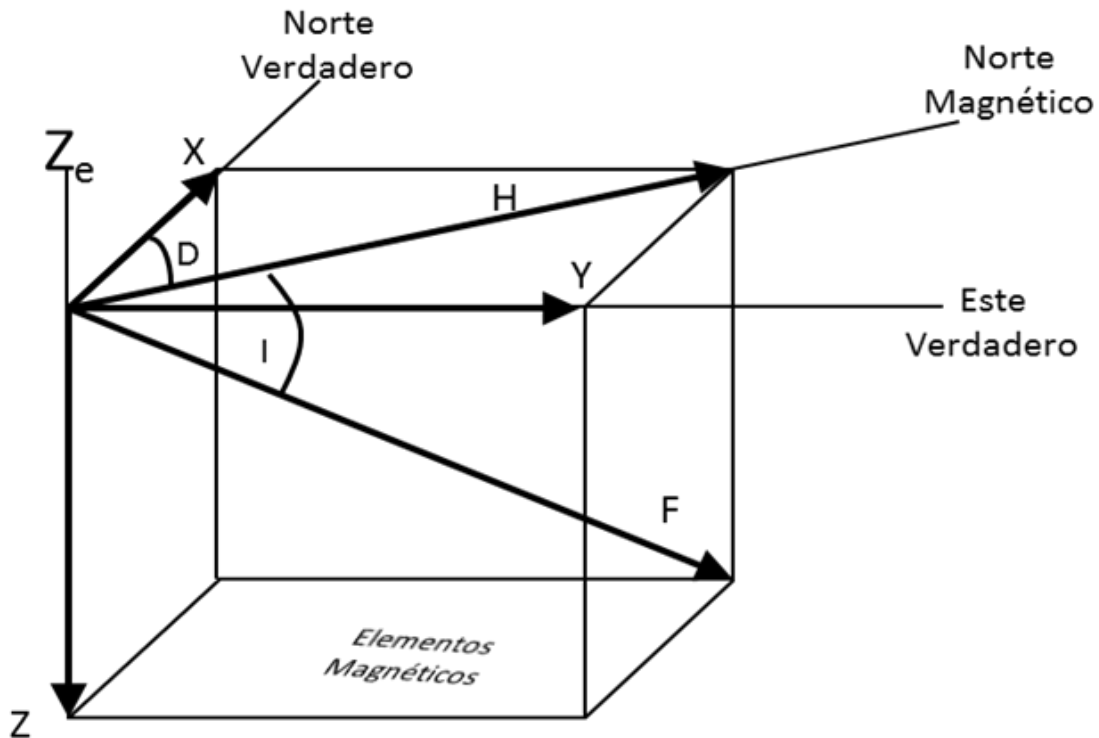


Figura 12. Representación de los vectores del campo magnético terrestre. La intensidad de campo ( $F$ ) y sus horizontal ( $H$ ) y vertical ( $Z$ ) relacionadas por los ángulos de inclinación ( $I$ ) y declinación ( $D$ ).

El componente restante, el cual se designa como campo de la Corteza, se origina de la magnetización de las rocas cercanas a la superficie de la Tierra, confinada a 20-30 km de profundidad, donde la temperatura es suficientemente baja. La relación entre el campo de la corteza y la distribución de minerales en la misma proporciona el objetivo principal de este método de exploración.

#### 7.5.1.4. *Magnetización del medio*

A escala atómica todos los materiales son polares y algunos magnéticos, ya que cada átomo actúa como un dipolo, debido al giro de los electrones en torno al núcleo y al spin de éstos. En los materiales diamagnéticos todos los huecos electrónicos están llenos y no hay electrones desapareados, de modo que al aplicarles un campo magnético las trayectorias orbitales de los electrones giran hasta producir un campo magnético que se opone al aplicado, por eso es mucho más débil que este. Por lo tanto, la susceptibilidad de los materiales diamagnéticos es débil y negativa y además es independiente de la temperatura del material. La mayor parte de los principales minerales formadores de rocas son diamagnéticos (cuarzo, calcita, halita, yeso, feldespato potásico, etc...).

La relación entre la magnetización y el campo magnético externo en los minerales ferromagnéticos genera una forma característica de lazo y que se conoce como ciclo de histéresis.

En los materiales paramagnéticos los huecos electrónicos están incompletos, de modo que el campo magnético resulta del spin de los electrones desapareados. Cuando se sitúan en un campo externo los dipolos correspondientes a los spines desapareados giran para producir un campo en el mismo sentido, que es proporcional al campo aplicado. La susceptibilidad es positiva pero débil. Esta susceptibilidad depende de la temperatura (Ley de Curie-Weiss) y del campo al que se mide, esta dependencia es menor que la de los imanes permanentes.

Los materiales ferri, ferro y anti-ferromagnéticos son debido a la existencia de electrones libres los dipolos asociados con el spin de los electrones desapareados están acoplados magnéticamente entre átomos adyacentes, dando lugar a un campo molecular donde el grano mineral constituye uno o varios dominios magnéticos. Según la superposición de las orbitas este acoplamiento puede ser paralelo o antiparalelo. En materiales ferromagnéticos los dipolos son paralelos, dando lugar a una fuerte magnetización espontánea, que existe en ausencia de un campo magnético externo, y una susceptibilidad muy alta, como por ejemplo el hierro, el cobalto y níquel.

A cualquier temperatura por encima de los 0 °K, la energía térmica hace que los dipolos magnéticos de un material ferromagnético se desvíen de su alineamiento paralelo. Finalmente, al aumentar la temperatura, se alcanza la denominada temperatura de Curie en la cual el ferromagnetismo desaparece y los materiales se tornan paramagnéticos.

### 7.5.2. Gravimetría

La gravedad es la fuerza de atracción entre dos cuerpos siendo mayor en los polos que, en el ecuador de la Tierra y que la sutil variación de la gravedad es en muy pequeñas cantidades a lo largo de toda la superficie terrestre.

La prospección gravimétrica, (junto a otros tipos de prospecciones: Magnetométrica, Eléctrica y Electromagnética), se considera como un método geofísico no invasivo, de rápida adquisición y de gran valor cuando se enfoca en obtener información del interior de la Tierra. Con este método potencial se mide la variación espacial del campo gravimétrico terrestre que puede detectarse mediante el uso de un instrumento de alta precisión denominado gravímetro. Los levantamientos gravimétricos pertenecen a los métodos llamados pasivos o de campo natural.

Los estudios gravimétricos se basan en la medición sobre la superficie terrestre, detectando pequeñas variaciones del campo gravitacional. Las anomalías son causadas por variaciones laterales en la distribución de masas de la corteza terrestre, lo que indica una distribución geológica de diferente densidad en las capas estratigráficas del subsuelo. Como resultado de la distribución irregular, se producirá una variación en la intensidad del campo gravimétrico. Altos estructurales (como anticlinales), implican una distribución de rocas más densa que hace que aumente la atracción local de la gravedad directamente encima de la estructura. Los domos salinos, compuestos de material más ligero que el de los sedimentos adyacentes, a quienes penetra generalmente, da origen a una fuerza gravitatoria menor directamente encima de la estructura (Vera, 2015).

#### 7.5.2.1. Historia de la Gravimetría

El hombre de la antigüedad aceptó la gravitación como parte básica de su ambiente y, durante siglos avanzó científica y tecnológicamente sin presentarle demasiada atención. Galileo Galilei fue el primero en intentar explicar y medir por el método científico el comportamiento de los cuerpos en movimiento dentro del campo gravitacional de la Tierra. Galileo observó que el periodo del movimiento de un péndulo dependía de su longitud, y que la fuerza gravitacional de un cuerpo que cae es proporcional a su peso, siendo la aceleración igual entre todos los cuerpos.

El método gravimétrico fue aplicado inicialmente en la prospección petrolífera en los Estados Unidos y en el Golfo de México, con el objetivo de localizar domos salinos (diferencia de densidad respecto al entorno) que potencialmente pudiesen albergar petróleo. Posteriormente se buscaron con este método estructuras anticlinales para el mismo fin. En la postrimería del siglo XIX el húngaro Roland von EÖTVÖS desarrolló la llamada balanza de torsión que mide las distorsiones del campo gravitatorio causadas por masas o cuerpos de densidades anómalas enterrados en el subsuelo como por ejemplo domos de sal o cuerpos de cromita. En 1915 y 1916 se emplearon la balanza de torsión de EÖTVÖS en el levantamiento de la estructura de un campo petrolífero ubicado en Egbell, en la antigua Checoslovaquia.

### 7.5.2.2. Fundamento Teórico –Matemático

El proceso de adquisición mediante gravimetría se compone de dos partes: la operación topográfica y la medición del dato gravimétrico. Ambas están relacionadas de tal manera que deben ser obtenidas con precisión.

El principio en que se basa el Método de Prospección Gravimétrica es la Ley de la Gravitación Universal o tercera Ley de Newton, y que puede ser expresada de la manera siguiente: "Dos cuerpos cuyas masas sean  $m_1$  y  $m_2$ , se atraen entre sí con una fuerza directamente proporcional a la magnitud de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa". En forma de ecuación se expresa como:

$$g \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (11)$$

Para que la ecuación 11 se convierta en una igualdad, se necesita una constante (constante de gravitación universal  $G$ ), cuyo valor es  $G = 6.670 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$ , de tal manera que la ecuación que rige la ley de atracción universal es:

$$g = G \left( \frac{m_1 m_2}{r^2} \right) \quad (12)$$

De acuerdo con la ley, cualquier masa que se encuentre sobre la superficie de la tierra experimenta una fuerza de atracción hacia el centro de la misma, debida al producto de las masas e inversa al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa.

La tierra puede ser considerada como un elipsoide de revolución, con una elipticidad (radio ecuatorial menos radio polar, dividido entre el ecuatorial) de 1/297. La fuerza de la gravedad que actúa sobre una masa unitaria en la superficie de la Tierra a una latitud ( $\phi$ ), considerada como una masa homogénea, está dada por:

$$g = 9.78049(1 + 5.284 * 10^{-5} * \sin^2 \phi - 5.9 * 10^{-8}) \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (13)$$

A la variación del valor de la atracción de la gravedad medida en campo, con respecto al valor calculado con la ecuación 13, se le conoce como anomalía. Las anomalías pueden ser provocadas por diversos factores, principalmente a cambios de densidad lateral de los materiales que forman la corteza terrestre, característica que constituye la base del método de la Exploración Gravimétrica.

El campo gravimétrico se mide en gales (Gal). Un Gal es igual a una aceleración de  $1 \text{ m/s}^2$ . Debido a las densidades propias de las litologías terrestres, las anomalías de la gravedad se expresan en miligales (mGal), que son la milésima parte de un Gal, o en unidades gravimétricas, de un décimo de miligal. Es claro que la unidad que se está considerando es una unidad de aceleración, esto es, fuerza de atracción sobre unidad de masa.

## **7.6. Métodos electromagnéticos**

### **7.6.1. Percepción Remota mediante imágenes satelitales y UAV (Drone)**

La percepción remota (Remote Sensing, por su notación en inglés) puede definirse como la ciencia de obtener información de un material en la superficie terrestre mediante el análisis de datos adquiridos por algún tipo de sensor o cámara a una distancia determinada entre dicho objeto y el sistema de medición. También es citada por algunos autores como “la utilización de sensores para la adquisición de información sobre objetos o fenómenos, sin que exista contacto directo entre el sensor y los objetos (geológicos exploratorios)”.

El creciente empleo de distintos sensores de observación terrestre está originando no sólo con enorme cantidad de información, sino como nuevas maneras de estudiar la superficie terrestre. Es posible utilizar esta herramienta para recopilar información correspondiente a la reflectancia superficial y transformarlos en matrices de datos distribuidas espacialmente, utilizando técnicas de procesamiento e interpretación de imágenes con fines prospectivos.

#### **7.6.1.1. Historia de la Percepción Remota**

La aplicación de la percepción remota biótica comenzó alrededor de hace unos 600 millones de años, cuando alguna forma de vida primitiva diferenció algunas células mediante la fotosensibilidad. Este rudimento fotosensible evolucionó volviéndose en un poderoso sensor, el llamado “sentido de la vista”. Un imitador mecánico, mimetizando sus funciones es la actual “cámara fotográfica”, que hizo su aparición hace alrededor de un siglo y que fue mejorada durante la década de 1930, aplicándose en procesos de exploración como fotografía aérea. Fue la Segunda Guerra Mundial la causante de un desarrollo tecnológico de gran alcance, aunque no fue hasta los años 60’s cuando las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas, con sensores electrónicos multispectrales (sistema de detección) que se acoplaron a computadoras de alta capacidad operativa para fines castrenses.

El término Remote Sensing fue acuñado por la científica Evelyn Pruitt, de la marina de EE.UU. cuando se dio a conocer que la fotografía aérea no era lo suficientemente precisa para descubrir las múltiples formas de adquisición de imágenes usando radiación fuera del espectro en la región visible (VIS).

La nueva era de la percepción remota, aunque está predominantemente encaminada hacia satélites para reconocimiento militar, recientemente se ha enfocado en vuelos espaciales tripulados con fines científicos: estudios meteorológicos, climáticos, medioambientales y análisis para prospección de recursos terrestres. Los programas de vuelos espaciales tripulados se iniciaron en 1961 por EE.UU. El primer satélite espacial dedicado al manejo de los recursos terrestres fue lanzado en 1972, y nombrado ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite). Este fue muy utilizado con fines agrícolas. Esta plataforma de adquisición espectral evolucionó a los sistemas satelitales para reconocimientos de la superficie terrestre y que actualmente son conocidos como plataformas Landsat, siendo el más reciente el Landsat 8.

#### 7.6.1.2. *Fundamento teórico-matemático*

La percepción remota basa íntegramente su funcionamiento en torno a una determinada región de espectro de radiación electromagnética (REM). Esto es, la distribución de la radiación electromagnética de acuerdo con la frecuencia y a la longitud de onda en la que viaja la energía. El espectro se ha dividido en varias regiones espectrales puesto que no existe la manera de detectar la emisión de energía a lo largo de toda la radiación. Conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son la forma más frecuente para analizar los datos actualmente adquiridos. Cada material de la superficie terrestre (el objeto geológico de exploración) refleja de diferentes formas las longitudes de onda, en forma de color, que es una radiación visible para el ojo humano, su sistema interno de percepción remota. Por ejemplo, cada persona percibe los objetos de una manera un tanto diferente (i.e.: enfermedades de la vista donde no se pueden distinguir bien los colores). El espectro visible, que es captado por el ojo humano (de ahí su nombre), es solo una pequeña parte del total del espectro electromagnético (Figura 13).

La longitud de onda, que es solamente la distancia de cresta a cresta de las ondas es lo que nos determina el color así como la energía que lleva la misma onda; entre mayor sea la longitud de onda menor va a ser la energía que lleva la onda. Por lo tanto, como observamos en la Figura 13, el rojo tiene mucha menos energía que el violeta el cual ya lleva mucha más energía (por eso los rayos ultravioleta que emite el Sol son los que aportan de energía a las celdas solares que ahora son muy populares).

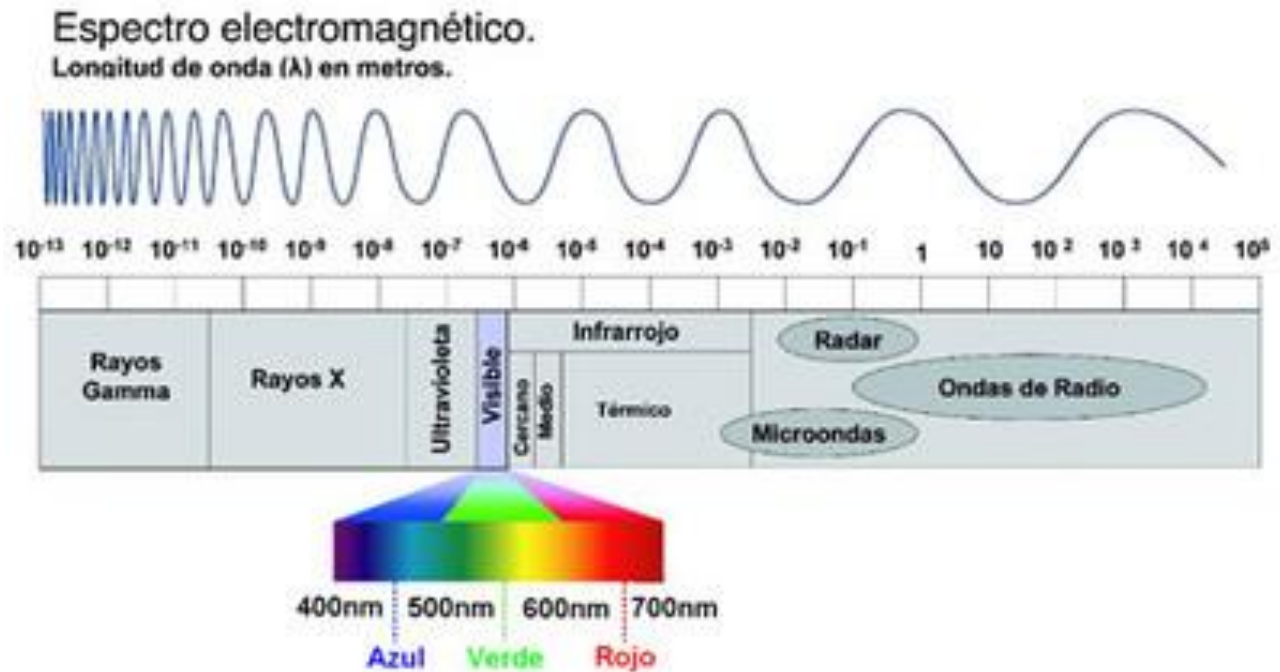


Figura 13. Rango de longitudes de onda ( $\lambda$ ) y frecuencias de las radiaciones del espectro electromagnético. tomada del periódico El País.

Para poder captar el espectro electromagnético los humanos y los animales utilizamos la vista, permitiendo la entrada de luz (radiación) para ser analizado por el cerebro, donde lo procesamos como una serie de colores. El espectro visible (0.4 a 0.7 nm) se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que puede ser percibida por el sistema óptico humano, coincidiendo con las longitudes de onda en respuesta a la radiación solar. En la industria los métodos de adquisición pueden ser satelitales, aéreos o incluso terrestres.

Actualmente la percepción remota es de notable aplicación en una gran gama de actividades: agrícolas, medioambientales, catastrales, militares, industriales, y de ordenamiento territorial. Esto permite conocer el gran valor de la técnica para un amplio abanico de disciplinas y pone de manifiesto la necesidad de promover este tipo de tecnología de una forma adecuada que constituya un apoyo muy conveniente para reducir costos y el tiempo invertido para la elaboración de un proyecto o estudio exploratorio geotérmico.

La obtención de información mediante percepción remota está influenciada por las interacciones de las diferentes partes constituyentes de un sistema de detección (Figura 14), tales como:

- Fuente de energía (Sol, como fuente natural de radiación), donde influyen el ángulo de elevación y las divergencias solares.



- Cubierta terrestre, donde intervienen las características físicas, químicas y la rugosidad (efecto de dispersión) de la superficie en un instante de tiempo.
- Sensor o detector, el cual influye en la geometría de la toma y la calidad de datos.
- Atmósfera, que se refiere a la dispersión selectiva de la radiación electromagnética.
- 



Figura 14. Esquema general de adquisición de datos para percepción remota.

### 7.6.1.3. Sensores comerciales

La percepción remota desde plataformas aéreas sea con placas, películas fotográficas o sensores electrónicos sigue constituyendo una valiosa fuente de información. A partir de 1960 se debió comenzar a compartir su rango de aplicaciones con las tecnologías desde plataformas satelitales.

Actualmente existe una gran variedad de sensores y plataformas que pueden variar en los siguientes parámetros:

- Resolución Espacial: Es el objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre la imagen de satélite, también puede ser definida como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la imagen. Se mide en unidades de longitud, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie. Esa distancia, corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina píxel; esta es la medida más generalizada de la resolución espacial, la cual está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación.
- Resolución Espectral: Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre los sensores espaciales, la menor resolución espectral

corresponde al radar y a los sistemas fotogramétricos; por el contrario los sensores ópticos ofrecen un amplio rango de bandas. La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño.

- Resolución Temporal, se refiere al tiempo entre adquisiciones distintas pero sobre una misma localidad.
- Resolución Radiométrica: Se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radianza espectral que recibe.

