

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**ELABORACIÓN DE MAPAS DE FLUJO DE CALOR Y
PROCESAMIENTO DE DATOS, UTILIZANDO IMÁGENES
SATELITALES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE
TEMPERATURA**

PRESENTADO POR:

MEJÍA PLATERO, JENNIFER VANESSA

MÁRMOL ROMERO, MIGUEL ERNESTO

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA

DICIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título:

**ELABORACIÓN DE MAPAS DE FLUJO DE CALOR Y
PROCESAMIENTO DE DATOS, UTILIZANDO IMÁGENES
SATELITALES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE
TEMPERATURA**

Presentado por:

MEJÍA PLATERO, JENNIFER MEJÍA

MÁRMOL ROMERO, MIGUEL ERNESTO

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, lunes 6 de noviembre de 2023, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 2:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. WERNER DAVID MELENDEZ VALLE


Firma

- DR. CARLOS EUGENIO MARTINEZ CRUZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

ELABORACION DE MAPAS DE FLUJO DE CALOR Y PROCESAMIENTO DE DATOS,
UTILIZANDO IMÁGENES SATÉLITALES E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE
TEMPERATURA

A cargo de los Bachilleres:

- MEJIA PLATERO JENNIFER VANESSA
- MARMOL ROMERO MIGUEL ERNESTO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.0

(**Nueve punto cero**)

Agradecimientos

Jennifer Vanessa Mejía Platero

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme culminar mi carrera universitaria y por no dejar que me rindiera a pesar de tener altos y bajos en este proceso.

A mi madre, Leticia Platero por siempre apoyarme y alegrarse por cada logro y avance que fui teniendo, cada emoción y palabra de apoyo me motivaron a seguir adelante y poder dar más de lo que yo misma creía que podía.

A mi padre, Reinaldo Mejía por siempre apoyarme económicamente y facilitarme transporte para poder reunirnos e incluso ir a visitas en el oriente del país, además de brindarme su apoyo y felicitaciones.

A mi hermana, Joselyn Mejía que siempre ha estado a mi lado apoyándome y a estado pendiente de mis avances.

A mi novio, Henry Castellanos por apoyarme incondicionalmente, por su cariño y cada palabra de aliento que me brindo para decirme que yo si podía y que no me rindiera, por aconsejarme, escucharme, por siempre creer en mí y decirme lo orgulloso que estaba por cada pequeño logro que íbamos teniendo en el camino, por cada felicitación y celebración en este proceso.

A mi compañero de tesis, Miguel Mármol porque a pesar de los altos y bajos que tuvimos en este proceso no nos rendimos y siempre vimos como poder reunirnos sin afectar al otro, por estar pendiente de reunirnos, por tener la iniciativa de mejorar nuestros procesos y avances, por lograr culminar este proceso lleno de satisfacción.

Al Doctor Carlos Pocasangre, nuestro docente asesor el cual nos aconsejó, nos ayudó a mejorar nuestros procesos y nos acompañó a cada una de las visitas de campo, además de siempre

motivarnos e impulsarnos a realizar un paper el cual fue seleccionado para ser presentado en CONESCAPAN Guatemala 2023.

A Maya, Claudia y Valeria, mis compañeras y amigas del trabajo por animarme, apoyarme y siempre estar pendientes de mis avances.

A Adonnis Rodríguez, el cual nos motivó por optar a este tema de estudio y por brindarme su apoyo en el transcurso de mi carrera universitaria.

A mis compañeros de la escuela de ingeniería eléctrica y otras carreras de la facultad de ingeniería y arquitectura con los cuales estudiamos, reímos, comimos y aprendimos unos de otros, gracias por que sin el apoyo de ustedes la carrera hubiera sido menos llevadera.

A los docentes con los cuales tuve la oportunidad de llevar materias y personal administrativo de la escuela de ingeniería eléctrica, gracias por sus consejos, sus enseñanzas y apoyo que nos brindaron.

Miguel Ernesto Mármol Romero

Agradecido principalmente con nuestro creador por su intercesión y guía espiritual, con mucha fe fue posible culminar este paso importante.

