



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**“Identificación de zonas potenciales para exploración  
geotérmica aplicando imágenes ópticas  
multiespectrales e interferometría SAR”**

Tesis que presenta

**Iván Othón Ramírez García**

Para obtener el grado de

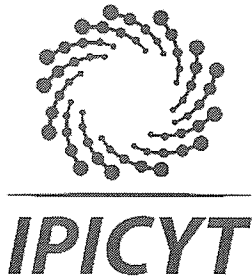
**Maestro en Geociencias Aplicadas**

**Codirectores de la Tesis:**

**Dr. José Tuxpan Vargas**

**Dr. Anmi García Arellano**

San Luis Potosí, S.L.P., noviembre de 2019



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis *“Identificación de zonas potenciales para exploración geotérmica aplicando imágenes ópticas multispectrales e interferometría SAR”* presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Iván Othón Ramírez García** y aprobada el veintiséis de noviembre del dos mil diecinueve por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Codirector de la tesis

**Dr. Anmi García Arellano**  
Codirector de la tesis

**Dr. Pablo Dávila Harris**  
Miembro del Comité Tutorial

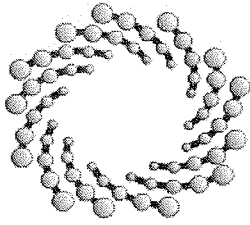
**Dr. Sanjeet Kumar Verma**  
Miembro del Comité Tutorial



## **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Geomática de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección del Dr. José Tuxpan Vargas y Dr. Anmi García Arellano.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología 595790 del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 049 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 26 días del mes de noviembre del año 2019, se reunió a las 13:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Sanjeet Kumar Verma</b> _	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Iván Othón Ramírez García**

sobre la Tesis intitulada:

*Identificación de zonas potenciales para exploración geotérmica aplicando imágenes ópticas multiespectrales e interferometría SAR*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
**Dr. Anmi García Arellano (ECOSUR)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 14:08 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 26 días del mes de noviembre de 2019.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primero que nada al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) y al CONACYT por brindarme la oportunidad de estudiar una maestría.

A mis asesores de tesis al Dr. José Tuxpan Vargas y al Dr. Anmi García Arellano por todo el conocimiento y apoyo brindado en la realización de este trabajo de investigación.

A mis papas Othón Librado Ramírez y Columba García Carreto y hermano Emmanuel Ramírez García por su apoyo incondicional en cada momento de mi vida y por creer siempre en mí.

A todos los amigos y compañeros con los que compartí este tiempo realizando mis estudios, de los que me llevo gratos momentos.

# CONTENIDO

<b>Constancia de aprobación de la tesis</b>	<b>ii</b>
<b>Créditos Institucionales</b>	<b>iii</b>
<b>Acta de examen</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Contenido</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Resumen</b>	<b>x</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>1</b>
Generalidades	1
1.1    Introducción	1
1.2    Planteamiento del Problema	6
1.3    Justificación	6
1.4    Objetivos	7
1.4.1    General	7
1.4.2    Específicos	7
1.5    Alcance	8
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>9</b>
Marco teórico	9
2.1    Energías renovables: geotermia	9
2.1.1    Puntos geotérmicos	10
2.1.2    Clasificación y aplicaciones	12
2.1.3    Aprovechamiento de la geotermia en México	14
2.2    Técnicas de prospección/exploración geotérmica	17
2.2.1    Técnicas geológicas	17
2.2.2    Técnicas geofísicas	18
2.2.3    Técnicas geoquímicas	20
2.2.4    Técnicas termométricas	21
2.2.5    Nuevas tecnologías de exploración	21
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>24</b>

Descripción del sitio de prueba	24
3.1    Campo geotérmico Acoculco, Puebla	24
3.2    Localización	25
3.3    Geología	26
3.4    Sistema Geotérmico Hidrotermal	29
3.5    Trabajos previos y Estimaciones preliminares	30
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>32</b>
Metodología	32
4.1    Planteamiento de propuesta	32
4.2    Métodos y Herramientas	33
4.2.1    Imágenes Satelitales multiespectrales	33
4.2.2    Imágenes satelitales SAR	38
4.3    Desarrollo del modelo: parametrización	43
4.3.1    Alteraciones hidrotermales	43
4.3.2    Anomalías térmicas	46
4.3.3    Deformación de superficie de suelo	48
4.4    Modelación multi-paramétrica	53
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>55</b>
Resultados	55
5.1    Generación de mapas y estimación de parámetros	55
5.1.1    Anomalías térmicas	55
5.1.2    Alteraciones hidrotermales	61
5.1.3    Deformación superficial del suelo	69
5.2    Evaluación del modelo multi-paramétrico	70
5.3    Validación del modelo	78
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>80</b>
Conclusiones	80
<b>REFERENCIAS</b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de recursos geotérmicos según White y Williams .....	12
Tabla 2. Información general del satélite SENTINEL-1 .....	38
Tabla 3. Análisis de componentes principales con seis bandas landsat 8 .....	62
Tabla 4. Análisis de componentes principales para la identificación de hidroxilos.....	65
Tabla 5. Análisis de componentes principales para identificar óxidos.....	67

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Consumo de energía mundial por tipo de fuente. tomado de U.S. Energy Information Administration (EIA) .....	1
FIGURA 2. Energía Solar.....	3
FIGURA 3. Energía Eólica .....	3
FIGURA 4. Energía Hidráulica .....	3
FIGURA 5. Energía Geotérmica.....	3
FIGURA 6. Recursos geotermicos de México. (fuente: inventario nacional de energías renovables)4	
FIGURA 7. Modelo de un sistema geotérmico con sus principales características (Barbier, 2002) 11	
FIGURA 8. Principales campos geotérmicos en México operados por la GPG .....	14
FIGURA 9. Mapa del centro de México con la ubicación del CVTM, los principales campos geotérmicos y la zona de Acapulco. Campos Geotérmicos: (LH) Los Humeros; (LA) Los Azufres; (LP) La Primavera. (Modificado de López-Hernández, 2009) .....	24
FIGURA 10. Localización del áreas geotérmica en Acapulco, Puebla .....	25
FIGURA 11. Geología zona de Acapulco, Pue. (Fuente: Mapa geológico del Servicio Geológico Mexicano).....	27
FIGURA 12. Bandas espectrales y longitud de onda de Landsat 8 y Landsat 7 ETM+ (USGS 2013) .....	33
FIGURA 13. Diagrama de proceso con imágenes landsat 8 para el cálculo de parámetros .....	34
FIGURA 14. Esquema del sistema SAR (modificado de Ilie, 2011) .....	39
FIGURA 15. Interferograma .....	42
FIGURA 16. Coherencia de las imágenes sentinel-1 .....	43
FIGURA 17. Respuesta espectral de minerales del grupo de los óxidos (jarosita, hematita, goethita) y de hidroxilos, sobre las bandas del sensor oli del sistema Landsat 8. (modificado de Hunt y Ashley, 1979) .....	44
FIGURA 18. Imagen obtenida al sustraer la fase topográfica del interferograma .....	49
FIGURA 19. Imagen obtenida al aplicar Multilooking y filtro de fase.....	50
FIGURA 20. Fase desenvuelta .....	51



FIGURA 21. Imagen de desplazamientos con valores de coherencia mayores a 0.5 .....	52
FIGURA 22. Imagen interferometrica de desplazamiento geocodificada .....	53
FIGURA 23. Esquema de conjunción multi-paramétrica en la localización de zonas con potencial geotérmico.....	54
FIGURA 24. Temperatura superficial año 2014.....	56
FIGURA 25. Temperatura superficial año 2017.....	57
FIGURA 26. Valores altos en temperatura superficial. ....	58
FIGURA 27. Flujos de calor radiativo. año 2014.....	59
FIGURA 28. Flujos de calor radiativo. año 2017.....	60
FIGURA 29. Valores maximos de Flujos de calor radiativo. año 2014.....	60
FIGURA 30. Valores maximos de Flujos de calor radiativo. año 2017.....	61
FIGURA 31. Imagen inversa de C4 representando hidroxilos en tonos brillantes .....	63
FIGURA 32. Imagen inversa de C5 las zonas brillantes representan oxidos .....	64
FIGURA 33. A) Componente principal C3, los pixeles más brillantes muestran áreas con presencia de hidroxilos. B) Mapeo de presencia de hidroxilos con los valores maximos de la componente principal C3.....	66
FIGURA 34. A) Imagen negativa de la componente principal C4 donde los óxidos se representan en tonos brillantes. B) Mapeo de presencia de óxidos con los valores maximos de la componente principal C4.....	68
FIGURA 35. Desplazamientos verticales calculados en la zona de Acoculco, Puebla en el año 2014 .....	69
FIGURA 36. Desplazamientos verticales calculados en la zona de Acoculco, Puebla en el año 2017 .....	70
FIGURA 37. Mapa de la zona mostrando las alteraciones hidrotermales, flujos de calor y temperatura superficial .....	71
FIGURA 38. Mapa de las zonas donde existe presencia de alteraciones hidrotermales y anomalías térmicas. A) año 2014, B) año 2017.....	72
FIGURA 39. Mapa de desplazamientos y zonas de presencia de parámetros. Año 2014.....	73
FIGURA 40. Mapa de desplazamientos y zonas de presencia de parámetros. Año 2017.....	74
FIGURA 41. Composición RGB de bandas 5, 4, 3. se muestran las Zonas identificadas para exploración geotérmica en las imágenes ampliadas. año 2014 .....	75
FIGURA 42. Composición RGB de bandas 5, 4, 3. se muestran las Zonas identificadas para exploración geotérmica en las imágenes ampliadas. Año 2017 .....	76
FIGURA 43. Zonas con el mayor potencial geotérmico para Acoculco, Puebla .....	77
FIGURA 44. Zonas de potencial geotérmico de mayor interés para la exploración terrestre a detalle en Acoculco, Puebla.....	79

## Resumen

### **“Identificación de zonas potenciales para exploración geotérmica aplicando imágenes ópticas multiespectrales e interferometría SAR”**

La energía generada por el calor de la Tierra o energía geotérmica, que se deriva dentro de la superficie de la Tierra. Es una energía renovable clave que cubre una parte significativa de la demanda de electricidad en varios países como Estados Unidos de América (EE.UU.), Filipinas, Indonesia y México. México tiene una capacidad instalada total de 1017 MW aproximadamente, lo que representa el 14 % de la capacidad instalada global total de energía geotérmica.

En este trabajo se presenta una metodología para la identificación de sitios potenciales para exploración geotérmica mediante un enfoque innovador de técnicas de percepción remota. Se utilizaron imágenes de sensores pasivos provenientes de la plataforma Landsat 8, para obtener datos de anomalías térmicas superficiales, así como de presencia de alteraciones hidrotermales empleando un Análisis de Componentes Principales (PCA). Además, mediante imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de la misión Sentinel-1 se obtuvieron datos de deformación de superficie empleando la técnica DInSAR (Interferometría Diferencial).

La zona de la caldera de Acoculco, Puebla, fue elegida como el sitio de prueba, la cual ya está identificada como potencial fuente de energía geotérmica por varios estudios de la Comisión Federal de Electricidad, y que aportan información adicional para la validación de la metodología propuesta.

Los datos obtenidos en el sitio estudiado se integraron y relacionaron mediante una modelación multi-paramétrica, que genera varios mapas y ayuda a identificar un sitio potencial para la exploración geotérmica. Además, la presencia de alteraciones hidrotermales, anomalías térmicas y deformaciones de superficie, apoya a ser un sitio probable para la exploración geotérmica.

Palabras clave: Percepción remota, geotermia, imágenes satelitales, InSAR, DInSAR.

## **Abstract**

### **“Identification of potential areas for geothermal exploration using optical multispectral images and SAR interferometry”**

The energy generated due the heat of the earth and geothermal energy is one of them, which derived within the sub-surface of the earth. This key renewable energy covers a significant share of electricity demand in several countries like United States of America (USA), Philippines, Indonesia and Mexico. Mexico has total installed capacity of 1017 MW approximately, which accounts for 14% of the total global installed capacity of geothermal energy.

This work presents a methodology for the identification of potential sites for the geothermal exploration by an innovative approach of remote sensing techniques. Passive sensor images from the Landsat 8 platform were used to obtain data from superficial thermal anomalies as well as the presence of hydrothermal alteration using a Principal Component Analysis (PCA). In addition, Synthetic Aperture Radar (SAR) images of Sentinel-1 mission, surface deformation data were obtained using the DInSAR (Differential Interferometric) technique.

The caldera area of Acoculco, Puebla was chosen as the test site, which is already identified as potential sources of geothermal energy by several studies of Comision Federal de Electricidad (CFE) that provide additional information for the validation of the proposed methodology.

The data obtained by the studied site were integrated and related through multi-parametric modelling, which generates several maps and helps to identify a potential site for geothermal exploration. In addition, the existence of hydrothermal alteration, thermal anomalies and surface deformation supports to be a probable site for geothermal exploration.

Keywords: Remote sensing, geothermal, satellite data, InSAR, DInSAR.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

La demanda de energía en países en vías de desarrollo aumenta más cada día, debido al crecimiento de la población y de los procesos productivos que necesitan de servicios energéticos para cubrir sus necesidades básicas, esto ha convertido al sector energético en una condición importante para el crecimiento económico de un país. La principal fuente en todo el mundo para la generación de energía son los llamados combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) (Fig. 1). Sin embargo, el uso de este tipo de combustibles trae consigo graves problemas ambientales, uno de los principales es el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, sobre todo de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Es por ello que se han buscado medios que ayuden en la mitigación de estos gases contaminantes sin dejar de lado la demanda en la generación de energía.

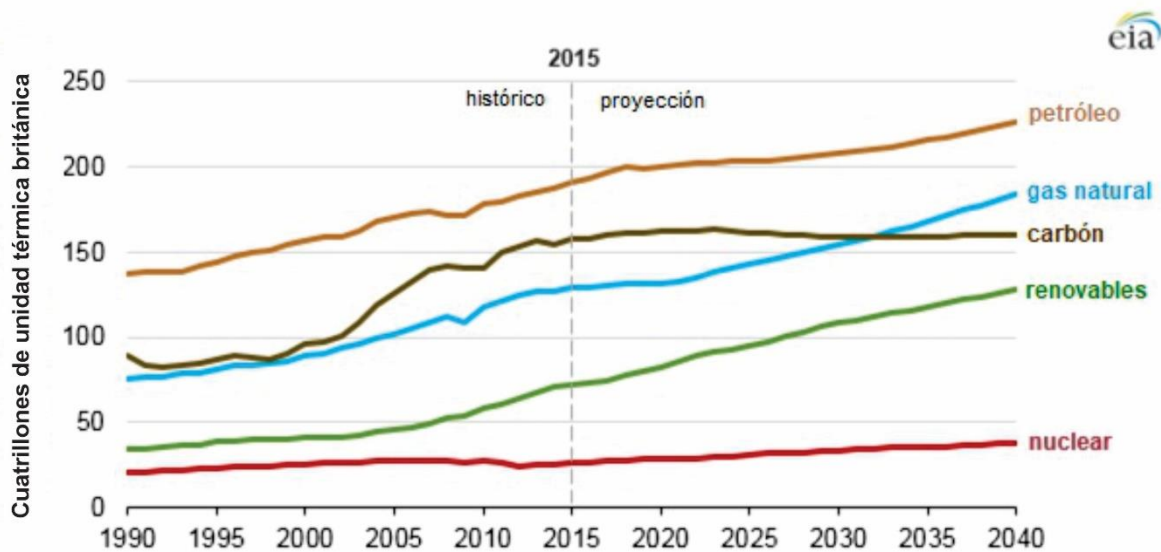


FIGURA 1. CONSUMO DE ENERGÍA MUNDIAL POR TIPO DE FUENTE. TOMADO DE U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA)

Una de las opciones más directas y eficaces es la sustitución de los combustibles fósiles por recursos renovables para generar energía. Actualmente existen diversas fuentes de energía renovable y aunque aún representan un porcentaje pequeño de la energía generada mundialmente, estas se encuentran en constante desarrollo.

Entre las fuentes de energía renovable más importante se encuentran:

- el sol: la energía solar se obtiene directamente de la radiación electromagnética emitida por este, la radiación es captada mediante paneles solares para transformarla en energía térmica, y también por paneles fotovoltaicos que convierten la luz en electricidad (Fig. 2).
- el viento: la energía generada a partir de la fuerza del viento se le conoce como eólica, la obtención de electricidad por recursos eólicos se produce con aerogeneradores. La turbina activada por el viento proporciona energía mecánica que hace girar el rotor de un generador convirtiendo energía mecánica en eléctrica (Fig. 3).
- los ríos y corrientes de agua dulce: la energía hidráulica es transformada en energía eléctrica mediante turbinas accionadas por agua en movimiento que pasa por su interior, transmitiendo la energía a un alternador convirtiéndola en electricidad (Fig. 4).
- el calor de la Tierra: la energía geotérmica llega a la superficie a través de las aguas subterráneas, que llegan a alcanzar temperaturas de ebullición, este tipo de energía puede ser aprovechada directamente, en calefacción de hogares, invernaderos, deshidratación de alimentos, y de forma indirecta en la producción de electricidad (Fig. 5).

En México se cuenta con una amplia variedad de recursos renovables de energía, cada fuente presenta ciertas particularidades en la tecnología para su aprovechamiento en el país:

#### **Solar (Cíclica, predecible, cara)**

- **Fácil de evaluar potencial**
- **Muy poca integración nacional**
- **Costo de la inversión, predecible**



**FIGURA 2. ENERGÍA SOLAR**

#### **Eólica (Intermitente, poco predecible, económica)**

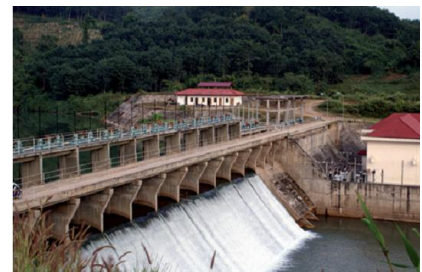
- **Fácil de evaluar potencial**
- **Muy poca integración nacional**
- **Costo de la inversión, predecible**



**FIGURA 3. ENERGÍA EÓLICA**

#### **Hidráulica (Dependiente del riego, poco predecible)**

- **Fácil de evaluar potencial**
- **Alta integración nacional**
- **Costo de la inversión, predecible, gestión complicada**



**FIGURA 4. ENERGÍA HIDRÁULICA**

#### **Geotérmica (Permanente, económica)**

- **Difícil conocer a priori el potencial (alto riesgo)**
- **Alta integración nacional**
- **Costo de la inversión en pozos incierta (alto riesgo)**



**FIGURA 5. ENERGÍA GEOTÉRMICA**

Entre estas, la utilización de la energía geotérmica en la generación de electricidad se ha vuelto una de las alternativas limpias con gran potencial que existen. Actualmente se produce electricidad mediante energía geotérmica en 24 países y alrededor de 40 países en todo el mundo posee suficiente potencial geotérmico capaz de satisfacer su demanda completa de electricidad.

México cuenta con un desarrollo destacado en la generación de electricidad a través de energía geotérmica, posicionándose en los primeros cinco lugares a nivel mundial en cuanto a producción se refiere. El potencial geotérmico total estimado del territorio mexicano, entre reservas probadas, probables y posibles, asciende a 13.4 GWe (Fig. 6) (Secretaría de Energía, 2018).

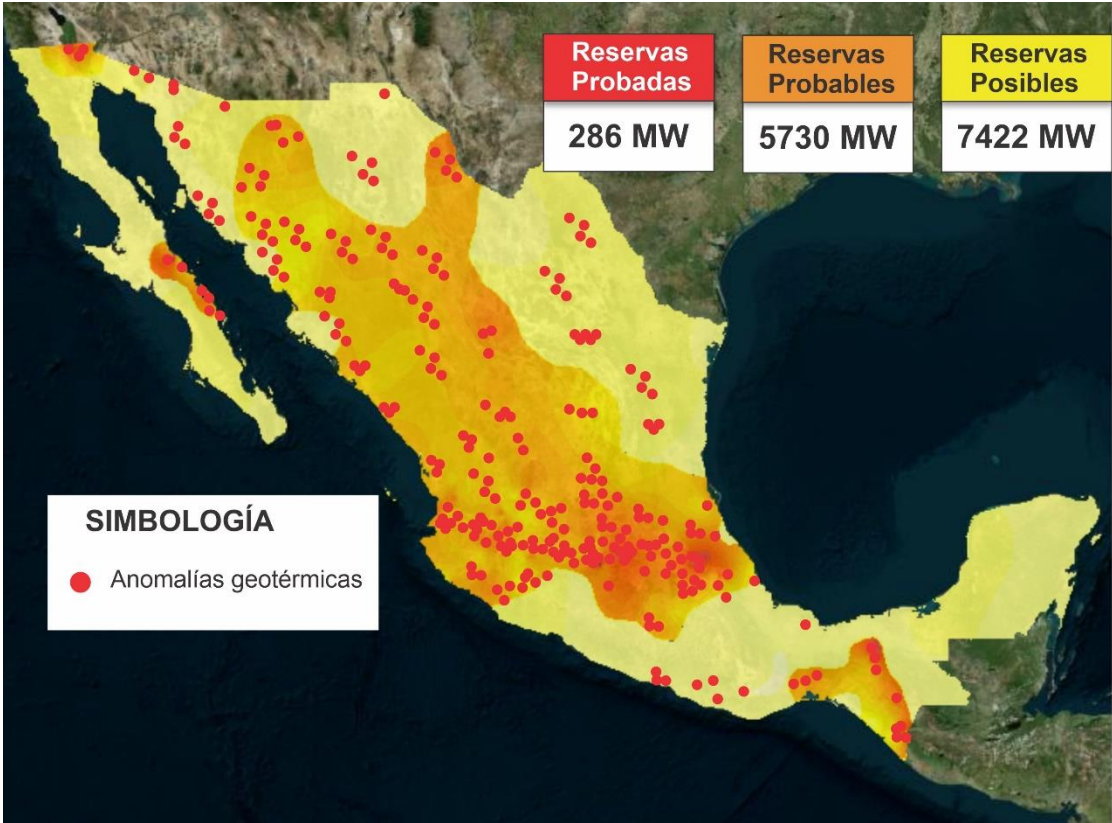


FIGURA 6. RECURSOS GEOTERMICOS DE MÉXICO. (FUENTE: INVENTARIO NACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES)

Sin embargo, aún sigue sin aprovecharse la mayor parte de este potencial, debido en parte a que ciertas tecnologías y técnicas de explotación no están del todo disponibles todavía, y de igual forma, desde el punto de vista de inversión los proyectos geotérmicos son arriesgados, requiriendo de capital constante en la fase inicial de exploración, en conjunto con el riesgo asociado a la perforación exploratoria profunda, fase considerada de alto riesgo por la incertidumbre en cuanto a la capacidad del recurso.

Por estos motivos es de gran importancia la generación de más trabajos de investigación que vayan orientados al mejoramiento y aumento en las técnicas de exploración para determinar zonas con potencial geotérmico que eficiente el factor procedimiento-costos, permitiendo al mismo tiempo sentar las bases para estudios más detallados que puedan llevar al uso y aprovechamiento de la geotermia en la generación de electricidad.

Los principales métodos empleados en la exploración geotérmica son los geofísicos y geoquímicos y más recientemente diversas técnicas basadas en la percepción remota. Las aplicaciones de esta última se han ido desarrollando y mejorando conjuntamente con las nuevas tecnologías disponibles en las diversas plataformas satelitales y en los sensores remotos montados en ellas.

El trabajo que se presenta se enfoca en la determinación de zonas potenciales para la exploración geotérmica, haciendo uso de herramientas de percepción remota para estimar parámetros observables sobre la superficie terrestre específicos de este tipo de zonas.



## **1.2 Planteamiento del Problema**

La producción de energía constituye una necesidad primordial de la cual el ser humano no puede prescindir en el mundo moderno. El carbón, el petróleo y el gas natural son las tres fuentes de combustibles de las que dependemos principalmente para cubrir nuestras necesidades energéticas. Sin embargo, existen varios problemas en la utilización de estas fuentes, tales como el costo, el agotamiento, la escasez y la contaminación.

Ante esta problemática, actualmente se exploran nuevas posibilidades de utilización de algunas fuentes de energías limpias, las cuales no se consumen ni agotan en sus procesos de transformación y aprovechamiento, así como la generación de un impacto ambiental mucho menor a aquellas producidas por las fuentes energéticas convencionales.

Tales características en conjunto con el aumento de la preocupación mundial por la sustentabilidad, han hecho que la utilización de estas fuentes de energía empiece a extenderse más cada día.

## **1.3 Justificación**

El aumento en el interés para la utilización de fuentes de energías limpias frente a las fuentes convencionales, va de la mano con el desarrollo de nuevas técnicas y herramientas utilizadas para su exploración, obtención y aprovechamiento, buscando la forma para lograr hacerlo de una forma más eficiente y económicamente rentable.

Como una de estas nuevas herramientas, la percepción remota se ha desarrollado en gran medida gracias a el avance científico y tecnológico de nuevos satélites, obteniendo información de la superficie terrestre a nivel global, consecuentemente se ha integrado en forma transdisciplinaria en diversas áreas de investigación, y dentro de las energías limpias en la exploración de recursos geotérmicos.

México es un país con uno de los mayores potenciales para la generación de energía geotérmica (González-Ruiz et al., 2015), por lo que la exploración de nuevas zonas potenciales para su explotación se vuelve vital para satisfacer las necesidades energéticas del país. Usando diversas técnicas de percepción remota se pretende mostrar la relación que existe entre diferentes manifestaciones superficiales y el potencial geotérmico de una zona determinada.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 General**

Determinar zonas potenciales para exploración geotérmica mediante la fusión de información satelital aplicando imágenes ópticas multiespectrales, técnicas de interferometría SAR y la incorporación de parámetros bio/geofísicos.

### **1.4.2 Específicos**

- Identificar y caracterizar mediante imágenes ópticas multiespectrales propiedades:

#### **Físicas:**

- Temperatura
- Flujos de calor

#### **Químicas:**

- Alteraciones hidrotermales
- Mineralización

- Detectar zonas de deformación superficial mediante técnicas de sensado activo: InSAR y DInSAR.
- Desarrollar una estructura computacional integradora de información satelital pasiva-activa para prospección geotérmica.
- Validar la metodología desarrollada mediante casos de entrenamiento: Acoculco, Puebla.

## 1.5 Alcance

En esta investigación se plantea el desarrollo de una metodología centrada en el tratamiento, análisis y fusión de imágenes obtenidas por medio de sistemas de percepción remota para determinar zonas con potencial para la exploración geotérmica.

Para el desarrollo de esta metodología se requiere de información satelital capaz de determinar indicadores superficiales asociados a una zona geotérmica: anomalías térmicas superficiales, alteraciones hidrotermales y deformaciones del terreno. La calidad de la información que se obtiene de estas plataformas depende en cierta medida de las características técnicas de los sensores y del pre-procesamiento de las imágenes.

Los dos primeros indicadores pueden obtenerse mediante los sensores, óptico y térmico, de la plataforma Landsat-8. La capacidad del sensor térmico compuesto por dos bandas espectrales permite producir mapas de temperatura superficial más precisos que su antecesor (Landsat-7). En el caso del mapeo de alteraciones hidrotermales una limitante que se presenta esta en el rango espectral del sensor óptico, el cual permite la identificación de grupos minerales, pero no de minerales individuales, así los mapas generados se enfocan únicamente en la presencia de grupos minerales asociados comúnmente a zonas con actividad geotérmica. Para el indicador de las deformaciones de superficie se requiere el uso de técnicas de Radar de Apertura Sintética (SAR) que utiliza sensores activos, como el de la misión Sentinel-1. Estas técnicas requieren de una gran capacidad computacional, teniendo tiempos de procesamiento largos, siendo indispensable la elección de los datos más adecuados en la etapa de pre-procesamiento.