Los sistemas ópticos son los de mayor aplicación en programas exploratorios, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número de valores que incluye ese rango, es decir, el número máximo de niveles digitales de la imagen suele identificarse con la correspondiente resolución del sensor. Actualmente la mayoría de los sensores comerciales ofrecen 256 niveles por pixel.

Existen dos opciones básicas usadas para la percepción remota de los objetos sobre el terreno:

- Sistemas de percepción activa
- Sistemas de percepción pasiva

Entre los múltiples sensores comerciales que existen, para los objetivos de este proyecto se utilizó el satélite "LANDSAT 7", el cual se lanzó el 15 de abril de 1999, transportando el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus).

Las imágenes obtenidas por este sensor están compuestas por 8 bandas (Tabla 2) que pueden ser combinadas de distintas formas para obtener variadas composiciones de color u opciones de procesamiento.

Los avances tecnológicos que presento este sensor lo posicionaron como el más interesante para la generación de imágenes con aplicaciones directas hasta una escala de 1:100.00, principalmente en áreas rurales o territorios de grandes extensiones.

Tabla 2. Bandas del sensor Landsat 7 y resoluciones respectivas utilizados en este estudio.

Numero de banda asignada	Resolución Espacial (m)	Nombre	Resolución espectral ( $\lambda$ )
Banda 1	30	Azul	0.452 – 0.52
Banda 2	30	Verde	0.533 – 0.610
Banda 3	30	Rojo	0.636 – 0.69
Banda 4	30	Infrarrojo cercano (NIR)	0.78 – 0.90
Banda 5	30	Infrarrojo medio (SWIR-1)	1.55 – 1.75
Banda 6	30	Infrarrojo Termal (SWIR-3)	10.40 – 12.50
Banda 7	15	Infrarrojo lejano (SWIR-2)	2.08 – 2.35
Banda 8	30	Pancromática	0.52 – 0.90

## 8. Metodología de trabajo en campo

Se comenzó delimitando un área de interés a partir de la carta topográfica 1:50 000 (Sierra Cucapáh, I11D65) de INEGI y las cartas geológicas escala 1:100, 000 y geológica-minera I11-12 (Mexicali), y las cartas geofísicas de El Zacatón: magnética de campo total I11-12, magnética primera derivada de campo total H11-B23 reducida al polo y H11-B23 magnética de campo total reducida al polo ambas a escala 1: 50, 000 del SGM (Figura 15).

Estos mapas sirvieron para la identificación preliminar de zonas de fallamiento y posibles cambios litológicos que pudieran ser indicadores de alteración hidrotermal asociada a las manifestaciones geotérmicas superficiales. Posteriormente y para análisis de firmas espectrales de minerales de

alteración se descargaron las imágenes nivel 1 de Landsat 7 y datos de magnetometría satelital EMAG-2, con la que se delimito el área específica de trabajo.

En el área seleccionada se planearon vuelos con Drone o UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Este sistema de adquisición aérea fue equipado con dos tipos de cámaras para la adquisición de imágenes RGB y entrega datos superficiales. Esta tecnología tiene la ventaja de que si las condiciones son favorables, se puede llegar a obtener resultados con profundidad de investigación de hasta un par de centímetros por debajo de la superficie. La Verificación posterior de lineamientos y afloramientos se realizó en trabajos de campo. Una vez definida el área reducida de estudio, se calcula la altura de vuelo del Drone a partir de la resolución deseada, se calibra el compás y GPS del equipo haciéndolo girar una vez sobre su propio eje, posteriormente se define el porcentaje de superposición vertical y horizontal con el objetivo de tener varios puntos de control en cada imagen para una correcta calibración y correlación entre fotografías consecutivas. Una vez cargados dichos parámetros el Drone levanta vuelo automáticamente hasta la elevación pre-establecida desde donde comienza la toma progresiva de imágenes a lo largo de una retícula de vuelo (grid) hasta cubrir toda el área de estudio.

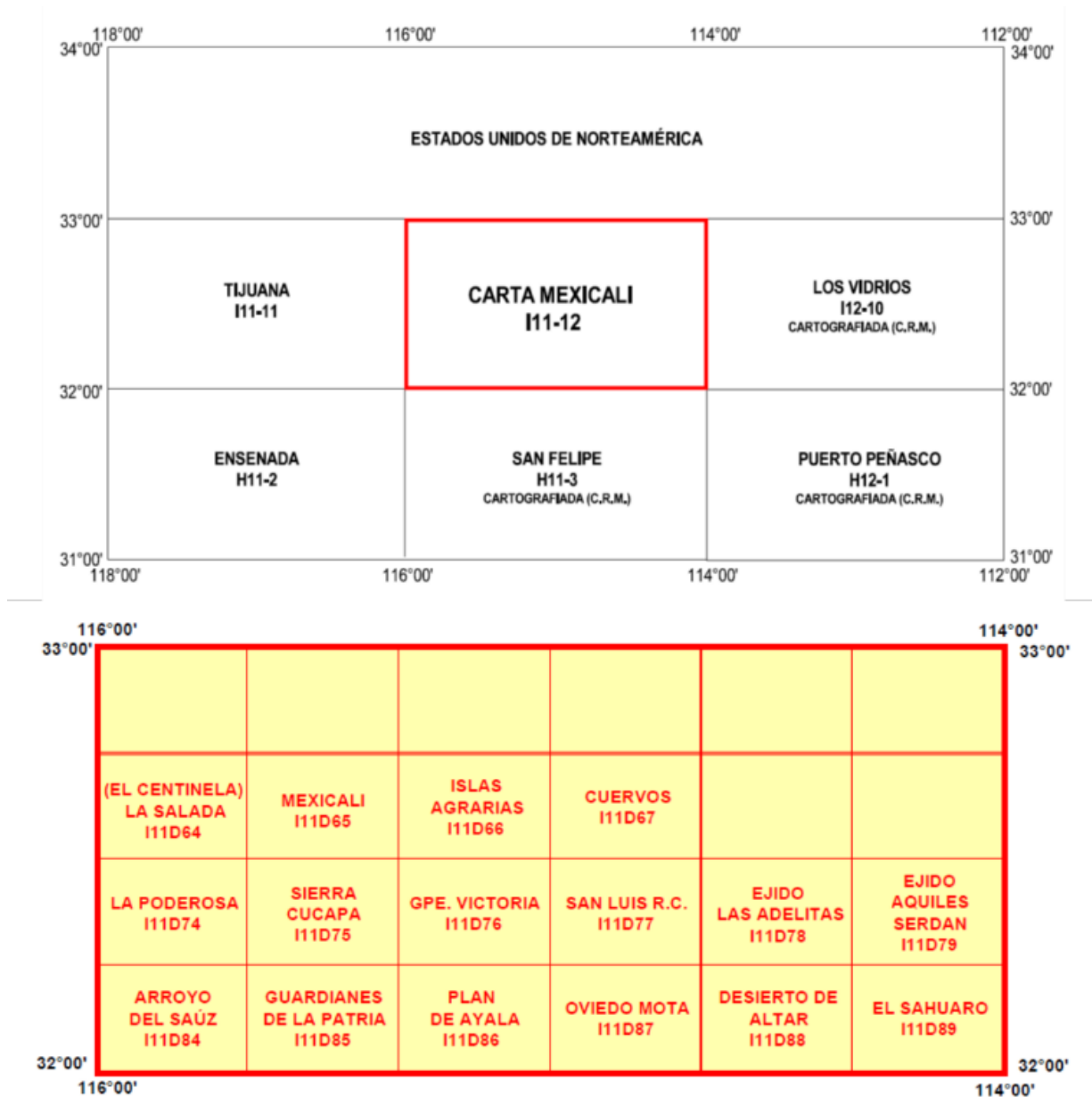


Figura 15. Mapas a escala 1:250,000, 1:100, 000 y 1::50,000 consultadas para elaboración del informe técnico. Tomadas de Peña-Leal et al., 2011.

Adicionalmente, dentro del área de estudio definida se hacen levantamientos GPS en puntos de control (Figura 16) para ser utilizados en el procesamiento de los datos termográficos. Cada fotografía lleva una superposición del 60% sobre las fotografías circundantes para que tanto la calibración y la georeferenciación sean lo más exactas posibles.



Figura 16. Preparación previa al vuelo con Drone para adquisición de imágenes en zonas de interés geotérmico.

### 8.1. Localización del área de estudio

El proyecto se dividió en estudio regional y estudio local dependiendo de la extensión del área de trabajo y objetivos deseados.

La sección regional comprende desde el límite sur de la Laguna Salada hasta Salton Sea; entre las coordenadas UTM 11N 592155, 3495615 para el borde inferior izquierdo hasta 11S 685005, 3720435, para el borde superior derecho con Datum WGS84 (Figuras 17 y 18).

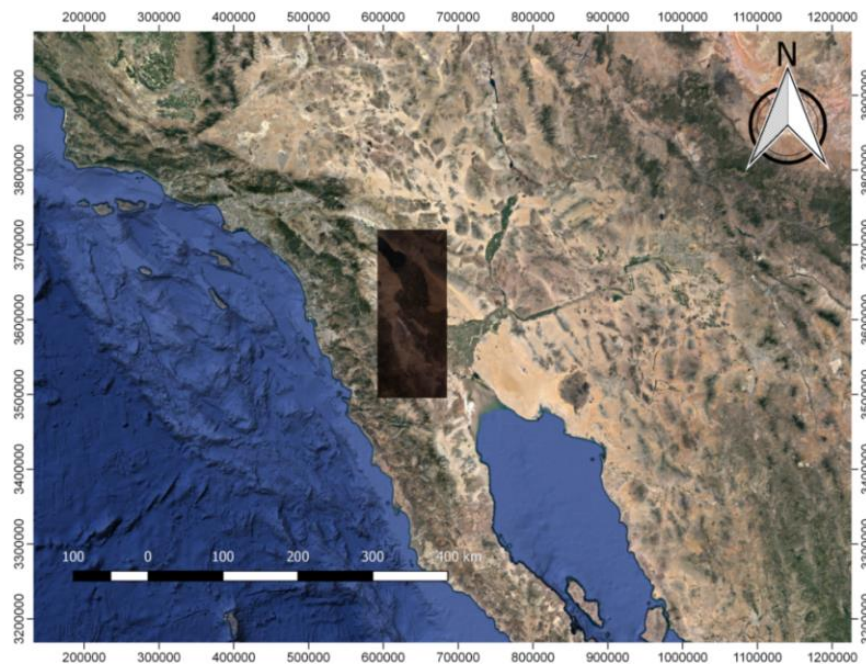


Figura 17. Mapa Regional del área de estudio.

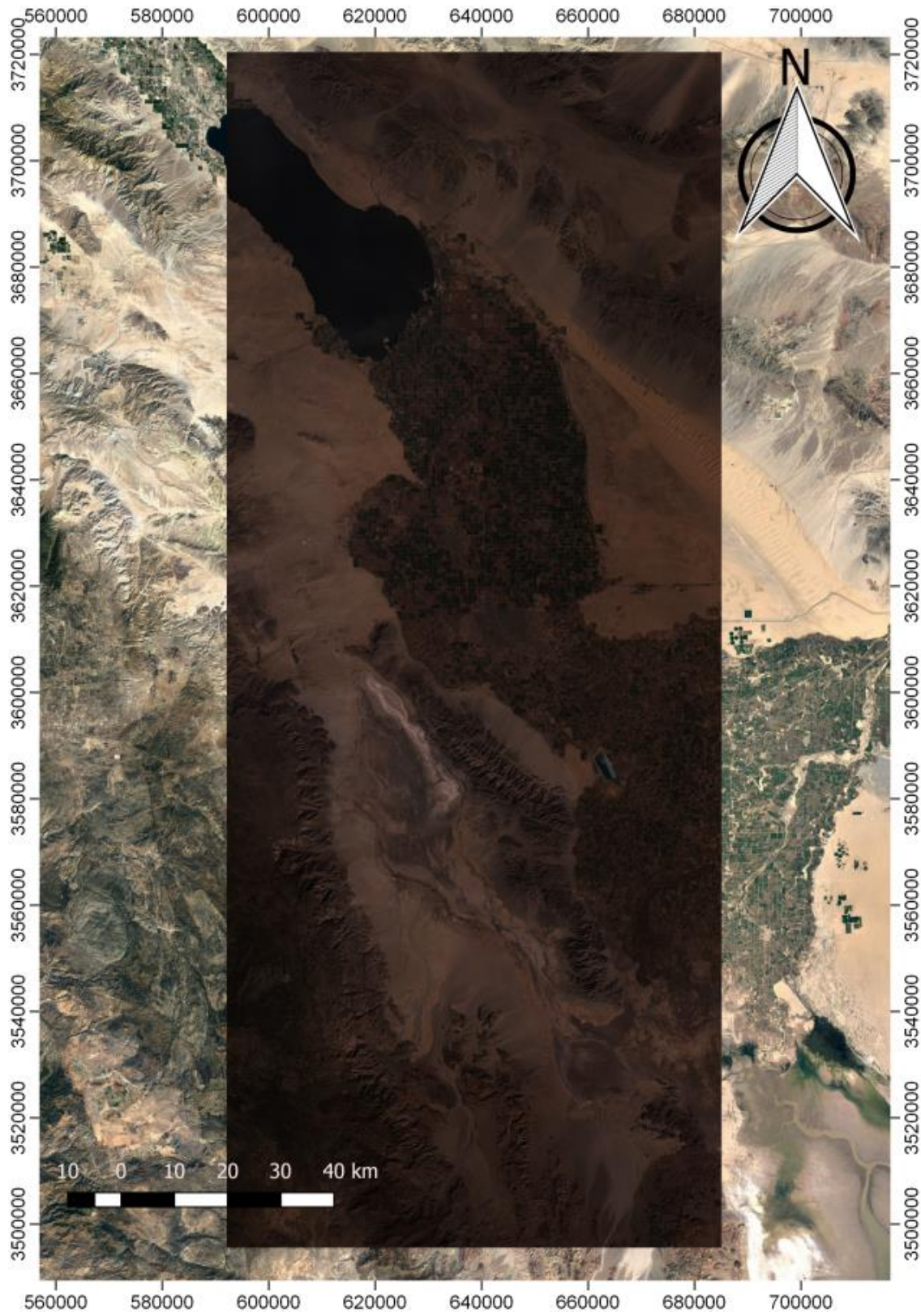


Figura 18. Mapa mostrando la ubicación del área de estudio completa.

La siguiente etapa se llevó a cabo a un nivel más local y detalle, delimitado a partir de su cercanía con las anomalías geotérmicas que ya se encuentran siendo explotadas por la planta geotérmica de Cerro de San Pedro

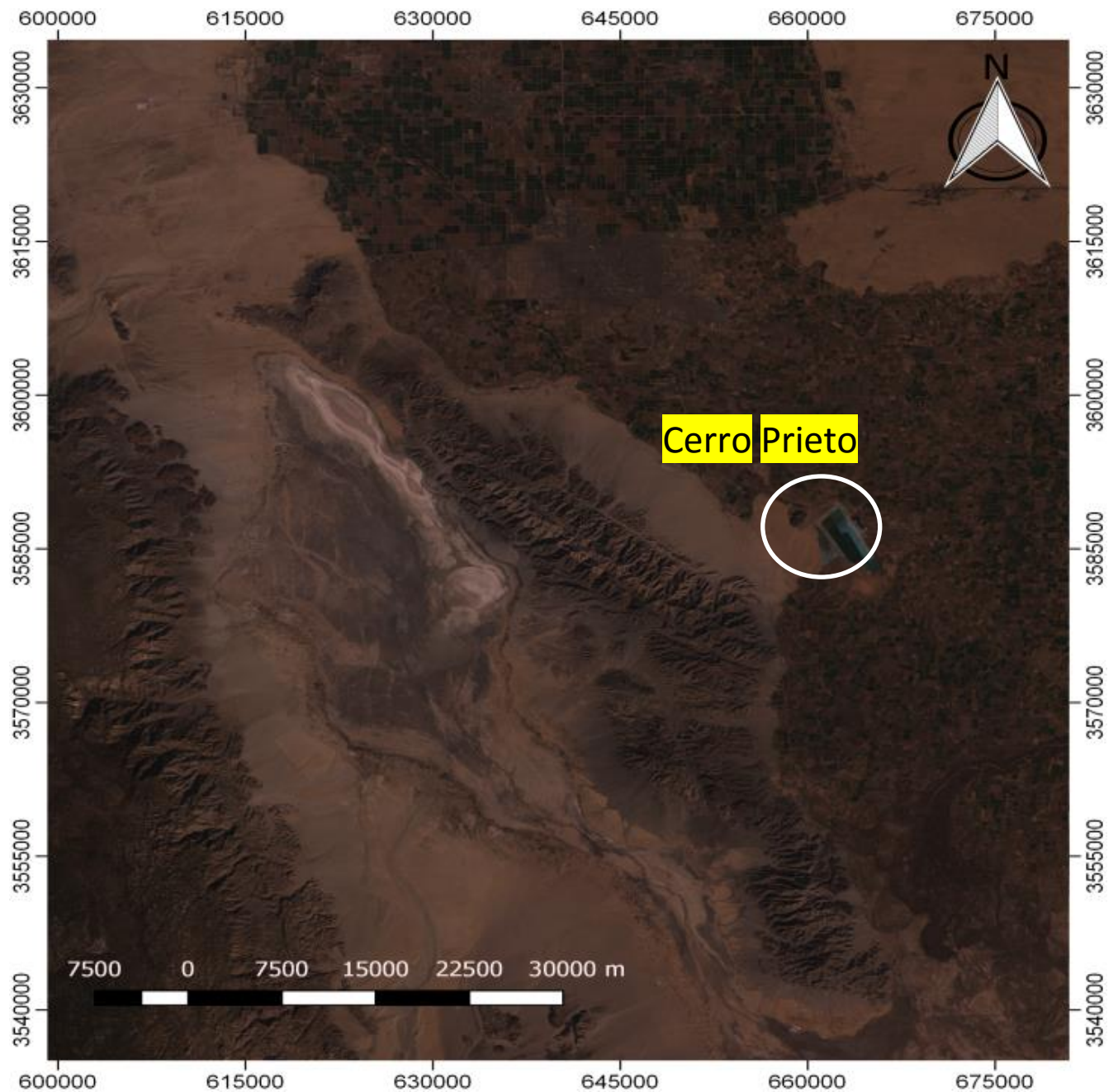


Figura 19. Mapa del área reducida de estudio. Se muestra la Cuenca de Laguna Salada al centro y bordeada al oriente por la Sierra de Cucapáh y al occidente por la Sierra de Juárez. En la zona central oriental, se distinguen las piletas de evaporación de la Central Geotérmica de Cerro Prieto.



## 8.2. Equipo y software utilizado

### 8.2.1. Magnetometría

El estudio magnetométrico se realizó a partir de los datos recabados por la Administración Nacional Atmosférica y Oceanográfica de USA (NOAA, por sus siglas en inglés) a través de la plataforma EMAG2. El sistema de datos de la plataforma es un compilado de lecturas magnéticas hechas con buques y aviones normalizadas mediante análisis satelitales la cual tiene una resolución de 2 minutos-arco y una altitud relativa de nivelación 4 Km sobre el geoide, mientras que las lecturas aéreomagnéticas fueron tomadas a 300 msnm.

En la etapa de procesado se utilizó el software Matlab® para extraer la información mediante la delimitación del área de estudio preestablecida mediante las imágenes satelitales. Posteriormente se genera un “grid” y se lleva a cabo el procesado correspondiente en el software especializado Oasis Montaj® de Geosoft®. La proyección de los mapas resultantes se hizo en el software de código abierto QGis®.

### 8.2.2. Percepción remota

#### 8.2.2.1. Satelital

El proceso de análisis multispectral satelital se realizó mediante imágenes de nivel 1 (ortorectificación) del sensor Landsat 7 ETM+, las cuales son proporcionadas de manera gratuita por el Servicio Geológico Norteamericano (USGS). El procesado se realizó mediante el software especializado Idrisi®, Selva Edition, y su proyección en el software libre QGis®

#### 8.2.2.2. Levantamiento con Drone

Las nuevas tecnologías como los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT ó Drone) están permitiendo la aplicación de técnicas avanzadas para muestrear de forma objetiva, rápida, eficiente y precisa. Para la adquisición de este proyecto se utilizaron dos equipos (sistema de vuelo y detector) para el reconocimiento y adquisición de imágenes con Drone:

- **Drone DJI modelo Matrice 600 Pro** ® de fabricación China (Figura 20), el cual cuenta con 6 rotores de enfriamiento automático, un fuselaje equipado con el controlador A3 Pro y el nuevo sistema lightbridge 2 HD, lo que le *“permite una autonomía de vuelo de hasta 40 minutos (dependiendo el peso de la carga activa) y una velocidad de 15m/s, con gran estabilidad y transmisión de señal”*, ya sea para imágenes o posicionamiento en tiempo real y triple GPS montados sobre el fuselaje.