A mi madre. Gabriela Romero. Quien me ha dado todo su apoyo en todo este tramo académico, se todo el esfuerzo que ha hecho por nosotros y ser nuestra referencia para tener un título de estudio superior, a pesar de muchas dificultades. Por enseñarme y recalcarme hábitos y reglas que son muy importante en la vida, como la responsabilidad, la honestidad y hacer el bien. Siempre estaré agradecido por esto y más.

A mi hermana. Gabriela Mármol. Muy agradecido por siempre escucharme y apoyarme. Por darme tus consejos que son muy importantes.

A mi novia Carla Velasco, ha sido fundamental con su compañía, sus ánimos, su tiempo disponible y su cariño, gracias por todas esas tardes después de clase o turno que tenías programado en el que compartíamos nuestras situaciones y ahora podemos ver los frutos de culminar mi carrera académica.

A Carlos Ventura. Mi amigo desde segundo grado de educación básica. Por su apoyo y ánimos de continuar con mi carrera.

A Jennifer Mejía. Mi compañera de tesis, tuvimos muchos sacrificios y esfuerzos para terminar este trabajo de investigación, gracias por compartir conmigo, momentos divertidos y otros serios, pero alcanzamos el objetivo y eso es satisfactorio.

A Carlos Pocasangre. Nuestro docente asesor que nos dio muchas herramientas para culminar de buena manera el trabajo de tesis, por su compañía y paciencia en todas las visitas de campo que se hicieron. Agradecidos por incentivarnos a documentar nuestro trabajo mediante un *paper* a tal punto de presentarlo fuera del país como lo fue en IEEE CONESCAPAN Edición XL en Guatemala.

A mis compañeros de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y diferentes carreras de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Fueron de gran apoyo en todo este camino, esos días que desayunamos, almorzamos, estudiamos y ejecutamos proyectos para entregar en nuestras diferentes actividades.

A los docentes de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y personal administrativo que brindan el apoyo y la atención necesaria, llevo mucho aprendizaje de todo el personal, con sus consejos, frases y pláticas que pudimos tener.

Y, por último, a diferentes empleados administrativos de la UES como motoristas, ordenanzas, personal del FUP y personal de Estudios Socioeconómicos de Oficinas Centrales por su atención, apoyo y consejos.

Índice General

Índice General	I
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas.....	XIV
Índice de Ecuaciones	XVI
Glosario	XVII
Resumen	XX
Capítulo 1	1
1.0 Información del Proyecto	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	5
1.2.1. Objetivo General	5
1.2.2. Objetivos Específicos.....	5
Capítulo 2	6
2.0 Marco Teórico	6
2.1. GENERACIÓN GEOTÉRMICA EN EL SALVADOR.....	6
2.1.1. LAGEO	8
2.1.1.1. Central Geotérmica de Ahuachapán.....	9
2.1.1.2. Central Geotérmica de Berlín.....	10
2.2. RECURSOS GEOTÉRMICOS EN EL SALVADOR.	10
2.2.1. Usos Directos de la Energía Geotérmica	10
2.2.2. Usos Indirectos de la Energía Geotérmica.....	11
2.2.3. Utilización en cascada	11
2.2.4. Tipos de Energía Geotérmica Según la Temperatura del Lugar.....	12

2.3. FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA.	13
2.3.1. Proceso de Generación	14
2.3.2. Pozos Geotérmicos	16
2.4. TELEDETECCIÓN.	17
2.4.1. Teledetección Activa	17
2.4.2. Teledetección Pasiva	20
2.4.3. Teledetección Mediante Microondas	22
2.4.4. El Valor de la Teledetección	24
2.4.5. Resolución de Imágenes Satelitales	24
2.4.5.1. Teledetección de Resolución Espacial Media y Baja	26
2.4.5.2. Teledetección de Alta Resolución Espacial	27
2.4.5.3. Usos de Alta Resolución Espacial	29
2.4.5.4. Usos de Resolución Espacial Media	30
2.4.5.5 Usos de la Baja Resolución Espacial	31
2.4.6. Satélites en Orbita	32
2.4.6.1. Distintos tipos de satélites y su funcionamiento	32
2.4.6.2. Satélites de Teledetección.	35
2.4.7. Georreferenciación y Sistemas de Coordenadas	38
2.4.7.1. Latitud y Longitud	39
2.4.7.2 Proyecciones de mapas a través de coordenadas cartesianas	40
2.4.7.3 Sistemas de Coordenadas en 3D	41
2.4.7.4 Propiedades y distorsión en proyecciones del mapa	42
2.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.	43
2.5.1. Termómetro e Hidrómetro con termocupla tipo K	44
2.5.2. Cámara termográfica	45
Capítulo 3	46