La capacidad de la metodología será comprobada en una zona de prueba que cuenta con estudios previos para el aprovechamiento de energía geotérmica, utilizando información disponible del sitio y los indicadores calculados se determinaran áreas que pudieran tener el mayor potencial geotérmico de la zona.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Energías renovables: geotermia**

Actualmente, la producción de energía se ha convertido en uno de los principales motores impulsores que interviene en el crecimiento económico de los países, y en conjunto con el crecimiento en el nivel de vida de la población, ha generado el aumento continuo de la demanda energética. (Karacsonyi, 2002)

Los recursos fósiles son la principal fuente utilizada para la generación de energía, desafortunadamente estos afectan de diversas maneras al medio ambiente, una de las principales problemáticas es la emisión de gases como bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), e hidrofluorocarbonos (HFC), los cuales aceleran el fenómeno denominado “efecto invernadero”, que provoca el aumento de la temperatura planetaria debido a la retención de la radiación infrarroja terrestre. Ante esta situación diversos países han asumido compromisos para mitigar la emisión de gases contaminantes. Una de las formas más directas y eficaces para reducir la emisión de gases contaminantes está en sustituir recursos fósiles en la generación de energía, por recursos renovables. (SENER, 2012; SEMARNAT, 2015)

Las energías renovables aún figuran con un menor porcentaje dentro de la producción energética, debido principalmente a la disponibilidad, costo y limitaciones técnicas. Sin embargo, en la última década, la adopción de tecnologías de energías renovables ha aumentado rápidamente y se prevé que esta tendencia continúe en los próximos años. (Karacsonyi, 2002)

La energía geotérmica tiene una huella ambiental de bajo impacto por lo que se considera una fuente verde de energía, además de ser renovable, tiene el potencial para convertirse en la fuente mundial más económica de combustible térmico sostenible para emisiones cero y generación de energía (Goldstein et al., 2013). Esta aprovecha el calor generado en el interior del planeta que se almacena o se descarga a través de las rocas y fluidos, la principal fuente de esta energía proviene

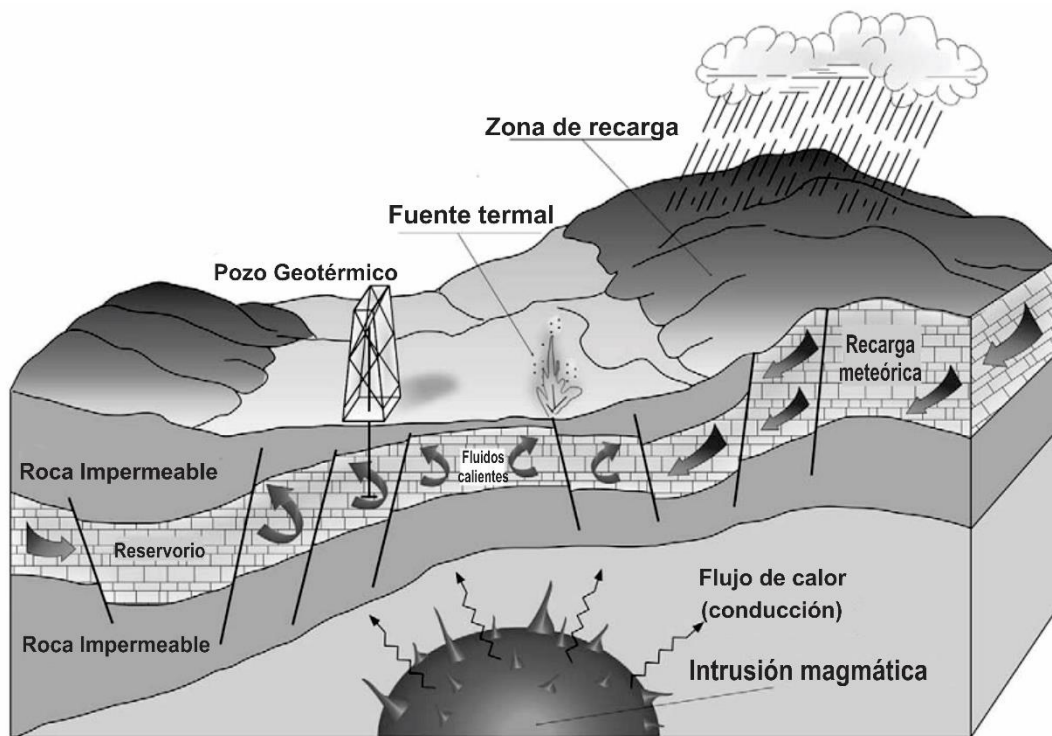
del flujo de calor proveniente del núcleo y manto terrestre, debido al decaimiento de elementos radioactivos que se encuentra en la corteza o por el calor generado debido a la fricción en las zonas de subducción a lo largo de los márgenes de las placas continentales. El calor generado en el interior de la Tierra se manifiesta de diversas maneras en la superficie terrestre, algunas de las más evidentes son a través de los volcanes, los geiseres, y las aguas termales. Algunas de estas manifestaciones naturales de la energía geotérmica, en mayor medida el vapor y agua caliente, han sido explotadas por décadas en la generación de energía eléctrica. (Kaltschmitt, Formighieri, & Bass, 2013)(Lund, 2012)

### **2.1.1 Puntos geotérmicos**

Los campos o puntos geotérmicos son aquellas zonas confinadas de la corteza terrestre en las cuales existe un flujo anormal de calor más alto que en las áreas circundantes que produce el calentamiento de las aguas contenidas en los estratos de rocas permeables a profundidad. Se encuentran cubiertos por una capa rocosa impermeable que impide el escape de fluido caliente. (Barbier, 2002; Sierra & Pedro, 1998)

La primera indicación significativa de que las rocas en el subsuelo son más calientes de lo normal está en la actividad geotermal superficial, estas se manifiestan como fumarolas, geiseres, aguas termales, salidas de vapor, así como también a una mayor escala en los volcanes activos. La fuente de calor generalmente es una masa magmática a alta temperatura (600-1000 °C) a profundidades alrededor de entre 7 a 15 km de la superficie terrestre. Cabe señalar que los campos geotérmicos también pueden formarse en regiones no afectadas por intrusiones magmáticas recientes (Cuaternario). Las causas en las anomalías del flujo de calor pueden deberse a situaciones tectónicas particulares, como el adelgazamiento de la corteza continental, lo que implica que el límite corteza-manto ascienda y como consecuencia tener temperaturas mayores a profundidades más superficiales. (Barbier, 2002)

Para tener un recurso geotérmico productivo, se requiere más que una anomalía térmica, también se necesita un **reservorio**. El reservorio geotérmico está formado por roca de alta permeabilidad, con un volumen suficiente para contener una cantidad de fluido que asegure su explotación comercial. En algunos casos la permeabilidad se debe a la fractura de rocas impermeables, a esto se le llama permeabilidad secundaria. El agua que contiene el reservorio es principalmente de origen meteórico, cuyo ingreso tiene lugar en las **áreas de recarga**, es decir, en las zonas donde se produce el afloramiento de la capa permeable, lo que mantiene un balance hidrológico parcial, a pesar de la remoción natural de fluido a través de manantiales termales como se muestra en la figura 7 (Barbier, 2002; Sierra & Pedro, 1998).



**FIGURA 7. MODELO DE UN SISTEMA GEOTÉRMICO CON SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS (BARBIER, 2002)**

## 2.1.2 Clasificación y aplicaciones

La clasificación de los recursos geotérmicos (White & Williams, 1975) se muestra en la tabla 1. Los rangos de temperaturas de estos recursos geotérmicos oscilan entre la temperatura ambiente anual alrededor de 20 °C hasta los 300°C. Los recursos arriba de los 150°C son usados para la generación de energía eléctrica, mientras que a temperaturas menores a 150 °C son generalmente usados en proyectos de uso directo para calefacción y refrigeración. (Kaltschmitt et al., 2013)

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS SEGÚN WHITE Y WILLIAMS

Tipo de Recurso	Rango de temperatura (°C)
Recursos de convección hidrotermal	
<b>Vapor dominante</b>	≈ 240°
<b>Agua caliente dominante</b>	20° a 350°
Recursos de Roca Caliente	
<b>Parte aún fundida (magma)</b>	> 600°
<b>Solidificada (roca seca caliente)</b>	90° a 650°
Otros recursos	
<b>Cuencas Sedimentarias</b>	20° a 150°
<b>Geopresurizadas</b>	90° a 200°
<b>Radiogénicos</b>	30° a 150°

Los sistemas hidrotermales son el tipo más común de recursos geotérmicos, esto en términos de explotación comercial a nivel mundial. Idealmente este tipo de sistemas implica la conjunción de una fuente de calor no muy profunda con un acuífero que transporte y en ocasiones almacene el calor y una estructura impermeable confinante. (Muñoz, 2014)

Los sistemas hidrotermales, en función de las características del fluido producido pueden dividirse en (Sierra & Pedro, 1998):

- a) **Campos con producción de agua caliente:** El agua del reservorio tiene una temperatura entre 60-100°C. Pueden encontrarse en áreas de flujo de calor normal o ligeramente superior al normal. Para su explotación comercial la profundidad del reservorio no debe superar los 2000 metros, utilizándose el fluido con fines agrícolas e industriales, así como para calefacción y suministro de agua caliente.
- b) **Campos con producción de vapor húmedo:** En estos campos, conocidos como de "líquido-dominante", el reservorio contiene agua a una temperatura mayor de 100 °C y una pequeña cantidad de vapor. Durante la extracción se produce una disminución de presión que origina una vaporización parcial del agua, obteniéndose así una mezcla de agua y vapor en las condiciones de saturación, con una baja concentración de gases incondensables. Los sistemas hidrotermales más explotados a nivel industrial pertenecen a este tipo. La utilización principal es la generación de energía eléctrica, además de los otros usos posibles del agua caliente residual. En México los campos de vapor húmedo que producen electricidad, son: Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros.
- c) **Campos con producción de vapor sobrecalentado:** Estos campos también denominados de "vapor-dominante", producen vapor seco, generalmente sobrecalentado, con gases, con una relativamente alta cantidad de gases incondensables, principalmente de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> y sulfuro de hidrogeno. El grado de sobrecalentamiento pueden alcanzar hasta 100°C y se utiliza el vapor para la producción de energía eléctrica. Cerca de la mitad de la energía eléctrica geotérmica generada del mundo proviene de seis campos de vapor-dominante: Larderello y Monte Amiata (Italia), Matsukawa (Japón), The Geysers (EE.UU.) y Copahue (Argentina).



### 2.1.3 Aprovechamiento de la geotermia en México

México se posiciona entre los primeros lugares a nivel mundial en el aprovechamiento de energía geotérmica, esto a través del constante y significativo desarrollo que se viene dando desde hace casi 60 años, con la primera planta piloto instalada en Pathé, localidad del estado de Hidalgo, en noviembre de 1959. Actualmente la Comisión Federal de Electricidad (CFE), organismo público encargado de la generación, transmisión y comercialización de la energía eléctrica en México, opera cuatro campos geotérmicos a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) (Fig. 8). Esos campos son los de Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres localizado en Michoacán, Los Humeros en Puebla, y Las Tres Vírgenes en Baja California Sur, con una capacidad instalada actual de 1017.4 MWe. (Gutiérrez-Negrín, Maya-González, & Quijano-León, 2015; Maya González & Gutiérrez-Negrín, 2007)



FIGURA 8. PRINCIPALES CAMPOS GEOTÉRMICOS EN MÉXICO OPERADOS POR LA GPG

El campo más antiguo y que aún sigue en operación es el de Cerro Prieto, iniciando la explotación comercial en 1973. Se localiza en la porción norte de México, muy cerca de la frontera con Estados Unidos, en el valle de Mexicali, Baja California. Destaca por albergar la planta geotérmica más grande de México y por ser el segundo campo más grande del mundo, sólo por debajo de *The Geysers*, en California, EUA (Maya González & Gutiérrez-Negrín, 2007).

Este campo se encuentra en una cuenca sedimentaria formada por dos fallas activas de deslizamiento que pertenecen al sistema de fallas activas de San Andrés. La fuente de calor del sistema geotérmico es una anomalía térmica producto del adelgazamiento de la corteza continental en la cuenca. Los fluidos geotérmicos se alojan en rocas sedimentaria de tipo areniscas, con alrededor de 2400 metros de espesor (Flores-Armenta, Ramírez-Montes, & Morales-Alcalá, 2014).

La planta de Cerro Prieto aporta cerca de tres cuartas partes del total de capacidad instalada en México con 720 MWe, además de que exporta electricidad a Estados Unidos (Alemán-Nava et al., 2014).

El segundo campo geotérmico en operar en México es el de Los Azufres, se localiza en la parte central de México, en el estado de Michoacán, ubicado en la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Mexicana a una altitud alrededor de 2800 msnm. Es un campo volcánico cuyos fluidos geotérmicos se alojan en rocas andesíticas afectadas por tres sistemas de fallas producidas por actividad tectónica local y regional. La fuente de calor del sistema se relaciona con la cámara magmática del volcán San Andrés. Las primeras unidades de potencia comenzaron a operar en 1982 y actualmente cuenta con una capacidad instalada de 194 MWe (Flores-Armenta et al., 2014; Gutiérrez-Negrín et al., 2015).

Otro campo volcánico en operación son los Humeros, situado en la parte central de México al extremo oriente de la Faja Volcánica Mexicana, en los límites de los estados de Puebla y Veracruz. Se encuentra al interior de una caldera cuaternaria a 2600 metros sobre el nivel del mar. La cámara magmática que dio origen a la caldera es la principal fuente de calor y los fluidos geotérmicos son alojados en

rocas andesíticas con temperaturas de hasta 400°C. La capacidad instalada actual del campo es de 93.4 MWe (Gutiérrez-Negrín et al., 2015).

El campo más pequeño y reciente operando en México es el de Las Tres Vírgenes, localizado en la parte media de la península de Baja California, en el estado de Baja California Sur. Este se encuentra en un complejo volcánico cuaternario formado por tres volcanes. La fuente de calor del sistema se relaciona esencialmente con la cámara magmática del volcán La Virgen, que es el más joven del complejo volcánico. La capacidad instalada con la que cuenta es de 10 MWe.

Además de los cuatro campos geotérmicos generando actualmente electricidad, la CFE tiene identificado otro campo llamado Cerritos Colorados, conocido anteriormente como La Primavera, ubicado en el área central de México cerca de Guadalajara, Jalisco, aunque aún no opera ninguna planta, los estudios exploratorios muestran la existencia de un recurso geotérmico con un potencial estimado de 75 MWe (Quijano-León & Gutiérrez-Negrín, 2003).

Otras zonas con un potencial promisorio se han identificado gracias a estudios de exploración en algunas de las más de 2000 manifestaciones termales conocidas en la República Mexicana, destacando entre estas las de Tulechek y Ejido de León en Baja California, Piedras de Lumbre en Chihuahua, Acoculco en Puebla, Lago de Cuitzeo en Michoacán y el Volcán Chichonal en Chiapas (Flores-Armenta et al., 2014).

Igualmente se debe considerar la existencia del potencial geotérmico submarino en México. Las estimaciones para el potencial geotermoeléctrico con recursos hidrotermales submarinos en el Golfo de California y en la plataforma continental de México son de 1200 MW, aunque este potencial debe considerarse como una estimación muy preliminar que requiere ser medida y estudiada con mayor detalle (Hiriart Le Bert et al., 2011).

La gran actividad tectónica y volcánica del territorio mexicano dota al país con un gran potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica proporcionando

amplias oportunidades para ser explotada y lograr una transición de fuentes renovables con la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas del país.

## **2.2 Técnicas de prospección/exploración geotérmica**

En la búsqueda de cualquier recurso natural, se debe definir y seguir una estrategia en el proceso de exploración, esto también aplica a los recursos geotérmicos. Una vez identificada una región geotérmica el siguiente paso es hacer uso de diferentes técnicas de exploración para localizar el área geotérmica de mayor interés e identificar objetivos adecuados para la producción de fluidos (Barbier, 2002).

Las técnicas empleadas en las distintas fases de la exploración de recursos geotérmicos, se pueden agrupar como:

- Técnicas geológicas
- Técnicas geofísicas
- Técnicas geoquímicas
- Técnicas termométricas

### **2.2.1 Técnicas geológicas**

El uso de técnicas geológicas en la exploración geotérmica está dirigido a ubicar y caracterizar la anomalía térmica o fuente de calor, el reservorio y la capa sello (Sierra & Pedro, 1998). La primera etapa debe iniciar con la cartografía de la zona, en donde se incluye información de la secuencia litológica y vulcanológica, información estructural (fallas y fracturas), información topográfica, información hidrotermal (manifestaciones superficiales, áreas de alteración), información radiométrica, mapeo de gases del subsuelo (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Hg, B). Para llevar a cabo estas tareas se emplean diversas herramientas disponibles, entre las que están: imágenes satelitales y fotografía aérea, sistemas de posicionamiento global (GPS), modelos digitales de elevación del terreno (MDE), detectores de gases, sistemas de información geográfica (SIG); con base a toda la información recabada, se pueden

elaborar modelos geológicos preliminares del subsuelo, sirviendo de guía para los siguientes estados de la exploración (Hiriart Le Bert et al., 2011).

Las técnicas geológicas también incluyen otro tipo de estudios, entre los que se encuentran: el estudio petrológico de lavas y productos volcánicos para caracterizar la naturaleza del magma, esencialmente su grado de acidez y diferenciación, los estudios estratigráficos los cuales establecen las características del reservorio y de la capa sello. Y, las técnicas hidrogeológicas, que integrando estudios geológicos y de aguas subterráneas determinan el sistema estratigráfico y estructural, el sentido de circulación de los fluidos en profundidad y el área de recarga. (Sierra & Pedro, 1998)

### **2.2.2 Técnicas geofísicas**

Los métodos geofísicos se emplean como complemento y apoyo a la exploración geológica, se cuenta con diversas técnicas que miden alguna propiedad física del subsuelo, esto mediante sondeos realizados en superficie o levantamientos aéreos. Los datos obtenidos se usan en la elaboración de modelos uni, bi o tridimensionales de la distribución de la propiedad medida en el subsuelo, para luego dar una interpretación geológica del modelo geofísico (Hiriart Le Bert et al., 2011).

Los métodos geofísicos que comúnmente se utilizan en la exploración geotérmica son los estudios de resistividad del subsuelo, los gravimétricos y magnetométricos, sísmicos, así como los estudios térmicos y de flujo de calor, estos últimos relacionados directamente con el tipo de anomalías que nos interesan (Quijano León, 2007).

Los estudios geofísicos se vuelven indispensables en las primeras etapas de la exploración, cuando aún no existen perforaciones profundas, para tener un mayor conocimiento de la estructura interna de la Tierra.

- **Métodos eléctricos**

Este tipo de métodos se basan en la medición de la resistividad eléctrica de las rocas, introduciendo en el terreno una corriente de intensidad conocida y midiendo

la diferencia de potencial producida. La resistividad disminuye al aumentar la temperatura, por la presencia de rocas alteradas, pero fundamentalmente por la presencia de aguas salinas. En depósitos geotérmicos la temperatura y salinidad de los fluidos tiende a ser más alta que en las rocas adyacentes, por lo que la resistividad generalmente es baja. Por lo tanto, este método es adecuado para detectar este contraste en la resistividad entre las rocas saturadas de agua caliente y las rocas frías circundantes (Barbier, 2002).

- Métodos gravimétricos

El método gravimétrico estudia las variaciones en el campo gravitacional de la Tierra que se producen como consecuencia de la diferencia de densidades de las distintas formaciones geológicas (Ochieng, 2016). Por sí solas, las anomalías gravitacionales no son indicativos de que una región sea geotérmica, pero mediante la interpretación de los datos se obtiene información acerca de las estructuras profundas, del tipo de rocas, así como su distribución y características geométricas, localización de fallas, zonas de fracturas o alteración (Barbier, 2002).

- Métodos magnetométricos

Los estudios magnéticos se fundamentan en la respuesta magnética, inducida por el campo magnético de la Tierra, en ciertos minerales que se encuentran cerca de la superficie terrestre. Con los cambios espaciales en el campo magnético que se detectan se pueden deducir variaciones en la distribución de minerales magnéticos y relaciones con estructuras geológicas (Barbier, 2002). Los estudios magnéticos son una herramienta útil para la prospección geotérmica en la detección de zonas que carecen de rasgos magnéticos, debido a la destrucción de la magnetita en rocas cercanas a la superficie por alteración hidrotermal (Ochieng, 2016).

- Métodos sísmicos

La prospección sísmica aprovecha la capacidad de las ondas elásticas o sísmicas de ser transmitidas a través de las rocas, las ondas sísmicas son generadas por pequeños terremotos producidos natural o artificialmente, y se miden sus velocidades al ser reflejadas o refractadas (Sierra & Pedro, 1998). La interpretación

de la información sísmica provee datos para ayudar a determinar la ubicación de fallas activas que pueden dirigir fluidos calientes hacia la superficie, así como también la estructura y las propiedades de los cuerpos rocosos (Barbier, 2002).

- Flujos de calor

El cálculo de flujos de calor es una técnica aún más específica que los métodos tradicionales mencionados anteriormente, el objetivo es reconocer las zonas de mayor anomalía térmica (Sierra & Pedro, 1998). La realización de la prospección requiere de la perforación de pozos de poca profundidad, menores a 300 m, en los que se efectúa la medición de temperaturas, para calcular el gradiente geotérmico. En los puntos donde se obtuvo el gradiente se mide la conductividad térmica de la roca, esto a través de mediciones de laboratorio sobre muestras de núcleo. Con esta información se calcula el flujo de calor en cada punto. En áreas geotérmicas, los valores altos de flujos de calor son un buen indicador de zonas de mayor interés geotérmico (Barbier, 2002).

### **2.2.3 Técnicas geoquímicas**

Los estudios geoquímicos son una herramienta útil durante la etapa de reconocimiento, su objetivo es evaluar las temperaturas y condiciones químicas del fluido en profundidad (Kaltschmitt et al., 2013), siempre que existan manifestaciones térmicas en donde puedan obtenerse muestras de fluido, en estudios geotérmicos pueden ser: muestras de aguas termales, muestras de vapor de fumarolas y muestras de gas. Los estudios geoquímicos de fluidos geotérmicos involucran tres pasos principales: 1) recolección de muestras, 2) análisis químico y 3) interpretación de datos (Barbier, 2002). La composición química e isotópica de los fluidos termales proporcionan información acerca de la composición y distribución de los fluidos en profundidad, su temperatura, presión y estado físico (vapor o agua), rocas superficiales asociadas, origen y tiempo de residencia del fluido, dirección de circulación, permeabilidad y flujo natural de calor. Los métodos geoquímicos son de

gran utilidad durante las etapas de exploración debido a su bajo costo en relación con los métodos geofísicos ( Sierra & Pedro, 1998).

#### **2.2.4 Técnicas termométricas**

Estas técnicas miden directamente las anomalías térmicas, objetivo principal en la exploración geotérmica. Se pueden dividir en tres tipos: medición de la distribución de temperatura superficial; medición de gradiente y flujo térmico en pozos; y determinación de la descarga superficial natural de calor. Hoy en día existen gran número de mediciones de temperatura y flujo de calor en pozos en todo el mundo. El gradiente térmico de zonas al interior de las placas tectónicas es del orden de 0.01 a 0.03 °C/m de profundidad, siendo que en acuíferos hidrotermales las anomalías de gradientes pueden llegar a ser hasta diez o más veces mayores (Hiriart Le Bert et al., 2011).

#### **2.2.5 Nuevas tecnologías de exploración**

La exploración de recursos geotérmicos tradicionalmente se ha apoyado en el conjunto de las diversas técnicas presentadas anteriormente. Y más recientemente se han realizado estudios con tecnologías de reciente creación, entre las que destacan las *técnicas de percepción remota*, las cuales representan hoy en día una de las opciones con un potencial en continuo crecimiento debido al desarrollo constante de nuevos satélites y a los diversos sensores que se estos poseen. Estos últimos medirán parámetros en la superficie terrestre que apoyen en la detección de potencial geotérmico. Una gran variedad de estudios aplicando estas técnicas se han realizado en los últimos años, enfocándose principalmente en parámetros como: la mineralogía de alteración, las anomalías de temperatura y los flujos de calor, así también la deformación de la superficie y las anomalías geobotánicas.



- Mapeo Mineral

En cuanto a la exploración geotérmica, estas herramientas de percepción remota se han aplicado principalmente en la identificación de materiales en superficie y de grupos minerales, con el objetivo de extraer y mapear información de alteraciones hidrotermales asociadas a los cambios en temperatura y química del ambiente resultado de la interacción que llega a ocurrir con agua caliente y vapor de gas de un sistema geotérmico. Existen múltiples trabajos en esta área que emplean imágenes multispectrales e hiperespectrales como imágenes LANDSAT y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) con las cuales, se ha detectado zonas de alteración mineral, así como su mapeo empleando modelos basados en Análisis de Componentes Principales (ACP), complementando con diversos cocientes de bandas, útiles en la detección de alteraciones minerales hidrotermales y tiene una amplia aplicación en el mapeo mineral y geológico.

La metodología descrita se ha usado en el mapeo de depósitos magmáticos hidrotermales y de metales preciosos en el distrito de Honghai, China, (Wang, Du, & Carranza, 2016) en el cual proporcionó una visión de bajo costo de zonas de alteración en aéreas con buena exposición de las rocas. Así como en el desierto oriental de Egipto (Khalil, El-Desoky, & Salem, 2016) utilizando imágenes Landsat 8, que han servido en la detección de minerales de alteración mineral, su posterior mapeo y detectar las áreas de posible ocurrencia de titanita, mineral ligado a sistemas hidrotermales.

- Temperatura Superficial y Flujo de Calor

Los datos obtenidos de los sensores TIR (Thermal Infrared) han sido ampliamente utilizados en la detección de temperatura superficial que posteriormente se puede relacionar con calor geotérmico. Se han empleado tanto imágenes LANDSAT como ASTER TIR. De este último, estudios aplicados a campos geotérmicos como el de la caldera La Pacana en Chile (van der Meer et al., 2014) han presentado buena correspondencia entre la temperatura obtenida en campo y la temperatura derivada de ASTER.

Además de su aplicación en la detección de temperatura superficial, se ha investigado el potencial de estos datos en la estimación del *flujo de calor geotérmico*. Un acercamiento utilizando imágenes LANDSAT ETM+ se realizó por Watson en 2008. Más recientemente (Vaughan, Keszthelyi, Lowenstern, Jaworowski, & Heasler, 2012) usando una combinación de imágenes ASTER y MODIS se ha estimado el Flujo de Calor Geotérmico, dando resultados en la identificación de cambios de fondo y efectos estacionales para mejorar la extracción de anomalías geotérmicas.

- Deformación en Superficie

La interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) InSAR, es una técnica de percepción remota enfocada principalmente en el monitoreo de subsidencias del suelo y deformación de la superficie y que se ha aplicado en diversos estudios en sitios geotérmicos. Las mediciones se han realizado con datos del ERS (European Remote Sensing Satellite), la ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) y de la ESA (European Space Agency).

Cada vez se llevan a cabo más de estas mediciones en proyectos geotérmicos, como es el caso de la subsidencia del campo geotérmico de Cierro Prieto, México (Carnec & Fabriol, 1999), resultado de la extracción de fluidos geotérmicos. Por otro lado, en Islandia se realizó un estudio sobre las características superficiales de las depresiones en la cubierta de hielo de Vatnajokull (Jónsson, Adam, & Björnsson, 1998), debido al calentamiento geotérmico. Existen también otra serie de estudios (Lubitz, Motagh, Wetzel, & Kaufmann, 2013; Sass & Burbaum, 2010) en la ciudad alemana de Staufen en un sitio de exploración geotérmica, donde ocurrieron levantamientos y daños en edificios debido a la perforación de pozos con anhídrita. En todos estos estudios los datos InSAR han demostrado su sensibilidad a la topografía y a los cambios de elevación del terreno.

## CAPÍTULO 3

### DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE PRUEBA

#### 3.1 Campo geotérmico Acoculco, Puebla

Al centro de México, en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) se alojan el 79% de las anomalías termales conocidas (González-Ruiz et al., 2015), siendo explotadas comercialmente solo dos de ellas, los campos geotérmicos de Los Azufres y Los Humeros, mientras que algunos otros sistemas geotérmicos siguen siendo investigados para determinar su potencial para producir electricidad. Uno de ellos es el área de Acoculco (Fig. 9), identificado inicialmente durante un programa de exploración regional conducido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), debido a la presencia de una extensa alteración hidrotermal en la superficie, manantiales fríos ácidos y descargas de gas, junto con reportes de animales muertos por envenenamiento cuando se acercaban a beber (López Hernández, 2009).