Figura 20. Drone Matrice 600 Pro ®.

- Cámara DJI modelo Zenmuse X3 ® de fabricación china (Figura 21), montada sobre un sistema Gimball de suspensión y amortiguamiento que elimina vibraciones y movimientos bruscos, la cámara cuenta con un sensor tipo CMOS de 12.4 megapíxeles, un lente de 20mm con enfoque a nivel “infinito” y una resolución 4K (hasta 4096x2160), que le permite obtener resoluciones espaciales de hasta 1 cm/px, además de poder realizar la descomposición de las bandas del espectro visibles en 3 rangos específicos (Rojo-660nm, Verde-550nm y azul-470nm).



Figura 21. Cámara Zenmuse X3 ® montada en el drone Matrice 600 Pro ®.

## 8.3. Procesamiento de datos geofísicos

### 8.3.1. Magnetometría

Los datos obtenidos del emag2 correspondientes a la versión 2 de su base de datos contienen ya las correcciones pertinentes, como son:

- Corrección por variación diurna. La cual consiste en corregir los cambios inducidos por la actividad solar y el calentamiento de la atmósfera. Estos cambios tienden a presentarse en forma de ciclos irregulares y sus amplitudes incrementen hacia el mediodía, esta variación se obtiene a partir de los datos registrados de las estaciones base en forma de series de tiempo que permiten obtener el modelo matemático por medio de una regresión lineal. El valor que nos da este modelo se resta a los valores observados, correspondiendo a los tiempos de adquisición.
- Corrección por IGRF. El campo magnético medido en campo es debido a múltiples fuentes, en su mayoría proviene del interior de la tierra y que fluctúa con el tiempo y se puede representar por una serie de coeficientes armónicos esféricos llamado modelo global del campo magnético teórico (IGRF). El valor residual que da como resultado este modelo se le sustrae a los datos procesados.

El set de datos contiene todos los valores del planeta, para lo que se necesita conocer los bordes del área de estudio, mediante un código simple se delimitan dichos bordes y que genere solamente los valores dentro los límites que se le fueron establecidos. Este archivo contiene los valores del campo total del área de estudio (Figura 22) y el cual se importara al software Oasis Montaj®, donde se creará un “grid” mediante el algoritmo de mínima curvatura.

Partiendo del mapa de campo magnético total se realiza un filtro de reducción al polo. Esto fue aplicado al mapa de anomalía magnética, la cual es una transformación utilizada para facilitar la interpretación de la información magnética en donde se elimina la distorsión producida por la inclinación del campo geomagnético, eliminando o minimizando la asimetría y los desplazamientos laterales de las anomalías del campo magnético total, relacionados con las desviaciones direccionales de la magnetización, con este procesado podemos obtener anomalías que responden a la verdadera ubicación de las heterogeneidades del medio, lo que posibilita una interpretación mas sencilla. Los valores requeridos para una correcta realización de la anomalía magnética reducida al polo son la declinación y la inclinación magnética (Fig. 12), los cuales son:

Declinación:  $11^{\circ} 8'$

Inclinación:  $57^{\circ} 15'$

Estos valores fueron proveídos por Administración Nacional Atmosférica y Oceanográfica de USA (NOAA), por sus siglas en inglés.

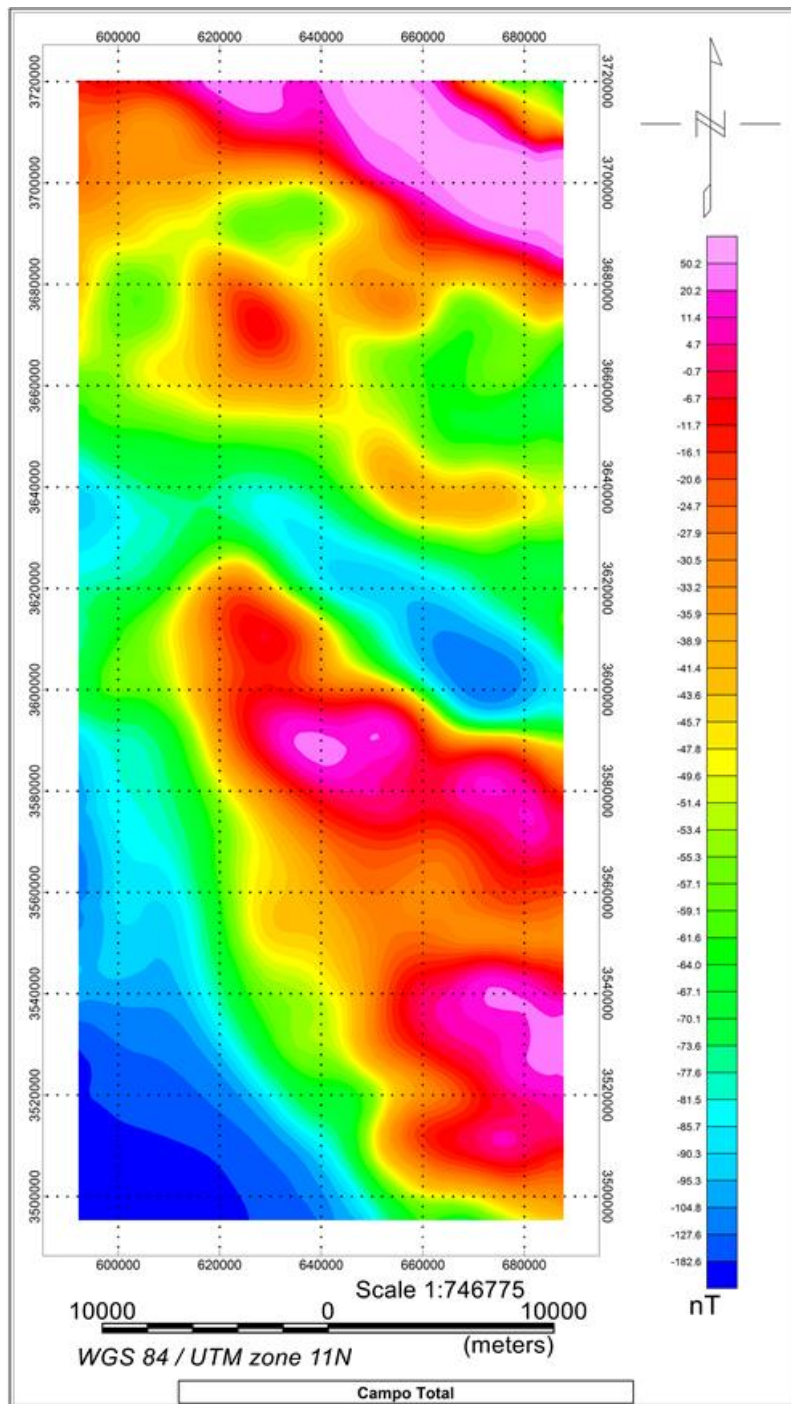


Figura 22. Mapa de campo magnético total en la zona de la Cuenca Laguna Salada, B. C., México.

El análisis del campo magnético anómalo reducido al polo muestra los conjuntos de fuentes en su posición física verdadera. La inclinación magnética de la Sierra Cucapáh induce que las anomalías magnéticas estén situadas fuera de sus fuentes magnéticas y den una falsa posición

de las estructuras geológicas de interés, por lo que el cálculo de la anomalía de reducción al polo ubica la anomalía magnética sobre la fuente real, haciendo que coincidan con los cambios litológicos y estructuras que las originan (Figura 23).

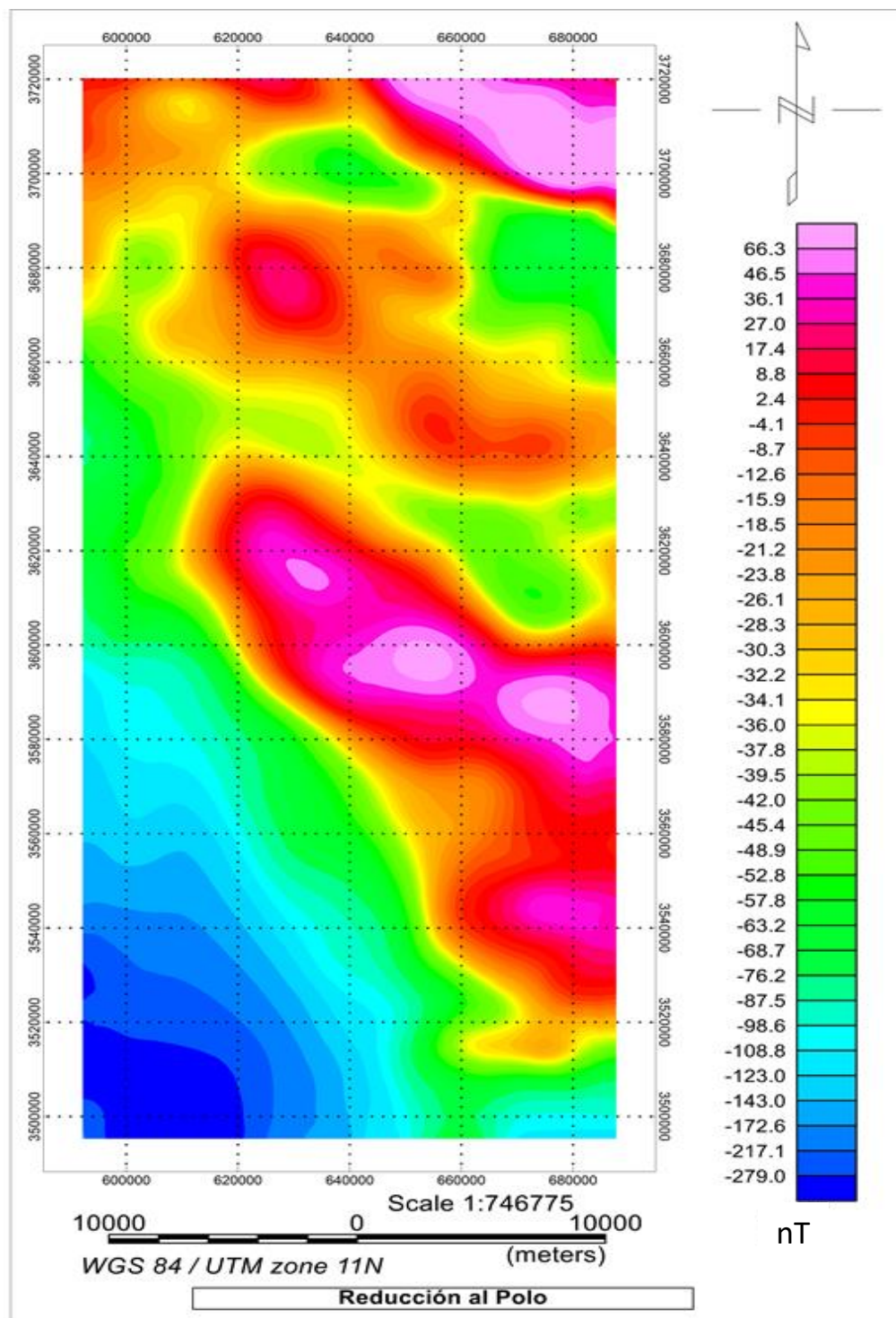


Figura 23. Mapa de anomalía reducida al polo de la Cuenca de Laguna Salada.

Con el objeto de analizar los principales lineamientos en la región de estudio, se aplicó la técnica de señal analítica, la cual consiste en presentar la anomalía magnética libre de la respuesta debida a la inclinación magnética e independiente a la dirección de cualquier campo potencial. Se forma a través de los gradientes horizontal y vertical inherentes a la anomalía. Este método genera una respuesta de forma que depende de la localización del cuerpo en profundidad pero no de la magnetización del mismo. El procedimiento matemático consiste en el cálculo de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las tres componentes del gradiente espacial del campo magnético reducido al polo, siendo muy útil para localizar los bordes de las fuentes magnéticas, especialmente cuando la magnetización remanente complica la interpretación (Figura 24).

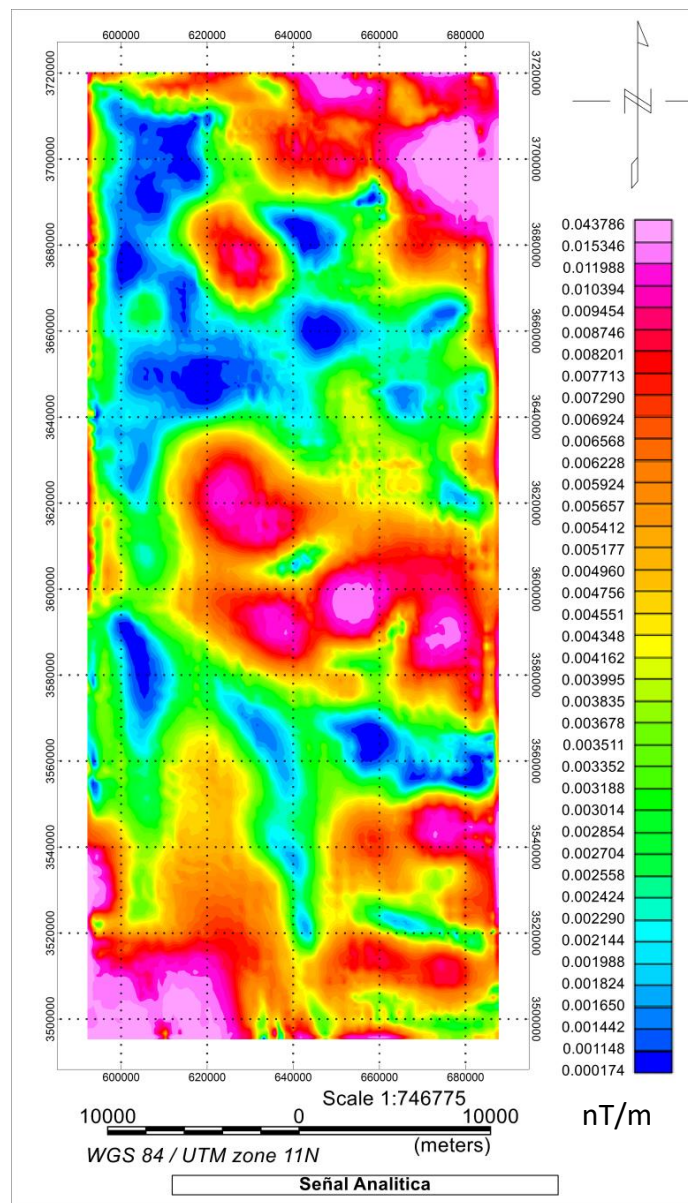


Figura 24. Mapa de respuesta de la señal analítica de la Cuenca de Laguna Salada.

### 8.3.2. Percepción remota

#### 8.3.2.1. Satelital

Las imágenes multispectrales satélites al momento de adquirirse ya se descargan pre-procesadas. Cuando se obtienen se deberá verificar la fecha y porcentaje de nubosidad, ya que la presencia de nubes pone en riesgo la calidad de los datos. Una vez verificados estos parámetros y descargadas las imágenes (Figura 25), se seleccionan las bandas a procesar a partir del interés en cuanto a respuesta mineralógica asociada a alteración por hidrotermalismo. Para fines de este proyecto se utilizaron las bandas del Landsat 7: 1, 2, 3, 4, 5 y 7.

Toda la radiación emitida por el Sol y registrada por los sensores pasa a través de la atmosfera terrestre, el contenido de gas y partículas suspendidas. Estos efectos pueden tener un impacto sustancial sobre los datos medidos por los detectores (Campbel et al, 2011), por lo que una serie de procesos (operadores matemáticos simples) son llevadas a cabo para separar la información recibida del sensor de todas aquellas perturbaciones que no sean debidas a la propia naturaleza del medio. La técnica generalmente aplicada para corregir las imágenes consiste en la sustracción del cuerpo oscuro propuestas por Chávez (1975). Esta es una técnica simple y directa con la cual se normalizan las imágenes multispectrales mediante el ajuste de las variaciones en los valores digitales causado por atenuaciones atmosféricas, ya que trabaja con los propios valores de la imagen. Se asume el conocimiento de un cuerpo con 0% de reflectancia dando como resultado un valor pixel de cero, esto puede ser debido a un cuerpo de agua. Se realiza mediante el análisis del histograma en el cual se buscan los valores más bajos del mismo y que son mayores a cero, este valor se debe a la dispersión atmosférica sobre la onda electromagnética y este valor debe ser sustraído de tal manera que los histogramas de cada imagen comiencen siempre en ceros.



Figura 25. Imagen satelital correspondiente a la banda 4 sin procesar.

Para realzar (resaltar características del objeto geológico) la información espectral deseada de las bandas de interés, el método permite identificar materiales a partir de su firma espectral. Se utilizaron las imágenes ya corregidas y recortadas para el área de estudio de la Cuenca de Laguna Salada. Se requirió descargar de dos sitios distintos debido a la localización y extensión del área estudiada. Cada una se procesó por separado y posteriormente se homogeneizó el histograma para unir los datos y tener una sola imagen representativa del área (Figura 26).



Figura 26. Ventana completa de la zona de la Laguna Salada.



Con base en las características de las firmas espectrales del suelo árido, vegetación, óxidos e hidróxidos, se seleccionan las bandas donde se tiene conocimiento de los valores aproximados de reflectancia. Los cocientes de bandas espectrales considerados fueron (Notas de la asignatura de Percepción Remota, 2017):

- 4/3. Este cociente resaltará la vegetación sana (alta reflectancia en el infrarrojo cercano y baja reflectancia en el rojo).
- 3/1. Cociente que resalta oxidación (alta reflectancia en el rojo y baja reflectancia en el azul).
- 5/7. Cociente que resalta los hidroxilos (Alta reflectancia en el infrarrojo medio y baja en el infrarrojo lejano).

Puesto que estamos tratando con cocientes matemáticos (la respuesta es en longitud de onda), es necesario considerar que el valor del denominador no puede ser cero, por lo que se hace una reclasificación de valores digitales, en el cual se le asigna un valor 1 de a todos los píxeles con valores entre 0 y 1. Para tener una mejor visualización de los resultados y obtener mejores productos se aplicó a los resultados de los cocientes una deformación lineal del histograma con una saturación del 1% (Notas de la asignatura de Percepción Remota, 2017).

Posteriormente se realizaron composiciones a falso color. Este proceso consiste en elegir tres bandas y asociarlas a los tres colores primarios (rojo, verde y azul) para dar una mejor discriminación y realce entre los tipos de cobertura de interés. Se desea asociar los colores observados con las características de reflectancia espectral, en otras palabras, enfatizar la respuesta espectral de los materiales de interés. Con una composición a color de los resultados es posible extraer información combinando bandas de diferentes reflectancias para los distintos materiales en superficie (Notas de la asignatura de Percepción Remota, 2017).

Para los fines de este proyecto se realizaron 6 composiciones, 1 a color real y 5 a falso color, las cuales se explican a continuación:

- Composición a color real (RGB-321). Mediante esta composición se observa la superficie con sus colores naturales, siendo la composición básica en todo proceso de percepción remota (Figura 27).