3.0 Metodología.....	46
3.1. INFORMACIÓN SATELITAL	46
3.1.1. Landsat 8.....	46
3.1.1.1. Operaciones y Gestión	50
3.1.1.2. Misión de la Encuesta Global.....	51
3.1.1.3. Descripción General del Observatorio.....	51
3.1.1.4. Sensor OLI.....	51
3.1.1.5. Sensor TIRS.....	53
3.1.2. Descarga de imágenes satelitales de Landsat 8.....	55
3.1.2.1. Earth Explorer	55
3.1.2.2. Descarga de imágenes satelitales de Landsat 8 en Earth Explorer	57
3.2. SOFTWARE PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES	61
3.2.1. QGIS.....	62
3.3. TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR.....	63
3.3.1. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre mediante Imágenes de Satélite. 63	
3.3.1.1. Temperatura Superficial LST calculada con el método Monocanal simplificado.....	64
3.3.1.2. Temperatura Superficial LST calculada con el método de Ventana Dividida. 79	
3.3.2. Temperatura de Ambiente	110
3.3.2.1. Temperatura de ambiente obtenida por medio de ERA5-LAND. + ..	110
3.3.2.2. Temperatura de ambiente obtenida por medio del Método de Eslava el cual toma como varia el DEM (Digital Elevation Model).....	115
3.3.3. Flujo de Calor Radiante RHF	117
3.3.3.1. Flujo de Calor Radiante RHF calculado a partir del Método	

Monocanal Simplificado de la Temperatura Superficial LST	118
3.3.3.2. Flujo de Calor Radiante RHF calculado a partir del Método Ventana	
Dividida de la Temperatura Superficial LST	122
3.4. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PARA MAPAS DE IMPRESIÓN EN	
QGIS.....	124
3.4.1. Capa vectorial (shapefile)	124
3.4.2. DEM (Digital Elevation Model)	126
3.4.3. Georreferencia en mapas de impresión.....	128
3.5. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN CAMPO.	131
3.5.1. Cámara Termográfica I7.....	131
3.5.2. Medidor de Temperatura y Humedad Portátil	134
3.6. INSTRUMENTO DE GEOLOCALIZACIÓN (GARMIN GPSMAP 64S).....	136
Capítulo 4.....	137
4.0 Desarrollo.....	137
4.1. INFIERNILLOS: AGUA AGRIA; GUADALUPE, SAN VICENTE.....	137
4.1.1. Área de Estudio	137
4.1.2. Visita de Campo	140
4.1.3. Mediciones y Recolección de Datos.....	141
4.1.4. Datos Recolectados	141
4.1.5. Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante	142
4.1.6. Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por Medio de Teledetección	
Satelital.....	143
4.2. AUSOLES CERRO CUYANAUSUL, AHUACHAPAN.	147
4.2.1. Área de Estudio	147
4.2.1.1. Área Ausoles Respiradero	149
4.2.1.2. Área Ausoles Termopilas	149

4.2.1.3.	Área Ausoles Tortuguero	150
4.2.2.	Visita de Campo	151
4.2.2.1.	Visita de Campo Ausoles Respiradero	151
4.2.2.2.	Visita de Campo Ausoles Termopilas	152
4.2.2.3.	Visita de Campo Ausoles Tortuguero	153
4.2.3.	Mediciones y Recolección de Datos	154
4.2.3.1.	Ausoles Respiradero	154
4.2.3.2.	Ausoles Termopilas	156
4.2.3.3.	Ausoles Tortuguero	157
4.2.4.	Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante	158
4.2.4.1.	Ausoles Respiradero	158
4.2.4.2.	Ausoles Termopilas	159
4.2.4.3.	Ausoles Tortuguero	159
4.2.5.	Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital 160	
4.2.5.1.	NDVI en Ausoles Respiradero	160
4.2.5.2.	NDVI en Ausoles Termopilas	162
4.2.5.3.	NDVI en Ausoles Tortuguero	162
4.2.5.4.	LST Ausoles Respiradero	163
4.2.5.5.	LST Ausoles Termopilas	164
4.2.5.6.	LST Ausoles Termopilas	165
4.2.5.7.	RHF Ausoles Respiradero	166
4.2.5.8.	RHF Ausoles Termopilas	167
4.2.5.9.	RHF Ausoles Tortuguero	168
4.2.5.10.	Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Respiradero	