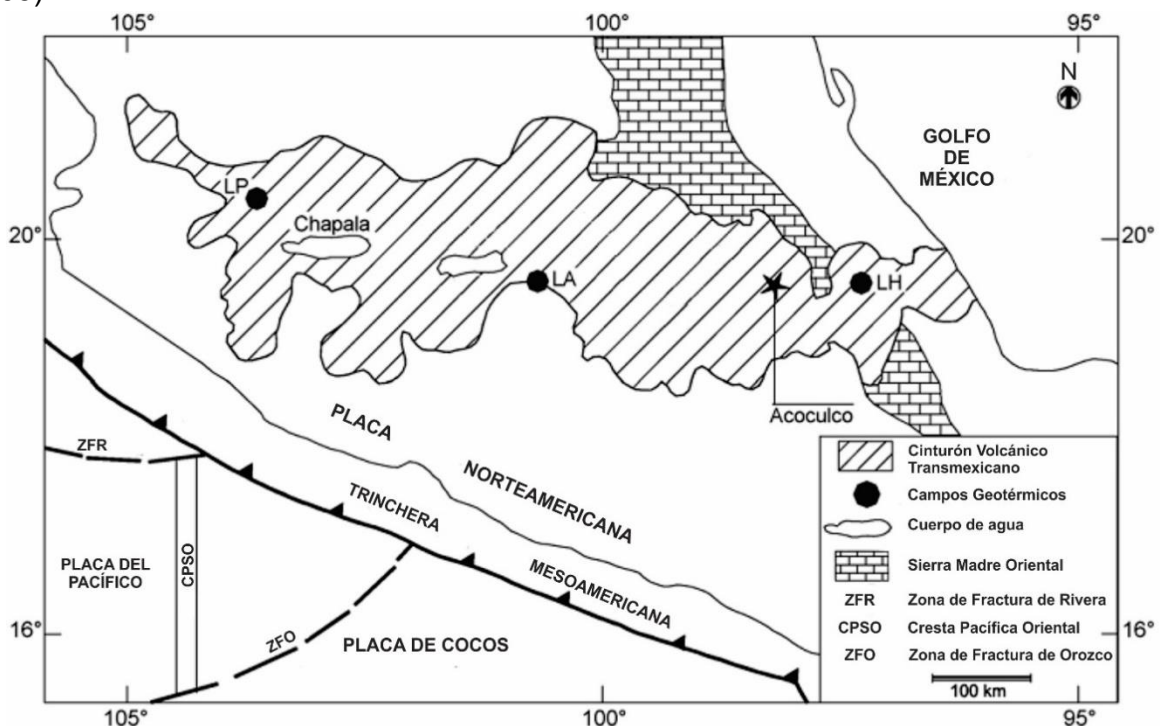
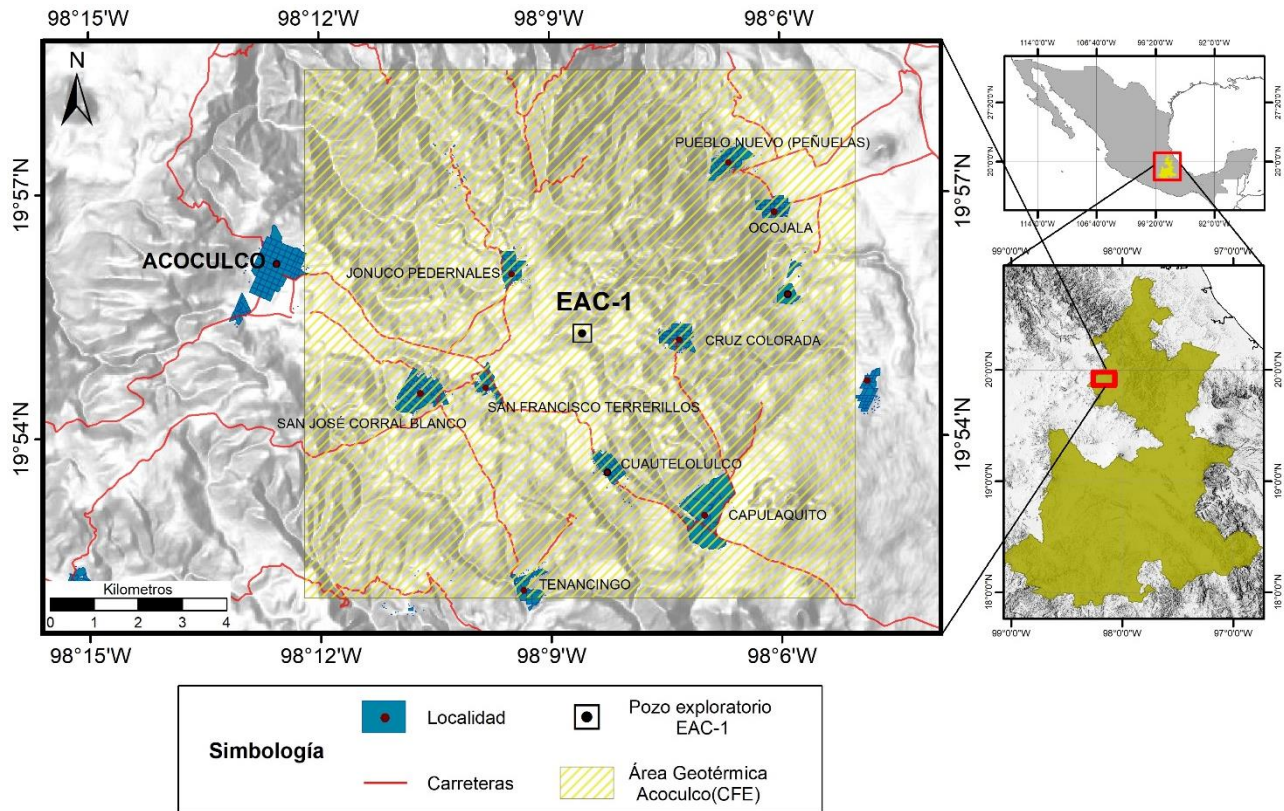


FIGURA 9. MAPA DEL CENTRO DE MÉXICO CON LA UBICACIÓN DEL CVTM, LOS PRINCIPALES CAMPOS GEOTÉRMICOS Y LA ZONA DE ACOCULCO. CAMPOS GEOTÉRMICOS: (LH) LOS HUMEROS; (LA) LOS AZUFRES; (LP) LA PRIMAVERA. (MODIFICADO DE LÓPEZ-HERNÁNDEZ, 2009)

### 3.2 Localización

La zona geotérmica de Acozulco, es un complejo volcánico localizado fisiográficamente en la parte oriente del Cinturón Volcánico Transmexicano, cercana a los límites con la Sierra Madre Oriental (Fig. 10). De manera local, el sistema geotérmico se ubica en los límites de los estados de Puebla e Hidalgo, en el municipio de Chignahuapan, Pue., a 85 kilómetros al noroeste de la ciudad de Puebla y a 65 kilómetros al sureste de la ciudad de Pachuca, Hgo., entre las coordenadas 19° 47" y 20°02" de latitud norte y 97°55" y 98°20" de longitud oeste. Cuenta con elevaciones que van desde 2800 hasta 2900 metros sobre el nivel del mar.



**FIGURA 10. LOCALIZACIÓN DEL ÁREAS GEOTÉRMICA EN ACOCULCO, PUEBLA (DATOS DE INEGI Y CFE)**

### 3.3 Geología

El sistema geotérmico de Acoculco se encuentra dentro del complejo de caldera volcánica Tulancingo-Acoculco, uno de los más grandes del CVTM. Este complejo de edades Plioceno-Cuaternario, se constituye principalmente por derrames de lava, domos y productos piroclásticos, depositados sobre rocas sedimentarias mesozoicas (lutitas y calizas) fuertemente plegadas y metamorfizadas (López-Hernández et al., 2009). Su formación se relaciona a dos ciclos volcánicos significativos, cada uno acompañado con un colapso de Caldera. El más antiguo, con edad Plioceno Medio, dio origen a la llamada caldera Tulancingo, es la más grande de las dos con un diámetro de 32 km. El más reciente, del Pleistoceno, dio origen a la caldera Acoculco, emplazada en el centro del complejo en forma semicircular, con un diámetro de 18 km (López Hernández, 2009).

El primer episodio volcánico comenzó con la emisión de lavas de composición riodacítica de la unidad Las Minas, emplazándose sobre la secuencia sedimentaria metamorfizada. Posteriormente, esta unidad fue cubierta por grandes depósitos de productos piroclásticos pertenecientes a la ignimbrita Los Azufres de composición riolítica, esta erupción resultó en la formación de la caldera Tulancingo (López Hernández, 2009). Los últimos eventos post-caldericos corresponden a derrames de lavas de composición dacítica, que formaron un paquete de lavas de espesor variable, posteriormente se emplazaron domos riodacíticos sobre el borde de la caldera formando el complejo Yolo (López Hernández, 2009).

La actividad magmática de Acoculco comenzó aproximadamente hace 2.7 Ma con la presurización de magma andesítico que quebrantó las calizas Cretácicas y vulcanismo pre caldera. Este evento produjo una ignimbrita andesítica que despresurizó la cámara magmática causando el colapso del techo y la generación de brechas líticas y más ignimbrita, formándose así la caldera asimétrica (Avellán et al., 2018).

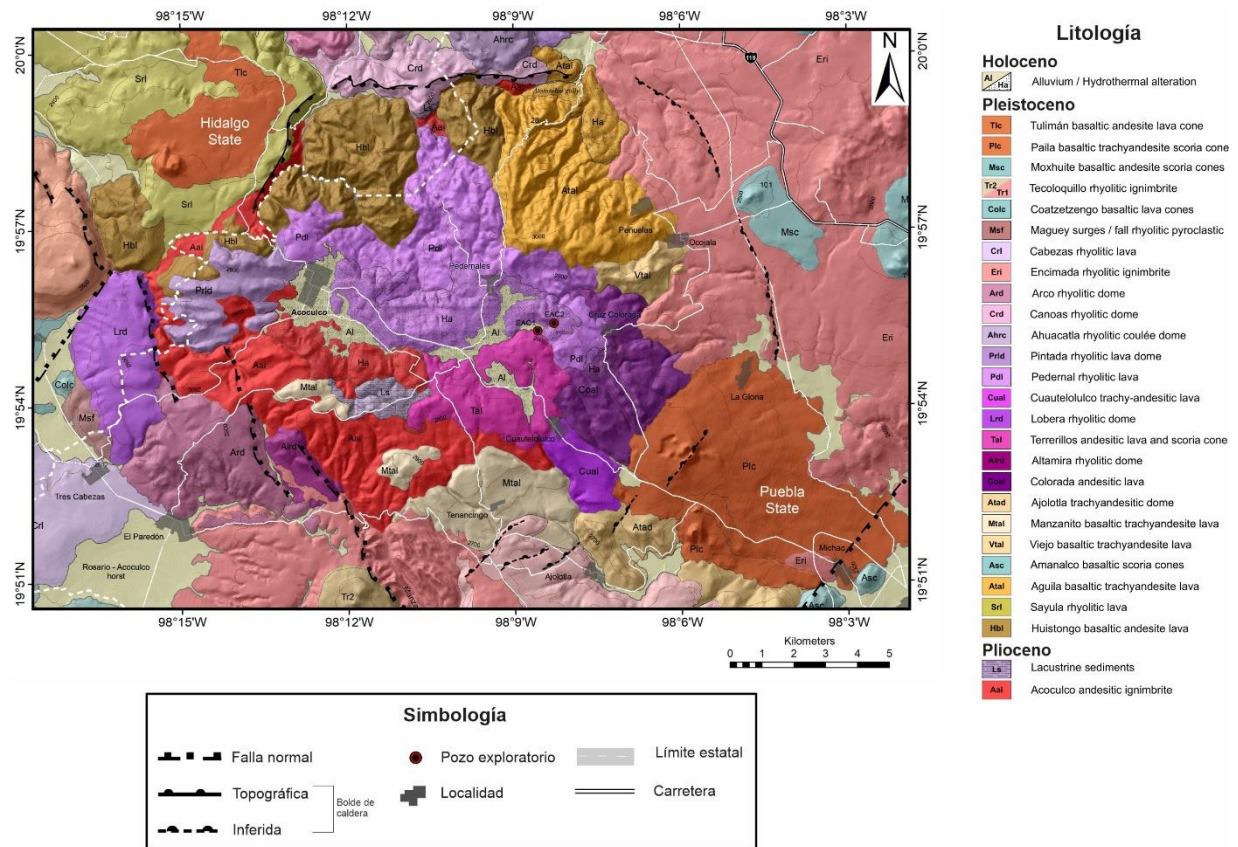


FIGURA 11. GEOLOGÍA ZONA DE ACOZULCO, PUE. (AVELLÁN ET AL., 2018)

Después de la formación de la caldera, un periodo de extrusiones emplazó los domos riolíticos post-caldera a lo largo de la estructura del anillo (Avellán et al., 2018). El domo Tecoloquillo en el borde sur, estuvo acompañado de pequeñas erupciones piroclásticas que formaron la Toba Tecoloquillo. El interior de la caldera fue llenado parcialmente con sedimentos lacustres (López-Hernández et al., 2009).

Un reajuste de la presión en la cámara magmática durante la sedimentación, dio lugar a un proceso de resurgencia, con centro en el poblado de Acozulco, los esfuerzos generados fueron responsables de la mayor parte del fallamiento y fracturamiento después del colapso, así como de la deformación de algunos depósitos lacustres. Al mismo tiempo se emplazaron algunos domos riolíticos alrededor del poblado de Acozulco (López Hernández, 2009).

Los últimos eventos relacionados a la evolución de la caldera emitieron el cono de lava Tulliman y el cono de escoria de La Paila emplazados en la parte noroeste y sureste sobre la fractura anular de la Caldera Acoculco (Avellán et al., 2018).

Esta caldera, en la actualidad se encuentra en la etapa hidrotermal, que es la fase terminal del ciclo volcánico, donde se depositan minerales secundarios que disminuyen su permeabilidad. Esto ha autosellado el sistema hidrotermal, lo que impide la formación de manifestaciones termales en superficie, en cambio gases fríos de origen magmático se liberan a la atmosfera ascendiendo a través de fisuras muy reducidas, perdiendo la mayor parte de su temperatura (López Hernández, 2009).

Alrededor del complejo calderico se produjo vulcanismo extracaldera del Campo Volcánico Apan-Tezontepec que intercalo los productos de Acoculco con basaltos y basaltos andesítico, este vulcanismo emplazó conos de escoria basáltica, flujos de lava asociados, algunos volcanes escudos y cenizas de caída que formaron extensas mesetas volcánicas (Avellán et al., 2018).

La geometría subcircular de la caldera de Acoculco se definió por la presencia del escarpe de Atotonilco al norte, la falla de Manzanito al suroeste y los sitios de ventilación en las partes este y sur. (Avellán et al., 2018). El complejo calderico se encuentra estructuralmente sobre la intersección de dos sistemas de fallas regionales, una con tendencia NE y la otra NW, ambos sistemas se encuentran cubiertos por rocas volcánicas. Estas fallas unen un graben apical que se relaciona con la formación de un domo resurgente dentro de la caldera Acoculco. Las únicas fallas expuestas en superficie se localizan al oeste y sureste de la localidad de Acoculco, siendo pequeñas fallas con orientación E. A lo largo de estas fallas no se observa rasgos de alteración hidrotermal, lo que sugiere que no tienen conexión directa con el sistema hidrotermal profundo (López-Hernández et al., 2009).

### **3.4 Sistema Geotérmico Hidrotermal**

Los sistemas hidrotermales suelen desarrollarse en la etapa terminal de los complejos volcánicos. La actividad de los sistemas hidrotermales activos se llega a manifestar en superficie como manantiales calientes, fumarolas, suelos calientes, volcanes de lodo. Especialmente en las calderas volcánicas se tienden a desarrollar sistemas hidrotermales de gran magnitud, la gran cantidad de magma acumulada en el subsuelo a poca profundidad funciona como fuente de calor del sistema y si además se conjunta con una elevada permeabilidad de las rocas en el subsuelo y de la recarga de los acuíferos, se forma el escenario ideal para la creación de un sistema hidrotermal.

El complejo de Acoculco a diferencia de otros sistemas hidrotermales asociados a calderas volcánicas, presenta manifestaciones superficiales escasas, principalmente burbujeo en manantiales ácido-sulfatados de baja temperatura, causado por el desprendimiento de gases, algunos de carácter tóxico, todas concentradas en dos sitios dentro de la caldera de Acoculco: la Alcaparrosa y los Azufres. Estos sitios se encuentran separados uno del otro aproximadamente a 1750 metros (Canet, Hernández-Cruz, et al., 2015).

Además, se caracteriza por la carencia de termalismo evidente, la manifestación más caliente tiene apenas 49°C y se ubica a unos 18 km al sureste de los Azufres y la Alcaparrosa, en la parte sedimentaria de la Sierra Madre Oriental (Viggiano-Guerra, Flores Armenta, & Ramírez Silva, 2011), y por la extensa e intensa alteración hidrotermal dentro del complejo de la caldera cubriendo varios kilómetros cuadrados, afectando tobas, brechas y lavas, estas últimas en menor grado que las demás (Canet, Trillaud, et al., 2015).

El sistema hidrotermal en Acoculco actualmente presenta una permeabilidad escasa, debido a un proceso de auto-sellado de las zonas permeables por la precipitación de minerales hidrotermales. Este se suma a la ausencia de actividad magmática o tectónica reciente que reactive estructuras antiguas, produciendo la baja permeabilidad del medio (López Hernández, 2009). A pesar de la baja



permeabilidad, existen manantiales termales de temperatura moderada en Chignahuapan, Jicolapa y Quetzalapa, posiblemente relacionados con el sistema hidrotermal, debido a un importante flujo de agua dentro de la formación calcárea subyacente al complejo (López Hernández, 2009).

Las características de este sistema hidrotermal, esencialmente los manantiales fríos con emisión de gases, se asemejan a las de algunos sistemas hidrotermales reportados en Filipinas que se han denominado como “kaipohans”, y se les considera como indicios de un alto potencial geotérmico (Lermo, Antayhua, Bernal, Vénegas, & Arredondo, 2009).

### **3.5 Trabajos previos y Estimaciones preliminares**

Debido al interés prestado a la zona, se han llevado a cabo diversos estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos. La CFE realizó la perforación de dos pozos exploratorios, con el propósito de evaluar el potencial del área para generar electricidad a partir de recursos de alta temperatura. El primer pozo EAC-1, fue perforado en 1995 hasta una profundidad de 2000 metros, fue ubicado cerca de la zona activa de emisión de gases más intensa, en el sitio de los Azufres. Los registros térmicos midieron temperaturas de 307°C, valor que indica un gradiente geotérmico de ~140°C/1000 m, lo que es tres veces mayor al valor promedio de la CVTM (Canet, Trillaud, et al., 2015). Además, se detectaron dos zonas convectivas a 1250 y 1650 metros (Lorenzo Pulido, et al., 2011).

La ubicación del segundo pozo EAC-2, se encuentra a aproximadamente 500 metros al noreste del pozo EAC-1, se perforo a 1900 metros de profundidad, la misma falta de permeabilidad fue encontrada y se llegaron a medir 264°C de temperatura junto con dos probables zonas convectivas a 1550 y 1850 metros de profundidad (Hiriart Le Bert et al., 2011). Además de los registros térmicos, durante las perforaciones se obtuvieron muestras de núcleo y de canal para su análisis petrográfico con el fin de caracterizar los rasgos mineralógicos primarios y texturales de las rocas, caracterizar la mineralogía hidrotermal para su aplicación ingenieril

determinando parámetros como: temperatura e historia térmica, permeabilidad, pH, presión y ebullición (Viggiano-Guerra et al., 2011).

Con estos estudios se ha calculado un potencial preliminar del campo geotérmico de Acoculco, teniendo así que con el método Volumétrico-Montecarlo se presenta un potencial de **107 MWe** con una desviación estándar de 42 MWe y un intervalo de confianza al 90% entre 38 y 177 MWe. Mientras que con el método de descompresión gradual presenta un potencial **48 MWe**. (Hiriart Le Bert et al., 2011)

Con base a la información obtenida durante los estudios la CFE estima que, aunque las rocas calientes presenten una porosidad y permeabilidad muy bajo, estas podrían ser estimuladas con fracturamiento hidráulico y/o químico para alcanzar valores artificiales suficientes para su explotación comercial, siendo este campo candidato para desarrollar un sistema geotérmico mejorado (Hiriart Le Bert et al., 2011).

# **CAPÍTULO 4**

## **METODOLOGÍA**

### **4.1 Planteamiento de propuesta**

La idea principal de este trabajo de investigación consiste en establecer una metodología alternativa basada en la fusión de datos satelitales provenientes de sistemas pasivos y activos, con el objetivo de identificar zonas potenciales para la exploración geotérmica.

En este trabajo a través de la información adquirida por las diferentes plataformas satelitales empleadas, se estudiaron, analizaron e identificaron diversos criterios y parámetros bio/geofísicos asociados estrechamente con sitios adecuados para procesos de exploración geotérmica, entre los que destacan: la identificación de alteraciones hidrotermales y mineralógicas, anomalías térmicas, flujos de calor y deformaciones de superficie de suelo.

Se adquirieron imágenes ópticas multiespectrales provenientes de los satélites Landsat; e imágenes de RADAR, de la misión Sentinel-1. Cada imagen adquirida por los sensores remotos inicialmente lleva un proceso de corrección, esto con el objetivo de eliminar o minimizar las distorsiones y/o degradaciones producidas durante el proceso de adquisición de las imágenes. Cada una de estas distorsiones dependen principalmente del tipo de sensor y del tipo de plataforma (satélite) en el que se montan.

En este capítulo, se presentan los diversos procesos que componen la metodología utilizada. Y consecuentemente los usos y aplicaciones que llevaron a definir cada uno de los parámetros mencionados anteriormente y su relevancia en la exploración geotérmica.

## 4.2 Métodos y Herramientas

### 4.2.1 Imágenes Satelitales multiespectrales

Para el estudio se utilizaron imágenes satelitales Landsat-8 OLI-TIRS, las imágenes se adquirieron a través de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés, las cuales se proporcionan de manera gratuita. El programa de satélites Landsat es uno de los de más larga trayectoria en la adquisición de imágenes de la Tierra desde el espacio. Los instrumentos en los satélites Landsat han adquirido millones de imágenes siendo un recurso único para la investigación, teniendo aplicaciones en áreas como la agricultura, la geología y el medio ambiente, entre muchas más. (Alipour, Sarajian, & Esmaily, 2010)

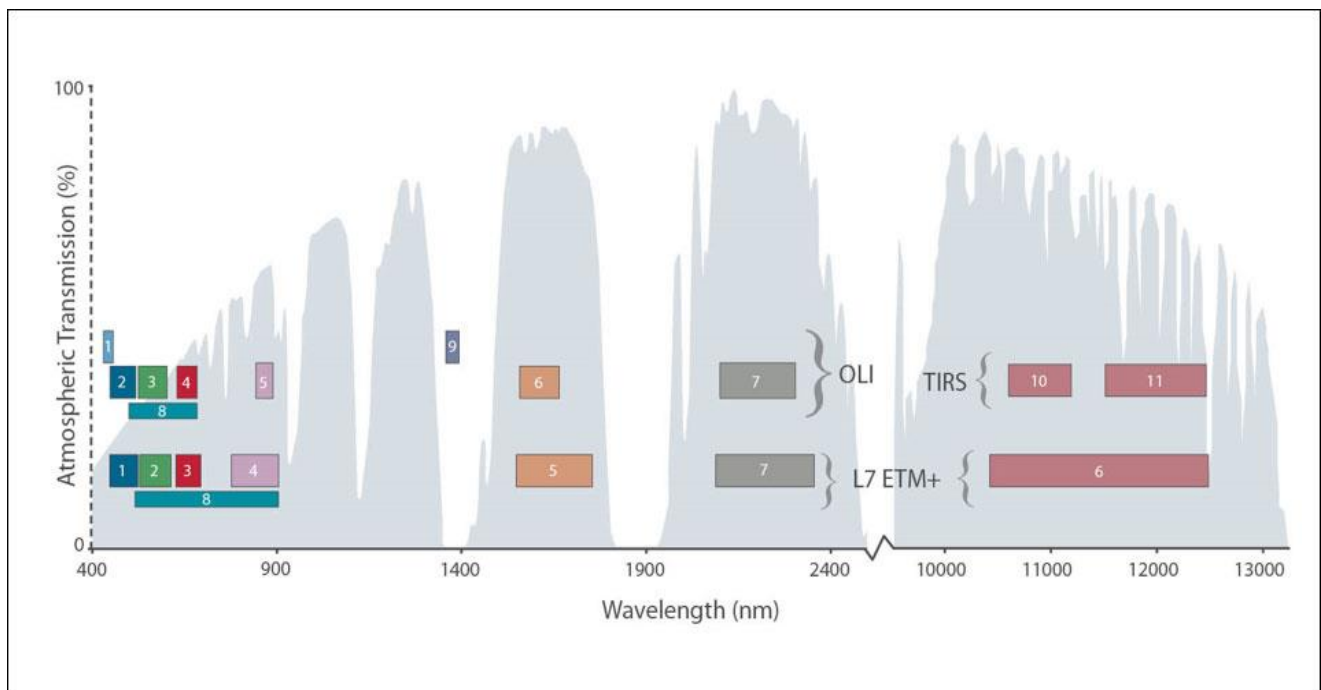


FIGURA 12. BANDAS ESPECTRALES Y LONGITUD DE ONDA DE LANDSAT 8 Y LANDSAT 7 ETM+ (USGS 2013)

Las imágenes Landsat ETM+ están compuestas por ocho bandas multiespectrales: 4 VNIR (visible e infrarrojo cercano), 2 SWIR (infrarrojo medio), 1 PAN (pancromática) y 1 TIR (infrarrojo térmico). Mientras que las imágenes Landsat 8 obtenidas por el sensor OLI y TIRS constan de 11 bandas espectrales, el sensor

OLI recoge bandas similares a el sensor ETM+ pero incorpora dos nuevas bandas: un canal profundo en el azul visible en la banda 1 útil para estudios costeros y aerosoles; y un canal infrarrojo en la banda 9 para detección de nubes cirrus. Y el sensor TIRS recoge dos bandas térmicas útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie (Fig. 12) (Ariza Alexander, 2013).

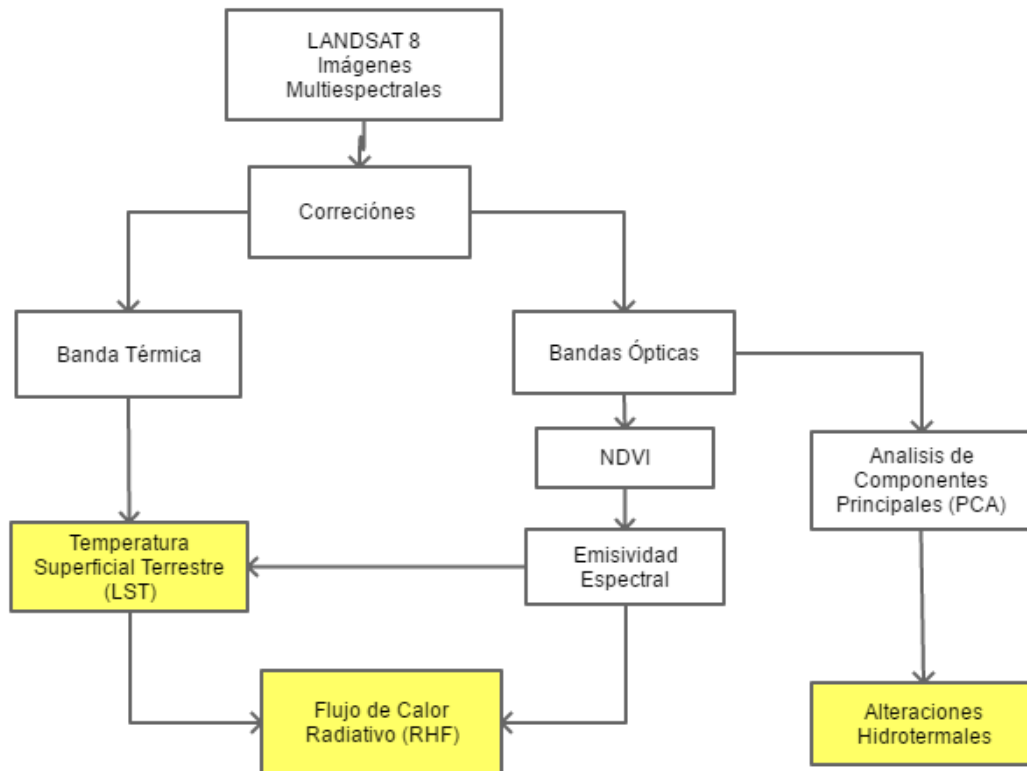


FIGURA 13. DIAGRAMA DE PROCESO CON IMÁGENES LANDSAT 8 PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS

#### 4.2.1.1 Pre-procesamiento

Las imágenes adquiridas por los sensores remotos pueden tener distorsiones o degradaciones producidas durante el proceso de adquisición, para minimizar estas afectaciones se realizan correcciones a las imágenes y así poder detectar, interpretar y cuantificar correctamente los cambios que ocurren en la Tierra.

Este proceso se lleva a cabo al convertir los datos de imágenes (números digitales) de los múltiples sensores y plataformas, a unidades físicas significativas en una escala radiométrica común, como la radiancia y reflectancia.

Se siguió el procedimiento presentado por Chander et al. (2009) y Ariza (2013), para la conversión de números digitales (ND) en radiancia para todas las bandas, reflectancia en el techo de la atmosfera (TOA) para las bandas VNIR/SWIR y a temperatura de brillo en las bandas térmicas.

- *Corrección radiométrica*

Las distorsiones radiométricas son cambios producidos en los valores de intensidad de los pixeles que componen una imagen, resultado de efectos de la atmosfera sobre el espectro electromagnético, además de los efectos de los instrumentos que componen los sensores.

La corrección radiométrica es un requisito indispensable en la generación de datos científicos de alta calidad, y de productos derivados de mayor nivel (Chander, Markham, & Helder, 2009).

El primer paso en la corrección radiométrica es convertir el valor de los números digitales (ND) de las bandas a valores de radiancia calibrados, para las imágenes del sensor ETM+ este proceso se realizó utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

En donde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral absoluta obtenida por el sensor [W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup> μm<sup>-1</sup>].

$LMAX_{\lambda}$  y  $LMIN_{\lambda}$  = Radiancias espectrales correspondientes a los valores máximo y mínimo de ND.

$Q_{cal}$  = valor estándar calibrado y cuantificado de pixel (ND).

$Q_{calmax}$  y  $Q_{calmin}$  = Valores máximo y mínimo de  $Q_{cal}$ .

Las imágenes del sensor OLI se convirtieron a valores de radiancia usando otra expresión de la ecuación anterior:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral absoluta obtenida por el sensor [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ].

$Q_{cal}$  = Valor estándar calibrado y cuantificado de pixel (ND).

$M_L$  = Factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato *RADIANCE\_MULT\_BAND\_x*.

$A_L$  = Factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato *RADIANCE\_ADD\_BAND\_x*.

Para el segundo paso, una vez que se obtiene la radiancia espectral recibida por el sensor, se calcula la reflectancia en el techo de la atmosfera (TOA). Este proceso logra reducir la variabilidad existente de escena a escena (Chander et al., 2009).

En el caso del sensor ETM+ la ecuación utilizada es la siguiente:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectancia planetaria TOA [sin unidades]

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ]

$d$  = Distancia Tierra – Sol [unidades astronómicas]

$ESUN_{\lambda}$  = Irradiancia exoatmosférica solar media [ $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ ]

$\theta_s$  = Ángulo del cenit solar [grados]

Para el sensor OLI del sistema Landsat 8 la siguiente ecuación es usada:

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad (4)$$

Donde:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectancia planetaria TOA

$Q_{cal}$  = Valor estandar calibrado y cuantificado de pixel [ND]

$M_{\rho}$  = Factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato

REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_x

$A_{\rho}$  = Factor aditivo de escalado específico obtenido del metadato REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_x

○ *Corrección radiométrica en el espectro térmico*

La eliminación de los efectos atmosféricos de la banda térmica es necesaria para la utilización en el estudio de temperaturas. Las bandas térmicas obtenidas por los sensores ETM+ y TIRS de los sistemas Landsat pueden ser convertidas de radiancia espectral a temperatura de brillo en grados Kelvin (°K), la temperatura de brillo asume que la superficie terrestre es un cuerpo negro (emisividad espectral es 1) e incluye efectos atmosféricos (Chander et al., 2009).