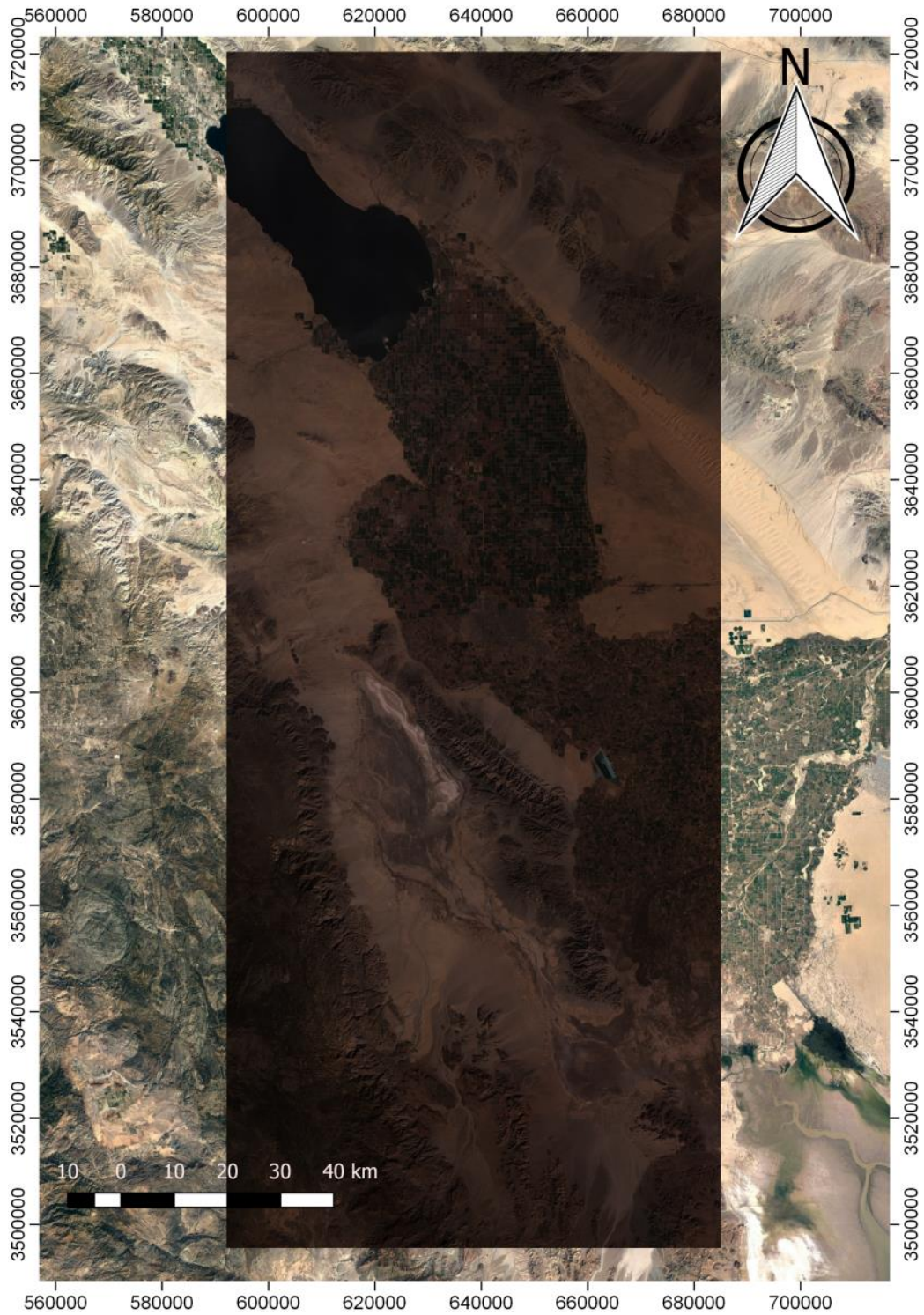


Figura 27. Composición en color real del área completa a partir de imágenes satelitales.

- Composición a Falso Color (RGB-432). Esta composición delimita áreas urbanas y de vegetación de forma que se pueda saber si un área está siendo afectada por actividad humana se resaltara en cian y colores gris opacos mientras que la vegetación tiende a adquirir color rojo (Figura 28).

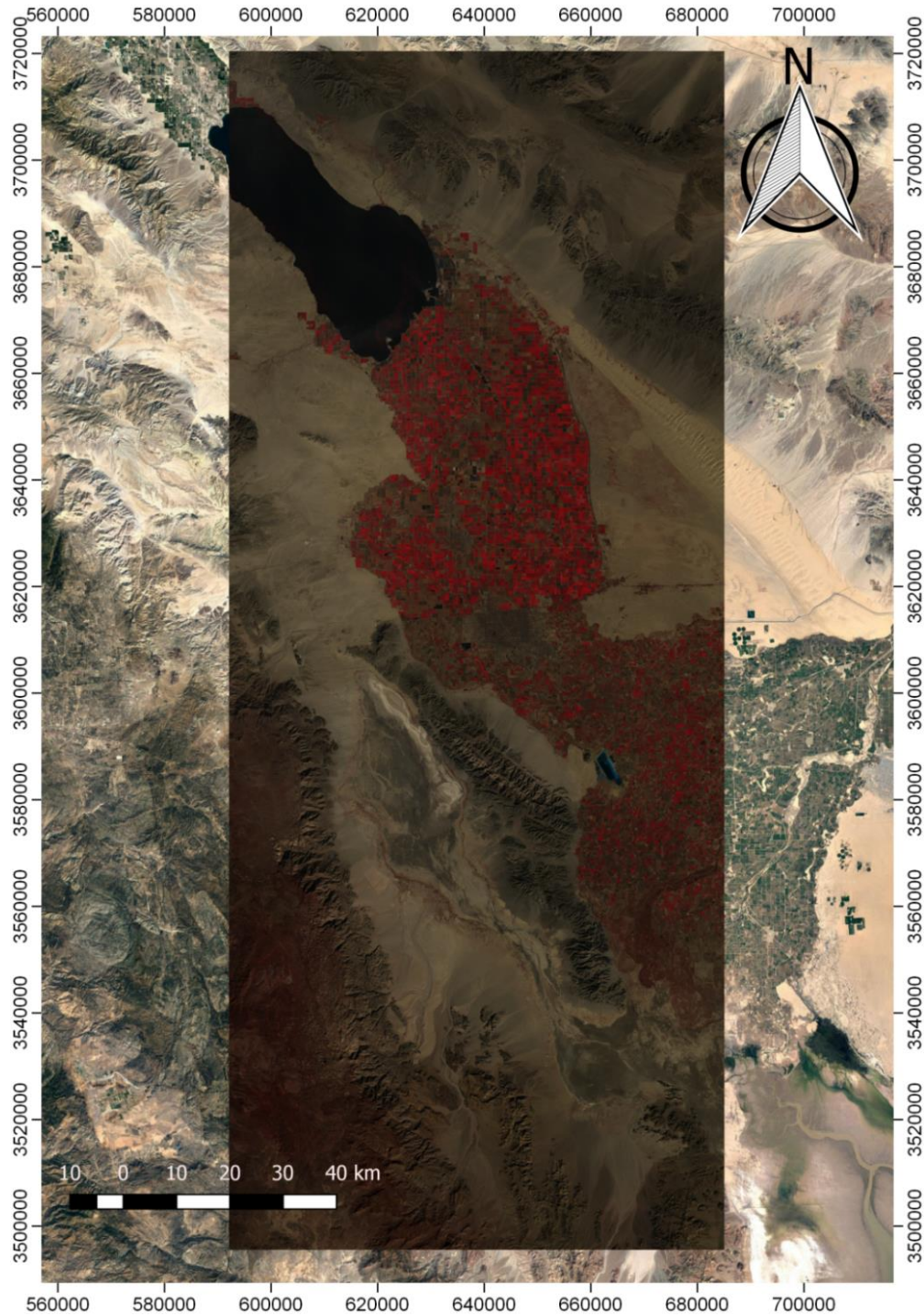


Figura 28. Composición a falso color del área completa de Laguna Salada, B. C., México.

- Composición Óxidos\_Vegetación\_Hidroxiilos (RGB- 3/1, 4/3, 5/7). Esta composición se realiza colocando en le banda del rojo los elementos que más reflejan una oxidación superficial y en el azul los elementos con oxidación debido a saturación o procesos asociados a alteraciones hidrotermales, la respuesta amarilla se asocia la vegetación por cultivo y el morado a un suelo desnudo sin ningún tipo de alteración (Figura 29).

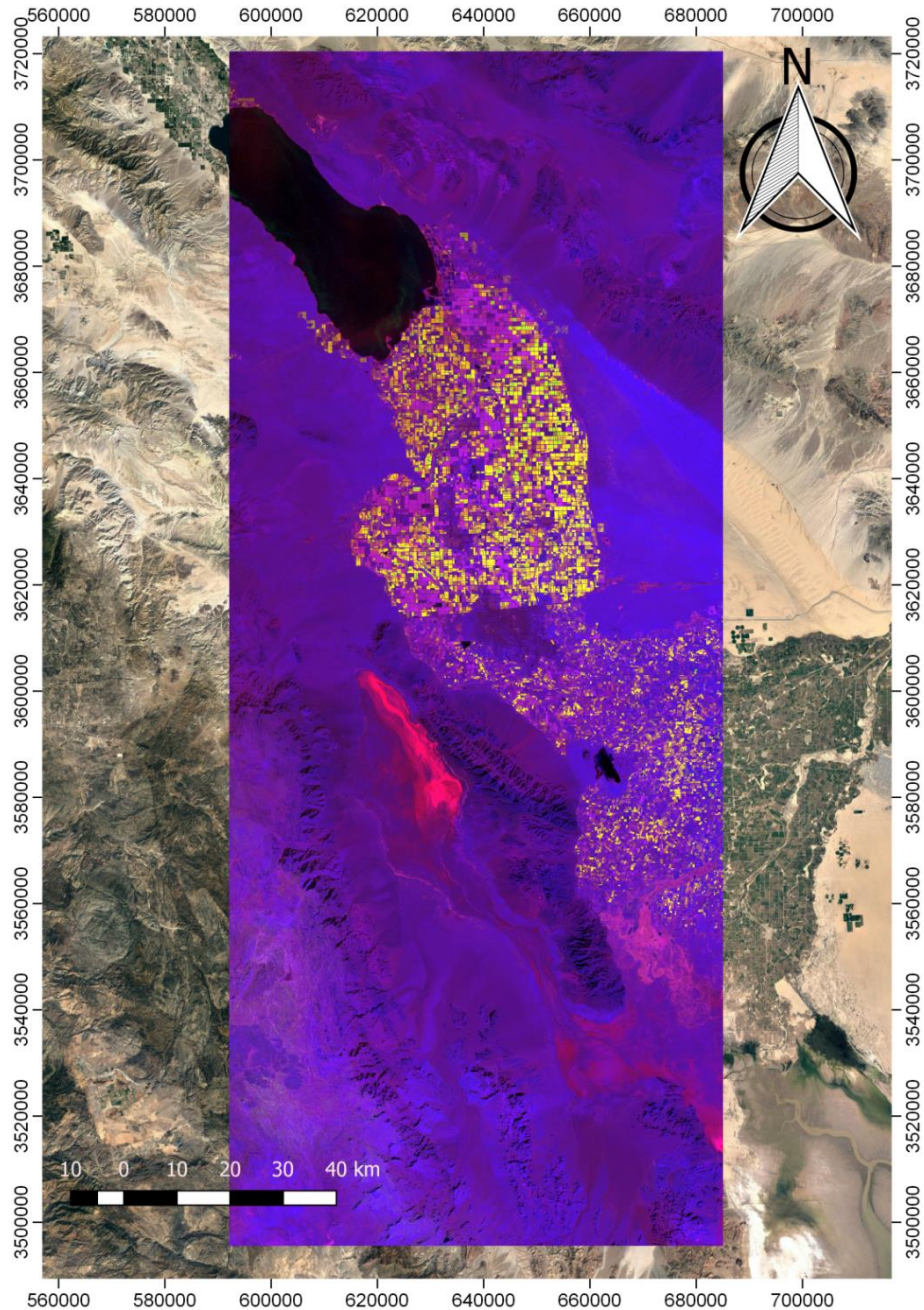


Figura 29. Composición a falso color para Óxidos, Vegetación, Hidroxiilos en Laguna Salada, B. C., México.

- Composición Óxidos\_Hidroxiolos\_Óxidos+Hidroxiolos (RGB-3/1, 5/7, 3/1 + 5/7). La composición con óxidos e hidroxiolos se realiza colocando el cociente que resalta oxidación en la banda del rojo y las alteraciones por saturación en la banda del verde. También se utiliza en la suma de estos dos cocientes, desplegando el resultado en color azul, de esta manera se analiza de manera más detallada los diferentes tipos de alteraciones en superficie (Figura 30).

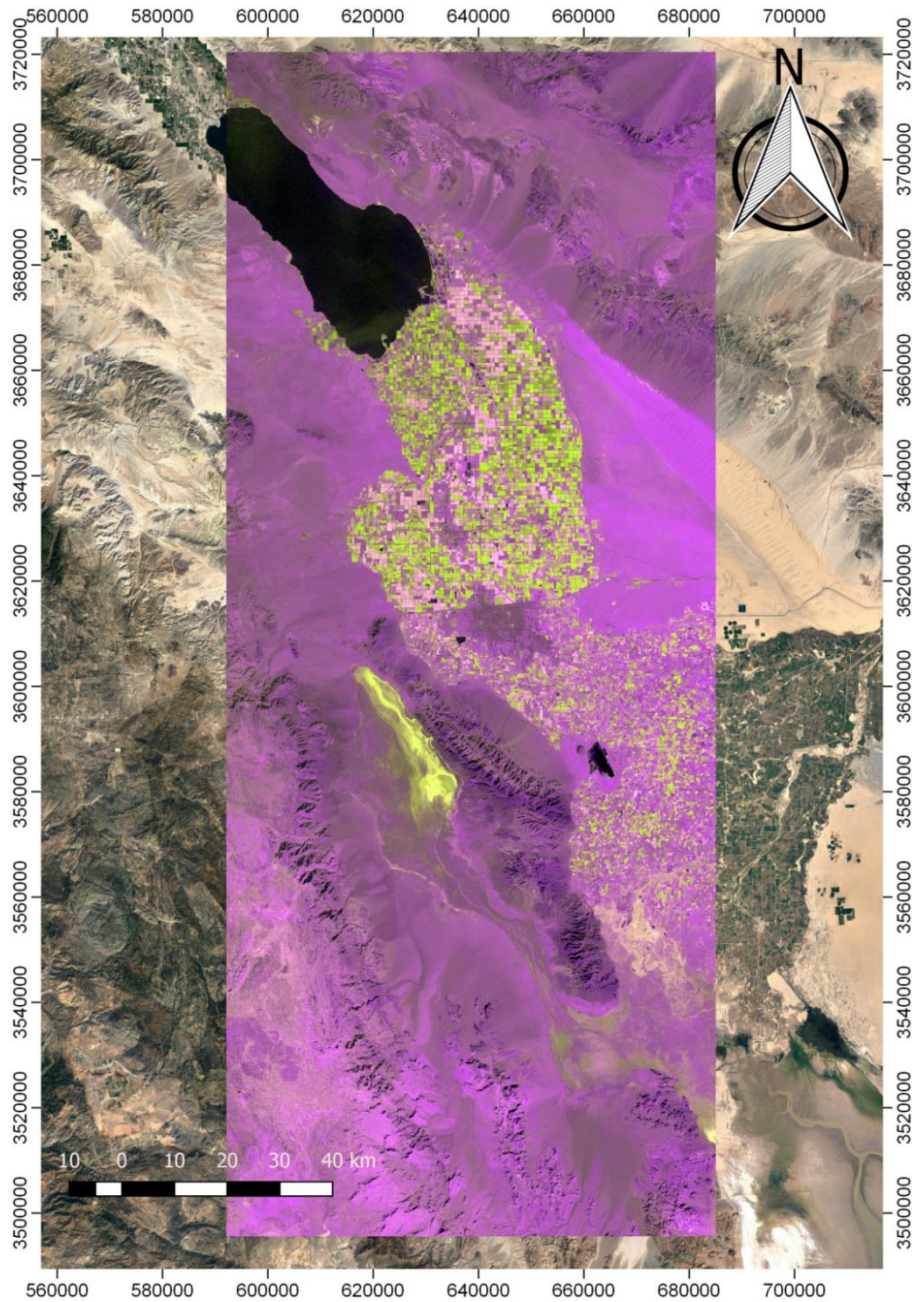


Figura 30. Composición a falso color Óxidos, Hidroxiolos, Óxidos+Hidroxiolos en Laguna Salada, B. C., México.

- Composición 731 (RGB - Banda 7, Banda 3, Banda 1). Esta composición hecha a partir de las bandas del infrarrojo lejano, el rojo y el azul, nos ayuda diferenciar tipos de rocas, definir anomalías de color que generalmente son amarillentas a un color café claro y verde, la vegetación es verde oscuro a negro, los cuerpos de agua se presentan en color negro con algunas coloraciones azul celeste, dependiendo de su contenido mineral (Figura 31).



Figura 31. Composición a falso color 731 en Laguna Salada, B. C., México.

- Composición 742 (RGB – Banda 7, Banda 4, Banda 2). Se realizó combinando las bandas del infrarrojo lejano (FIR, por sus siglas en inglés) donde los minerales arcillosos absorben la energía.

La banda del infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que cubre el segmento donde la vegetación refleja fuertemente y la banda del verde en la cual los minerales con óxidos de hierro y arcillas absorben la energía.

Las rocas pueden describirse según sus contenidos de óxido de hierro y arcillas, esta combinación de bandas permite una buena discriminación geológica (Notas de la asignatura de Temas Selectos de Exploración Minera, 2017). Las rocas ricas en óxidos de hierro como los basaltos o las lateritas tienden a verse en rojo, mientras que aquellas ricas en arcillas, como los depósitos detríticos (arenas, conglomerados) tienden a coloraciones azules. Las rocas félsicas son de colores pálidos, las rocas silíceas suelen verse de azules claros y la vegetación se observa verde (Figura 32).

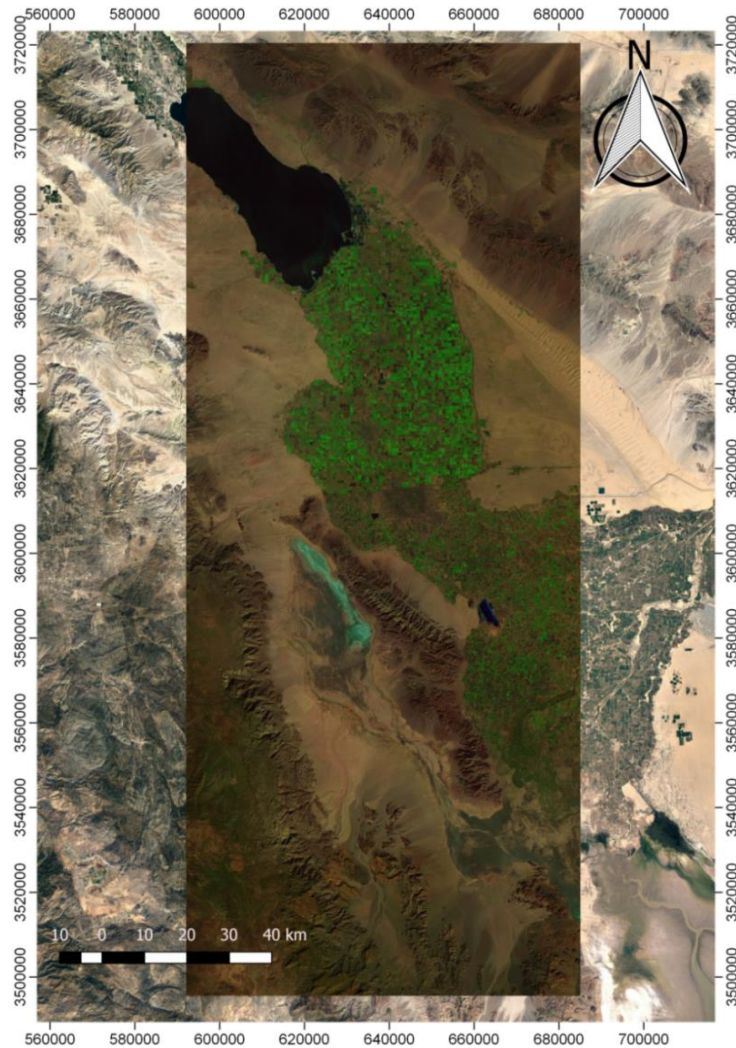


Figura 32. Composición a falso color 742 en Laguna Salada, B. C., México.

### 8.3.2.2. Drone

El procesado de las imágenes RGB y termográficas adquiridas con Drone permite generar mapas a detalle de ubicación y de anomalías. Para obtener resultados completos se calibran las imágenes a partir de los puntos GPS que graba el equipo M600 Pro al momento de tomar la captura y, con el valor de altura, se obtiene la matriz de valores de cada imagen. Para generar los mapas se aplica un algoritmo de reconstrucción de superficies de Poisson (Figura 33).