4.2.5.11.	Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Termopilas	170
4.2.5.12.	Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Tortuguero.	171
4.3.	AUSOLES CHILANGUERA, SAN MIGUEL.	171
4.3.1	Área de Estudio	171
4.3.2.	Visita de Campo	173
4.3.3.	Mediciones y Recolección de Datos	174
4.3.4.	Datos Recolectados	175
4.3.5.	Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante	176
4.3.6.	Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital	177
4.4.	AUSOLES CONCHAGUA, LA UNIÓN.	181
4.4.1.	Área de Estudio	181
4.4.2.	Visita de Campo	183
4.4.3.	Mediciones y Recolección de Datos	184
4.4.4.	Datos Recolectados	185
4.4.5.	Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante	186
4.4.6.	Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital	187
Capítulo 5		192
5.0 Conclusiones		192
BIBLIOGRAFÍA		196

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de Identificación de Áreas Geotérmicas Estudiadas. Fuente: Elaboración propia.....	4
Figura 2: Central Geotérmica de Ahuachapán. Fuente: LaGeo, 2023b	9
Figura 3: Central Geotérmica de Berlín. Fuente: LaGeo, 2023d	10
Figura 4: Proceso de Generación Eléctrica en Geotermia. Fuente: LaGeo, 2023c	15
Figura 5: Proceso de Generación Geotérmica. Fuente: El modelo del campo geotérmico proviene de Dickson y Fanelli (2004).	16
Figura 6: Pozos Geotérmicos Fuente: Geinor Ingeniería y Servicios, 2022.	17
Figura 7: Ilustración de Teledetección Activa. Fuente: EOS Data Analytics, 2023e	18
Figura 8: Ilustración de Teledetección Pasiva. Fuente: EOS Data Analytics, 2023e	20
Figura 9: Escala de Resolución Espacial. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).	25
<i>Figura 10: Imagen de alta resolución espacial (0,5 m/píxel) procedente de Kompsat 3 en la que se puede distinguir cada árbol de forma individual. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).</i>	30
Figura 11: Imagen de resolución espacial media (10 m/píxel) de Sentinel-2 L2A, que permite distinguir los límites de los campos sin detalles de los mismos. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).	31
<i>Figura 12: Imagen de baja resolución (30 m/píxel) de Landsat 8 OLI y TIRS, que muestra las características generales del paisaje de una vasta zona. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).</i>	32
Figura 13: Ilustración de Latitud y Longitud. Fuente: ArcGIS. (2023).	39
Figura 14: Plano Cartesiano. Fuente: ArcGIS. (2023).	41
Figura 15: Plano 3D. Fuente: ArcGIS. (2023).	42
Figura 16: Satélite Landsat 8. Fuente: EOS Data Analytics. (2023a).	50
Figura 17: Interfaz de la página Earth Explorer. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer.	57
Figura 18: Criterios de búsqueda. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	58
Figura 19: Cobertura de nubes. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	58
Figura 20: Conjunto de datos. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	59