Para la obtención de la temperatura de brillo se utiliza la ecuación:

$$T_B = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}}\right) + 1} \quad (5)$$

Siendo:

$T_B$  = Temperatura de brillo [°K]

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ]

$K2$  = Constante de calibración 2 [°K]

$K1$  = Constante de calibración 1 [ $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ]

\*El valor K1 y K2 se incluyen en el metadato de la imagen.



#### 4.2.2 Imágenes satelitales SAR

Se trabajó con datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) de la misión Sentinel-1, desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) para el monitoreo y estudio de la superficie terrestre y oceánica. La plataforma posee una resolución temporal de 12 días, es decir, es el periodo de revisita de una misma zona en la Tierra; posee una resolución espacial de 5m y las imágenes son distribuidas de manera gratuita desde el propio portal de la ESA (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>). En la tabla 2, se sintetizan las características más importantes de la plataforma Sentinel-1.

**TABLA 2. INFORMACIÓN GENERAL DEL SATÉLITE SENTINEL-1  
(FUENTE: AGENCIA ESPACIAL EUROPEA)**

Parámetros	SENTINEL 1
<i>Altitud de Órbita</i>	693km
<i>Bandas Radar</i>	C-Band
<i>Modo de imagen SAR</i>	Strip Map Mode: 80 km Swath, 5 x 5 m resolución espacial Interferometric Wide Swath: 250 km Swath, 5x20 m resolución espacial Extra-Wide Swath Mode: 400 km Swath, 25 x 100 m resolución espacial Wave-Mode: 20 km x 20 km, 5 x 20 m resolución espacial
<i>Polarización</i>	VV+VH o HH+HV
<i>Distancia de Muestreo (GSD)</i>	5-20m
<i>Lanzamiento/Expectativa de vida</i>	2014-2021
<i>Tiempo Revisita</i>	12 días

Un radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés Synthetic Aperture Radar), es un sensor activo montado en una plataforma satelital que transmite y recibe señales de microondas perpendicular a la dirección de vuelo, midiendo distancias entre el sensor y el punto en la superficie de la Tierra, (Fig. 14). En su recorrido almacena ecos de la señal recibida desde una posición distinta cada vez, esto permite la síntesis de una apertura virtual de longitud mucho mayor que la de la antena real, de aquí el nombre de apertura sintética. Los ecos recibidos son

almacenados y posteriormente procesados para construir una imagen del suelo (Gens & Logan, 2003; Zozaya, 2015).

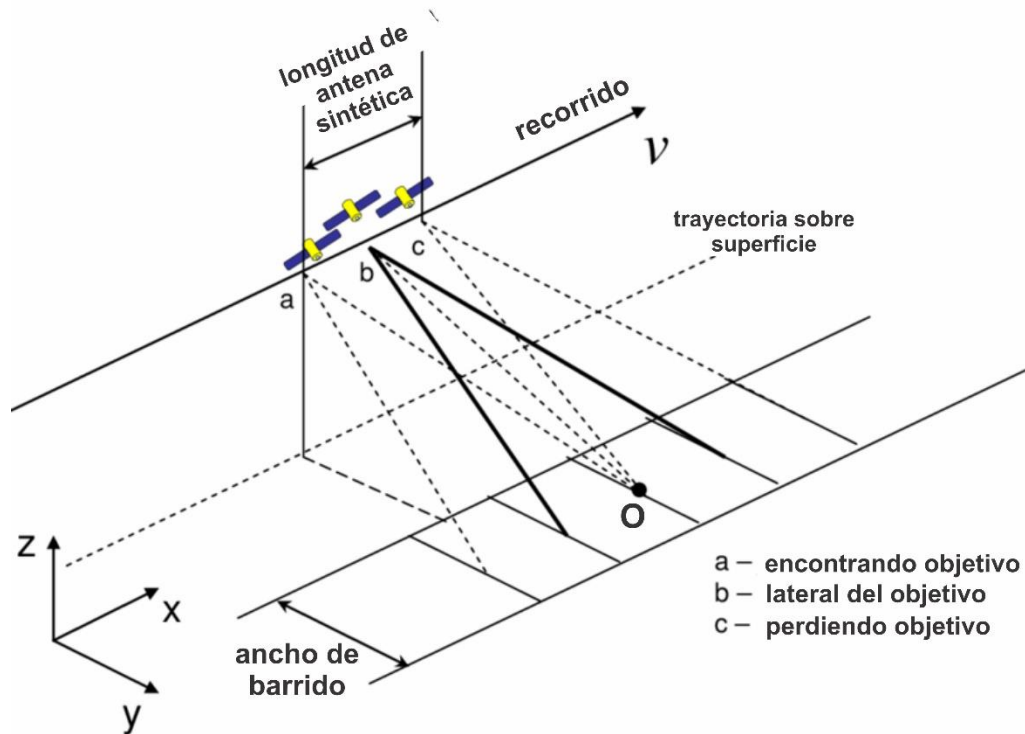


FIGURA 14. ESQUEMA DEL SISTEMA SAR (MODIFICADO DE ILIE, 2011)

Las imágenes SAR se emplean regularmente como un complemento a las imágenes ópticas. Sin embargo, poseen ventajas únicas sobre los sensores ópticos, debido a su capacidad activa pueden operar tanto en el día como en la noche, penetra nubes, y en cierta medida pocos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve, dependiendo de la frecuencia a la que operan. No obstante, en imágenes de radar se debe considerar la complejidad en el procesamiento de los datos y las dificultades en su interpretación (Mayorga, 2011; Zozaya, 2015).

Los radares de apertura sintética tienen múltiples aplicaciones y técnicas abarcando diversas áreas de investigación, entre estas aplicaciones algunas que destacan son: la generación de modelos de elevación digital usando interferometría (InSAR),

monitoreo de subsidencias y deformaciones de superficie mediante interferometría diferencial (DInSAR), estimación de corrientes oceánicas y de la velocidad del viento, control y clasificación de cultivos, estimación de la humedad del suelo, control de la altura de los bosques, la biomasa y la deforestación, supervisión ambiental de derrames de petróleo, inundaciones, crecimiento urbano, y cambio climático global (Zozaya, 2015).

#### **4.2.2.1 Procesamiento SAR**

De igual forma que con las imágenes multispectrales, se requiere aplicar procedimientos de pre-procesamiento en las imágenes SAR para su posterior análisis. El procesamiento se llevó a cabo con el software de código abierto SNAP (Sentinel Application Platform) de la Agencia Espacial Europea, desarrollado para el procesamiento y análisis de imágenes de radar de diferentes satélites. Entre las herramientas que dispone este software se encuentran: Calibración, Filtros de ruido speckle, Corrección de terreno, Producción de mosaicos, Polarimetría, Interferometría, Clasificación, entre otras más.

El procesamiento inicial realizado a las imágenes Sentinel-1, se hizo siguiendo la metodología para generar interferometría SAR (InSAR). Esta herramienta se ha desarrollado rápidamente y actualmente es una de las más importantes para examinar con precisión el movimiento de terreno debido a distintos procesos como subsidencias, terremotos y actividad volcánica, y por supuesto tiene aplicaciones en la exploración geotérmica (Falorni, Morgan, & Eneva, 2011; Hanssen, 2005). También da paso a la técnica llamada Interferometría Diferencial (DInSAR), la cual se utilizó en este estudio para medir y analizar las deformaciones de superficie de suelo y se explicará en un apartado más adelante.

- Metodología InSAR

La interferometría SAR, mide el cambio de fase de la señal a lo largo del tiempo. Las diferencias en los valores de fase registrados entre imágenes de radar sucesivas se representan en un interferograma, que es utilizado para detectar el movimiento en la superficie terrestre (Falorni et al., 2011).

El primer paso es la selección de imágenes SAR, que sean adecuadas para la interferometría, esto es de gran importancia ya que tiene impacto en la calidad de los resultados finales. Las consideraciones que deben tomarse son:

- Seleccionar pares de imágenes ascendentes o descendientes, que cubran una misma área adquiridas en diferentes tiempos.
- Comprobar que el par de imágenes tengan una línea base perpendicular pequeña; la línea base se refiere a la distancia entre las orbitas de los satélites en un plano perpendicular a la órbita y su proyección perpendicular al intervalo inclinado es la línea base perpendicular; en cuanto menor sea la línea base, menor será la contribución de la topografía a la fase interferométrica, además de una mayor coherencia entre imágenes.

- Corregistro

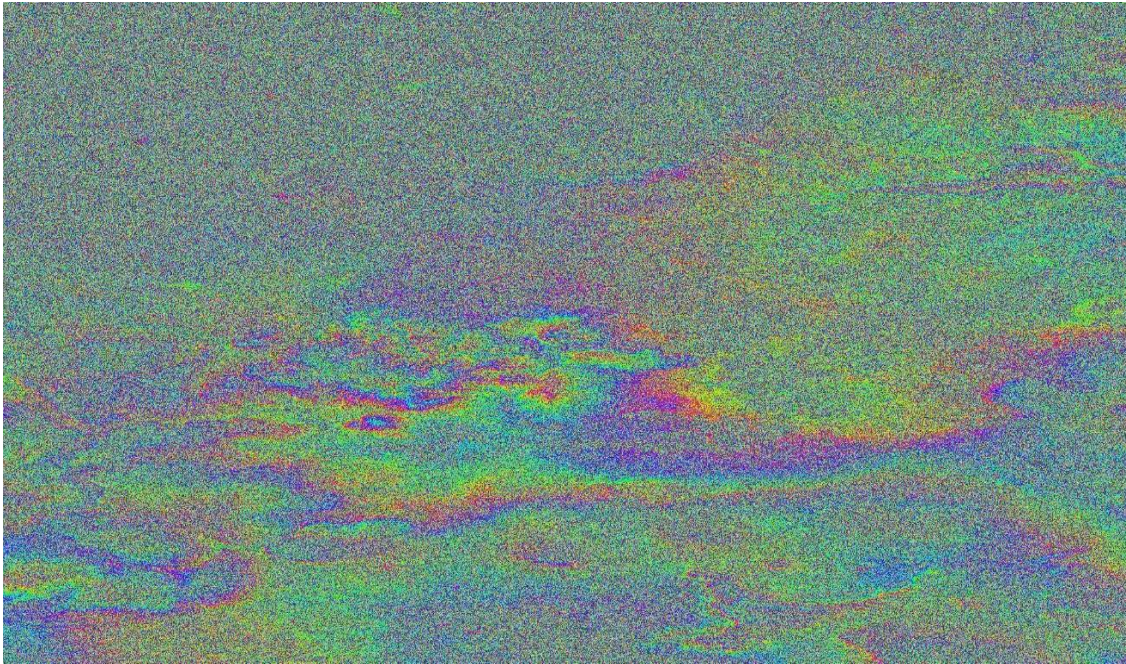
El proceso de corregistro es el siguiente paso, este consiste en alinear dos imágenes, una llamada maestra y una imagen esclava, que cubren la misma área de manera que encajen exactamente una encima de la otra.

Para hacer eso, se necesita determinar el desfase entre las dos imágenes. Sin embargo, la información de la órbita no es lo suficientemente buena para determinar el desplazamiento hasta el nivel de píxel. Por lo que es necesario que optimizarla mediante una coincidencia de correlación en el dominio de la frecuencia usando transformaciones rápidas de Fourier, siendo computacionalmente efectivas. Una vez que se determina el desplazamiento, la imagen esclava se remuestrea para coincidir con la imagen maestra (Gens & Logan, 2003).

- Interferograma/Estimación de Coherencia

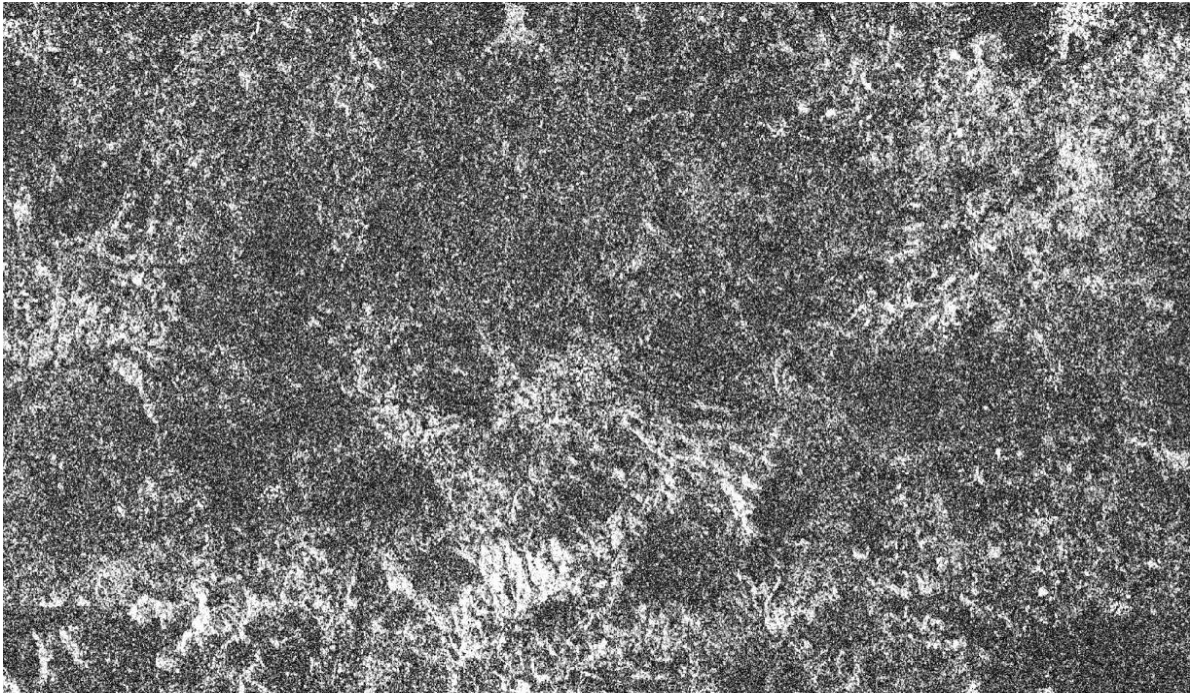
La formación del Interferograma se lleva a cabo con el producto de los valores complejos de la imagen maestra y el conjugado complejo de la imagen esclava, es decir, se promedian las amplitudes de los píxeles correspondientes y se calcula la diferencia de los valores fase para cada punto de la imagen.

La diferencia de fase queda representada por las denominadas franjas, estas aparecen en el interferograma como ciclos de colores arbitrarios, cada franja representa todo el rango de la fase de  $-\pi$  a  $\pi$  (Fig. 15). El movimiento relativo del terreno entre dos puntos puede calcularse contando las franjas y multiplicando por la mitad de la longitud de onda. Cuanto más cerca estén las franjas, mayor es la tensión que hay en el suelo.



**FIGURA 15. INTERFEROGRAMA**

En este paso del procesamiento también se genera la estimación de coherencia. La coherencia es una medida de la correlación de la información de amplitud y fase de dos señales correspondientes y varía en el rango de 0 a 1 (Fig. 16). Las partes brillantes representan niveles de alta coherencia mientras que las zonas oscuras indican la falta de coherencia. La pérdida de coherencia puede producir pobres resultados interferométricos.



**FIGURA 16. COHERENCIA DE LAS IMÁGENES SENTINEL-1**

### **4.3 Desarrollo del modelo: parametrización**

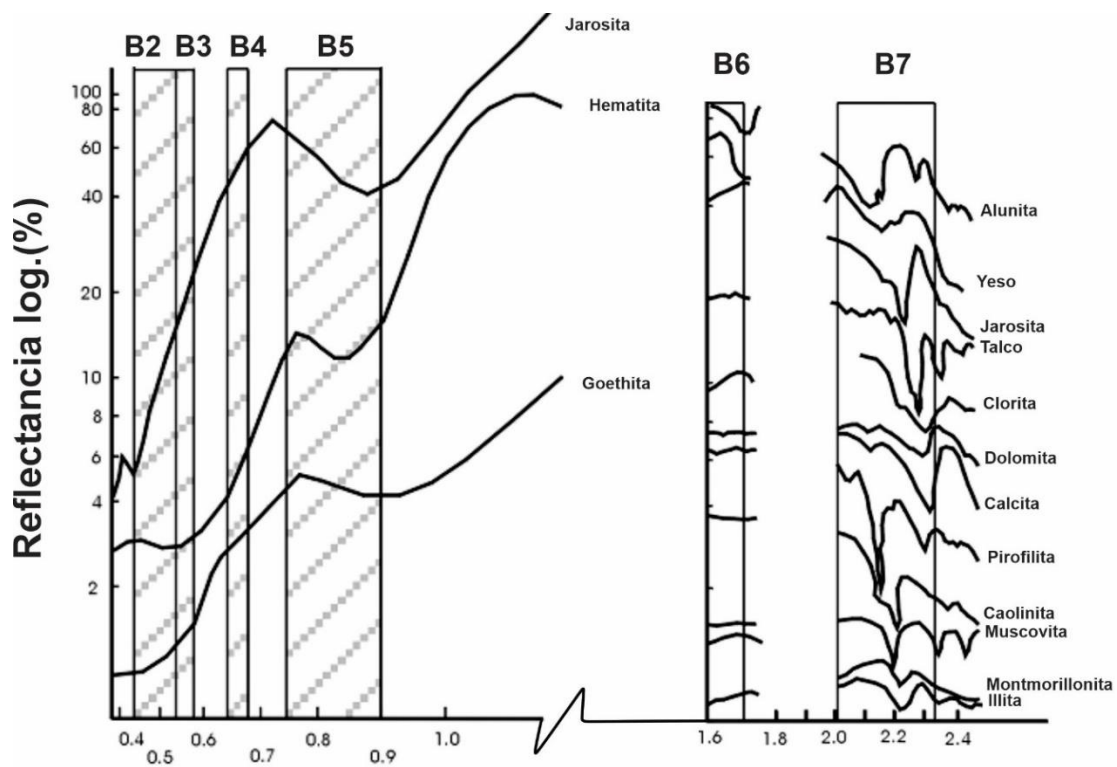
#### **4.3.1 Alteraciones hidrotermales**

Las alteraciones hidrotermales son producidas debido a procesos de flujo de fluidos calientes que alteran la mineralogía y química de las rocas superficiales. Se han reconocido una gran variedad de minerales hidrotermales en sistemas geotérmicos, debido a que la composición de los fluidos es extremadamente variable conteniendo diferentes tipos de gases, sales, aguas y metales. No obstante, las alteraciones hidrotermales frecuentemente se indican por la presencia de óxidos de hierro e hidroxilos, identificados en manifestaciones superficiales de zonas mineralizadas.

Las bandas de los sensores ETM+ y OLI son demasiado anchas para permitir la identificación de minerales individuales, pero sirven para identificar grupos minerales pertenecientes al grupo de hidroxilos y sulfatos; así como de la identificación del óxido de hierro que es una clave útil para definir áreas

hidrotermalmente alteradas (Fernández De La Vega-Marquez, Prol-Ledesma, & Orozco, 2001).

En la figura 17, se muestran las características espectrales de estos minerales en la parte visible e infrarroja del espectro electromagnético (0.4 – 2.5  $\mu\text{m}$ ). Uno de los problemas que existen es la interferencia debido a vegetación que presenta una gran reflectancia en el infrarrojo. Mientras que la parte media del infrarrojo (1.1 - 2.5  $\mu\text{m}$ ) puede dar mayor información sobre composición mineralógica que la observada en la región visible e infrarroja, teniendo alta reflectancia cerca de 1.65  $\mu\text{m}$ , para rocas y minerales y valores altos de absorción en aproximadamente 2.2  $\mu\text{m}$  (Fernandez De La Vega-Marquez et al., 2001).



**FIGURA 17. RESPUESTA ESPECTRAL DE MINERALES DEL GRUPO DE LOS OXIDOS (JAROSITA, HEMATITA, GOETHITA) Y DE HIDROXILOS, SOBRE LAS BANDAS DEL SENSOR OLI DEL SISTEMA LANDSAT 8. (MODIFICADO DE HUNT Y ASHLEY, 1979)**

El método para la caracterización de alteraciones hidrotermales, consistió en un Análisis de Componentes Principales (PCA), esta técnica, en conjunto con diferentes cocientes de bandas, son útiles para la detección cualitativa de minerales de alteración hidrotermal y han sido ampliamente usados en el mapeo geológico y mineral (Khalil, El-desoky, & Salem, 2016).

De manera básica, PCA es un método para identificar patrones en la información, transforma los datos de manera que se acentúan sus similitudes y diferencias. También se utiliza para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos, esta reducción permite una visualización clara de los datos y un análisis posterior más manejable, sin que esto lleve a ninguna pérdida de información, sino que ayuda a obtener conjunto de datos o bandas que tienen mayor información (Gupta, Tiwari, Saini, & Srivastava, 2013).

Las imágenes satelitales son numéricas, debido a esto es posible reducir su dimensionalidad usando PCA. Después de la transformación, los nuevos valores de píxeles se calculan y almacenan, pero las coordenadas del pixel siguen siendo las mismas.

A partir de las imágenes corregidas Landsat, se aplicó el análisis de componentes principales a todas las bandas no térmicas, para poder identificar en la zona de interés la presencia de alteraciones hidrotermales. El proceso del análisis se describe a continuación:

- Los datos de entrada fueron las bandas no térmicas corregidas, con excepción de la banda 1, para generar seis nuevas componentes.
- Se analizó la matriz de carga para seleccionar las componentes principales que aportaran la mayor información en la localización de óxidos e hidroxilos.
- Se mapearon los valores más característicos de las componentes elegidas.



### 4.3.2 Anomalías térmicas

- Calculo de Temperatura Superficial Terrestre (LST)

La temperatura superficial terrestre (LST) es uno de los aspectos más importantes, de la superficie terrestre por lo que se han desarrollado metodologías para su medición desde el espacio. El cálculo de LST se ha vuelto un factor de gran importancia en muchas áreas de estudio, como el cambio climático global, los procesos hidrológicos y agrícolas, y el uso del suelo urbano, ya que es un factor que controla la mayoría de los procesos físicos, químicos y biológicos de la Tierra (Avdan & Jovanovska, 2016).

La estimación de LST se realizó mediante el método de umbrales de NDVI (Índice Normalizado de Vegetación) presentado por Sobrino y Rassouini (2000). Este método utiliza valores-umbrales del NDVI para distinguir entre píxeles correspondientes a suelo, vegetación y mixtos.

El primer paso es el cálculo del NDVI que se realizó utilizando la ecuación (6) a partir de las bandas corregidas de Infrarrojo Cercano (NIR) y Visible Roja (R) de los sistemas Landsat:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

Una vez calculado el NDVI, este se utilizó para obtener los valores de emisividad de superficie, valor de gran importancia para minimizar el error en la estimación de la temperatura superficial.

De acuerdo al método empleado, los valores de emisividad se calculan de acuerdo a diferentes casos:

- a) NDVI < 0.2. Este caso considera el píxel como suelo desnudo y la emisividad se toma con un valor promedio de 0.97
- b) NDVI > 0.5. Valores de NDVI mayores a 0.5 en píxel se consideran vegetación completa con un valor constante de emisividad de 0.99

c)  $0.2 \leq NDVI \leq 0.5$ . En este caso, el píxel está compuesto por una mezcla de suelo desnudo y vegetación, y la emisividad se calcula según la ecuación (7):

$$\varepsilon = 0.004P_v + 0.986 \quad (7)$$

Donde  $P_v$  es la proporción de vegetación obtenida a partir de :

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2 \quad (8)$$

Con  $NDVI_{max} = 0.5$  y  $NDVI_{min} = 0.2$

Finalmente, la estimación de la temperatura superficial se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$LST = \frac{B_T}{\left\{ 1 + \left[ \left( \frac{\lambda B_T}{\rho} \right) \ln \varepsilon_\lambda \right] \right\}} \quad (9)$$

Donde:

$B_T$  = Temperatura de brillo superficial [°K]

$\lambda$  = Longitud de onda de radiancia emitida ( $\lambda=10.8\mu\text{m}$ )

$\varepsilon_\lambda$  = Emisividad calculada a partir de NDVI

$\rho = h \frac{c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$  , donde  $\sigma$  es la constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ ),  $h$  es la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$ ), y  $c$  es la velocidad de la luz ( $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

Los valores de temperatura superficial resultantes se transformaron de grados Kelvin a grados Celsius restando 273.15.

- Calculo de Flujo de Calor Radiativo (RHF)

Otro parámetro calculado dentro de las anomalías térmicas fue el flujo de calor radiativo (RHF), que representa el calor emitido por la radiación del suelo, este fue estimado de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_r = \tau \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_a^4) \quad (10)$$

Donde:

$Q_r$  = Flujo de calor [W/m<sup>2</sup>]

$\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzmann

$\varepsilon$  = Emisividad

$\tau$  = Transmisividad atmosférica

$T_s$  = Temperatura superficial [°K]

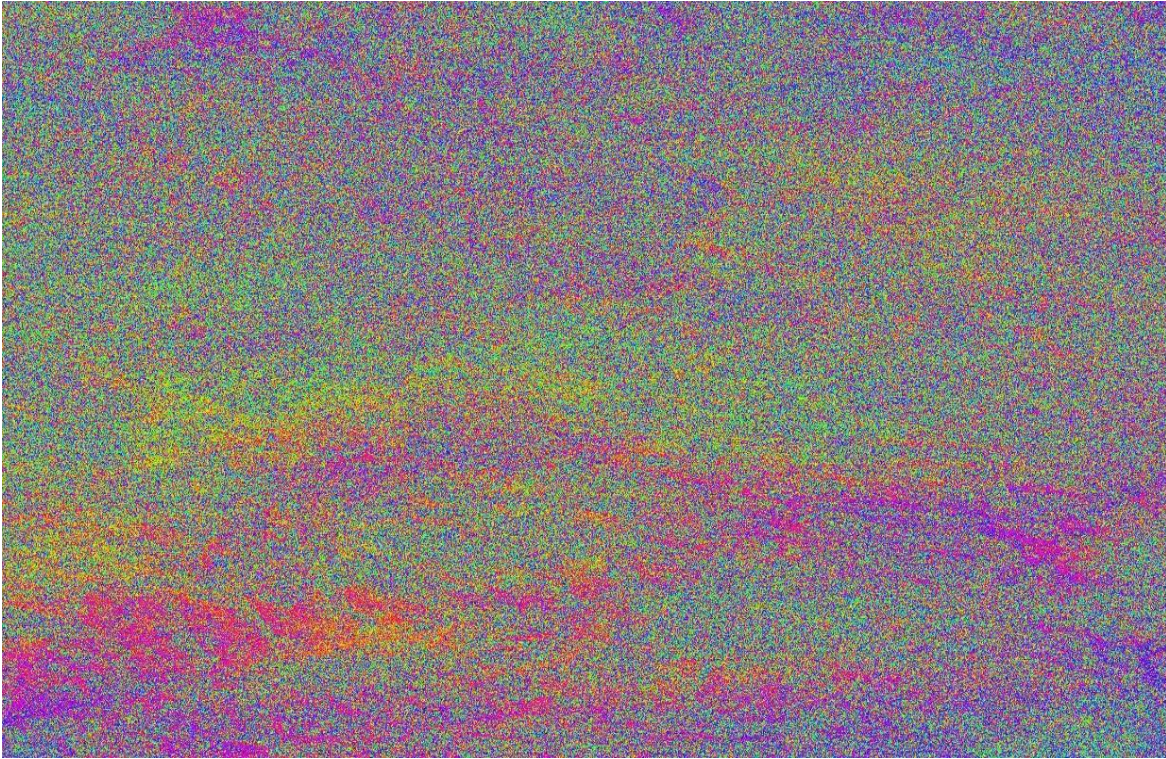
$T_a$  = Temperatura ambiente [°K]

### 4.3.3 Deformación de superficie de suelo

La técnica DInSAR (InSAR diferencial) ha sido usada en varios estudios en sitios geotérmicos (Eneva & Adams, 2012; Lubitz et al., 2013; Sass & Burbaum, 2010) y se ha convertido en una herramienta de gran potencial en el análisis de deformaciones superficiales muy pequeñas. Esta técnica se fundamenta en la detección de pequeñas variaciones de altitud a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre una misma área de estudio. La fase es sensible a la topografía del terreno, si esta última se conoce, es decir, si se cuenta con un modelo digital del terreno, la componente correspondiente de fase puede ser sustraída de la fase InSAR, dejando la componente relacionada con la deformación del terreno. Lo que posibilita la detección de las deformaciones en la superficie terrestre.