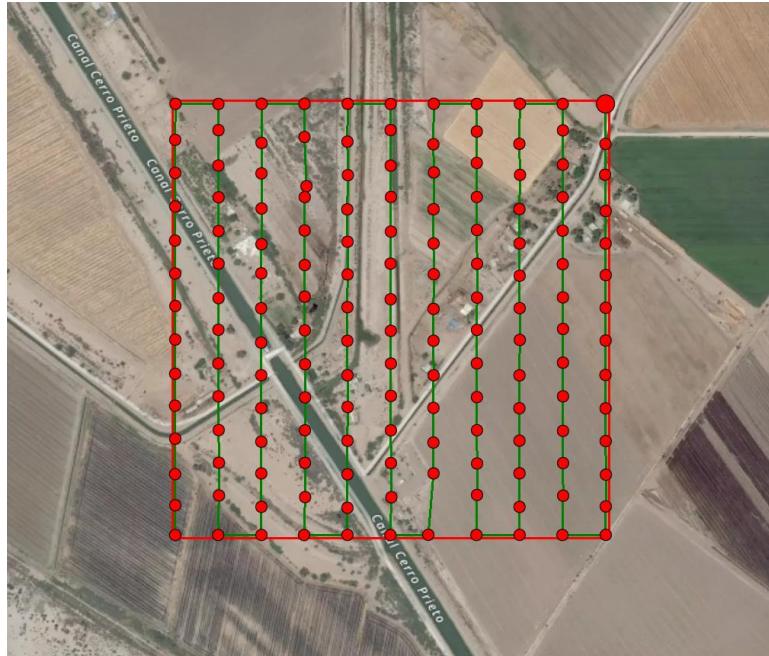


Figura 33. Ejemplo de una previsualización correspondiente a un programa de vuelo con drone.

Para el análisis RGB de estas imágenes es necesario descomponer la imagen 4K en 3 bandas:

- Rojo (660 nm)
- Verde (550 nm)
- Azul (470 nm)

Los resultados llevan el nombre de mapas de reflectancia, cada uno muestra un valor ya sea en escala de grises o de colores dentro del rango de 0 a 255 ya que se trata de imágenes de 8 bits (256 valores posibles para cada pixel).

Para los análisis de imágenes multispectrales satelitales es necesario corregir el ángulo de toma de datos del sensor, así como una corrección atmosférica para eliminar la dispersión que se genera cuando la onda entra en contacto con la atmosfera terrestre. El uso de un dron nos evita



tener que realizar dichas correcciones, ya que, el sensor se encuentra muy cerca del material reflectante en comparación a un sensor satelital.

El procesado desde el ingreso de los datos hasta la impresión de la imagen TIFF es:

- Correlación de los puntos GPS del archivo de datos y la fotografía de campo.
- Calibración de la cámara
- Extracción de MDT y nube de puntos
- Filtrado y optimización de la nube de puntos
- Corrección automática de brillo y color
- Fusión de proyecto

La obtención de la escala de grises nos muestra los valores absolutos que contiene cada pixel, ésta representación nos ayuda a discriminar áreas con respuestas espectrales muy continuas (Figura 34).



Figura 34. Ejemplo de una Imagen en escala de grises obtenida mediante Drone con una resolución de 3cm/PX

## 9. Análisis de resultados

La exploración geofísica está constituida por una serie de técnicas que, en su conjunto, permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas de los materiales que forman la corteza terrestre, como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de las ondas elásticas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras.

La medición y distribución de estas variaciones permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los que se conocen las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática.

Con tal información se generan modelos de inversión y, a partir del análisis de cada una de las técnicas empleadas y de aquellas que se correlacionan entre sí se busca de hacer una valoración del subsuelo con objetivos particulares, por ejemplo, alteración hidrotermal con fines exploratorios de depósitos minerales o campos geotérmicos.

### 9.1. Gravimetría

En la parte oeste del mapa se observa que la Cuenca Laguna Salada (área de trabajo) se caracteriza por dos bajos gravimétricos separados por un alto gravimétrico angosto de baja intensidad. Al norte se define la Cuenca Laguna Salada y al sur la Cuenca Las Tinajas (Chanes-Martínez, 2012). En la parte central existe el alto gravimétrico que se ubica al oeste de la Sierra El Mayor. Regionalmente el mapa de anomalías (Figura 35) muestra 5 bajos gravimétricos Laguna Salada, las Tinajas, Montague, Cerro Prieto y Altar. (Clemente 2013). \* Los datos de estudios gravimétricos previos son propiedad de Petróleos Mexicanos, y fueron correlacionados y corregidos con datos estratigráficos obtenidos por la CFE para el proyecto “Sísmica de reflexión en Laguna Salada, Baja California, México” (realizado por el CICESE) y presentado como Tesis de maestría por Clemente German Gallardo Mata en el 2013.

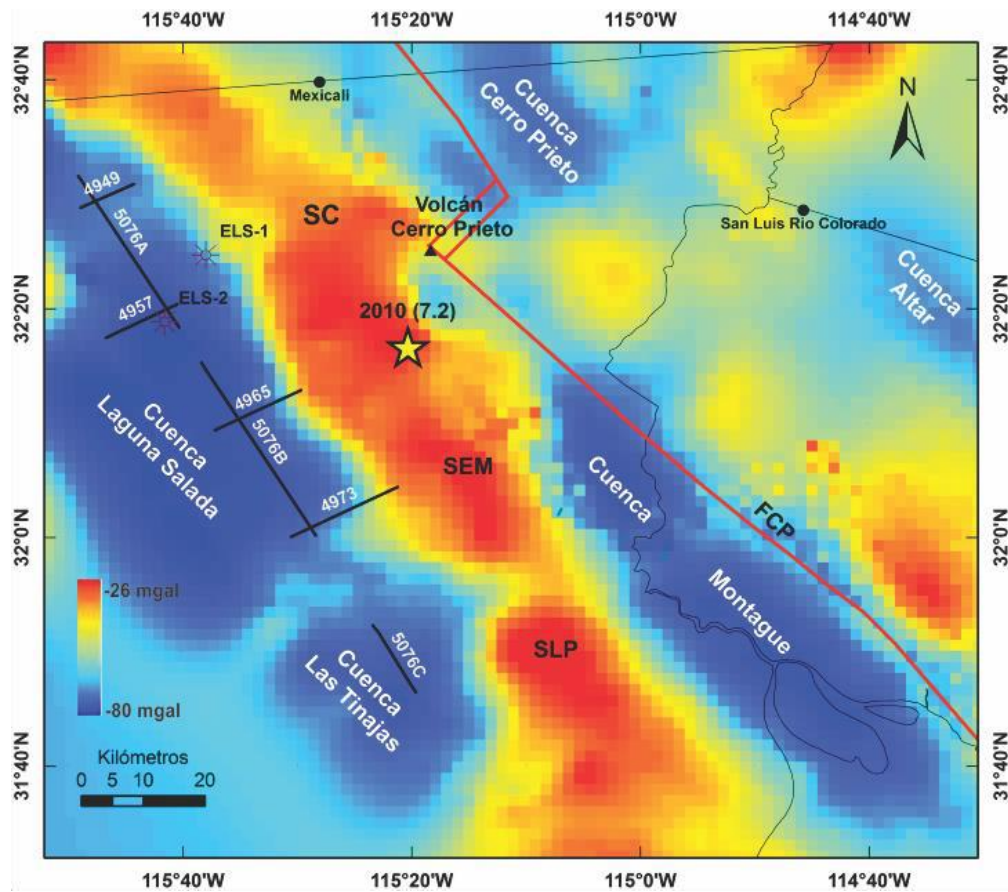


Figura 35. Mapa de anomalía de Bouger (Clemente, 2013).

## 9.2. Magnetometría

Los mapas de anomalías magnetométricas obtenidos se analizaron por tipo de procesado. Cada uno de los mapas generados representa una aproximación distinta a la respuesta magnética del medio. En esta sección se presentan y analizan los resultados considerando los mapas de contorno a un nivel semi-regional.

Una anomalía magnética se asocia a la magnetización remanente en las rocas que componen la corteza terrestre y al contenido de minerales ferromagnéticos de las mismas. Mientras mayor sea el contenido de minerales con propiedades magnéticas, mayor será su respuesta en intensidad magnética. Los mapas obtenidos son a partir de levantamientos magnéticos, satelitales, aéreos y terrestres compilados en una base de datos llamada "EMAG2" correspondiente a la segunda versión de esta misma base. Los datos procesados posteriormente para este reporte proporcionan información sobre la composición de la corteza terrestre somera de la zona de interés. Estos mapas, combinados con información geofísica y geológica, pueden conducir a una aproximación de la localización de zonas con potencial geotérmico, estructuras geológicas y litologías específicas.

### 9.2.1. Anomalía magnética de campo total

El mapa de campo magnético total representa la intensidad de campo medida en el sitio. En este mapa todas las tendencias temporales se han eliminado. Dentro del área de estudio, el campo magnético varía entre 60 y -190 nT, lo que resulta en un rango de 200 nT. Se puede observar la mayor intensidad a lo largo de Sierra Cucapáh y que se extiende hacia el sureste, hacia la zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, continuando al sureste y con variaciones alrededor de la misma. El campo magnético medido mantiene un decaimiento constante en la Laguna Salada, donde la intensidad es menor en la margen occidental, paralelo a la Sierra de Juárez. Hacia el SE el campo magnético vuelve a presenta un máximo menos intenso en el área correspondiente al Delta del Rio Colorado. La variación del campo en el borde de la Sierra Cucapáh con la Laguna Salada puede ser debida a la dirección de una estructura regional orientada NW-SE (Figura 36).

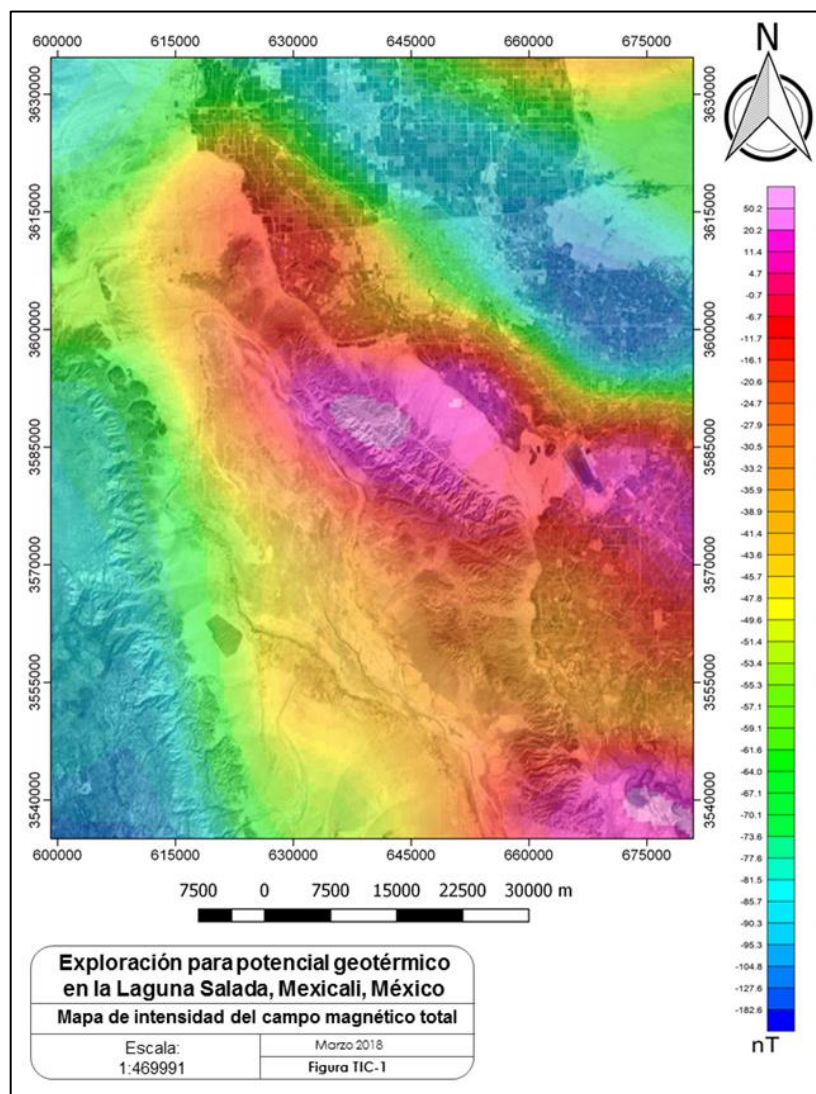


Figura 36. Mapa de Campo Total de la zona de estudio.

### 9.2.2. Reducción al Polo

Mediante el proceso matemático denominado Reducción al Polo es posible definir la posición geoespacial de los cuerpos cuyas intensidades magnéticas destacan por medio de las anomalías dipolares. De esta manera podemos ubicar la posición X y Y de los cuerpos y su extensión en superficie (por tanto su orientación general), así como los contrastes laterales asociados a estructuras geológicas que pudiesen ser indicadoras de los procesos magmático y tectónicos que caracterizan la zona. En el mapa de reducción al polo de la zona de estudio (Figura 37) se muestra la intensidad del campo magnético reducida al polo.

Como se esperaba, las anomalías se desplazan hacia el norte, estando por tanto ubicándose en una posición más precisa. Los efectos de la declinación y la inclinación magnética se han eliminado. Vale la pena mencionar que este mapa se usa para posteriormente calcular la Señal Analítica. Aquí, se concluye que hay una estructura que causa el contraste justo en el borde la Sierra Cucapáh con la Laguna Salada y que se extiende marginalmente por todo el borde de la sierra.

Esta estructura está orientada en dirección NW-SE y se correlaciona con una falla normal en el borde de la sierra. Las variaciones en el campo, las cuales fluctúan entre 70 y -280 nT, caracterizan el cambio de los cuerpos intrusivos ígneos que constituyen la zona serrana respecto a los sedimentos lacustres como relleno detrítico reciente y depósitos evaporíticos de la laguna.

Al sur de la Sierra se observa otro máximo local con una intensidad de hasta 50 nT, el cual está asociado a los sedimentos palustres correspondientes al Delta del Rio Colorado (Figura 37).

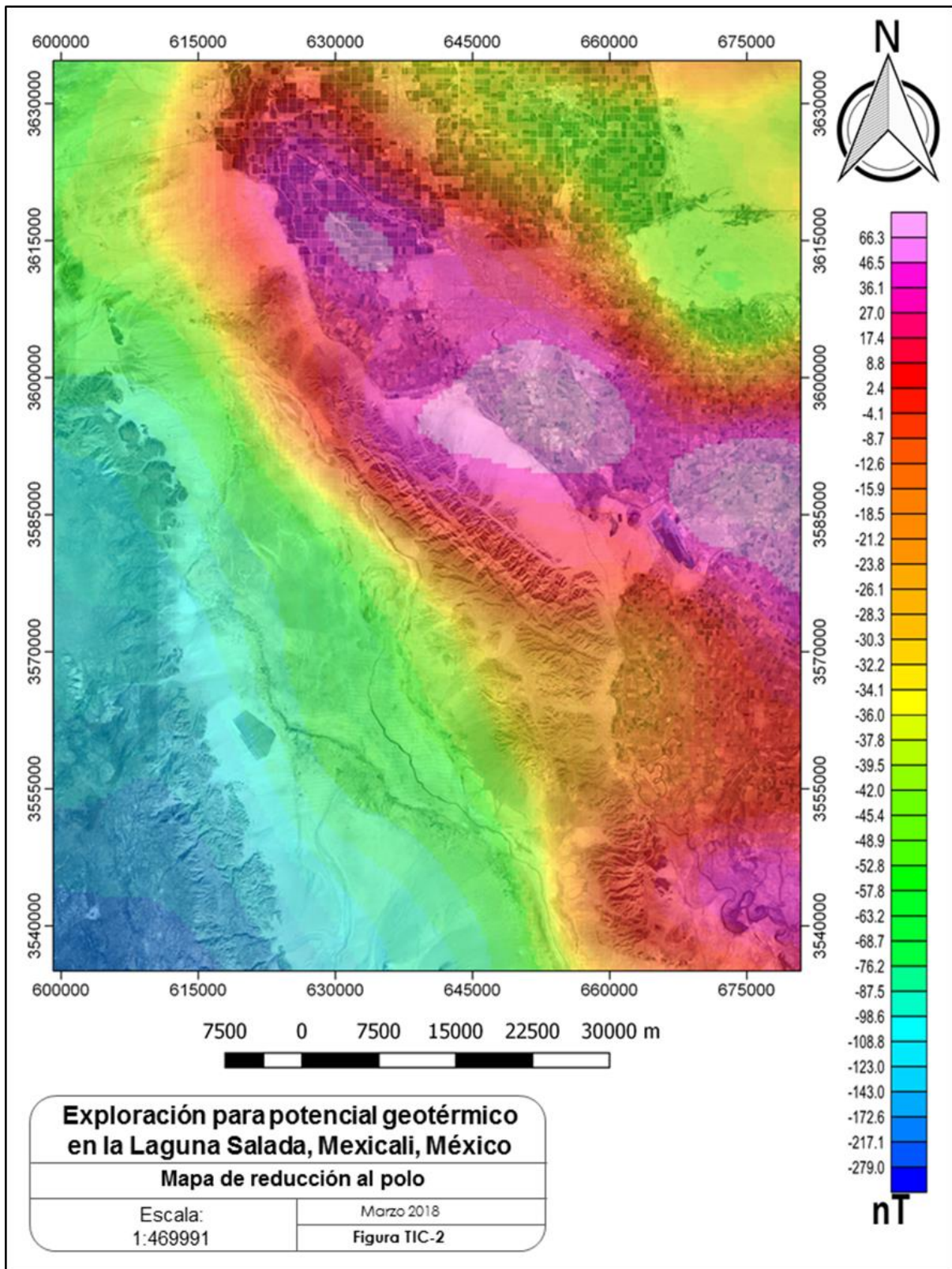


Figura 37. Mapa de Reducción al Polo en la Cuenca de Laguna Salada.

### 9.2.3. Señal Analítica

Este método fue de gran utilidad, pues como se mencionó anteriormente, es independiente del ángulo del vector de magnetización; es decir, sin importar la naturaleza dipolar de algunas de las anomalías de esta manera es posible observar las fuentes en su localización real.

La señal analítica indica bordes de los cuerpos magnéticos, como se resalta en las anomalías de la Figura 38. Los altos contrastes en la Cuenca de Laguna Salada indican la presencia de un cambio contrastante, al igual que en el área de Tulecheck, al oriente, donde se localiza el Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Los altos contrastes en la señal analítica revelan tal cambio como consecuencia posible de la litología y la presencia de una falla regional.

Estos contrastes también se han confirmado en el Valle Imperial de California, USA, donde están documentados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) varias zonas de interés geotérmico. Al occidente la Sierra de Juárez presenta valores más constantes en la señal, lo que coincidiría con un medio de baja magnetización, aun tratándose de materiales ígneos y metamórficos.

La margen norte de la Sierra Cucapáh presenta disminución en el valor del campo magnético, así como en la margen oriental, donde la variación en la respuesta de la señal analítica abarca el área conocida como Tulecheck, esta misma respuesta se puede observar alrededor de la actual planta geotérmica de Cerro Prieto, por lo tanto consideramos ambas zonas como de interés previo.