Figura 21: Criterios adicionales. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	59
Figura 22: Resultados de búsqueda. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	60
Figura 23: Previsualización de imagen a descargar. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer	60
Figura 24: Carpeta comprimida descargada. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 25: Archivos adjuntos en la carpeta descargada. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 26: Logo Qgis. Fuente: QGIS, 2023.....	63
Figura 27: Diagrama de procesos para el cálculo de la temperatura superficial LST por el método monocanal simplificado. Fuente: Elaboración propia.....	64
Figura 28: NDVI calculado de las longitudes de onda visibles e infrarrojo cercano reflejadas por la vegetación. Fuente: EOS. (2023).....	67
Figura 29: Cálculo del NDVI en QGIS. Fuente: Elaboración propia	69
Figura 30: Cálculo de la proporción de vegetación PV en QGIS. Fuente: Elaboración propia	70
Figura 31: Cálculo de la emisividad ϵ en QGIS. Fuente: Elaboración propia	72
Figura 32: Factor ML(Multiplicativo) y AL(Aditivo) específico de la banda 10-TIRS. Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.	74
Figura 33: Cálculo de la radiancia espectral ($L\lambda$) de la parte superior de la atmósfera (TOA) en QGIS. Fuente: Elaboración propia	75
Figura 34: Constantes de conversión térmica K_1 y K_2 , para la banda 10-TIRS. Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.	76
<i>Figura 35: Cálculo de la Temperatura de brillo [Tb] en QGIS. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>77</i>
Figura 36: Cálculo de la temperatura superficial LST en QGIS. Fuente: Elaboración propia	79
Figura 37: Diagrama de procesos para el cálculo de la temperatura superficial LST por el método ventana dividida. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 38: Factor de escala multiplicativo y factor de escala aditivo de reflectancia, Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.	81
Figura 39: Angulo de elevación solar obtenido de metadatos. Fuente: Metadatos.....	82
Figura 40: Cálculo de la reflectancia de la banda 4 en QGIS. Fuente: Elaboración propia....	82
Figura 41: Cálculo de la reflectancia de la banda 5 en QGIS. Fuente: Elaboración propia....	83
Figura 42: Cálculo del NDVI en QGIS. Fuente: Elaboración propia	85

Figura 43: Cálculo de la Proporción de Vegetación PV en QGIS. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 44: Cálculo de la emisividad de la banda 10. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 45: Cálculo de la emisividad de la banda 11. Fuente: Elaboración propia	88
Figura 46: Factor de escala multiplicativo y aditivo de radiancia obtenidos de metadatos. Fuente: Metadatos de imagen satelital descargada.	89
Figura 47: Cálculo de la radiancia de la Banda 10 en QGIS. Fuente: Elaboración propia	89
Figura 48: Cálculo de la radiancia de la Banda 11 en QGIS. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 49: Coeficientes de conversión térmica de las bandas 10 y 11, las cuales se obtuvieron de metadatos. Fuente: Elaboración propia	91
Figura 50: Cálculo de la temperatura de brillo de la banda 10 en QGIS. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 51: Cálculo de la temperatura de brillo de la banda 11 en QGIS. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 52: Interfaz del sitio web LAADS DAAC de la NASA. Fuente: LAADS DAAC. (2023).	93
Figura 53: Selección del producto. Fuente: LAADS DAAC. (2023).	94
Figura 54: Registro de la fecha de interés. Fuente: LAADS DAAC. (2023).....	94
Figura 55: Registro de la ubicación de interés. Fuente: LAADS DAAC. (2023).....	95
Figura 56: obtención de la imagen, con parámetros de la búsqueda realizada. Fuente: LAADS DAAC. (2023).....	95
Figura 57: Selección de la capa de interés en nuestro caso vapor de agua del infrarrojo cercano. Fuente: Elaboración propia	96
Figura 58: Capa de interés de la imagen MOD05_L2. Fuente: Elaboración propia	96
Figura 59: Transmisividad Atmosférica. Fuente: Lillesand y Kiefer 1994.....	98
Figura 60: Cálculo de la transmisividad de la Banda 10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	99
Figura 61: Cálculo de la transmisividad de la Banda 11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	100
Figura 62: Cálculo de la variable A10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	101
Figura 63: Cálculo de la variable A11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	102
Figura 64: Cálculo de la variable C10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	103