- Metodología DInSAR/Mapas de desplazamiento

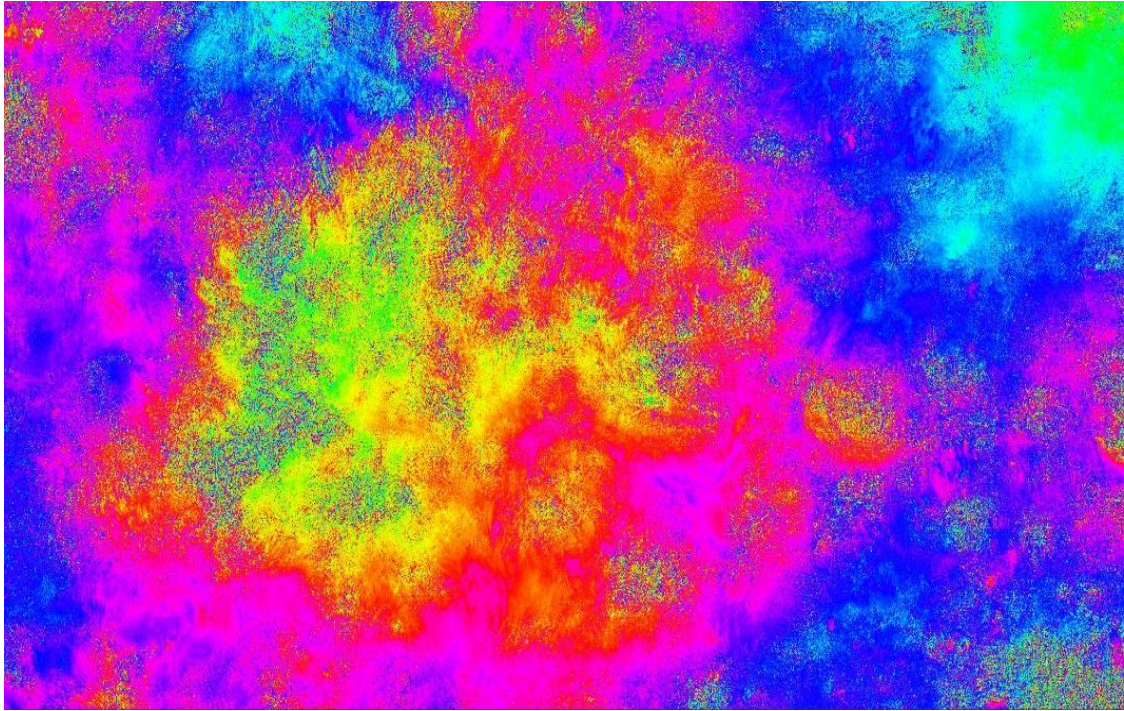
Como ya se ha mencionado para la generación de un interferograma diferencial, se debe sustraer la fase topográfica del interferograma (Fig. 18). Este proceso se aplicó a cada interferograma obtenido en el procesamiento previo de las imágenes Sentinel-1, que de igual forma se realizó con el software SNAP, que contiene los módulos requeridos en el tratamiento de imágenes SAR.



**FIGURA 18. IMAGEN OBTENIDA AL SUSTRAER LA FASE TOPOGRÁFICA DEL INTERFEROGRAMA**

Una vez generado el interferograma diferencial se observa que la señal resultante aún es muy ruidosa y los patrones de las franjas son difíciles de distinguir. Para llevar a cabo un mejoramiento en la calidad de la imagen, así como la reducción de ruido presente, se aplicaron técnicas de multilooking y filtrado de fase.

El multilooking se aplicó primero, este proceso esencialmente realiza un promedio espacial de píxeles vecinos para suprimir el ruido (Fig. 19), y es bastante efectivo para ruido no correlacionado a fuentes temporales, de línea base y de volumen. Una vez aplicado el multilooking se realizó el filtrado de fase, mediante este proceso se aumenta la relación señal/ruido lo que mejora la precisión del desenvolvimiento de fase, que es el siguiente paso en el procesamiento.



**FIGURA 19. IMAGEN OBTENIDA AL APLICAR MULTILOOKING Y FILTRO DE FASE**

Los valores de la fase diferencial interferométrica obtenida se encuentran comprendidos entre  $-\pi$  a  $\pi$ , esto significa que la fase tiene módulo  $2\pi$ , y se conoce como fase envuelta (wrapped phase). Para recuperar la fase original de la señal, el procedimiento aplicado es el llamado phase unwrapping (Fig. 20), con este se encuentra el número entero de ciclos  $2\pi$  que se le ha de sumar a la fase original y así obtener el verdadero valor de fase:

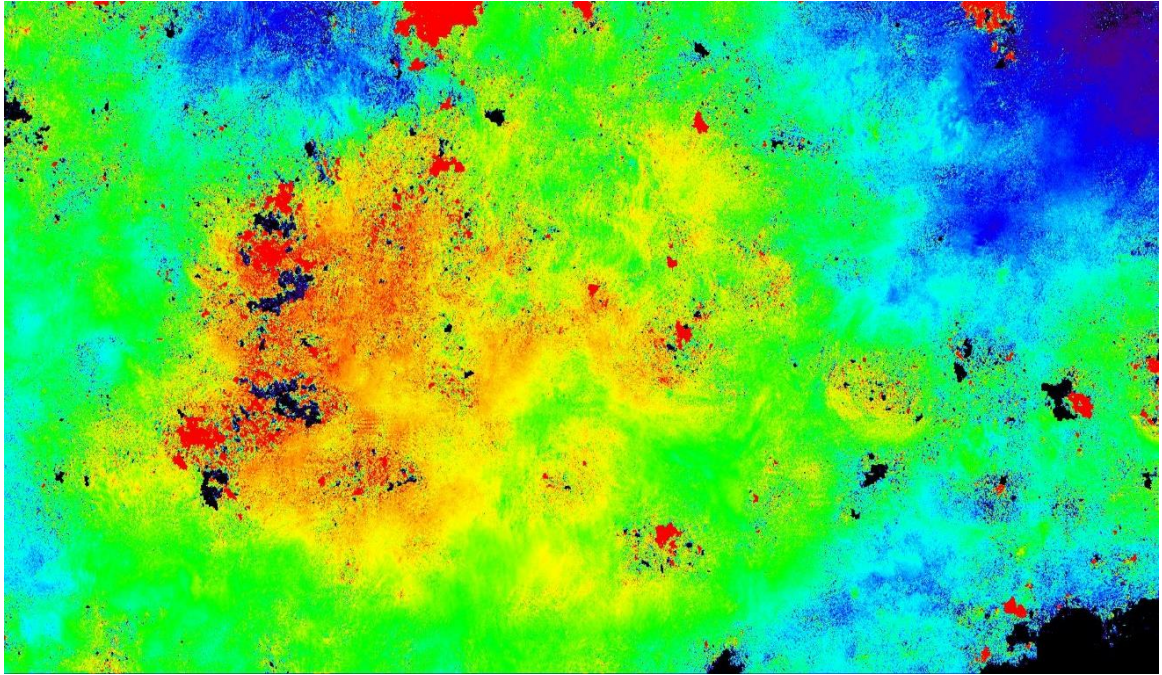
$$\Phi = \Psi + 2\pi * n \quad (11)$$

Donde:

$\Phi$  = fase desenvuelta

$\Psi$  = fase envuelta

$n$  = número de ciclos



**FIGURA 20. FASE DESENVUELTA**

Encontrar el valor entero de ciclos, implica una de las mayores dificultades en el procesamiento ya que conlleva un gran esfuerzo computacional. Para este proceso se utilizó el software SNAPHU de la Universidad de Stanford, EE. UU (<https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>).

A partir de la fase desenvuelta (Fig. 20), se puede estimar el movimiento vertical de la zona de interés, así como la velocidad de deformación. Se obtuvo el desplazamiento mediante la expresión (12):

$$dspv = \frac{\phi_{unw}\lambda}{-4\pi \cos \theta} \quad (12)$$

Donde:

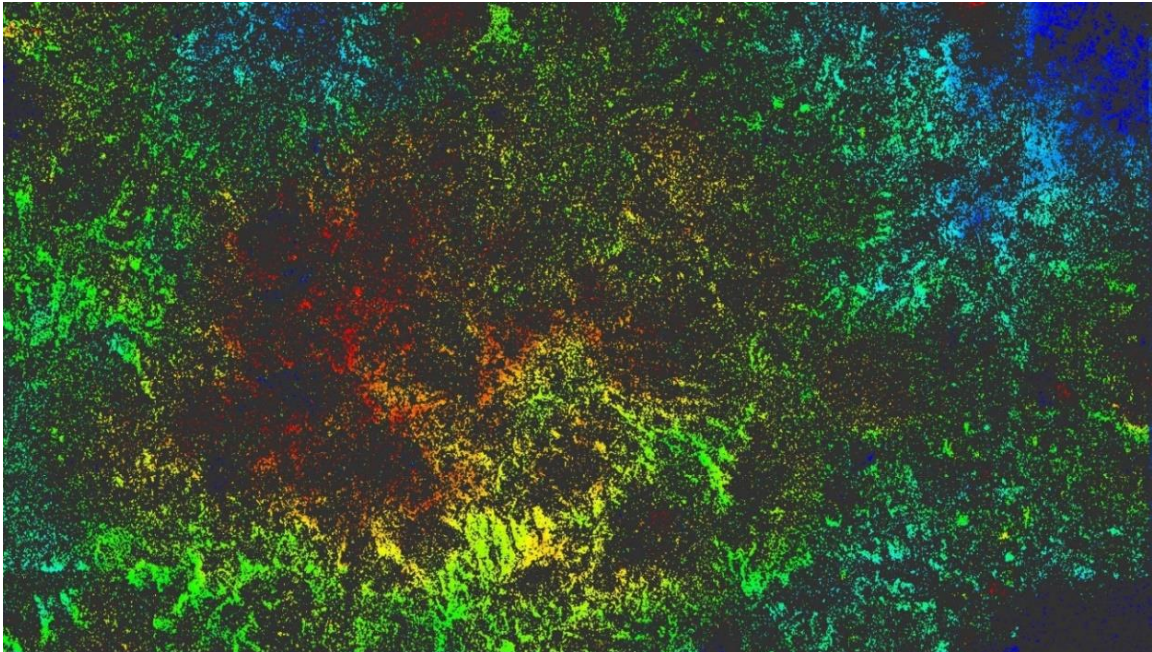
$\phi_{unw}$  = fase desenvuelta

$\lambda$  = longitud de onda de la señal

$\theta$  = ángulo de incidencia de la señal

$dspv$  = desplazamiento vertical

Utilizando los datos de coherencia que se obtienen durante el procesamiento InSAR y cuyos valores varían de 0 a 1, teniendo en cuenta que mientras más bajo el valor de la coherencia la calidad del interferograma disminuye, se aplicó un enmascaramiento de las zonas con valores de coherencia mayores a 0.5 en la imagen de desplazamiento obtenida, con el fin de obtener un mapa con los valores de desplazamiento de mejor calidad calculados, esto se observa en la figura 21.



**FIGURA 21. IMAGEN DE DESPLAZAMIENTOS CON VALORES DE COHERENCIA MAYORES A 0.5**

Finalmente, para que los datos sean útiles para estudios en geociencias, la imagen interferométrica se proyectó en un sistema de coordenadas geográficas, utilizando el módulo de geocodificación integrado en el software SNAP, el cual es asistido por un modelo digital de elevación. La imagen final geocodificada resultante se muestra en la figura 22.

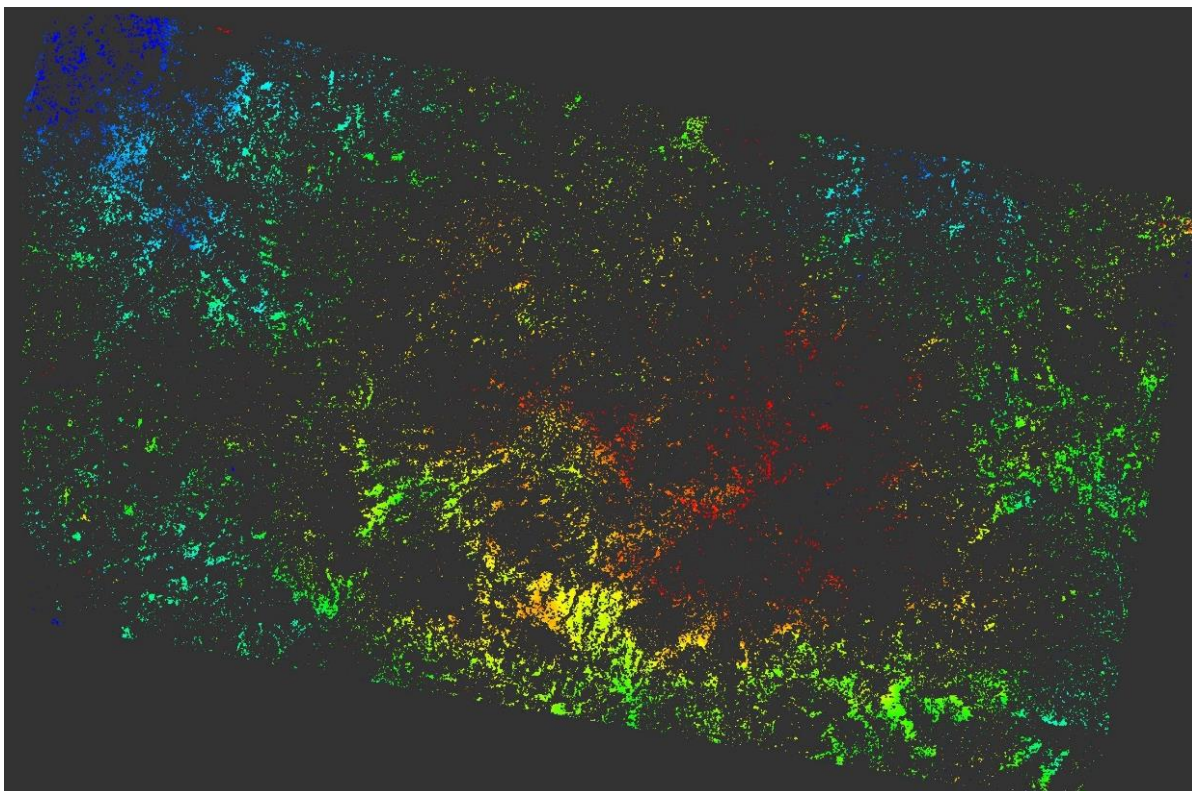


FIGURA 22. IMAGEN INTERFEROMETRICA DE DESPLAZAMIENTO GEOCODIFICADA

#### 4.4 Modelación multi-paramétrica

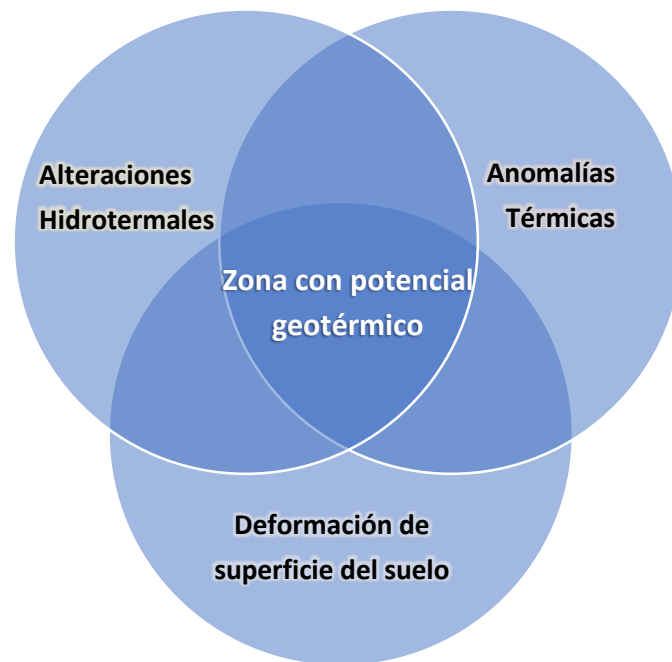
Obtenidos los distintos parámetros mencionados anteriormente, se procede a la integración y análisis de la información. El modelo que se propone es la sumatoria de las intersecciones de cada parámetro calculado, representado por la siguiente expresión:

$$\text{Zona Potencial} = \mathcal{P}_1 \cap \mathcal{P}_2 \cap \mathcal{P}_3 \cap \mathcal{P}_4 \cap \dots \mathcal{P}_n \quad (13)$$

Donde  $\mathcal{P}$  representa los valores de cada parámetro obtenido del análisis de la información satelital.



El objetivo principal y lo que nos indica la ecuación (13) es la búsqueda de zonas dentro de nuestro sitio de prueba en donde converjan los datos más significativos que pudieran indicar si existe evidencia de algún potencial geotérmico. Para lograrlo, se implementó el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que facilita el manejo de la información obtenida de las imágenes satelitales, permitiendo integrar datos obtenidos de imágenes Landsat 8 junto con los de las imágenes Sentinel-1, las cuales cuentan con distintas resoluciones espaciales entre sí. De igual forma debido a que la información satelital obtenida es guardada en varias capas, permite la operación de diversos conjuntos de procedimientos para obtener nueva información derivada, que es guardada en nuevas capas de información.



**FIGURA 23. ESQUEMA DE CONJUNCIÓN MULTI-PARAMÉTRICA EN LA LOCALIZACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO**

# **CAPÍTULO 5**

## **RESULTADOS**

### **5.1 Generación de mapas y estimación de parámetros**

Para este trabajo de investigación se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales y SAR de los satélites Landsat 8 y Sentinel-1 respectivamente, con el objetivo de estimar los parámetros y generar los mapas correspondientes que se usarán en el desarrollo del modelo multi-paramétrico para diagnosticar el potencial geotérmico de una zona. Las imágenes Landsat 8, cubren la zona de prueba con un path/row: 46/26, abarcando los años 2014 a 2017, y para Sentinel-1 se usaron pares de imágenes con un tiempo de adquisición entre imágenes de 12 días para cada año.

La corrección y procesamiento de imágenes Landsat 8 se realizó en el software MATLAB, así como el análisis de componentes principales, mientras que para el procesamiento de las imágenes Sentinel-1 se utilizó el programa SNAP (Sentinel Application Platform) que pone a disposición de forma gratuita la Agencia Espacial Europea (ESA) y la cual cuenta con herramientas denominadas Toolboxes específicas para trabajar imágenes de radar de Sentinel 1.

#### **5.1.1 Anomalías térmicas**

Una de las principales características para determinar si una zona puede ser apta para la explotación geotérmica es la evidencia de anomalías térmicas en la superficie. Se corrigieron y procesaron las bandas ópticas y térmicas de imágenes Landsat 8 para determinar la temperatura superficial terrestre (LST) y el flujo de calor radiativo (RHF) de la zona de estudio.

Las figuras 24 y 25 muestran la temperatura de superficie calculada en la zona de estudio, para los años 2014 y 2017, considerando que el sitio de prueba se encuentra aproximadamente a 2750 msnm donde la temperatura media anual es de 12 °C, se observan zonas con rango de temperaturas altas que supera los 30 °C. En cada año se observa estas zonas se encuentran alejadas del pozo exploratorio EC-1 de la CFE, coincidiendo con los reportes de ausencia de anomalías de temperatura en dicha zona.

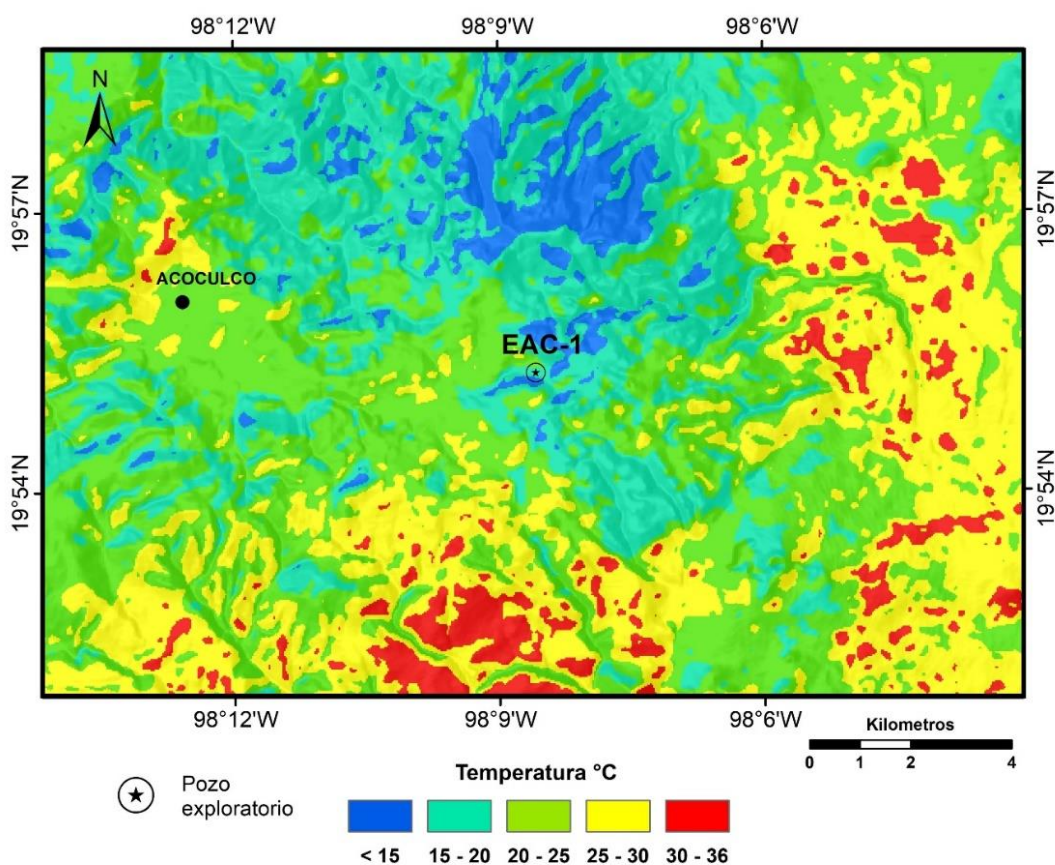


FIGURA 24. TEMPERATURA SUPERFICIAL AÑO 2014

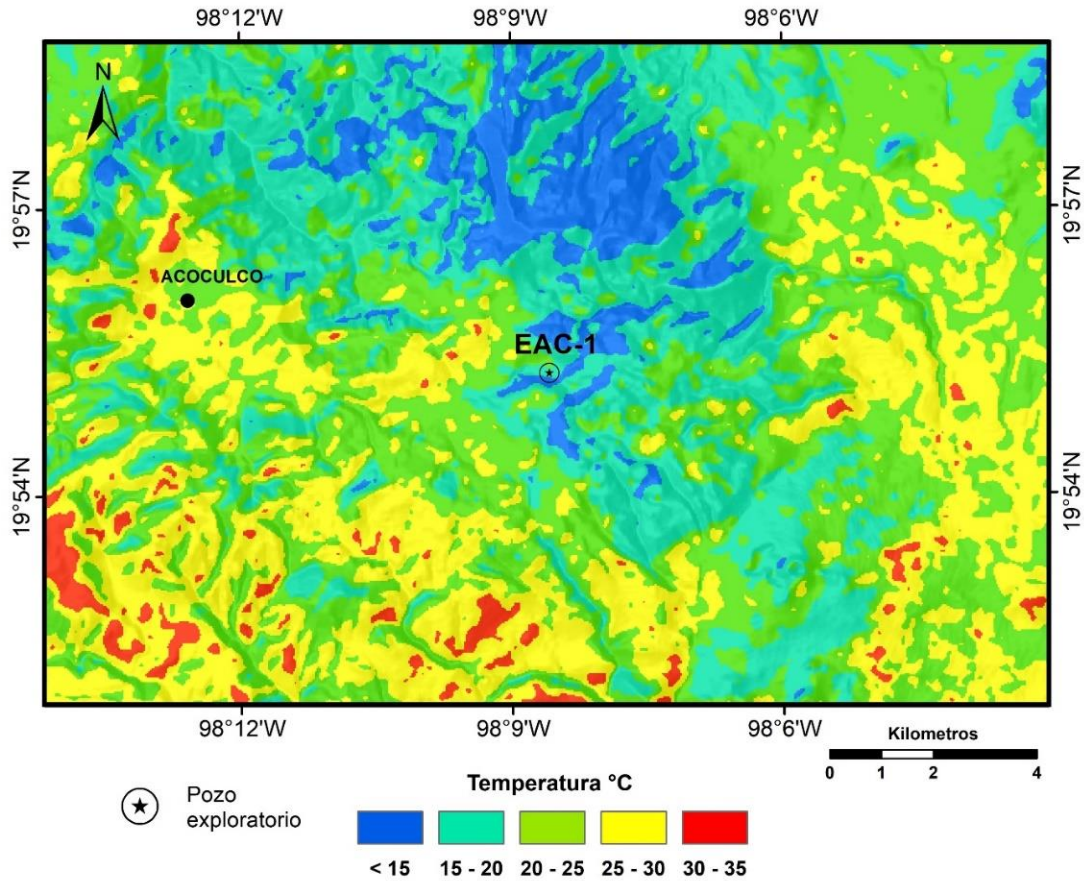
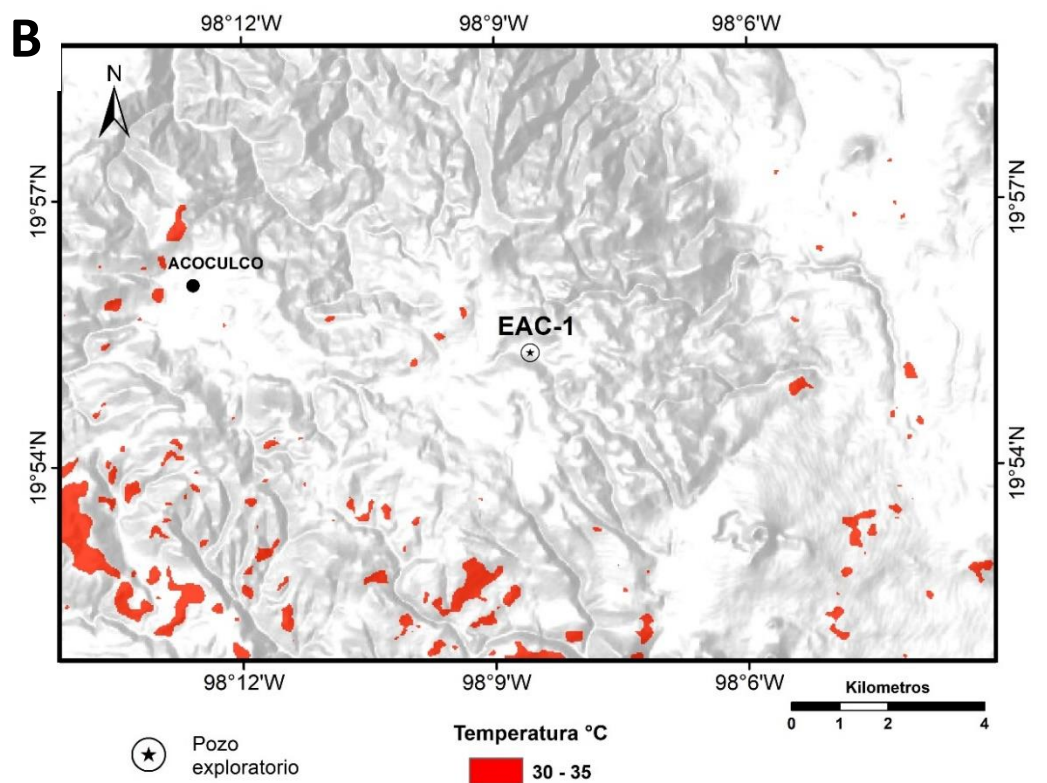
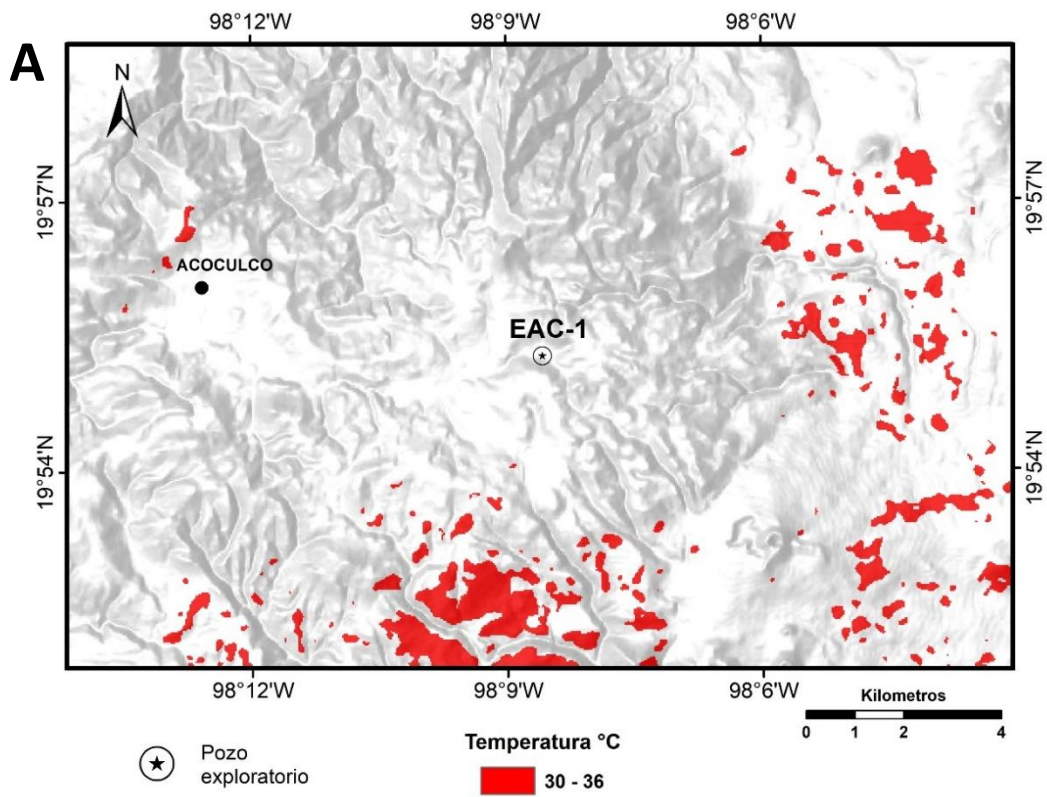


FIGURA 25. TEMPERATURA SUPERFICIAL AÑO 2017

Se aislaron las temperaturas más altas observadas en la zona para cada uno de los años y se mapearon, estos se muestran en la figura 26 A y B, se observan los rangos de temperatura que van de los 30 °C a los 35 y 36 °C respectivamente. La información de temperatura superficial obtenida representada en estos mapas es la que se utilizó en el análisis del modelo multi-paramétrico.