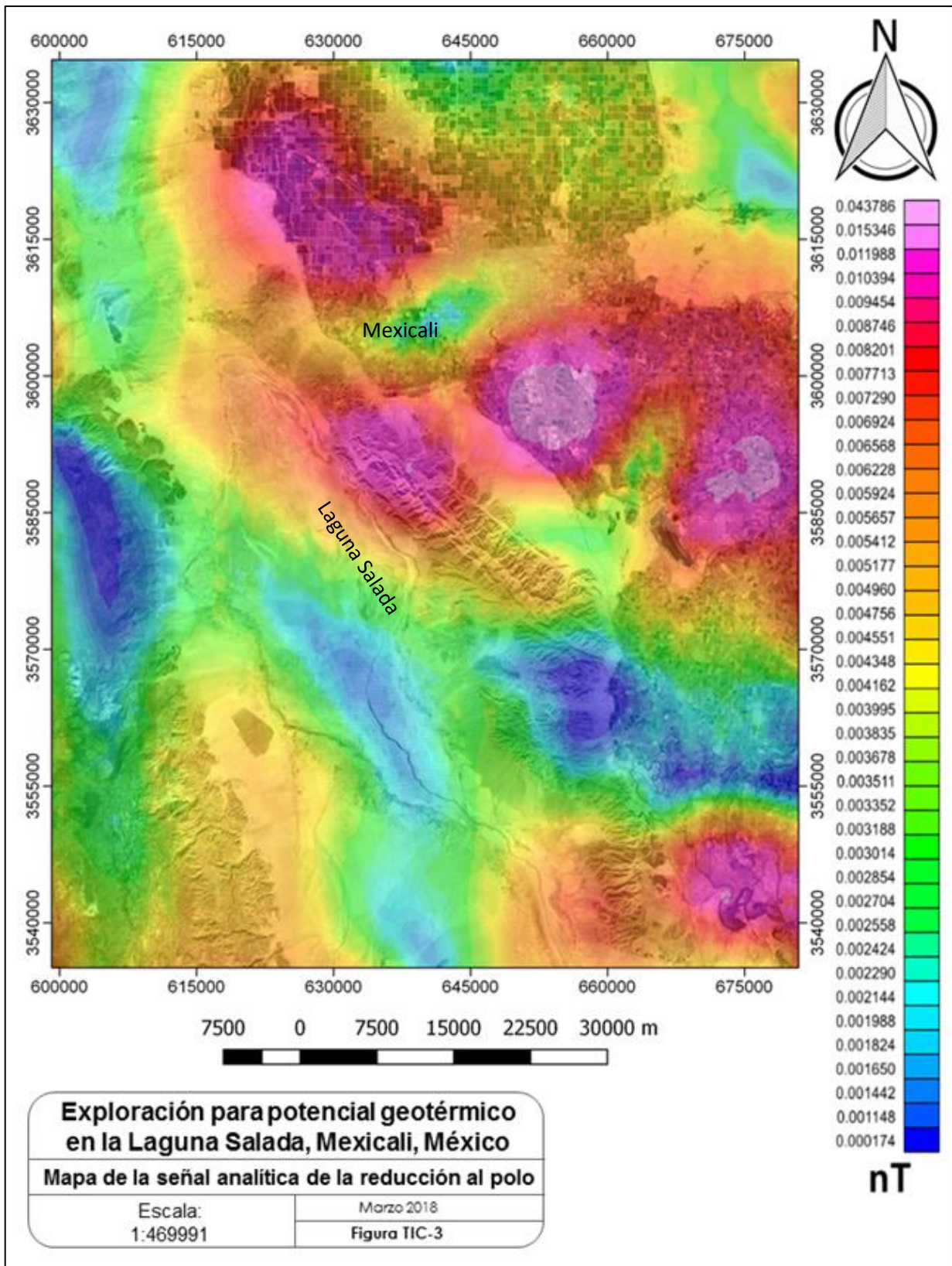


Figura 38. Mapa de la Señal Analítica en la Cuenca de Laguna Salada y sierras marginales.



## 9.3. Percepción Remota

### 9.3.1. Satelital

Desde los primeros trabajos de Rowan et al. (1977) y Abrams et al. (1977), los cocientes entre bandas han sido empleados en distintos ambientes geológicos como estrategia de base para la exploración minera (Kaufmann 1989, Kruse 1989, Spatz y Taranik 1994, entre muchos otros). El análisis de imágenes multispectrales satelitales es una herramienta cada vez más utilizada para obtener resultados confiables de grandes extensiones de terreno de forma eficiente, económica y rápida.

En el área de estudio, fueron generados distintos cocientes entre bandas para las imágenes Landsat, con el objeto de detectar áreas de alteración, que puedan ser puestas en evidencia por la coexistencia de minerales con presencia de OH<sup>-</sup> (arcillas) y óxidos e hidróxidos de hierro (hematitas y limonitas).

La respuesta asociada a la presencia de alteraciones ha sido investigada por varios autores mediante espectros de campo y laboratorio (Rowan *et al.* 1977, Hunt y Ashley 1979) y más recientemente, a través de mediciones de campo realizadas con espectrómetros portables de la serie PIMA (Thompson *et al.* 1999). En las rocas alteradas, los principales rasgos diagnósticos que se relacionan con la presencia de concentraciones anómalas de iones OH<sup>-</sup> y Fe<sup>+3</sup> pueden estar indicando la presencia de alteración hidrotermal. Para caracterizar las alteraciones del área de estudio, se utilizaron las mediciones de campo realizadas "in situ" con el espectro-radiómetro. Para su análisis, las alteraciones observadas fueron agrupadas en aquellas que responden básicamente a fenómenos de oxidación, argilización o parcial silicificación. En líneas generales, las rocas que fueron sometidas a procesos de alteración hidrotermal muestran una curva espectral más irregular en el infrarrojo cercano y de onda corta (bandas 4, 5 y 7 de Landsat) que las rocas frescas, las cuales muestran una respuesta bastante homogénea en ese espectro.

En particular, la presencia de arcillas, minerales laminares e hidratados ocurren en rocas que han sufrido argilización (formación de minerales de arcilla por desplazamiento o alteración feldespática de las rocas). El área genera rasgos de absorción característicos en el infrarrojo medio con un descenso pronunciado en la intensidad de la respuesta hacia longitudes de onda más largas (banda 7), que contrastan con una respuesta más elevada en el intervalo que corresponde a la banda 5 y manteniendo la forma de la curva espectral para las otras longitudes de onda. La presencia de óxidos e hidróxidos de hierro (hematitas y limonitas) genera rasgos característicos en el visible, infrarrojo cercano y medio, dando a la curva de reflectancia de las rocas que han sufrido oxidación una forma particular, con un aumento de la respuesta en la región del infrarrojo medio (banda 5 y banda 7) y una pendiente importante entre esta región y la del infrarrojo cercano (banda 4).

En el rango del espectro visible, estas rocas se caracterizan por una respuesta más elevada en el rojo (banda 3) que en el verde (banda 2) o azul (banda 1). En el caso de que ambos tipos de alteración coexistan en una roca, se presentarán los rasgos distintivos diagnósticos de ambos tipos de alteración. Por su parte, la presencia de silicificación (o rocas ricas en sílice) causa un aumento general en la intensidad de la respuesta respecto de la roca fresca, pero sin modificar sustancialmente la forma de la curva espectral. Este aumento relativo de la reflectividad se hace más notable en el infrarrojo medio correspondiente a la banda 5. En los casos en que la silicificación coexista con otro tipo de alteración, la respuesta elevada de la sílice puede enmascarar el efecto que debería provocar la presencia de otras alteraciones.

Para los objetivos del proyecto que sustenta este informe es necesario revisar las bandas del 1, 2, 3, 4, 5 y 7, con las cuales se realizaron las composiciones a color, cada composición tiene un resultado específico y mediante la conjunción de resultados se obtuvieron áreas con resultados favorables para posteriores estudios directos a detalle.

Los resultados de las composiciones se analizarán por mapa a continuación:

- El mapa a color real (Figura 39), nos muestra la distribución y elementos en superficie tal como se verían en una simple vista en un recorrido en campo. El mapa se puede utilizar para ubicar zonas conocidas, comunidades y caminos. La obtención de esta combinación de bandas es lo más básico y lo primero que podemos obtener al analizar imágenes multispectrales, también sirve como calibración y para corroborar que las reflectancias registradas si coincidan con lo presente en superficie.
- El mapa a falso color con las bandas 4, 3 y 2 (Figura 40), muestra en un color rojo intenso la vegetación saludable, en color Cian las zonas altamente urbanizadas y en color café las zonas con suelo desnudo. En el mapa se observa que la Ciudad de Mexicali presenta una respuesta opaca, esto debido a la baja urbanización y las constantes tormentas de arena que cubren todo el municipio. Dentro de la Laguna Salada se presenta vegetación con una reflectancia considerable en la banda 4, esta vegetación está asociada a zonas que llegan a contener agua cuando se encuentra saturada la laguna y debido a flujo proveniente del norte y sur.
- Para el mapa a falso color con las bandas 7, 3 y 1 (Figura 41), el uso de la banda correspondiente al infrarrojo lejano fue con el objetivo de diferenciar la litología en superficie y atenuar la señal de la vegetación que, en esta composición es color verde oscuro, se observa el color cian en la sección noreste de la Laguna Salada, justo en el borde de la Sierra Cucapáh y dentro del límite de los niveles de agua establecidos anteriormente en la figura 38. Esta respuesta puede ser debida al contenido de depósitos salinos presentes en superficie concediendo con la probable alteración hidrotermal. La propia Sierra Cucapáh presenta una respuesta distinta en su margen NE a comparación de

la margen SW. Esto puede ser debido al cambio litológico de los intrusivos ígneos con diversa composición mineralógica.

- El mapa a falso color con las bandas 7, 4 y 2 (Figura 42) se utilizó para discriminar de manera precisa la geología a partir del contenido de hierro y arcilla en las rocas. La laguna presenta la misma respuesta espectral que en la composición 731 (Figura 41) recalcando la presencia de anomalía por alteraciones. La margen NE de la sierra presenta un color verde opaco que fluye hacia la zona de Tulecheck. La respuesta rojiza de la margen SW de la Sierra Cucapáh indican materiales ricos en oxidación y lo sé que observa de color azul opaco a café claro coincide con la presencia de conglomerados y aluvión.
- El mapa a falso color con los cocientes  $3/1$ ,  $4/3$  y  $5/7$  se muestra en la Figura 43. Esta composición tiene como objetivo el presentar los minerales con cierta oxidación en color rojo, la vegetación sana en color verde y los elementos con alteraciones por OH- color azul. La superficie de la Laguna Salada muestra una respuesta con tonalidades rosas a rojizas debido a la evaporación de los cuerpos de agua generando oxidación en los elementos superficiales. La Sierra Cucapáh muestra el contraste de elementos de origen ígneo con una respuesta rojiza propia de la oxidación en el hierro, a diferencia de la margen SW, donde el color azul indica la presencia de alteración por hidroxilos. Es importante mencionar que la ubicación de las alteraciones por hidroxilos se encuentra más cerca de las fallas normales asociadas al tectonismo que dio lugar al bloque levantado de las sierras de Cucapáh y de Juárez.
- El mapa a falso color con los cocientes  $3/1$ ,  $5/7$  y la suma de los mismos cocientes ( $3/1+5/7$ ) correspondiente a la Figura 44. En este mapa se muestra en la ventana del rojo los materiales con contenido de óxidos, en la ventana del verde los elementos con hidróxidos y en la ventana del azul la combinación de la respuesta de los dos contenidos. Para resaltar las diferencias en las alteraciones, en la zona de Tulecheck se observan varios contrastes provenientes de la misma sierra en forma de lineamientos que corren paralelos a los flujos de agua cuando ocurren precipitaciones pluviales. Como respuesta quedan las alteraciones que son muy similares a las que se encuentran en el interior de la Laguna Salada y que continúan hasta el sur de la Sierra Cucapáh. Estas respuestas espectrales no se identificaron en la Sierra de Juárez, indicando que la zona con mayor posibilidad de presentar alteraciones hidrotermales son en las inmediaciones de la Sierra Cucapáh.

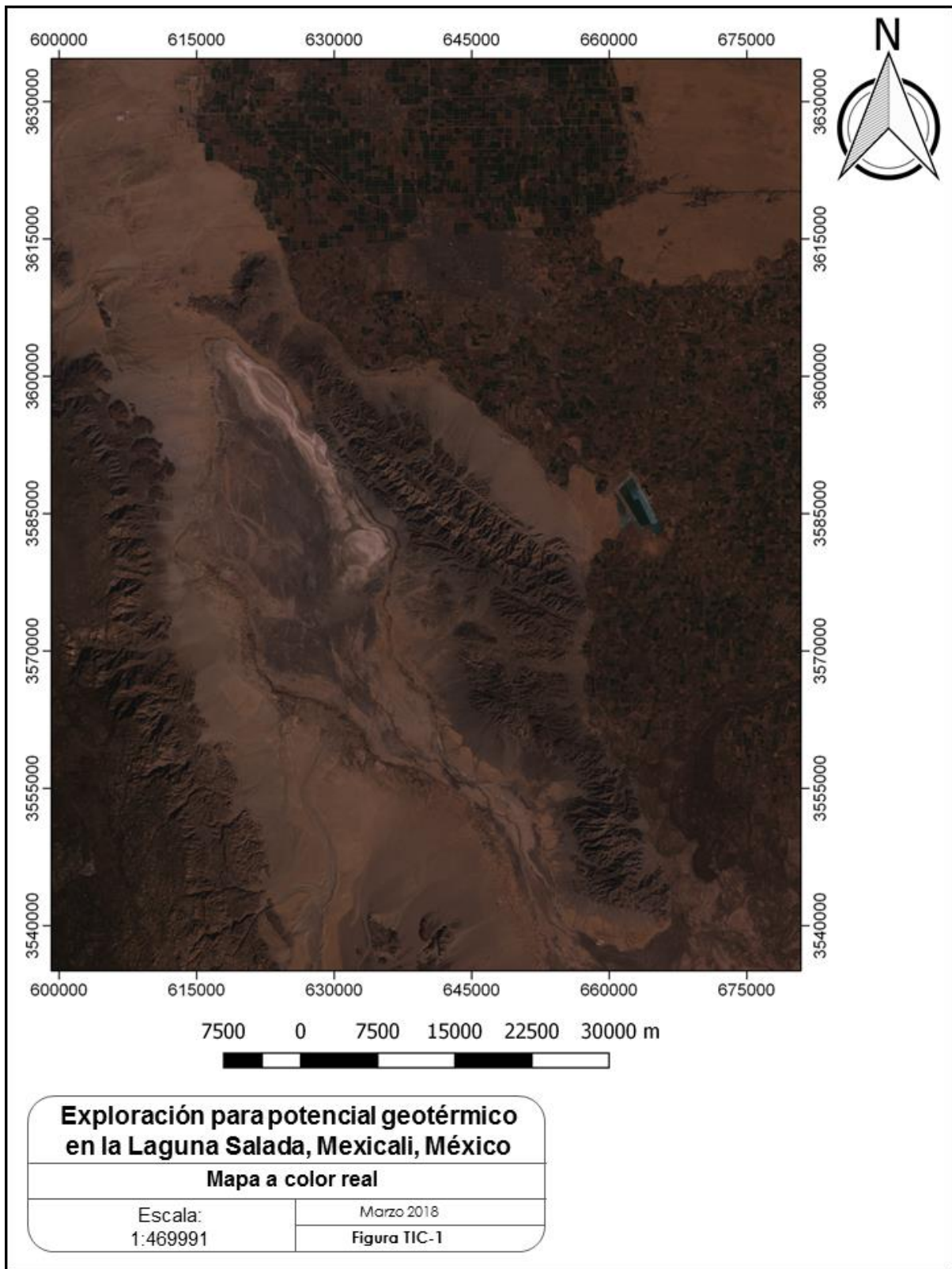


Figura 39. Mapa a color real del área de estudio.

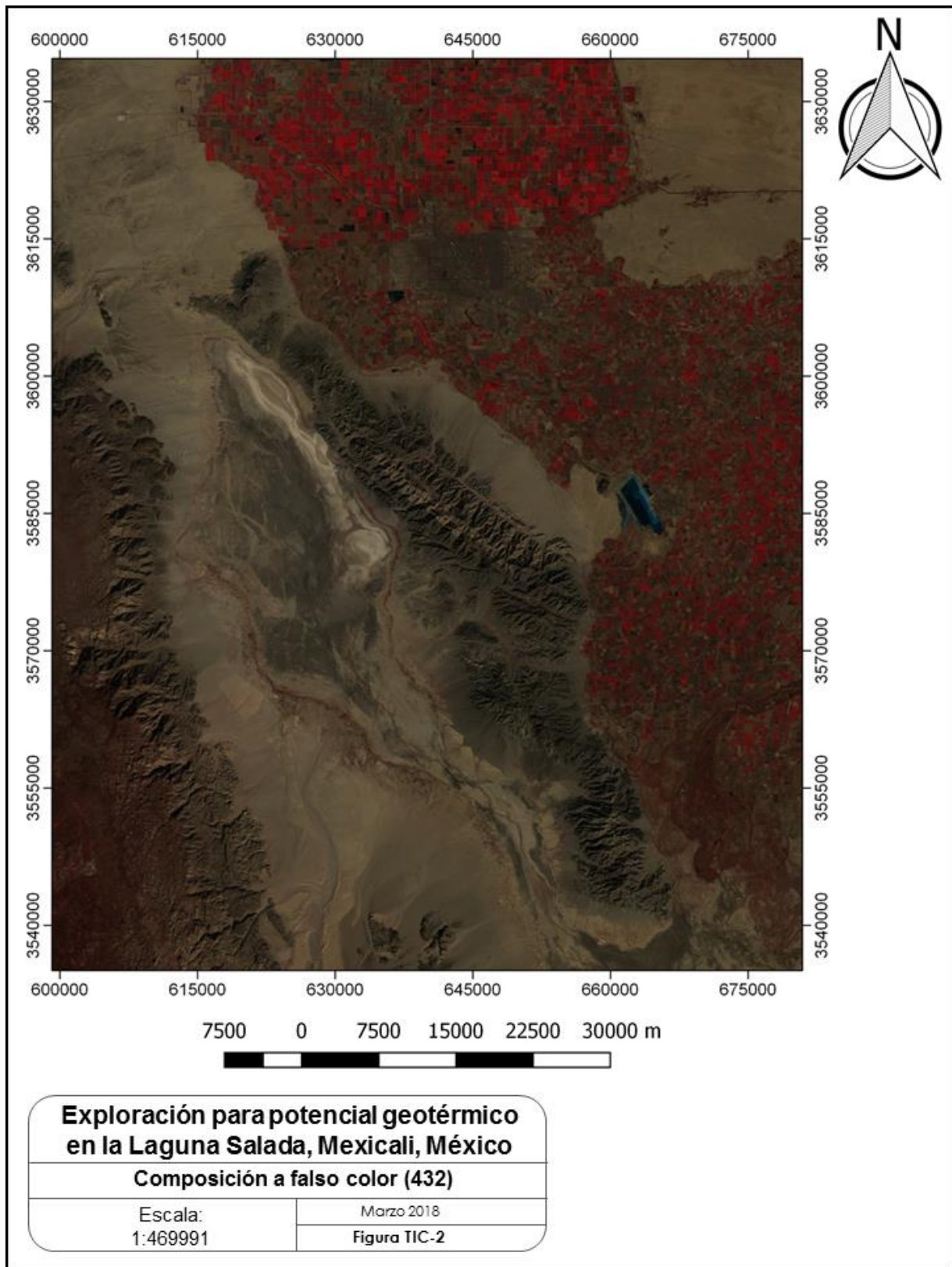


Figura 40. Composición a falso real del área de estudio.