**FIGURA 26. VALORES ALTOS EN TEMPERATURA SUPERFICIAL.**  
**A) AÑO 2014 B) AÑO 2017**

El flujo de calor radiativo (RHF) representa el calor emitido por radiación desde la superficie, este se encuentra medido en Watts por metro cuadrado ( $Wm^{-2}$ ). Se presentan los mapas de RHF correspondiente a los años 2014 y 2017 (Fig. 27 y 28). De igual forma que con la temperatura superficial para obtener los datos que se usaran en el modelo multi-paramétrico, se aislaron y mapearon los rangos de valores máximos de flujo de calor observados (Fig. 29 y 30).

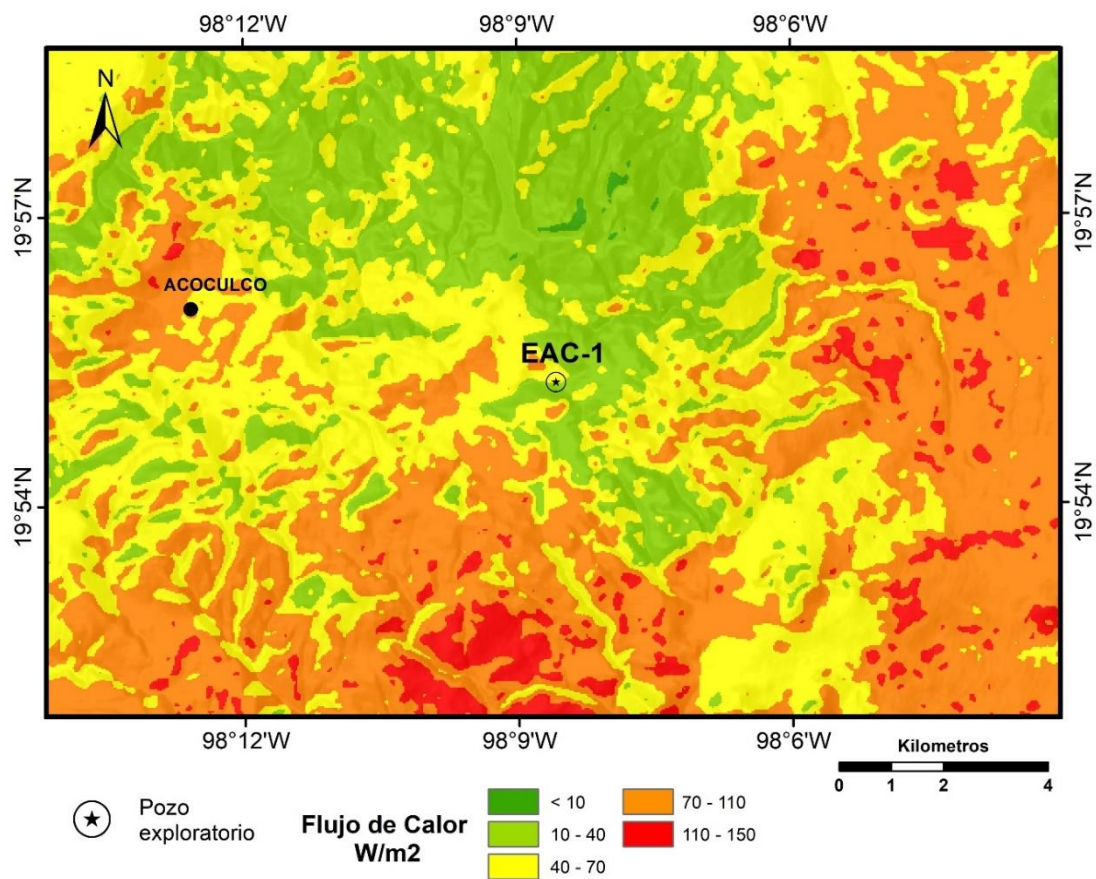


FIGURA 27. FLUJOS DE CALOR RADIATIVO. AÑO 2014

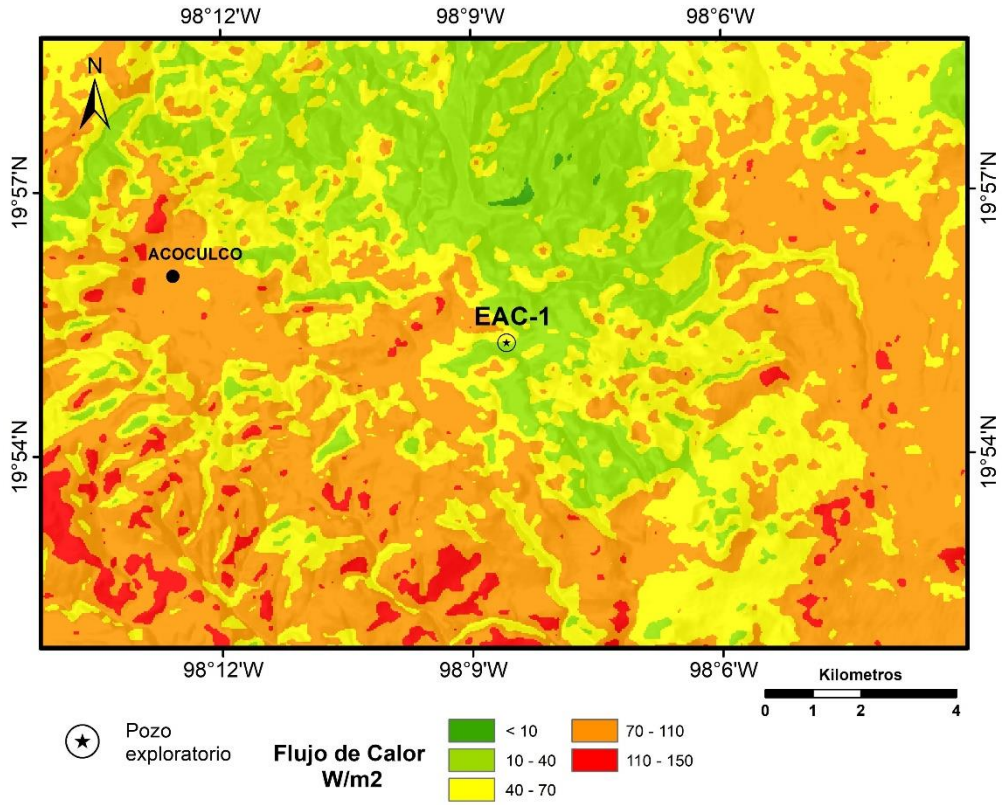


FIGURA 28. FLUJOS DE CALOR RADIATIVO. AÑO 2017

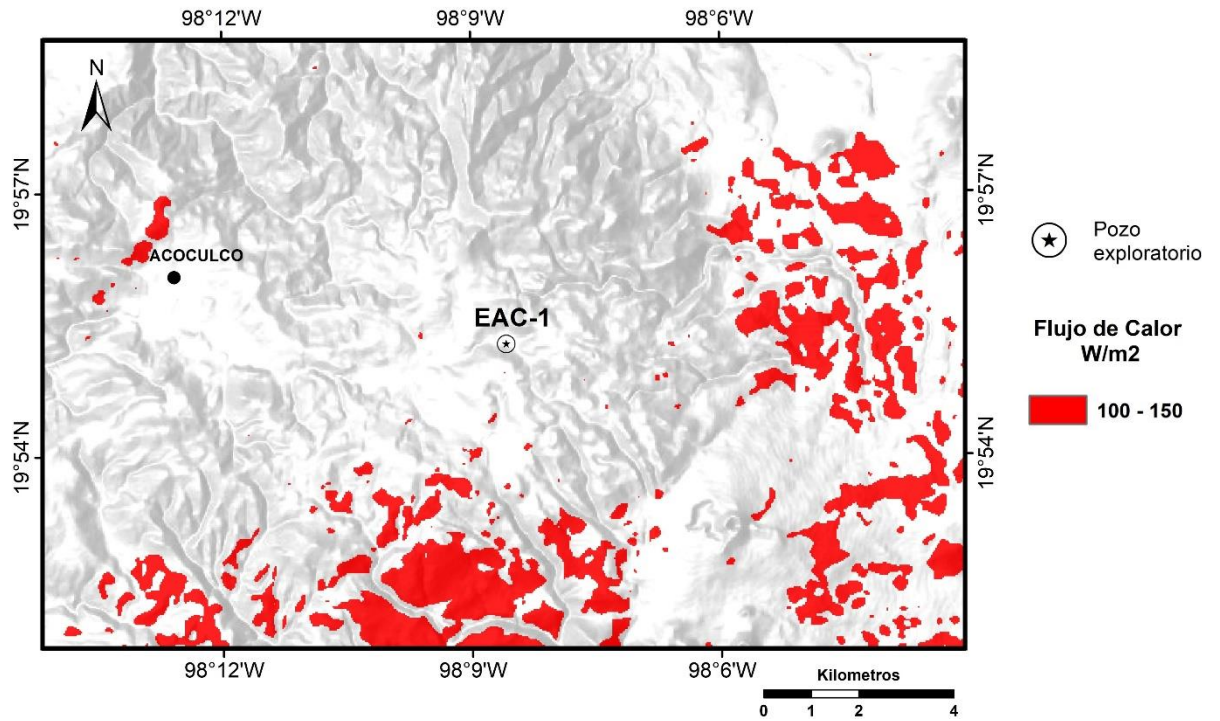


FIGURA 29. VALORES MÁXIMOS DE FLUJOS DE CALOR RADIATIVO. AÑO 2014

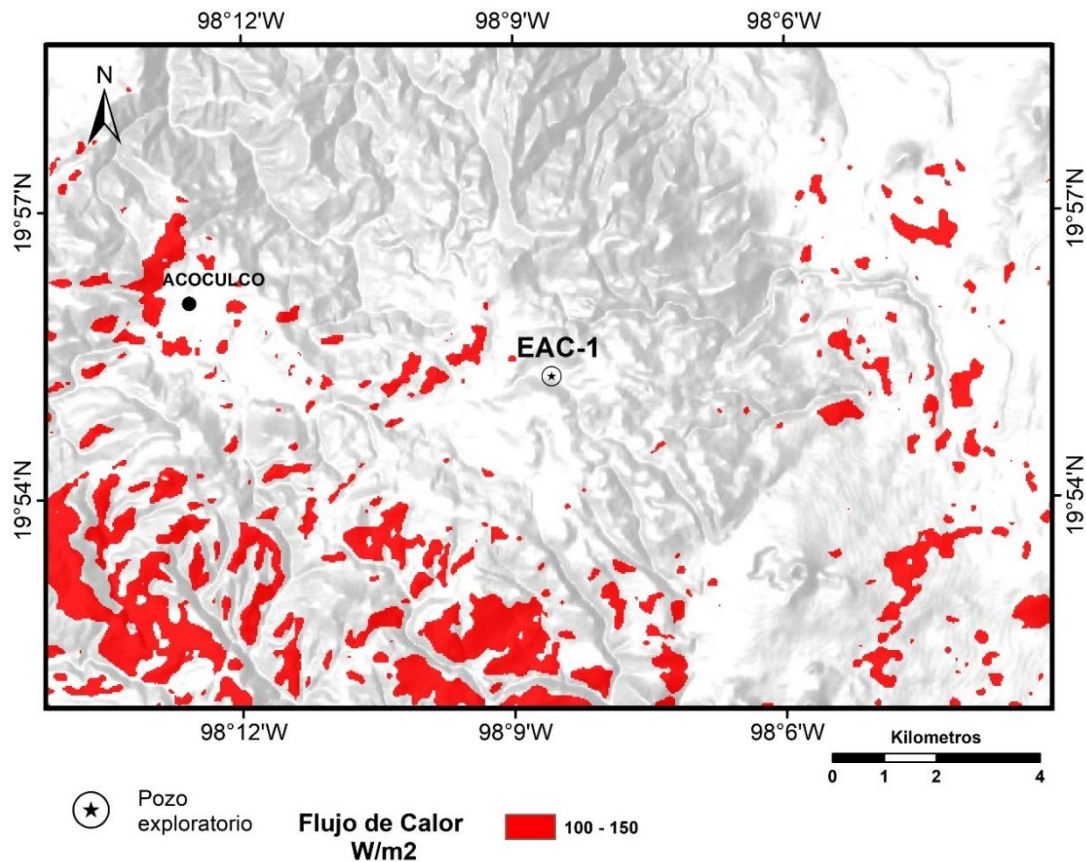


FIGURA 30. VALORES MAXIMOS DE FLUJOS DE CALOR RADIATIVO. AÑO 2017

### 5.1.2 Alteraciones hidrotermales

A partir de las bandas no térmicas corregidas de las imágenes Landsat 8, se realizó el análisis de componentes principales (PCA) para la identificación de alteraciones hidrotermales de la zona de estudio.

La transformación de las bandas originales a nuevas componentes se describe en la tabla 3, en este caso corresponden a imágenes del año 2014, de la matriz de carga obtenida se analizaron los signos y magnitudes de los vectores característicos de cada nueva componente para identificar aquellas más adecuadas para identificar alteraciones hidrotermales.



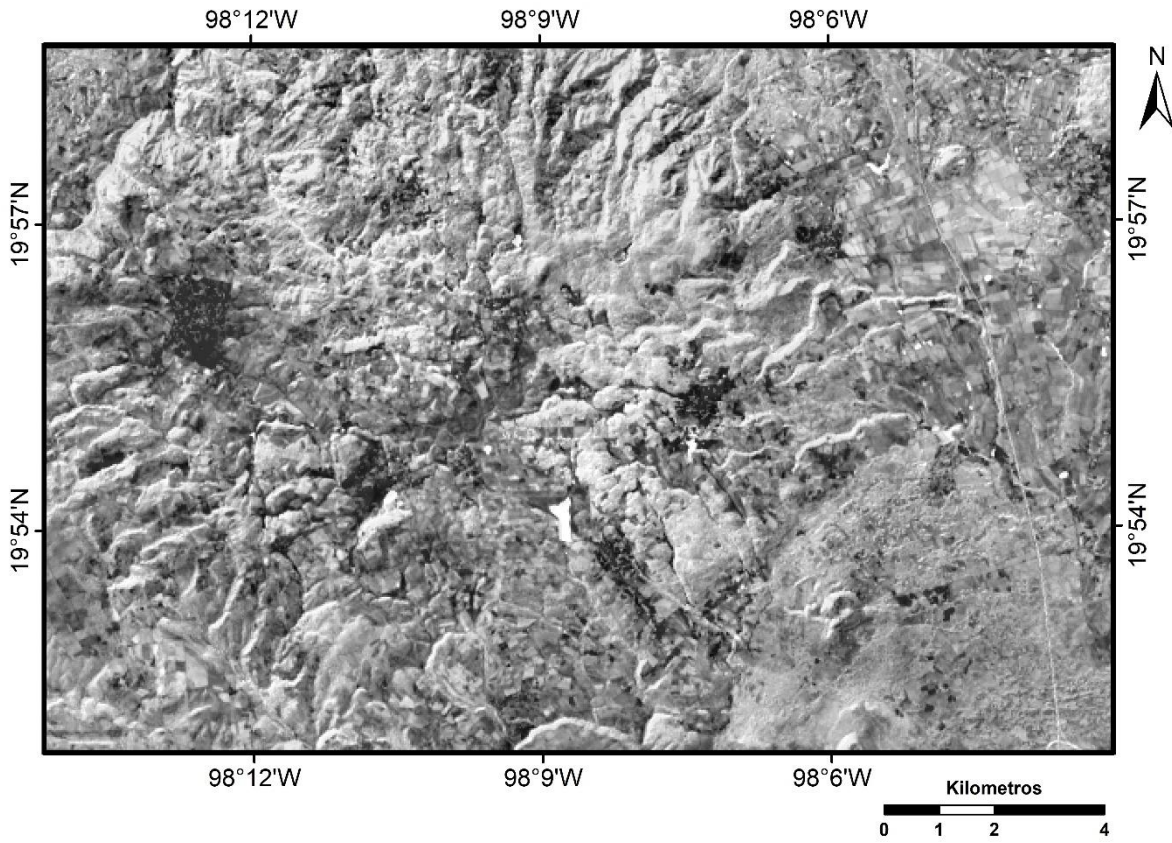
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Varianza %	<b>89.4667661</b>	7.22569999	2.63622942	0.51821003	0.1341977	0.01889675
L8 B2	0.13927676	-0.07844666	0.33626865	-0.18621903	<b>0.73113775</b>	-0.54049197
L8 B3	0.20245846	-0.06025663	0.47293862	-0.21409988	0.26336415	0.78518108
L8 B4	0.31776108	-0.18991911	0.6049649	-0.15970408	<b>-0.6191988</b>	-0.29675501
L8 B5	0.29390943	0.89853818	0.17779489	0.27030148	-0.00179184	-0.03961406
L8 B6	0.65068491	0.05639466	-0.50530187	<b>-0.5631624</b>	-0.03068123	-0.00236176
L8 B7	0.57346913	-0.37893902	-0.10163131	<b>0.70976302</b>	0.10828296	0.04148142

**TABLA 3. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES CON SEIS BANDAS LANDSAT 8**

La componente principal C1 contiene el 89.46% de la varianza y está compuesta por la mezcla positiva de todas las bandas, por lo tanto, representa principalmente información debido a la topografía y al albedo.

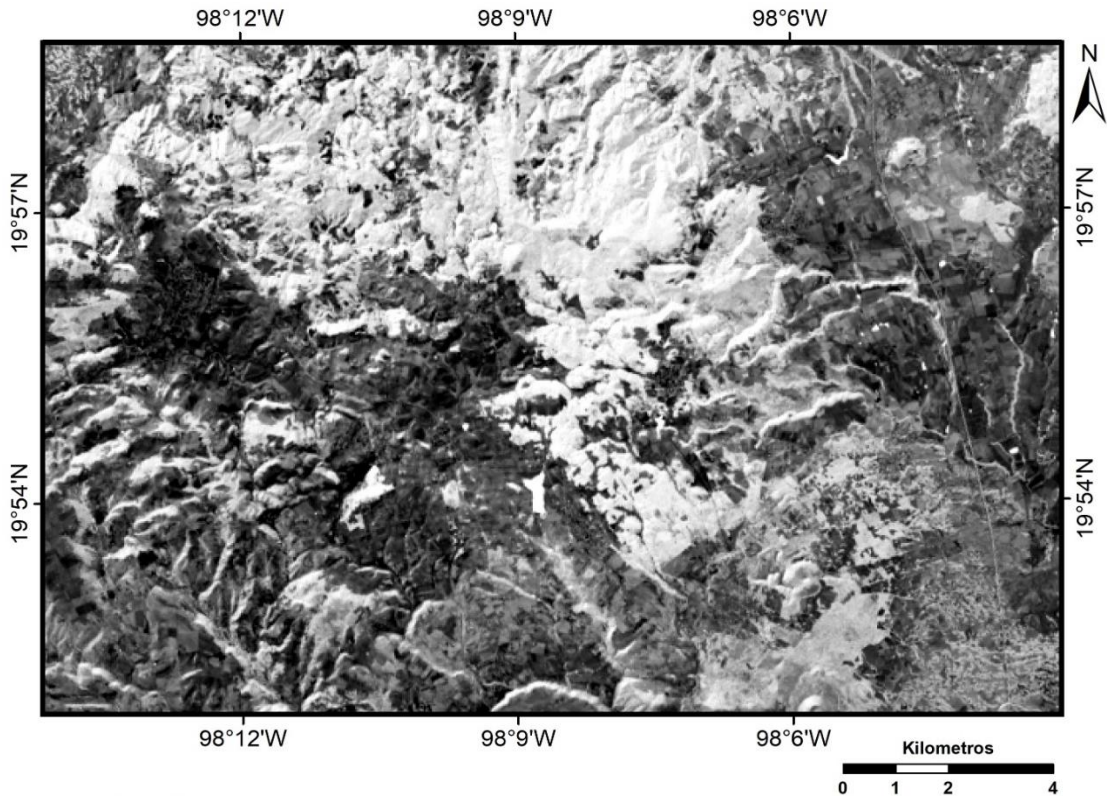
En la segunda componente principal (C2) la banda 4 contiene una contribución negativa de -0.18991 representando rasgos de absorción y una alta reflectancia en la banda 5 con una contribución positiva de 0.89853, por lo que se relaciona a la vegetación mostrándose en tonos brillantes.

Los hidroxilos quedan representados en la componente principal 4 (C4) en tonos oscuros, debido a la contribución positiva de la banda 7 (0.70976) donde presenta características de absorción, y la contribución negativa en la banda 5 de -0.56316. Se obtuvo la imagen inversa de C4 para representar estos minerales en tonos brillantes (Fig. 31).



**FIGURA 31. IMAGEN INVERSA DE C4 REPRESENTANDO HIDROXILOS EN TONOS BRILLANTES**

En la componente principal C5 se observa una mayor contribución de signo negativo de la banda 4 (-0.6191988) y en la banda 2 una mayor contribución positiva (0.73113775), para la identificación de óxidos en esta componente se observarán en tonos oscuros. Para representar los óxidos en tonos brillantes se obtuvo la imagen inversa de C5 (Fig. 32).



**FIGURA 32. IMAGEN INVERSA DE C5 LAS ZONAS BRILLANTES REPRESENTAN OXIDOS**

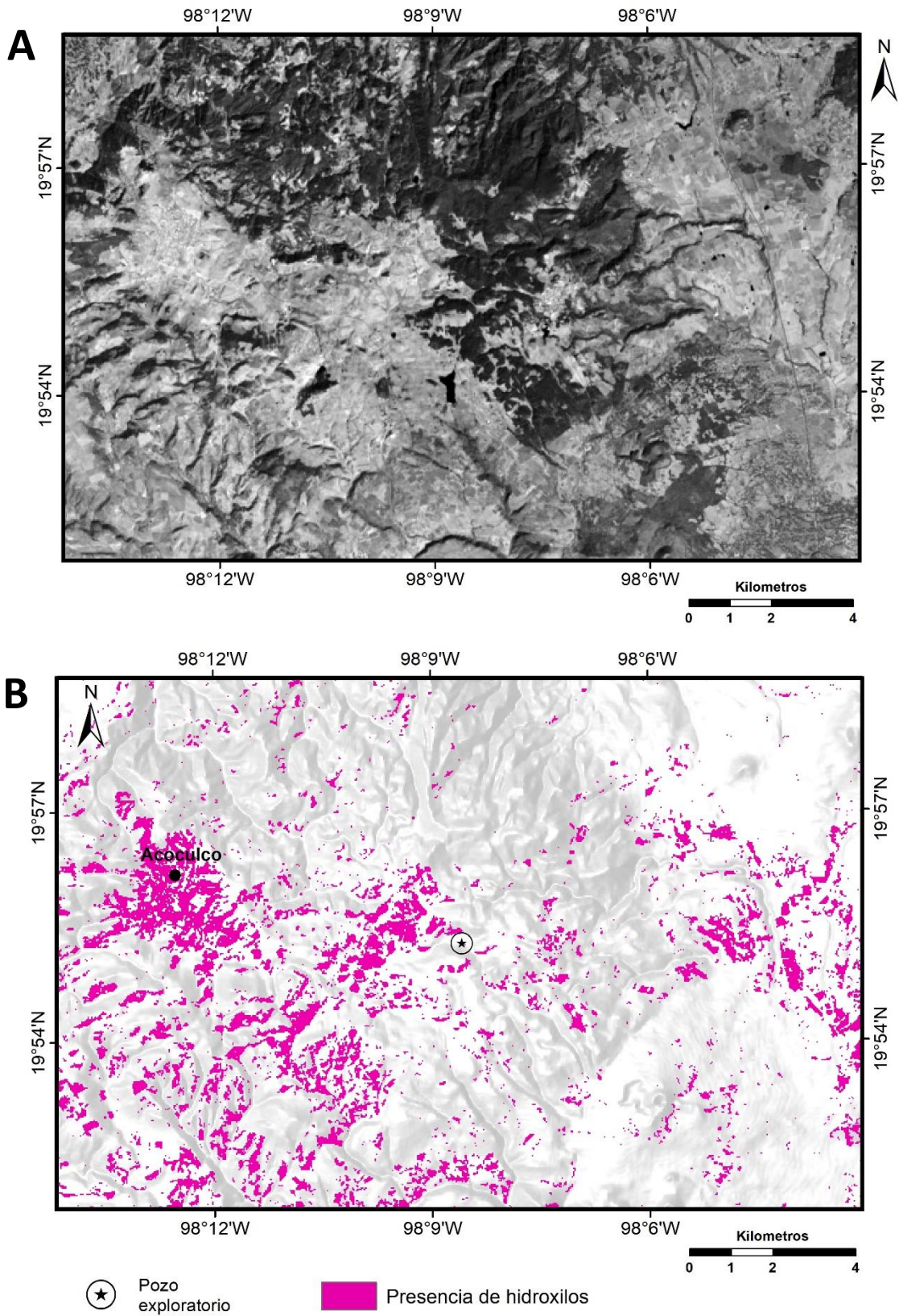
Para realizar un mapeo de hidroxilos y óxidos con mejor información se redujo la cantidad de bandas de entrada en el análisis de componentes principales. Según las características espectrales de cada grupo mineral es como se eligieron las bandas que se utilizarían (Ruiz-Armenta & Prol-Ledesma, 1998).

Para la identificación del grupo mineral de hidroxilos se escogieron las bandas B2, B5, B6 y B7 de Landsat 8. En la tabla 4 se presenta la transformación de componentes principales de dichas bandas.

**TABLA 4. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE HIDROXILOS**

	C1	C2	C3	C4
Varianza %	90.3117549	8.17989727	1.10348718	0.40486061
B2	0.14560676	-0.06476609	-0.53874838	0.82725704
B5	0.32135008	0.90008295	-0.25273985	-0.15068965
B6	0.70504981	-0.02137902	<b>0.6448924</b>	0.29421337
B7	0.6151728	-0.4303475	<b>-0.47956913</b>	-0.45428726

En la matriz de carga se observa que la componente principal C1 contiene valores positivos de las cuatro bandas y con una varianza del 90.31% representando el efecto topográfico y albedo de las imágenes originales. La componente principal C3 presenta una mayor contribución positiva en la banda B6, mientras que en la contribución de la banda B7 tiene carga negativa, de acuerdo a las características espectrales de los hidroxilos, la presencia de estos se mostrará en tonos brillantes (Fig. 33 A). A partir de la componente C3 se filtraron los valores de mayor contribución y se mapearon las zonas que podrían presentar la presencia de hidroxilos (Fig. 33 B).



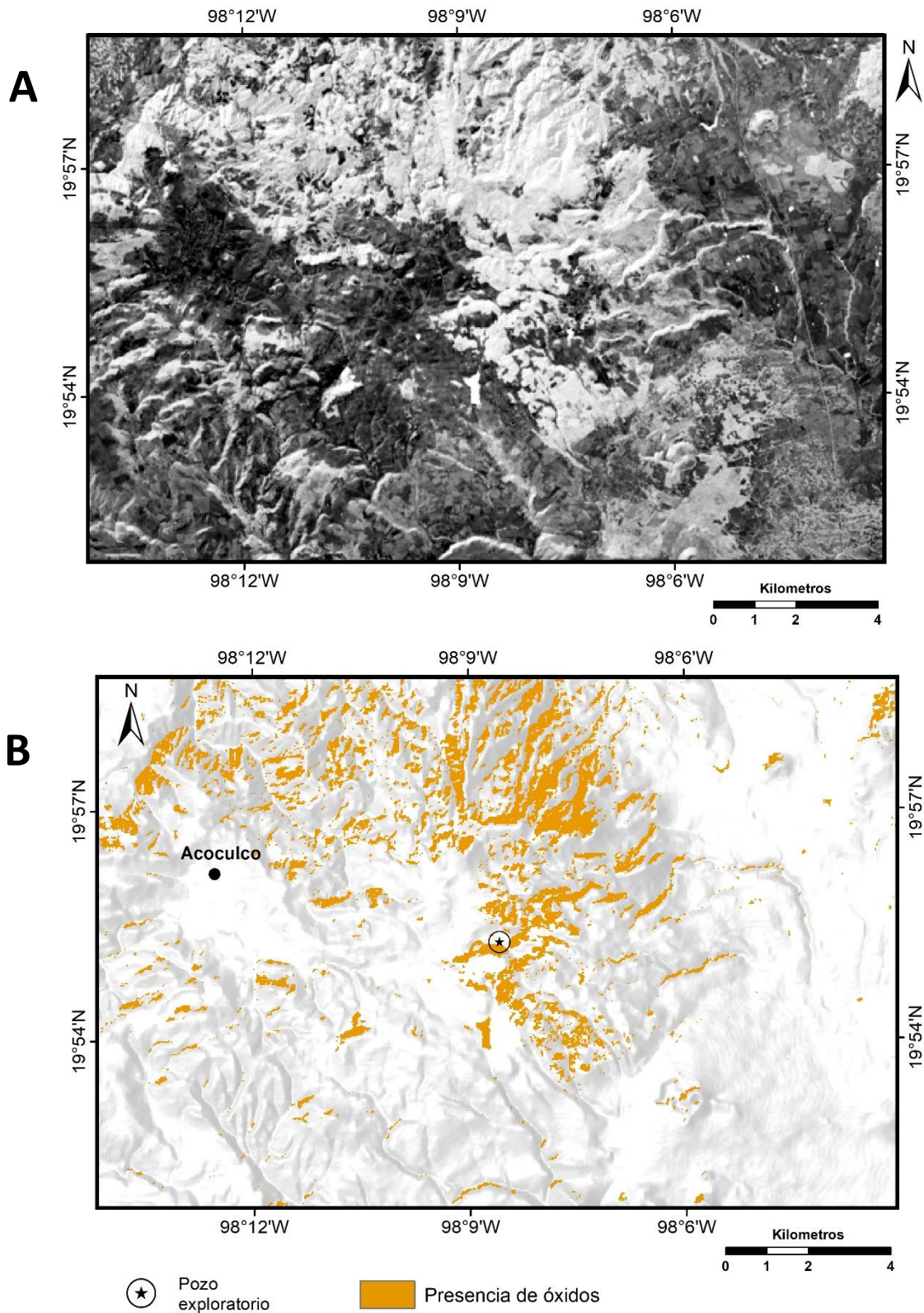
**FIGURA 33. A) COMPONENTE PRINCIPAL C3, LOS PÍXELES MÁS BRILLANTES MUESTRAN ÁREAS CON PRESENCIA DE HIDROXILOS. B) MAPEO DE PRESENCIA DE HIDROXILOS CON LOS VALORES MÁXIMOS DE LA COMPONENTE PRINCIPAL C3.**

Para el mapeo de óxidos se eligieron las bandas B2, B4, B5, y B6 de Landsat 8, la transformación de componentes principales se representa en la tabla 5.