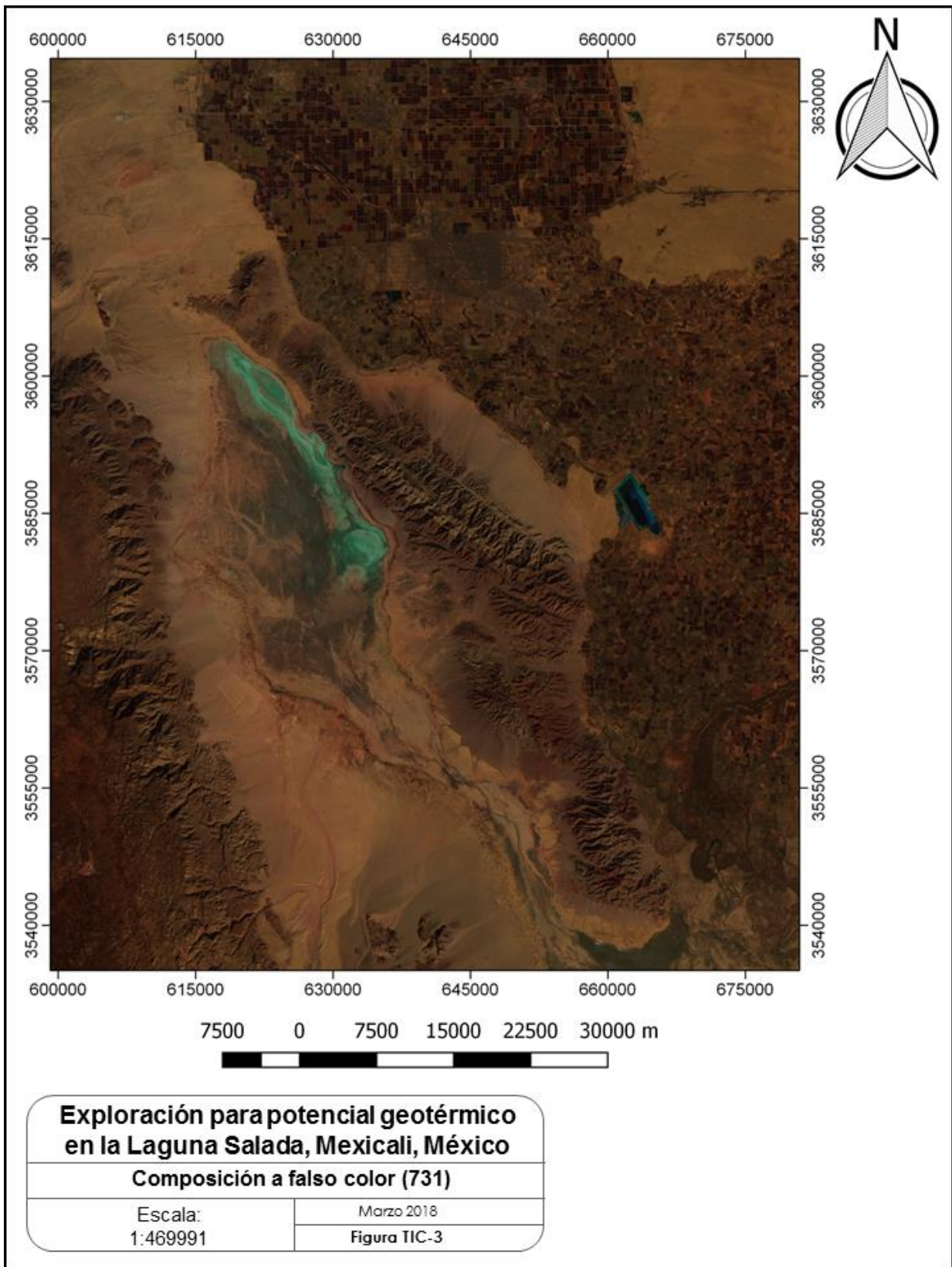


Figura 41. Composición 731 del área de estudio.

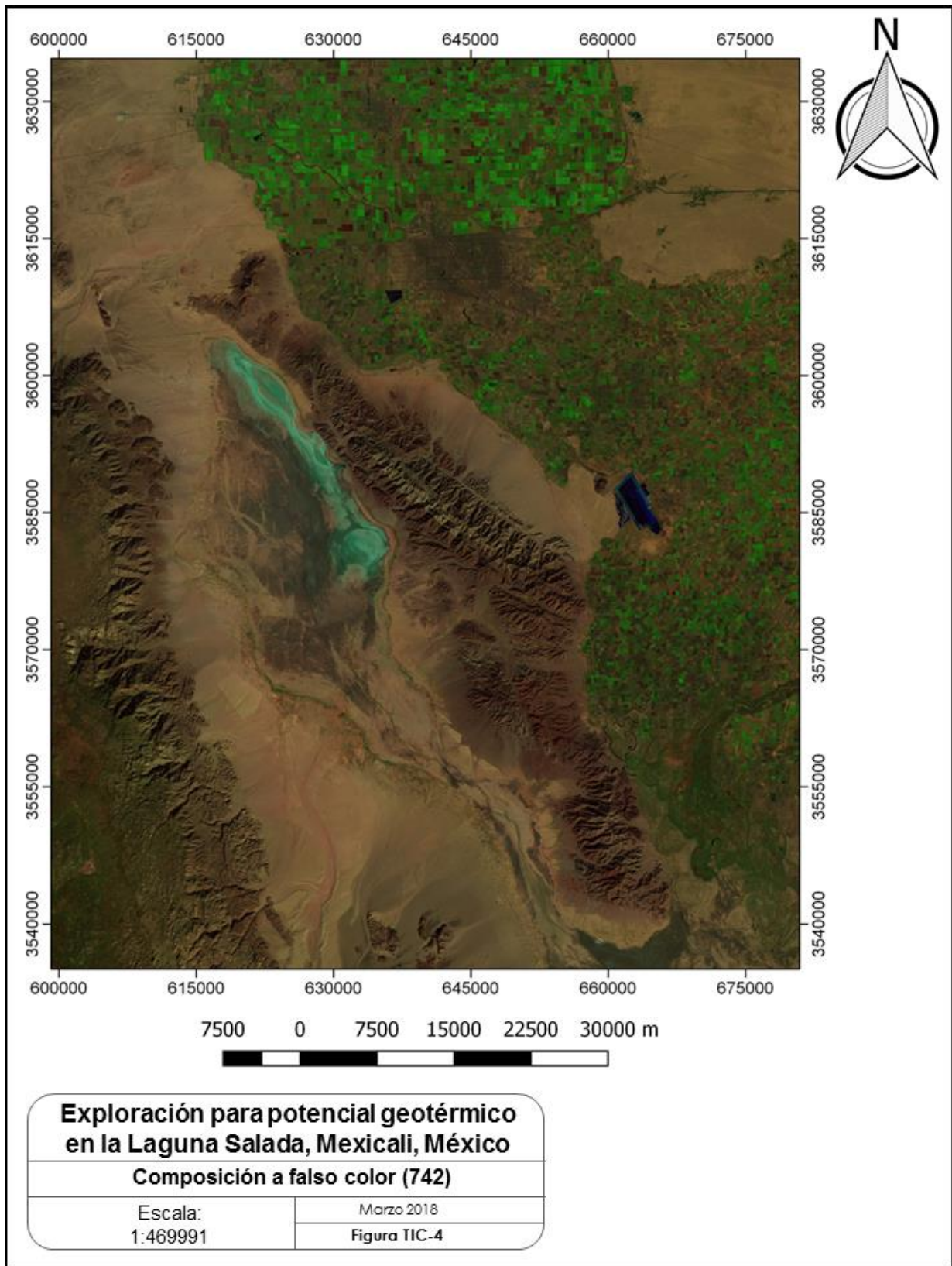


Figura 42. Composición 742 del área de estudio.

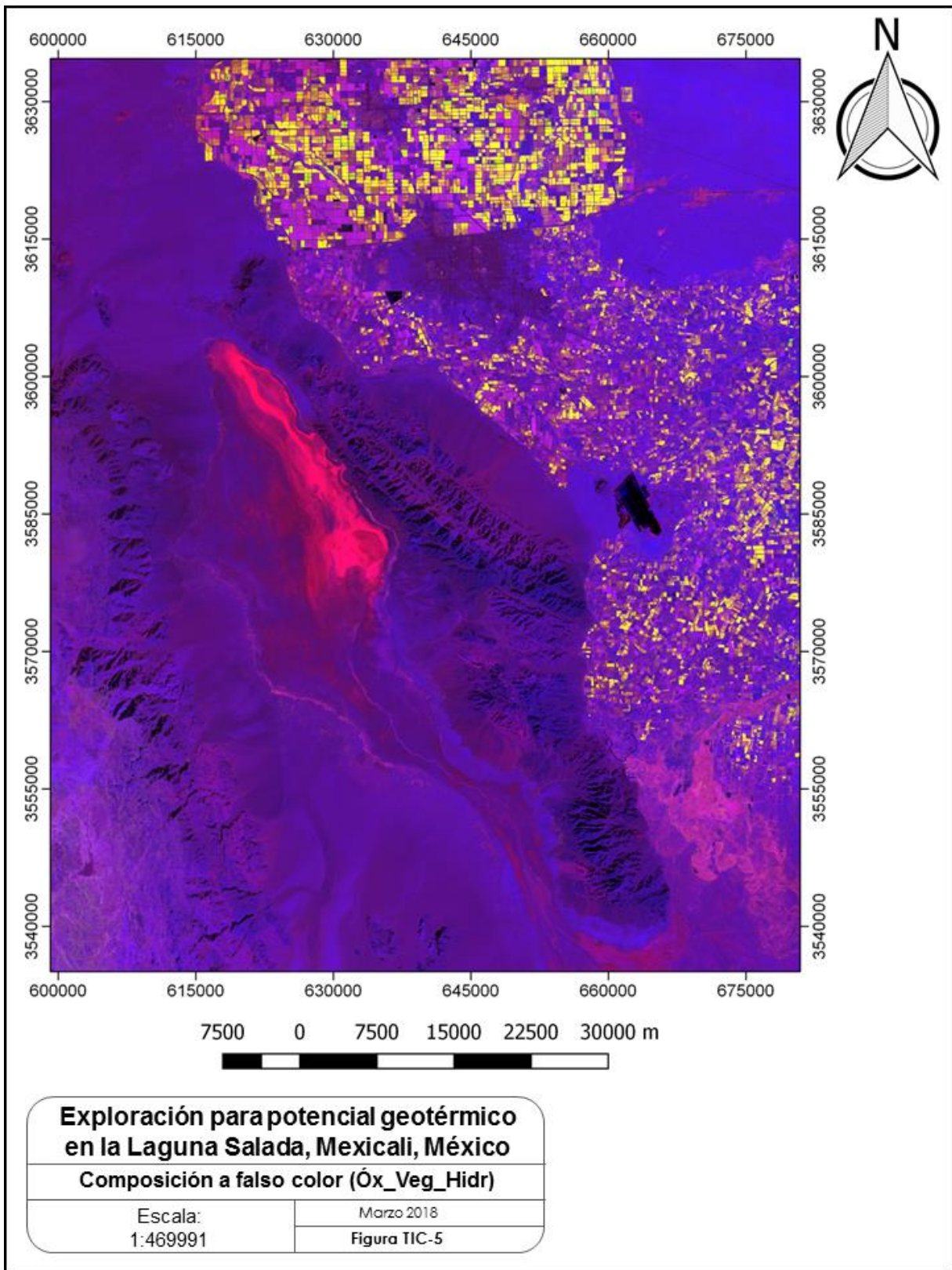


Figura 43. Composición con cocientes de banda del área de estudio.



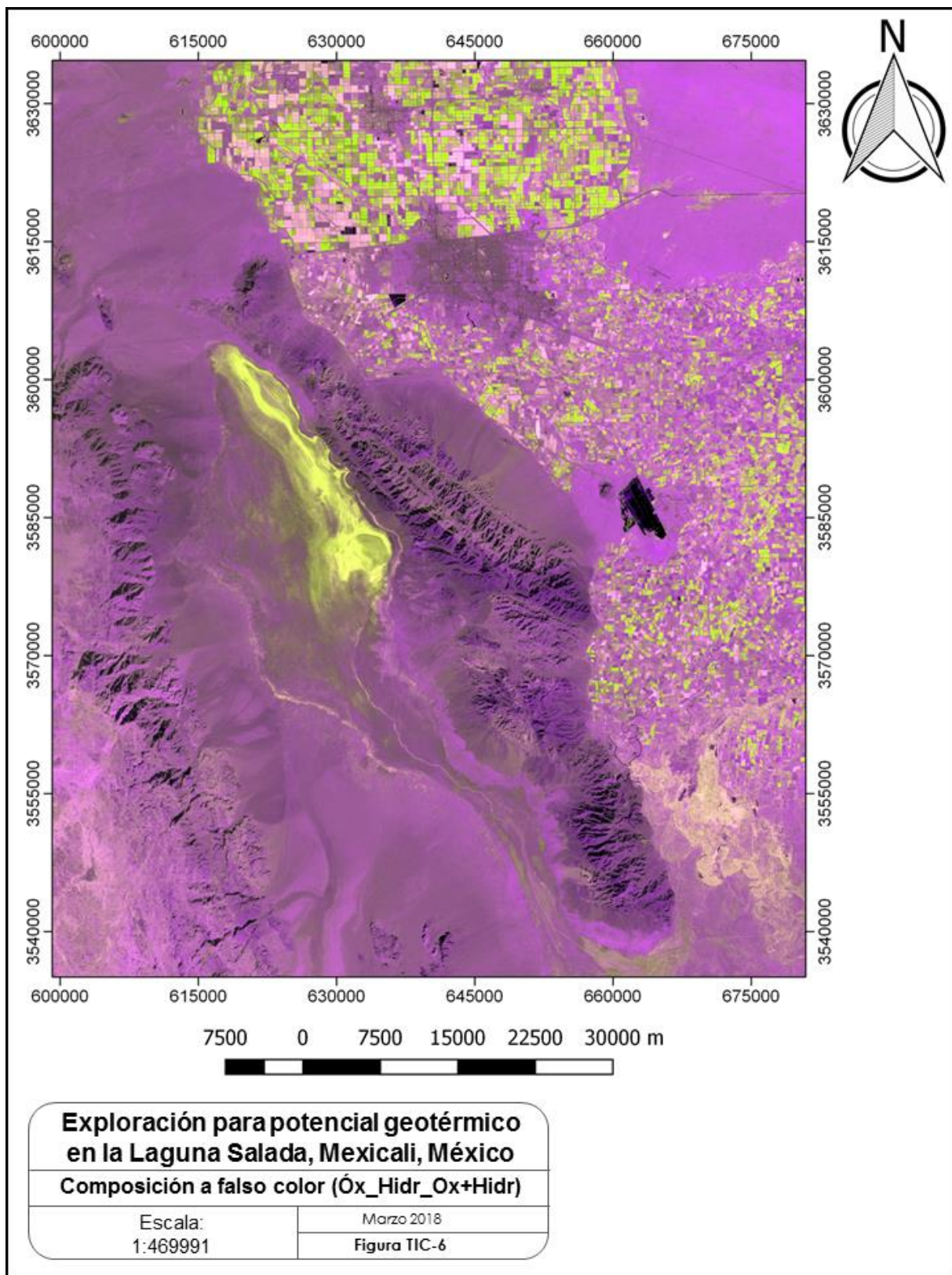


Figura 44. Composición con cocientes de banda del área de estudio.

### 9.3.2. Levantamiento con Drone

Los estudios realizados con Drone consistieron en la obtención de modelos 3D y las correspondientes imágenes de reflectancias en el espectro visible para poder caracterizar las variaciones en la superficie de la Laguna Salada, B. C., México (Figura 45) esto debido a la respuesta espectral de esta área (UTM 11N 630758.22E, 3590383 N).

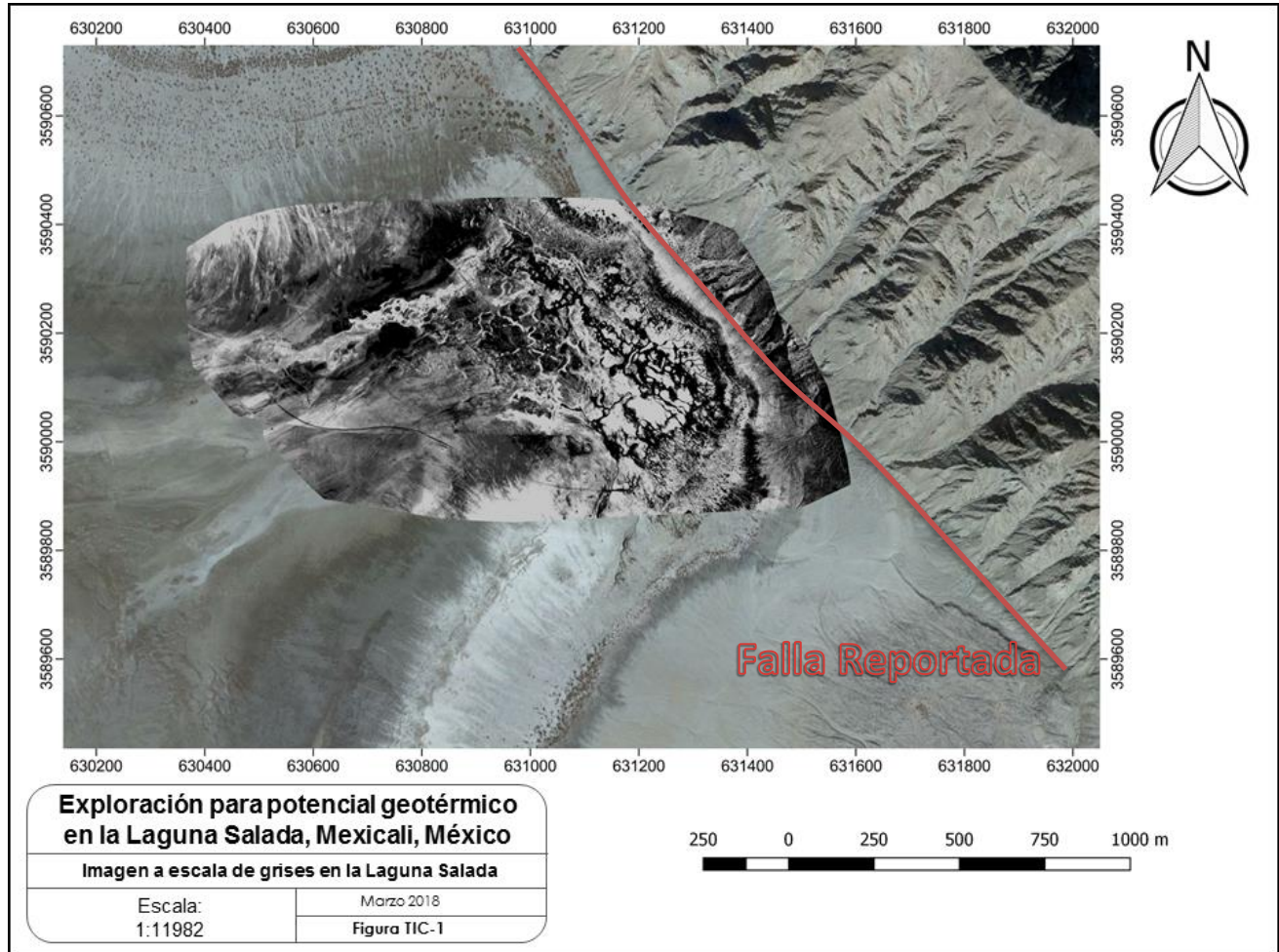
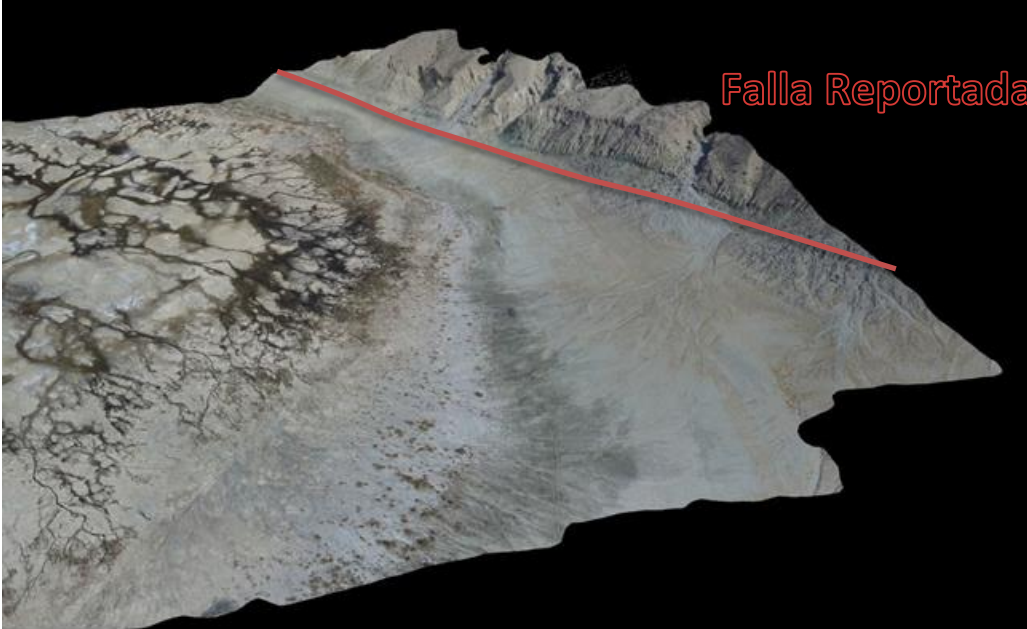


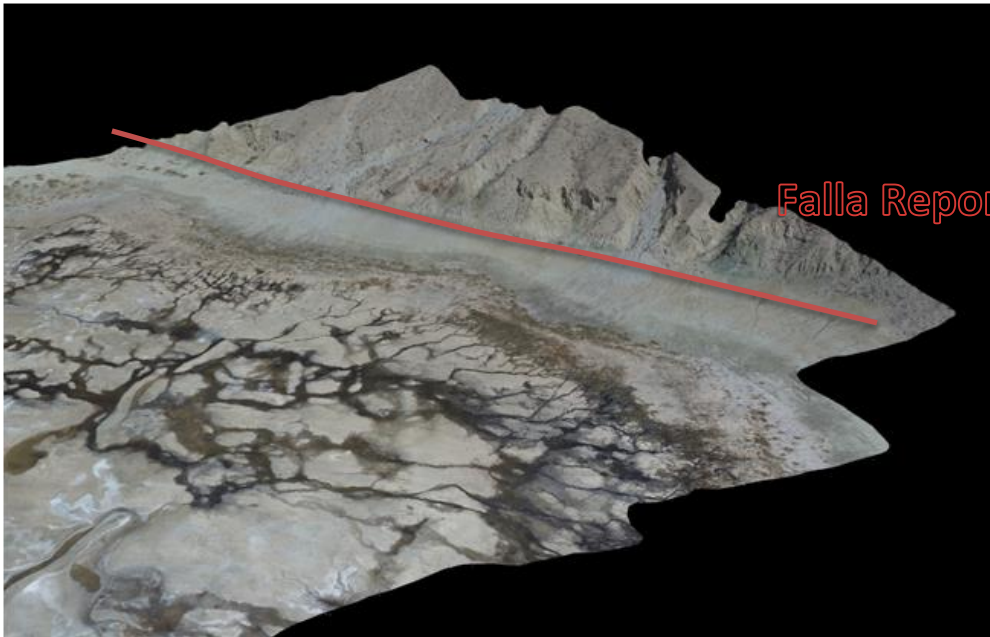
Figura 45. Mapa a escala de grises del primer vuelo realizado en la Laguna Salada.