**TABLA 5. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES PARA IDENTIFICAR ÓXIDOS**

	C1	C2	C3	C4
Varianza %	88.0401005	8.63312559	3.13305236	0.19372159
B2	0.16958434	-0.14999413	0.38582263	<b>0.89436224</b>
B4	0.38645822	-0.35023752	0.72746731	<b>-0.44584193</b>
B5	0.39965482	0.89265877	0.20781986	-0.01572431
B6	0.81373658	-0.24082308	-0.52796128	0.03307427

Del análisis de la matriz de carga se observa que la componente principal C4 muestra una mayor carga positiva en la banda B2 donde los óxidos presentan alta absorción, así como una carga negativa en la banda B4 donde los óxidos tienen alta reflectancia, por lo que se representarían en tonos oscuros a los óxidos. Para representar los óxidos de hierro en tonos brillantes se obtuvo imagen negativa de C4 y a partir de esta componente principal se hizo una filtración de valores dejando los máximos en la imagen y se mapearon las áreas donde podría existir mayor presencia de óxidos (Fig. 34 A y B).



**FIGURA 34. A) IMAGEN NEGATIVA DE LA COMPONENTE PRINCIPAL C4 DONDE LOS ÓXIDOS SE REPRESENTAN EN TONOS BRILLANTES. B) MAPEO DE PRESENCIA DE ÓXIDOS CON LOS VALORES MAXIMOS DE LA COMPONENTE PRINCIPAL C4.**

### 5.1.3 Deformación superficial del suelo

El siguiente parámetro calculado fue la deformación de superficie que pudiera estar relacionada con la actividad geotérmica, esto a partir de la metodología DInSAR explicada en el capítulo 4.

La deformación superficial para los años 2014 y 2017 se muestran en las figuras 35 y 36, se sobrepuso a una imagen real de la zona para una mejor visualización. Los desplazamientos calculados se analizarán junto a los demás parámetros para observar la relación que guardan entre ellos y con la actividad geotérmica del sitio.

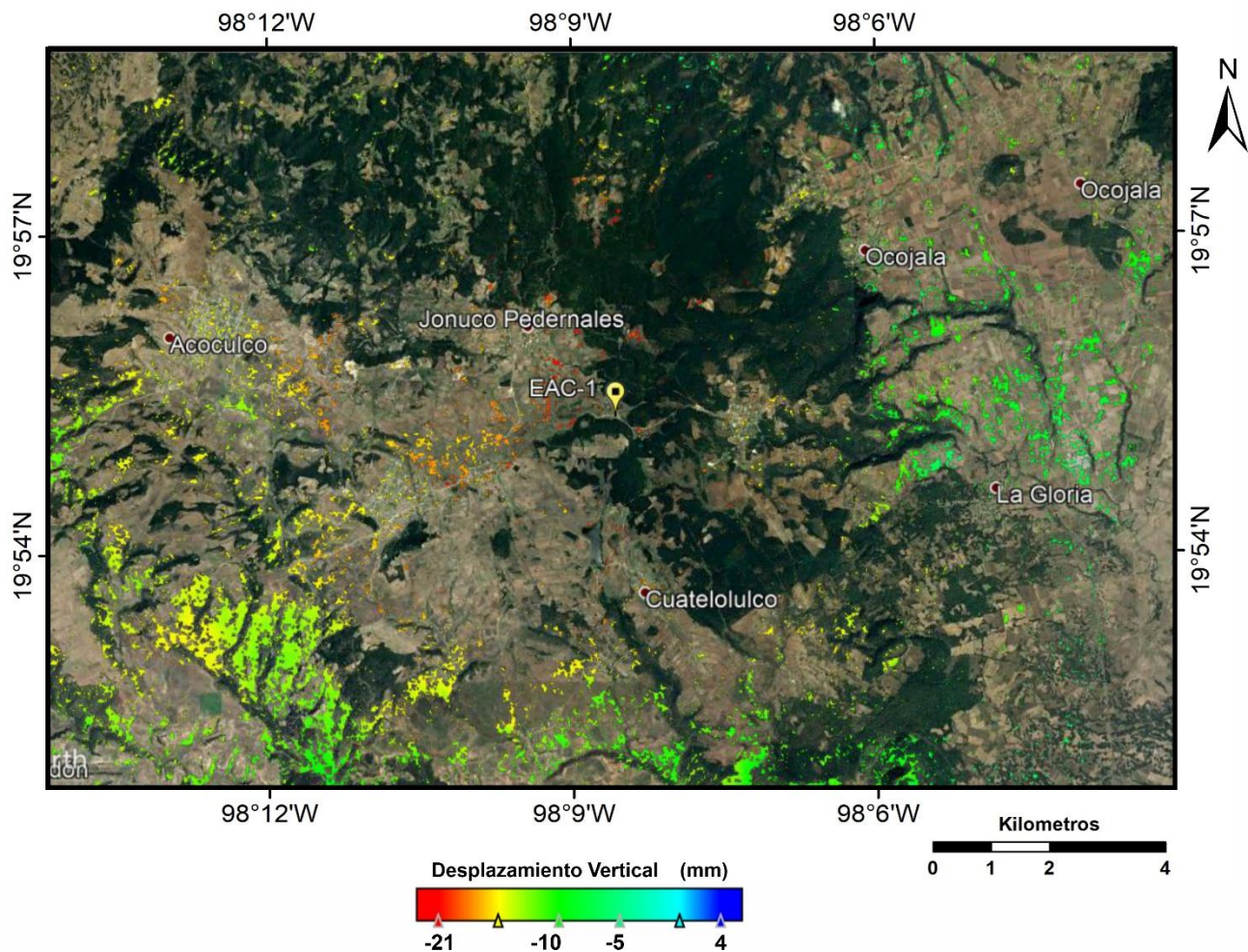


FIGURA 35. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES CALCULADOS EN LA ZONA DE ACOULCO, PUEBLA EN EL AÑO 2014



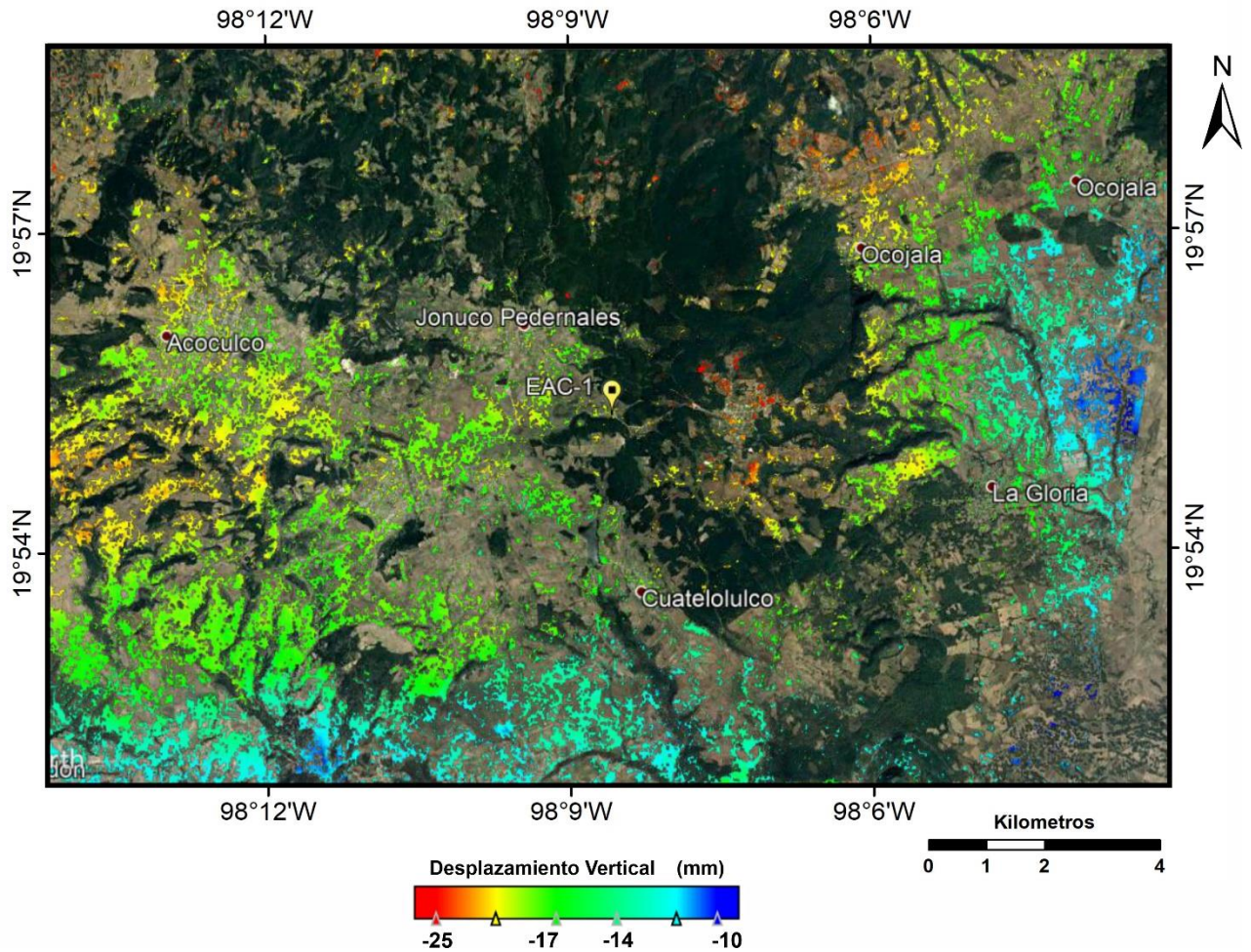
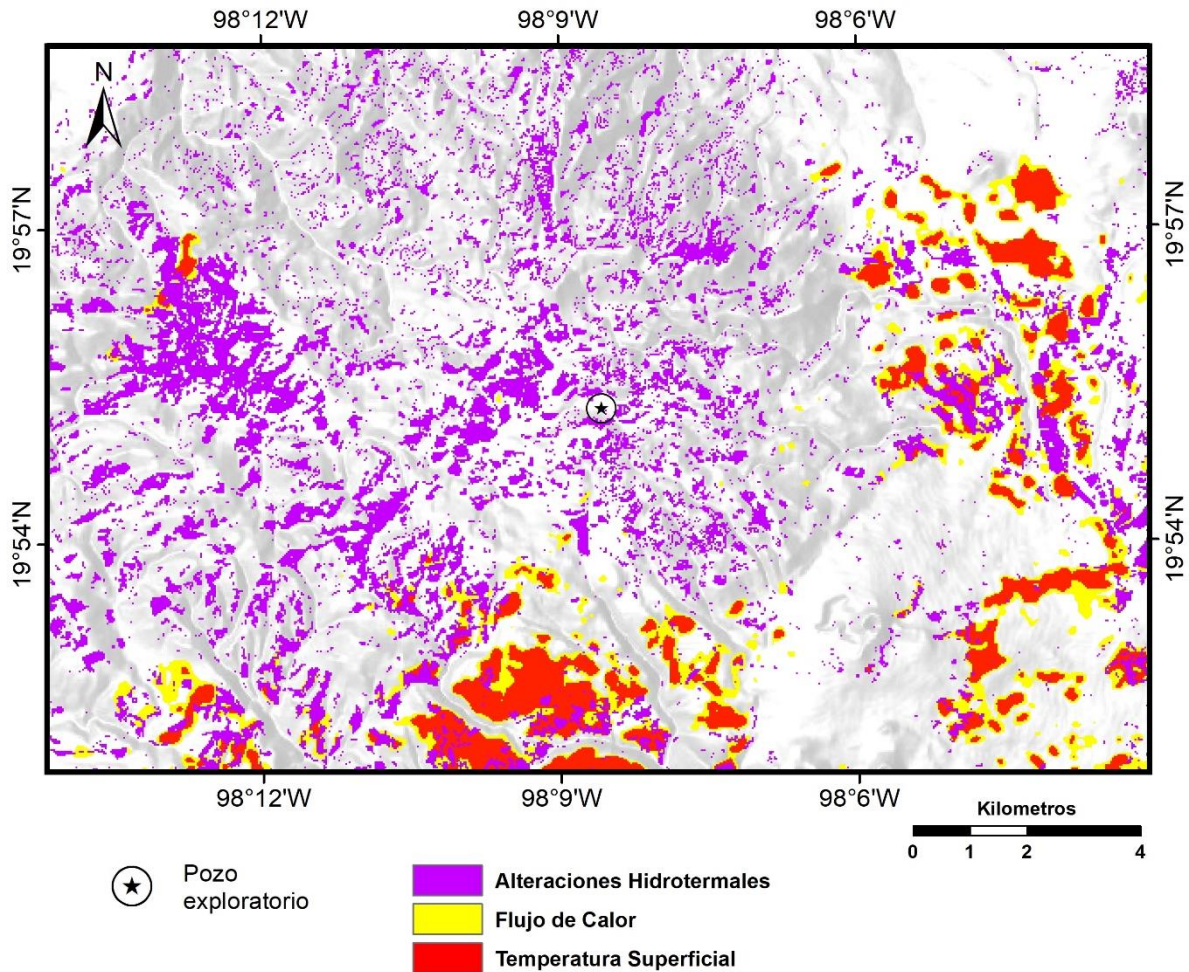


FIGURA 36. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES CALCULADOS EN LA ZONA DE ACOCULCO, PUEBLA EN EL AÑO 2017

## 5.2 Evaluación del modelo multi-paramétrico

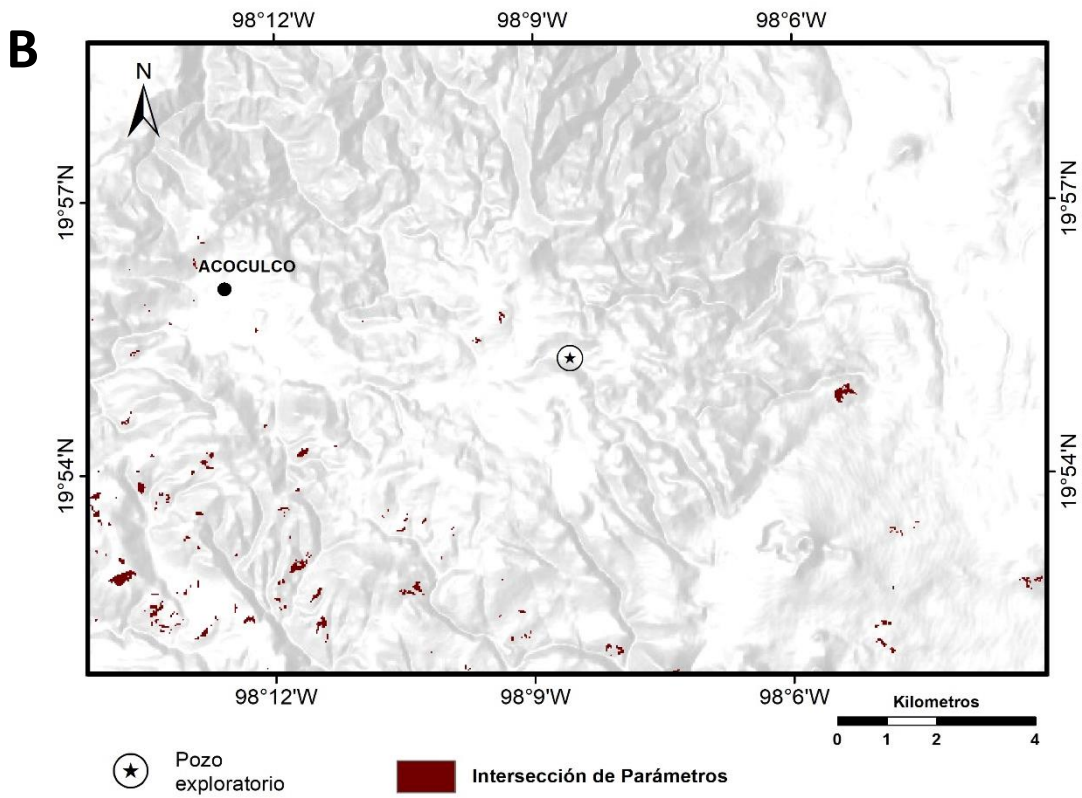
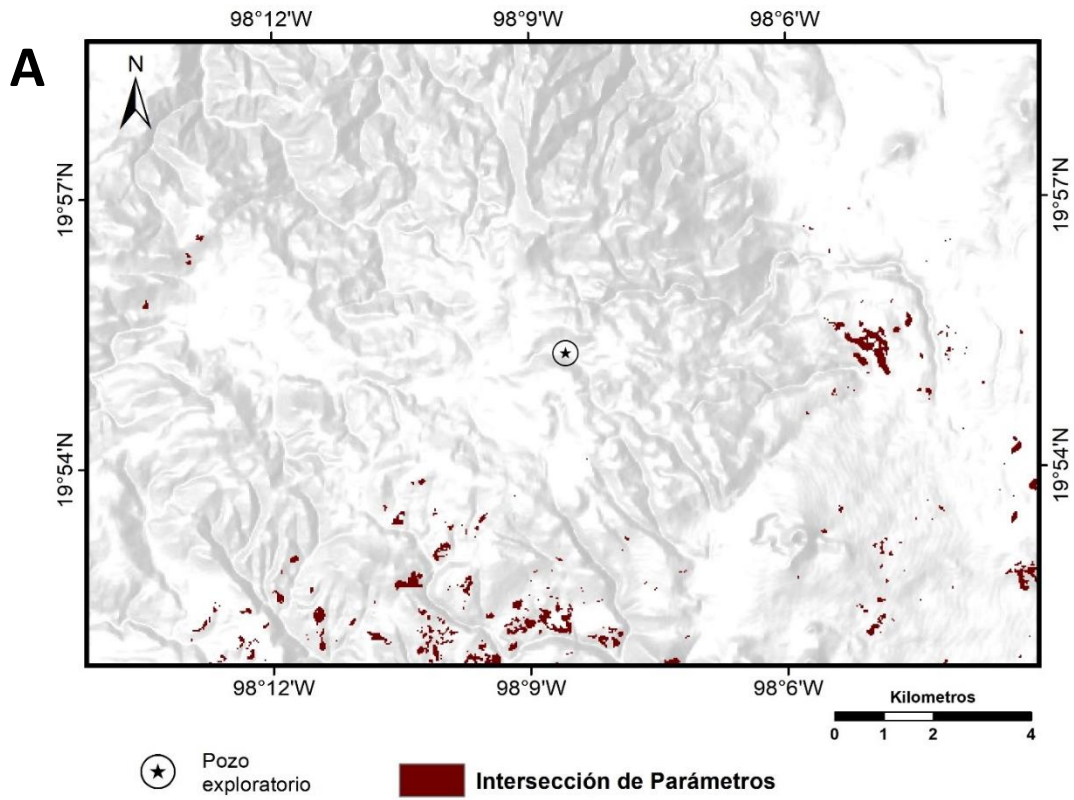
Ya generados cada uno de nuestros mapas con los parámetros ya descritos, se continuo al análisis de la información contenida en ellos, para esto se aplicaron técnicas de algebra de mapas con el objetivo de buscar las zonas donde los valores más característicos de cada parámetro se conjugarán. Mostrando posibles áreas que pudieran tener el potencial para una exploración geotérmica.

Inicialmente se realizó el mapeo de las alteraciones hidrotermales (óxidos e hidroxilos) en conjunto con las anomalías térmicas (temperatura superficial y flujo de calor), esto se muestra en la figura 37.



**FIGURA 37. MAPA DE LA ZONA MOSTRANDO LAS ALTERACIONES HIDROTERMALES, FLUJOS DE CALOR Y TEMPERATURA SUPERFICIAL**

A partir de la integración de esta información se buscó identificar las áreas que pudieran tener potencial para la prospección geotérmica de la zona, se aislaron los lugares en donde cada uno de los parámetros se intersectan. En la figura 38 se muestran los mapas obtenidos con las zonas que cuentan con la presencia de alteraciones hidrotermales, así como de anomalías de temperatura para los años 2014 y 2017.



**FIGURA 38. MAPA DE LAS ZONAS DONDE EXISTE PRESENCIA DE ALTERACIONES HIDROTHERMALES Y ANOMALÍAS TÉRMICAS. A) AÑO 2014, B) AÑO 2017**

Se integraron los datos de la deformación de superficie de la zona junto con los mapas obtenidos anteriormente, se buscó determinar si existe relación en la presencia de anomalías térmicas y alteraciones hidrotermales con el desplazamiento del terreno en superficie (Fig. 39 y 40), con el fin de definir las zonas que pudieran tener potencial geotérmico.

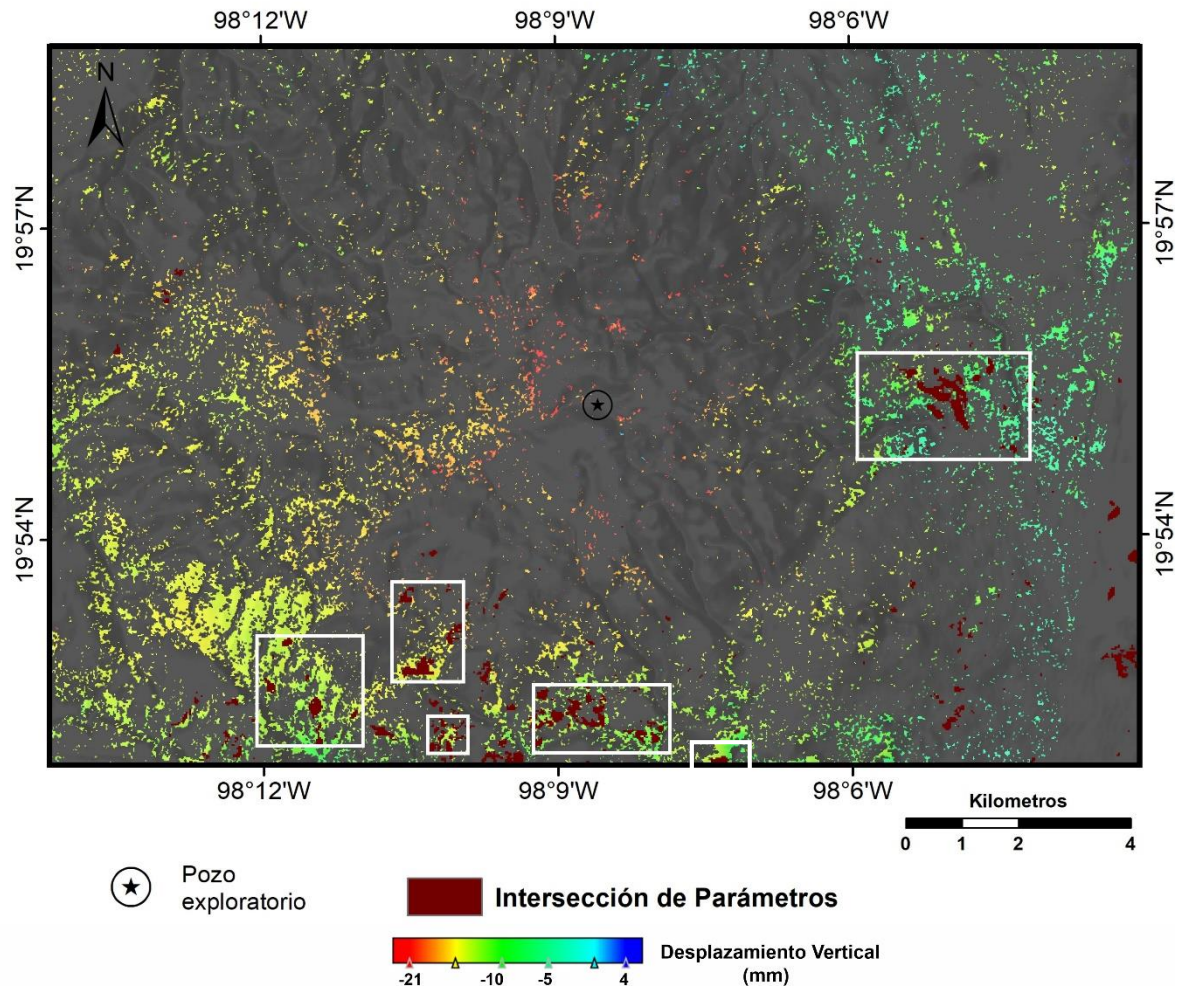
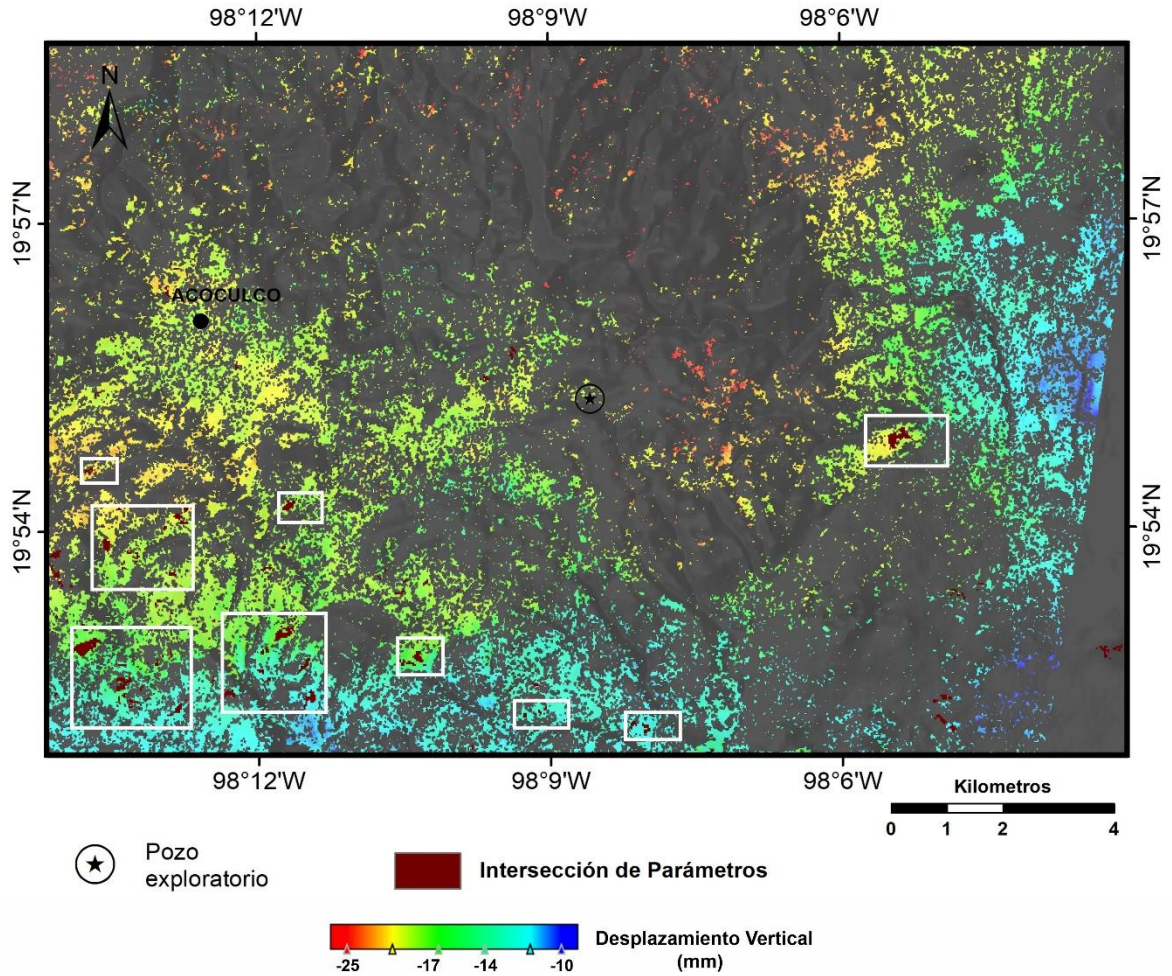


FIGURA 39. MAPA DE DESPLAZAMIENTOS Y ZONAS DE PRESENCIA DE PARÁMETROS. AÑO 2014



**FIGURA 40. MAPA DE DESPLAZAMIENTOS Y ZONAS DE PRESENCIA DE PARÁMETROS. AÑO 2017**

Se puede observar que existe deformación superficial de terreno en áreas donde se detectó la presencia de alteraciones hidrotermales y anomalías de temperatura, para una mejor visualización se han remarcado estas áreas con los recuadros blancos en las figuras 39 y 40, teniendo así en primera instancia áreas con cierto potencial geotérmico.

A continuación, se analizaron las áreas remarcadas en conjunto con una composición de bandas 5, 4, 3, de Landsat 8, esta composición resalta la vegetación en tonos rojos, donde existe presencia de campos de cultivo y vegetación densa fueron descartadas como idóneas para para la exploración geotérmica.

En las figuras 41 y 42 se muestran los resultados de este análisis, a través del cual se localizaron las áreas dentro del sitio de prueba que cuentan con potencial geotérmico para las imágenes de cada año.

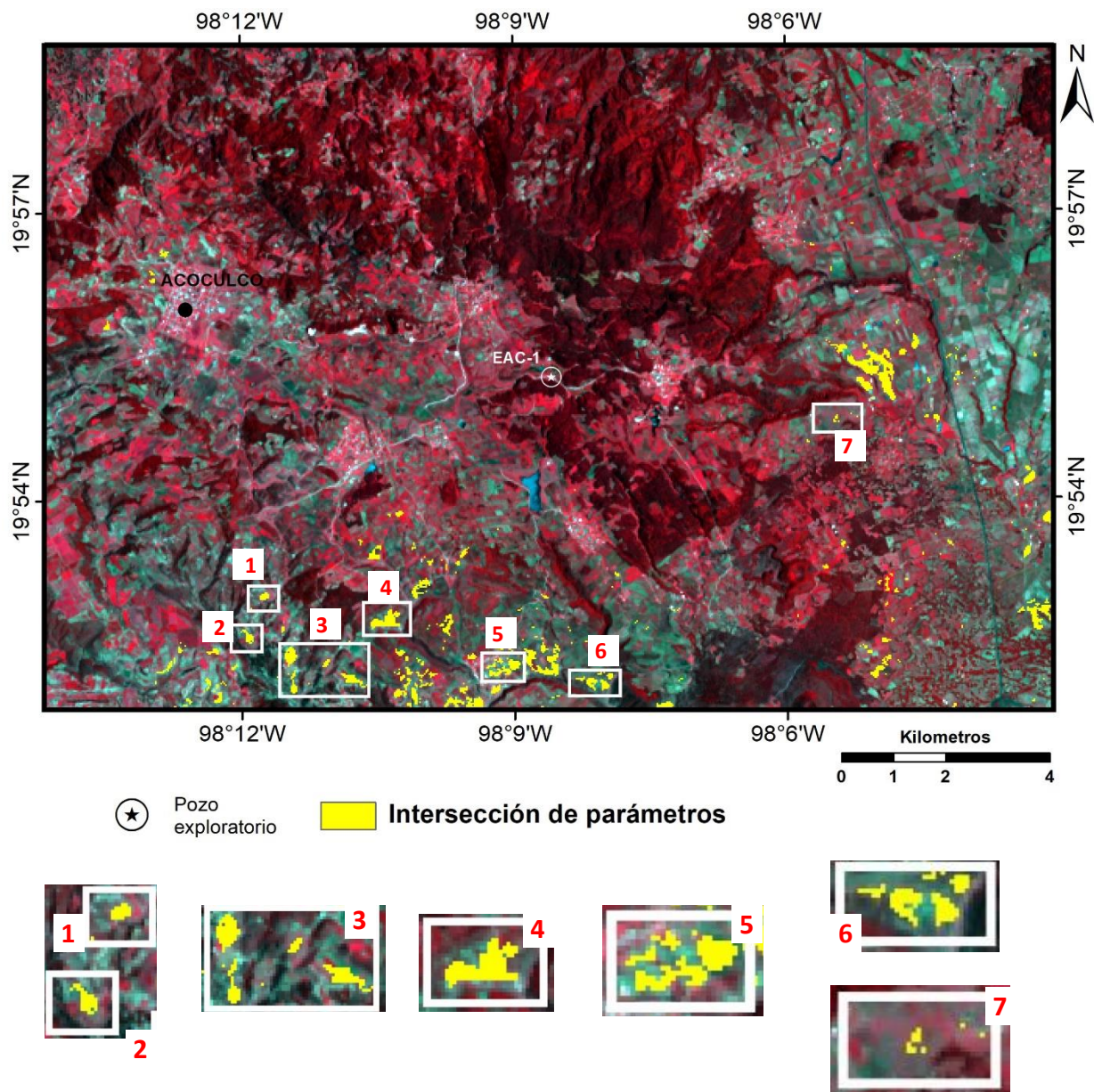
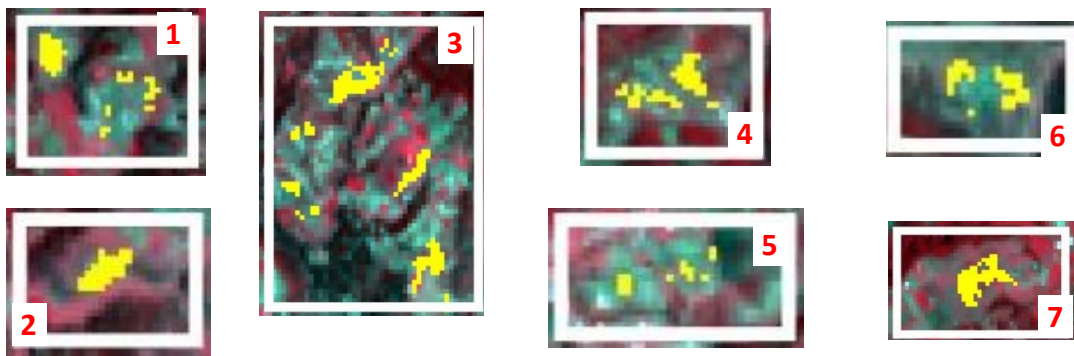
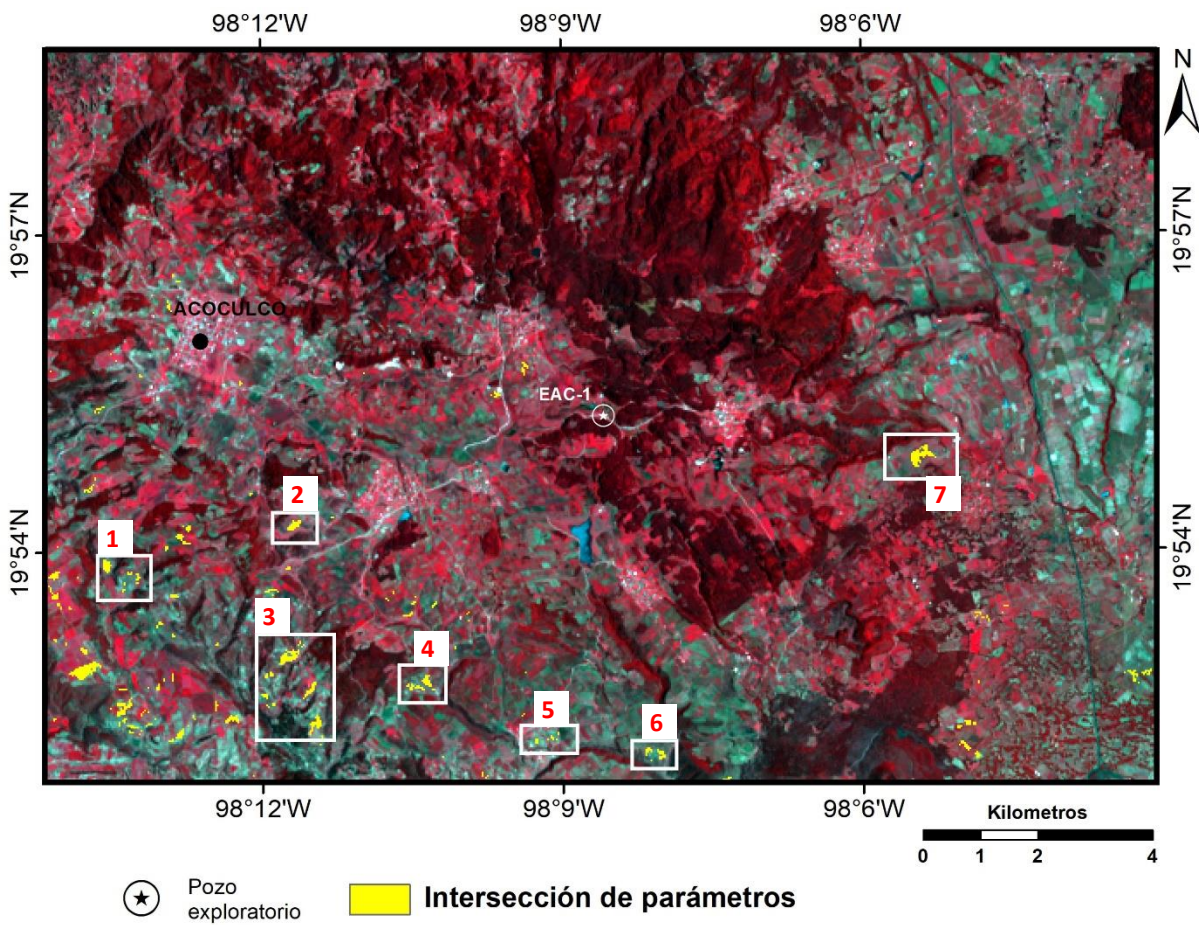


FIGURA 41. COMPOSICIÓN RGB DE BANDAS 5, 4, 3. SE MUESTRAN LAS ZONAS IDENTIFICADAS PARA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA EN LAS IMÁGENES AMPLIADAS. AÑO 2014



**FIGURA 42. COMPOSICIÓN RGB DE BANDAS 5, 4, 3. SE MUESTRAN LAS ZONAS IDENTIFICADAS PARA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA EN LAS IMÁGENES AMPLIADAS. AÑO 2017**

Con la información obtenida para cada año, se realizó un análisis temporal con el objetivo de identificar aquellas áreas de interés que tuvieran presencia permanente o constante en el sitio de prueba, y descartar posibles falsos positivos que pudieran

haberse producido por actividades de origen estacional o antropogénicas. Esto permitió el establecimiento de las áreas dentro del sitio de prueba con el mayor potencial geotérmico derivado del desarrollo metodológico propuesto (Fig. 43).

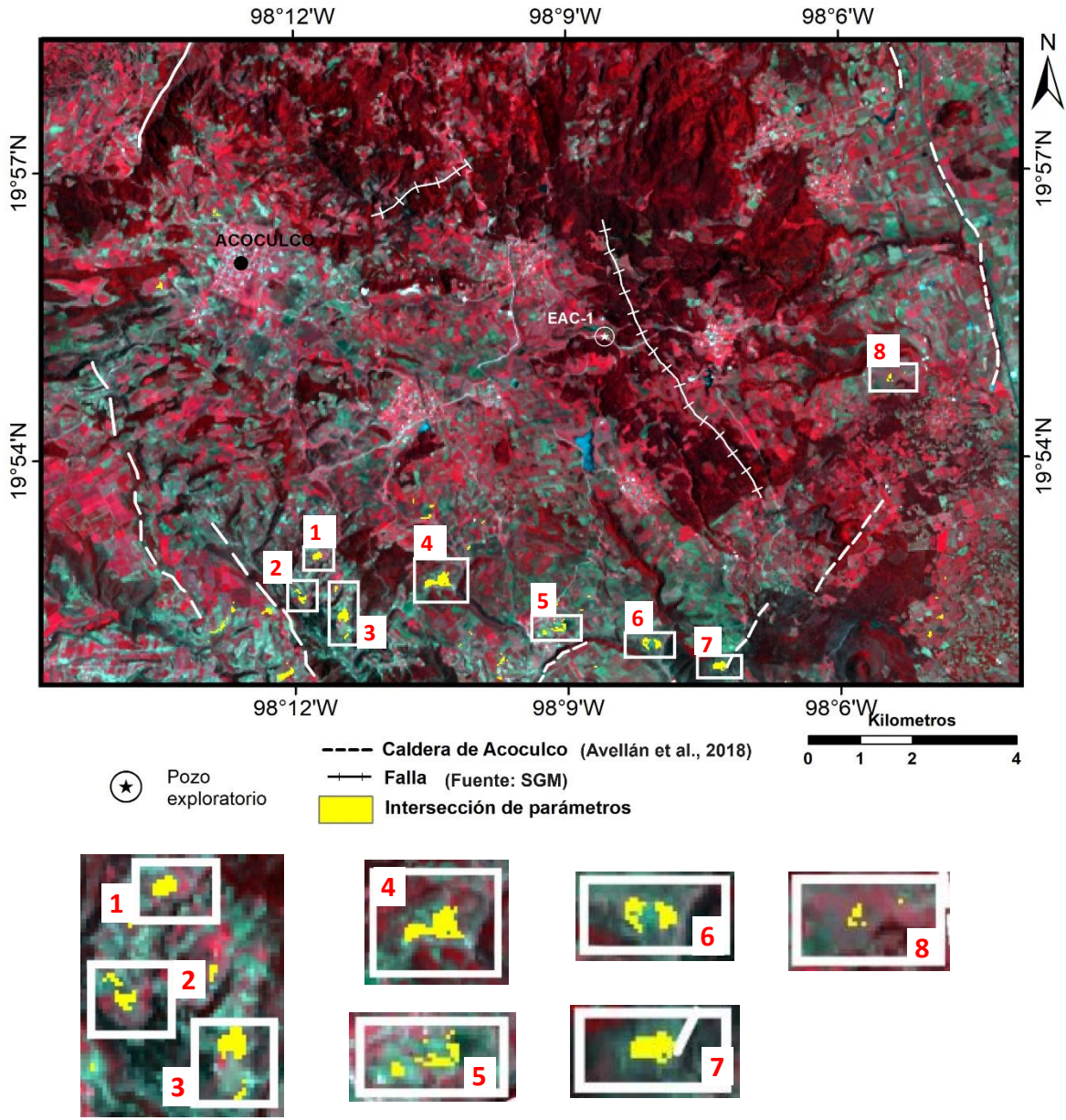


FIGURA 43. ZONAS CON EL MAYOR POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA ACOCULCO, PUEBLA



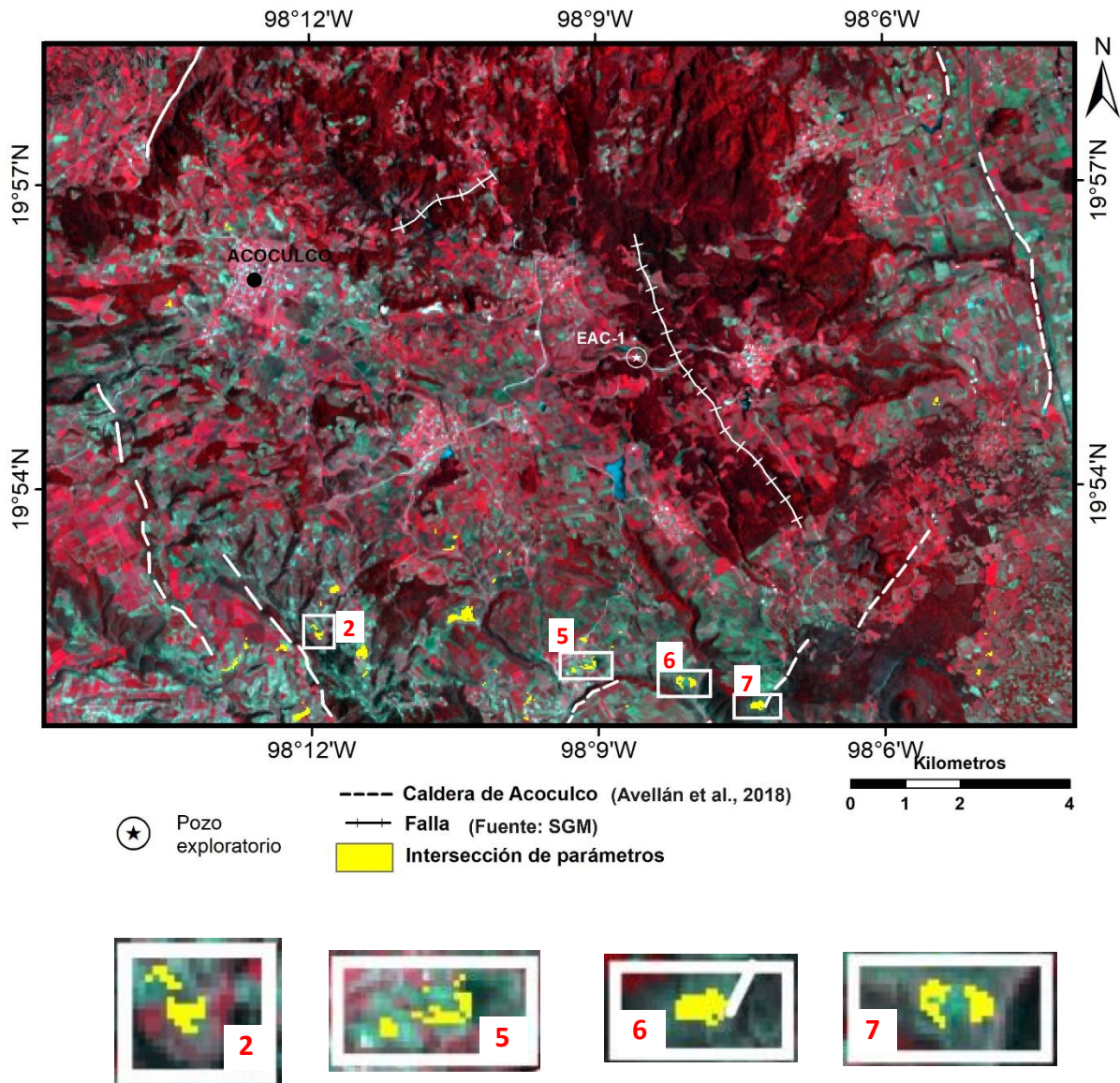
### 5.3 Validación del modelo

La zona de Acoculco se encuentra alojada en un complejo de caldera volcánica y se caracteriza por actividad volcánica representada por domos riolíticos, conos de escoria y derrames andesíticos (Quinto, Santoyo, Torres, Gonzalez, & Castillo, 1995), presenta extensas alteraciones hidrotermales en la superficie, manantiales ácidos fríos y emisiones de gases, además de la falta de termalismo evidente dentro del complejo de la caldera (Lermo et al., 2009; López-Hernández et al., 2009).

El desarrollo metodológico aplicado en este trabajo permitió la identificación de las características del lugar descritas anteriormente. Con el Análisis de Componentes Principales (PCA) se encontró la presencia de los grupos minerales de hidroxilos y óxidos de hierro, asociados a áreas hidrotermalmente alteradas esto en la zona dentro de la caldera, así también de las escasas temperaturas en manifestaciones superficiales haciendo uso de las bandas térmicas de Landsat 8 para la estimación de anomalías térmicas. Con el cálculo de desplazamientos de la zona haciendo uso de técnicas SAR, se integró y analizó esta información con los demás parámetros dentro del modelo propuesto, localizando así las áreas que presentan un alto potencial geotérmico en la zona de Acoculco.

La figura 43 presenta el producto final resultado del procesamiento y análisis de la información paramétrica calculada a partir de las imágenes satelitales, en esta se observa que las áreas identificadas con el mayor potencial geotérmico se localizan hacia el borde E y S-SW de la formación calderica, siguiendo los límites de la fractura anular.

De acuerdo a esto, las áreas de potencial geotérmico que se identifican con la numeración 2, 5, 6 y 7 (Fig. 44), se proponen como aquellas de mayor interés en la zona para una exploración terrestre a más detalle que pueda llevar al aprovechamiento de la geotermia del lugar, esto debido a la cercanía que existe entre estas y la fractura anular calderica, siendo un indicio de la posible existencia de zonas de debilidad por donde este fluyendo el calor.



**FIGURA 44. ZONAS DE POTENCIAL GEOTÉRMICO DE MAYOR INTERÉS PARA LA EXPLORACIÓN TERRESTRE A DETALLE EN ACOZULCO, PUEBLA**

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSIONES**

Conforme al trabajo que se realizó en esta investigación, se puede concluir:

- Se aportó una metodología alternativa que fusiona información satelital diferentes técnicas de percepción remota para determinar zonas potenciales para la exploración de recursos geotérmicos.
- El uso de las bandas térmicas de las imágenes Landsat 8 manifestó ser una herramienta de alta eficiencia y precisión en la búsqueda de puntos geotérmicos.
- La aplicación del análisis de componentes principales a imágenes satelitales Landsat 8 permitió la identificación de zonas con presencia de alteraciones hidrotermales (hidroxilos y óxidos de hierro), las imágenes procesadas presentaron una gran utilidad para encontrar áreas de interés dentro de la zona de Acoculco, Puebla.
- El uso de técnicas de Radar de Apertura Sintética (SAR) para el cálculo de la deformación superficial del terreno demostró ser una herramienta con gran potencial para la exploración de campos geotérmicos, presentando una alta precisión en las mediciones de movimientos del terreno, lo que mejoró la estimación de las zonas con potencial geotérmico en este trabajo.
- Con la implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) fue posible conjuntar y fusionar la información paramétrica calculada a partir de las imágenes satelitales, generando mapas integradores con nueva información derivada que permitió la identificación de sitios con potencial para la exploración geotérmica en el sitio de prueba Acoculco, Puebla.
- El uso de técnicas de percepción remota puede aportar información de alto valor en etapas tempranas de exploración de zonas geotérmicas, la identificación de zonas con potencial prospectivo alto puede elevar la tasa de éxito de perforación, con ello reducir el riesgo y el costo de una campaña de exploración geotérmica.

## REFERENCIAS

- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., ... Parra, R. (2014, April). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.004>
- Alipour, T., Sarajian, M. R., & Esmaeily, A. (2010). Land Surface Temperature Estimation From Thermal Band of Landsat Sensor , Case Study : Alashtar City. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII(2003), 1–6.
- Ariza Alexander. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF*, 46. <https://doi.org/10.5751/ES-06710-190329>
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., ... Benowitz, J. (2018). Geology of the late Pliocene–Pleistocene Acoculco caldera complex, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, (November). <https://doi.org/10.1080/17445647.2018.1531075>
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 3–65. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R. 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*, 53, 154–165.

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.05.012>

- Canet, C., Trillaud, F., Prol-Ledesma, R. M., González-Hernández, G., Peláez, B., Hernández-Cruz, B., & Sánchez-Córdova, M. M. (2015). Thermal history of the Acoculco geothermal system, eastern Mexico: Insights from numerical modeling and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 305(November), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.019>
- Carnec, C., & Fabriol, H. (1999). Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. *Geophysical Research Letters*, 26(9), 1211–1214. <https://doi.org/10.1029/1999GL900062>
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Eneva, M., & Adams, D. (2012). Surface deformation in Imperial Valley, CA, from satellite radar interferometry. *Geoth. Resour. ...*, 36(track 3506), 1339–1344. Retrieved from <http://pubs.geothermal-library.org/lib/grc/1030405.pdf>
- Falorni, G., Morgan, J., & Eneva, M. (2011). Advanced InSAR Techniques for Geothermal Exploration and Production. *GRC Transactions*, 35, 1661–1666.
- Fernandez De La Vega-Marquez, T., Prol-Ledesma, R. M., & Orozco, G. (2001). Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). *Geofisica Internacional*, 40(3), 147–162.
- Flores-Armenta, M., Ramírez-Montes, M., & Morales-Alcalá, L. (2014). GEOTHERMAL ACTIVITY AND DEVELOPMENT IN MEXICO – Keeping the production going. “Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization”, 1–12.
- Gens, R., & Logan, T. (2003). *Alaska Satellite Facility software tools*.

- Goldstein, B., Hiriart, G., Tester, J., Gutierrez-Negrin, L., Bertani, R., Bromley, C., ... Muraoka, H. (2013). Geothermal Energy geothermal energy , Nature geothermal energy nature , Use geothermal energy use , and Expectations geothermal energy expectations. In *Renewable Energy Systems* (pp. 772–782). New York, NY: Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5820-3\\_309](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5820-3_309)
- González-Ruiz, L. E., González-Partida, E., Garduño Monroy, V. H., Romero Rojas, W., & Romero-Rojas, M. C. (2015). Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica.
- Gupta, R. P., Tiwari, R. K., Saini, V., & Srivastava, N. (2013). A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advances in Remote Sensing*, 02(02), 111–119. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.22015>
- Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., & Quijano-León, J. (2015). Present situation and perspectives of geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April 2015*, (April), 1–10. Retrieved from <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01002.pdf>
- Hanssen, R. F. (2005). Satellite radar interferometry for deformation monitoring: A priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3–4), 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.004>
- Hiriart Le Bert, G., Gutiérrez Negrín, L. C. a., Quijano León, J. L., Ornelas Celis, A., Espíndola, S., & Hernández, I. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México, 164.
- Jónsson, S., Adam, N., & Björnsson, H. (1998). Effects of subglacial geothermal activity observed by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letters*, 25(7), 1059–1062. <https://doi.org/10.1029/98GL50567>
- Kaltschmitt, M., Formighieri, C., & Bass, R. (2013). *Renewable Energy Systems. Renewable Energy Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5820-3>

- Karacsonyi, J. G. (2002). Panorama Energetico Mundial Un Desafio Para La Ingenieria, 1–27.
- Khalil, A. E., El-desoky, H. M., & Salem, S. M. (2016). Contribution of remote sensing techniques to the recognition of titanite occurrences at Gabal El-Degheimi area , Central Eastern Desert , Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*.
- Khalil, A. E., El-Desoky, H. M., & Salem, S. M. (2016). Contribution of remote sensing techniques to the recognition of titanite occurrences at Gabal El-Degheimi area, Central Eastern Desert, Egypt. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 20(1), 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.08.003>
- Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Vénegas, S., & Arredondo, J. (2009). Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pue., México. *Geotermia*, 22(1), 40–58.
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., & Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*, 38(3), 279–293. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.05.001>
- López Hernández, A. (2009). *Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acoculco y sus sistema hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México*. UNAM.
- Lorenzo Pulido, C., Flores Armenta, M., & Ramírez Silva, G. (2011). Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. *Geotermia*, 24(1), 59–69.
- Lubitz, C., Motagh, M., Wetzel, H. U., & Kaufmann, H. (2013). Remarkable urban uplift in Staufen im Breisgau, Germany: Observations from terraSAR-X InSAR and leveling from 2008 to 2011. *Remote Sensing*, 5(6), 3082–3100. <https://doi.org/10.3390/rs5063082>
- Maya González, R., & Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2007). Recursos Geotérmicos Para Generar Electricidad en México. *Revista Digital Universitaria*, 8(12), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X)

- Mayorga, T. (2011). Uso de interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) en la ladera occidental del Cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo-Ecuador, para determinar la deformación de la ladera por los movimientos en masa. *Universidad Nacional de Córdoba*.
- Muñoz, G. (2014). Exploring for Geothermal Resources with Electromagnetic Methods. *Surveys in Geophysics*, 35(1), 101–122. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9236-0>
- Ochieng, L. (Geothermal D. C. (2016). OVERVIEW OF GEOTHERMAL SURFACE, 1–12.
- Quijano-León, J. L., & Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2003). 30 Years of Geothermal-Electric Generation in Mexico.
- Quijano León, J. L. (2007). Manual de Geotermia, 1–109.
- Quinto, A., Santoyo, E., Torres, V., Gonzalez, E., & Castillo, D. (1995). Estudio geoquímico-ambiental de los efluentes naturales producidos en la zona geotérmica de Acoculco, Puebla. *Ingeniería Hidráulica En México*, 10(3), 21–27.
- Ruiz-Armenta, J. R., & Prol-Ledesma, R. M. (1998). Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 19(10), 1981–2000. <https://doi.org/10.1080/014311698215108>
- Sass, I., & Burbaum, U. (2010). Damage to the historic town of Staufen (Germany) caused by geothermal drillings through anhydrite-bearing formations. *Acta Carsologica*, 39(2), 233–245. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.96>
- Secretaría de Energía. (2018). *Boletín Energías Limpias*.
- Sierra, J. L., & Pedro, G. E. (1998). Energía Geotérmica, 1–58.
- van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkerslooth, C., & Wechsler, C. (2014). Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33(1), 255–



269. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.007>

Vaughan, R. G., Keszthelyi, L. P., Lowenstern, J. B., Jaworowski, C., & Heasler, H. (2012). Use of ASTER and MODIS thermal infrared data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 233–234, 72–89. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.04.022>

Viggiano-Guerra, J. C., Flores Armenta, M., & Ramírez Silva, G. R. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones, 24(1). Retrieved from <http://132.248.9.34/hevila/Geotermia/2011/vol24/no1/2.pdf>

Wang, G., Du, W., & Carranza, E. J. M. (2016). Remote sensing and GIS prospectivity mapping for magmatic-hydrothermal base- and precious-metal deposits in the Honghai district, China. *Journal of African Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.06.020>

White, D. E., & Williams, D. L. (1975). *Assessment of geothermal resources of the United States - 1975. Geological Survey Circular* (Vol. 726). Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/circ/1975/0726/report.pdf>

Zozaya, A. J. (2015). Electromagnetic interaction models for the characterization of targets in SAR scenes : preliminary literature review. *Revista Ingeniería UC*, 22(1), 26–63.