En la Figura 46 se observa la distribución de los cuerpos de agua y la variación a las faldas de la Sierra Cucapáh. Esta variación está preferencialmente alojada en lo que se identificó en campo como falla normal. El contenido de iones hidroxilo presente en los intrusivos podría indicar la presencia de una alteración superficial en vez de simple intemperismo local. En el modelo 3D del borde de la sierra se observa la falla con una dirección NW-SE, así como los flujos oblicuos de las corrientes provenientes de las zonas elevadas. Se identificaron los canales de saturación donde

se concentra el agua durante los procesos de desecación, consecuencia de las altas temperaturas.



(a)



(b)

Figura 46. Modelos 3D de la margen oriental de la Sierra Cucapáh vista desde: (a) la margen poniente de la sierra y (b) vista desde la laguna a hacia la sierra.

#### 9.4. Discusión de resultados

Mediante la etapa de reconocimiento se determinaran áreas que permitan formular las primeras hipótesis sobre posibilidades geotérmicas, proporcionando elementos que permitan identificar áreas con altos potenciales energéticos.

Mediante 2 métodos geofísicos (magnetometría y gravimetría caracterizaron regionalmente áreas que sirvieron para identificar áreas más reducidas donde se podría encontrar una potencial alteración hidrotermal (Percepción Remota). De comprobarse habría que evaluar posteriormente si existe potencial geotérmico y si es que pudiese ser rentable.

La Figura 47 muestra las áreas que resultaron de interés a partir de los resultados obtenidos por la magnetometría y la percepción remota. Los estudios posteriores considerarán información complementaria de estudios gravimétricos previos (Figuras 46 y 47).

Regionalmente el mapa de anomalía de Bouguer muestra 5 bajos gravimétricos: Laguna Salada, las Tinajas, Montague, Cerro Prieto y Altar (Figura 45). El bajo gravimétrico asociado a la Cuenca Laguna Salada tiene su mínimo gravimétrico (-80 mGal) hacia el sur de la Sierra Cucapáh. El origen de esta anomalía es el gran contraste de densidad entre los cuerpos intrusivos ígneos respecto a los gruesos paquetes detríticos de relleno de cuenca. Estos contrastes se pueden correlacionar con las variaciones en el campo magnético reducido al polo (Figura 37), y a los contrastes de reflectancia tanto en la composición 731 (Figura 41) y la composición 742 (Figura 42).

Los levantamientos geológicos y con Drone muestran fallas con dirección NW-SE con buzamiento mayor de 70°. Los vestigios de una aparente fumarola parece relacionarse con la traza de una falla de dirección NW30-40°SE (medida en campo), la cual es parte de la estructura regional identificada como Falla Pescadores (de edad Pliocénica). En la zona de estudio esta falla es normal, pero a nivel regional presenta una componente de tipo lateral derecho.

Además de la falla mencionada, se midieron otras fallas y fracturas con rumbos NW-SE (de 30° hasta 70°) y NE-SW (de 10° a 30°) hasta N-S dentro del área estudiada. Estas orientaciones coinciden con la respuesta de la señal analítica magnetométrica y que se parecían a detalle en las combinaciones a color correspondientes a las variaciones por óxidos e hidroxilos, (Figuras 38 y 44).

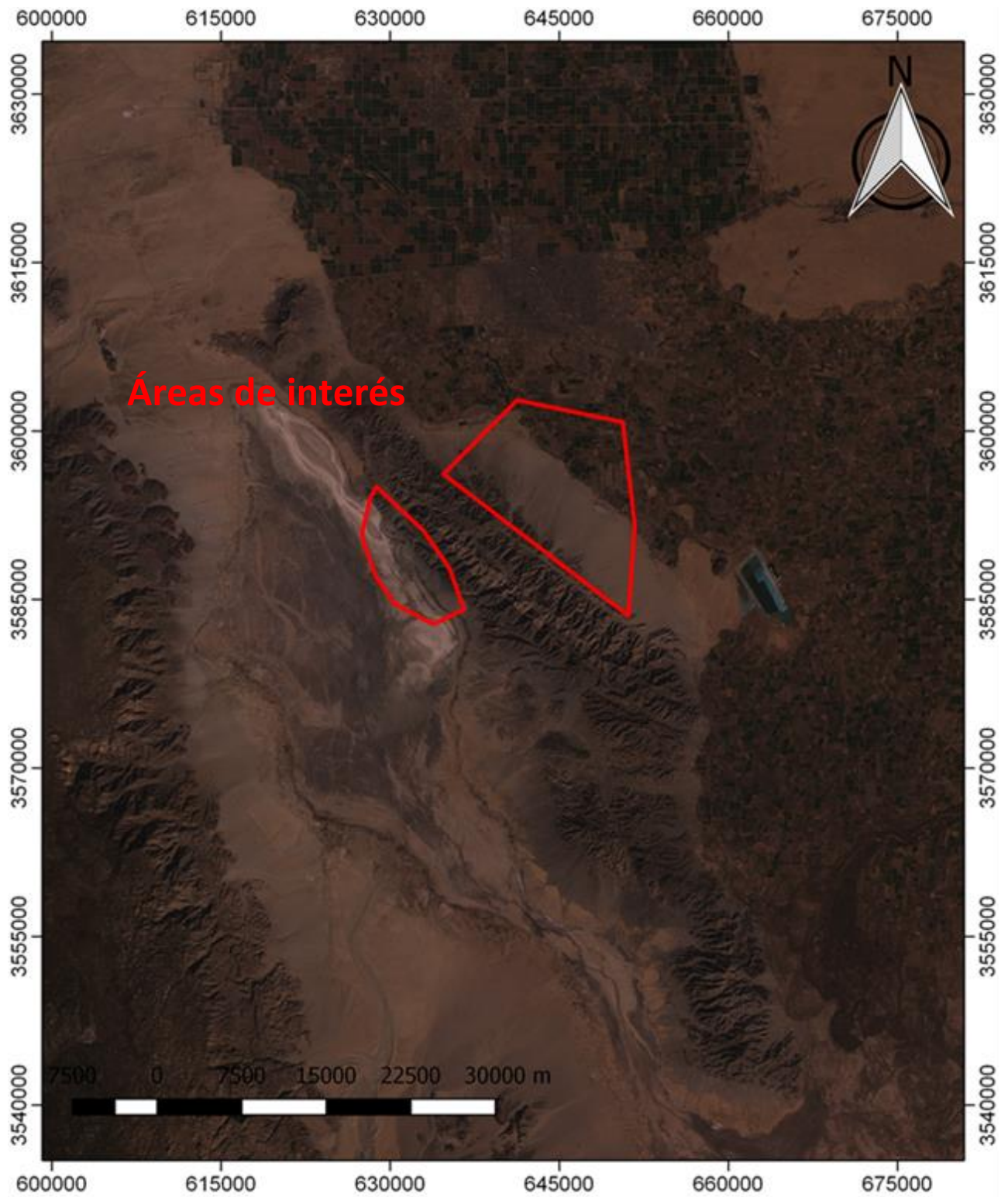


Figura 47. Mapa mostrando zonas de interés geotérmico para su evaluación a detalle posterior.

## 10. Conclusiones y recomendaciones

Los estudios realizados en este informe y en conjunto con lo reportado por el USGS, coinciden en que toda el área del Valle Imperial (California) comparte la distribución tectónica con el Valle de Mexicali. Estos rasgos regionales fueron favorecidos por la génesis y desarrollo de las fallas locales en la sierra Cucapáh. Gracias a las similitudes geológicas se puede determinar que los valores magnéticos y gravimétricos presentes en el área de estudio coinciden con los estudios hechos en EE. UU., donde se establecieron plantas de ciclo binario para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos locales.

La planta geotérmica de Cerro Prieto, ha dejado de producir la suficiente energía para cubrir a la demanda energética, la geofísica se utilizó para ubicar nuevas zonas prospectivas y propuestas de barrenos para explotación y reinyección. Reutilizando el agua geotérmica haces sustentable el recurso geotérmico y sostiene la vida del proyecto. No producen por que reinyectan en zonas poco favorables y la geofísica nos indicará los patrones de flujo donde se debe elegir el sitio adecuado para reinyección.

Los métodos potenciales son de especial utilidad en la caracterización de variaciones a gran escala de los gradientes geotérmicos, nos muestran el cambio magnético y gravimétrico causado por las variaciones geoquímicas, los cuales correlacionados con un análisis superficial de firmas espectrales nos delimito 2 áreas de gran interés donde se recomiendan estudios directos, las cuales se delimitan en la figura 47.

Se recomienda la programación de 6 pozos exploratorios para comprobar las anomalías geofísicas registradas, se proponen dos pozos en el área central de la sierra Cucapáh y 4 en el área conocida como Tulecheck, donde las altas variaciones magnéticas y los máximos gravimétrico localizados al oeste del Ejido Michoacán de Ocampo muestran un gran potencial para futuras exploraciones directas

La Laguna Salada cuenta con dos pozos exploratorios en estado de abandono, por lo que es recomendable reanudar su exploración con el objetivo de comprobar dichas anomalías y corroborar los gradientes térmicos para ubicar un yacimiento de temperatura intermedia que pudiera ser desarrollado con una planta de ciclo binario para la zona de Laguna Salada.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la variación magnética se presenta en el borde NE de la laguna, mientras que en el resto del área, la respuesta no muestra indicios de una explotabilidad geotérmica, es recomendable que los estudios estructurales se apoyen en resultados de geoquímica, geofísica en sitio y otros estudios a pie, con el fin de identificar con mayor certeza, áreas con alto potencial geotérmico.

## 11. Bibliografía

- Arango Galván, C. 2001. Análisis Temporal del Campo Magnético y Deformación en el Volcán Popocatepetl. Tesis de Ingeniería Geofísica. Instituto de Geofísica UNAM, México, pp. 13-25.
- Argote E., Denisse L. 2008. Modelación en 3D de Datos Magnéticos para Caracterizar Estructuras Arqueológicas, Tesis de Doctorado en Ciencias, Instituto de Geofísica UNAM, México, pp. 27-54.
- Blakely, R.J., 1996. Potential theory in Gravity and Magnetics Applications. Cambridge University Press. Reino Unido.
- Blásquez L. 1960. Hidrología y Edafología. La Isla Socorro. Archipiélago Revillagigedo. UNAM Monografías del Instituto de Geofísica. México, pp. 69-100.
- Bohrsen, M. y Reid, M. 1995. Petrogenesis of Alkaline Basalts from Socorro Island, Mexico: Trace element Evidence for Contamination of Ocean Island Basalt in the Shallow Ocean Crust. *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, no. B12, pp. 24,555- 24,576.
- Bohrsen, M. et al. 1996. Prolonged history of silicic peralkaline volcanism in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, no. B5, pp. 11,457- 11,474.
- Breiner, S. 1973. Applications Manual for Portable Magnetometers. Geometrics. California, pp.2-54.
- Dearing, John. 1994. Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System. Bartington Instruments. Oxford.
- Kearey, P. et al. 2002. An introduction to Geophysical Exploration, Wiley, John & Sons Incorporated.
- Klitgord y Mammerickx. 1982. Northern East Pacific Rise: Magnetic Anomaly and Bathimetric Framework. *Journal of Geophysical Research*, vol. 87, no. B8, pp 6725-6750.
- Mammerickx, J. y Naar, D.F. 1988. The Mathematician Paleoplate. . *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, no. B4, pp. 3025- 3040.
- Todd, V.R., and Shaw, S.E., 1979, Structural, metaphormic and intrusive framework of the Peninsular Ranges batholith in the southern San Diego County, California, Mezozoic Crystalline Rocks: Geological Aociety of America Annual Meeting Field Trip Guide-Book: San Diego California, San Diego State University, Department of Geological Sciences, P. 177-231.
- Menke, William y Abbott, Dallas. 1990. Geophysical Theory. Columbia University Press. New York.
- Milson, J.J. 2003. The Geological Field Guide John Wiley & Sons. Inglaterra, pp. 52-53.
- Axen, G., 1995. Extensional segmentation of the main Gulf escarpment. Mexico and United States. *Geology*, 23, pp. 515-518.
- Axen, G., y H. Romero Espejel, 1994. Cambio de dirección en el buzamiento de los sistemas de fallamiento basal de la parte norte del escarpe principal del Golfo de California. Resúmenes de la Reunión 1994 de la Unión Geofísica Mexicana, *Geos*, 14, p. 74.
- Barnard, F.L., 1968. Structural Geology of the Sierra de los Cucapas, northeastern Baja California, Mexico. Faculty of Graduate School of the University of Colorado, Boulder, Colorado, Doctoral Thesis. Inédito.
- Gastil, G.R., R.P. Phillips and E.C. Allison, 1975. Reconnaissance geology of state of Baja California. *Geol. Soc. of Amer.*, Memoir 140. 170 p.
- Herzig, C.T., and D.C. Jacobs, 1994. Cenozoic volcanism and two-stage extensional in the Salton trough, southern California and northern Baja California. *Geology*, 22, pp. 991-994.
- Mitchell, A., and H.G. Reading, 1986. Sedimentation and Tectonics. In: G. Reading (ed.). *Environments and Facies*. 2nd ed., Backwell Scientific Publication, Oxford. 615 p.

- Mueller, K.J, and T.K. Rockwell, 1995. Late Quaternary activity of the Laguna Salada Fault in northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 107, pp. 8-18.
- Stock, J.M and K.V. Hodges, 1989. Pre-Pliocene extension around the Gulf California and the transfer of Baja California the Pacific Plate. *Tectonics*, 8, pp. 99-115.
- Siem, M.E., 1992. The Structure and Petrology of Sierra El Mayor, northeastern Baja California, Mexico. San Diego State University, Master Thesis. Inédito.
- Álvaro Aguilar Dumas, 2009. Áreas para exploración en los alrededores del campo geotrmico de Cerro Prieto, BC, Comisión Federal de Electricidad, Geotermia, Vol. 22, No. 2.
- Cruz Manuel, 2002. Catálogo de fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. Instituto Mexicano del Petróleo, GEOS, Unión Geofísica Mexicana.
- Sánchez Osvaldo, 1982. El método Gravimétrico en la Exploración Geofísica. División de educación continua, Faculta de Ingeniería, UNAM.
- Nain Vera Chavez, 2015 Inversión tridimensional de métodos potenciales en estructuras salinas del Golfo de México, Facultad de Ingeniería, UNAM, Tesis de licenciatura.
- Gayo Plinio Segundo, 30 A.C., Magnes el pastor, Cap Pamplona -CP. Auritz- \_Burguete-Espinal.
- FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ BRAVO. MODELO GEOLOGICO-ESTRUCTURAL DEL VALLE DE LEON A PARTIR DE CARTOGRAFÍA AEROMAGNÉTICA CON SU APLICACIÓN HIDROGEOLÓGICA. Facultad de Ingeniería, UNAM. Tesis de licenciatura.
- Almirudis, E., Guevara, M., Santoyo, E., Torres-Alvarado, I., Paz-Moreno, F. (2015). Geothermal Energy Potential of Promissory Area in the Central and Eastern Zones of Sonora, Mexico: A Preliminary Geochemical Study, presentado en “Proceedings World Geothermal Congress”, Melbourne, Australia, 19-25 abril 2015.
- Bakker, W., Feringa, W., Gieske, A., Gorte, B., Hecker, C., Janssen, L. (2009). Principles of Remote Sensing: An introductory textbook. Netherlands: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, 3-65.
- Campbell, J. & Wynne, R. (2011). Introduction to Remote Sensing (5th Ed). New York, USA: The Guilford Press. 667 p.
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R., Alfonso, P., González-Partida, E., Salinas, S. (2015). Combining ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, vol. 53, 154-165.
- Castañeda, J. (1981). Notas sobre la Geología del área de Hermosillo, Sonora. *Revista del Instituto de Geología UNAM*, vol. 5 (1), 30-36.
- Chandra, A.M. & Ghosh, S.K. (2006). Remote Sensing and Geographical Information System. India: Alpha Science International Ltd. 303 p.
- Crosta, A. P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24 (21), 4233-4240. DOI: 10.1080/0143116031000152291.
- Damon, P.E., Shafiqullah, M., Roldán-Quintana, J., Cochemé, J.J. (1983). El Batolito Laramide (90-40 Ma) de Sonora, presentado en XV Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Guadalajara, Jalisco, México. Libro de resúmenes, 63-65.



- Kearey, P. et al. 2002. An introduction to Geophysical Exploration, Wiley, John & Sons Incorporated.
- Zúñiga, F. Ramón y Wyss Max, (2001). "Most- and Least-Likely Location of Large to Great Earthquakes along the Pacific Coast of Mexico Estimated from Local Recurrence Times Based on b-Values". Bulletin of the Seismological Society of America, 91, 6, pp. 1717-1728. December 2001.
- Klitgord y Mammerickx. 1982. Northern East Pacific Rise: Magnetic Anomaly and Bathymetric Framework. Journal of Geophysical Research, vol. 87, no. B8, pp 6725-6750.
- Mammerickx, J. y Naar, D.F. 1988. The Mathematician Paleoplate. Journal of Geophysical Research, vol. 93, no. B4, pp. 3025- 3040.
- Maus, S., U. Barckhausen, H. Berkenbosch, N. Bournas, J. Brozena, V. Childers, F. Dostaler, J. D. Fairhead, C. Finn, R. R. B. von Frese, C. Gaina, S. Golynsky, R. Kucks, H. Luhr, P. Milligan, S. Mogren, D. Muller, O. Olesen, M. Pilkington, R. Saltus, B. Schreckenberger, E.Thebault, and F. Caratori Tontini, EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements, Geochem. Geophys. Geosyst., under review, <http://geomag.org/info/Smaus/Doc/emag2.pdf>
- Watson, Z. T., Han, W. S., Keating, E. H., Jung, NH., y Lu, M. 2014. Eruption dynamics of CO2-driven cold-water geysers: Crystal, Tenmile geysers in Utah and Chimayó geyser in New Mexico. Earth and Planetary Science Letters, Volume 408, p. 272-284.
- DJI, Manual de operación y especificaciones para M600, 2017.
- GarciaDiego Ana, Coronado Yeimy, Quezada Arturo, 2016. Metodología para la elaboración de un modelo conceptual a partir de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en la fase de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico, Revista Geotermia Vol. 29.
- Julio Álvarez Rosales, Juan Manuel Camacho Hernández, Víctor Ilitch Gallardo Federico, Griselda Macías Valdez y Diego Herrera Carrillo, Características geológicas preliminares de la nueva zona termal Cucapah en el Valle de Mexicali, BC, México, Residencia General de Cerro Prieto. Residencia de Estudios. Departamento de Geología y Geofísica. Campo Geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México, 2012.
- Clemente German Gallardo Mata, Sismica de reflexión en Laguna Salada, Baja California, México, Programa de posgrado en ciencias de la tierra, 2013.