Figura 65: Cálculo de la variable C11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	104
Figura 66: Cálculo de la variable L10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	105
Figura 67: Cálculo de la variable L11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	106
Figura 68: Cálculo de la variable B1 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	107
Figura 69: Cálculo de la variable B0 en QGIS. Fuente. Elaboración propia	109
Figura 70: Cálculo de la Temperatura Superficial LST en QGIS. Fuente. Elaboración propia	110
Figura 71: Mapa mundial de la temperatura ambiente de ERA5-LAND. Fuente: ERA5-LAND	112
Figura 72: Selección de variable de temperatura. Fuente: ERA5-LAND.....	113
Figura 73: Selección del año de interés. Fuente: ERA5-LAND	114
Figura 74: Selección del mes de interés. Fuente: ERA5-LAND.....	114
Figura 75: Selección de los días de interés. Fuente: ERA5-LAND	114
Figura 76: Selección de las horas de interés. Fuente: ERA5-LAND	114
Figura 77: Colocación de las coordenadas de interés y selección del formato de descarga. Fuente: ERA5-LAND	115
Figura 78: Cálculo de la Temperatura Ambiente por medio del DEM en QGIS. Fuente. Elaboración propia	116
Figura 79: Herramienta Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente. NASA. (2023).	119
Figura 80: Ingreso de parámetros en la plataforma Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente: NASA. (2023).	121
Figura 81: Resultados mostrados por la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente: NASA. (2023).	122
Figura 82: Cálculo del Flujo de Calor en QGIS. Fuente: Elaboración propia	123
Figura 83: Interfaz de la página web GADM seleccionando el país de interés, en este caso El Salvador. Fuente: GADM. (2023).....	125
Figura 84: Capa del mapa de El Salvador mostrado en QGIS. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 85: Características de Open Topography GLO-30. Fuente: OpenTopography. (2023).	127
Figura 86: Logo de Open Topography. Fuente: OpenTopography. (2023).....	127
Figura 87: Selección de Modelo de Elevación Digital capa de proyección EPSG: 4326. Fuente:	

Elaboración propia	127
Figura 88: Presentación del DEM en el mapa de El Salvador. Fuente: Elaboración propia.	128
Figura 89: Selector de sistema de referencia de coordenadas WGS 84 en QGIS. Fuente: software QGIS.....	129
Figura 90: Selección de la georreferencia de interés, Project CRS: EPSG:4326-WGS 84. Fuente: software QGIS.....	129
Figura 91: Especificación de coordenadas, Grados, minutos, segundos. Fuente: software QGIS.....	130
Figura 92: Selector de sistema de referencia de coordenadas WGS 84/UTM zone 16N en QGIS. Fuente: software QGIS.....	130
Figura 93: Selección de la georreferencia de interés, EPSG:32616-WGS 84/UTM zone 16N. Fuente: software QGIS.....	131
Figura 94: Especificación de coordenadas, Decimal. Fuente: software QGIS.	131
Figura 95: Características de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f).....	132
<i>Figura 96: Cámara termográfica FLIR i7 utilizada en campo. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>133</i>
<i>Figura 97: Imágenes térmicas tomadas en las visitas de campo con la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>134</i>
<i>Figura 98: Termómetro e hidrómetro OMEGA. Fuentes: OMEGA. (s/f), Elaboración propia.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 99: GARMIN comunicándose con satélites GPS. Fuente: Fotografía propia.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 100: Fotografía tomada en la visita de campo, camino a los infiernillos. Fuente: fotografía propia.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 101: Mapa de ubicación “Infiernillos San Vicente” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 102: Vista Satelital del Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>140</i>
<i>Figura 103: Fotografías tomadas en el área de estudio. Fuente: Fotografías propias</i>	<i>141</i>
<i>Figura 104: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 105: Estado Térmico del área de estudio utilizando la temperatura de superficie terrestre. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>145</i>
<i>Figura 106: Flujo de Calor Radiante (RHF) en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia</i>	<i>145</i>

.....	146
<i>Figura 107: Mapa de ubicación “Ausoles Cerro Cuyanausul” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia.....</i>	148
<i>Figura 108: Vista Satelital del Área de Estudio Respiradero. Fuente: Elaboración propia</i>	149
<i>Figura 109: Vista Satelital del Área de Estudio Termopilas. Fuente: Elaboración propia.</i>	150
<i>Figura 110: Vista Satelital del Área de Estudio Tortuguero. Fuente: Elaboración propia.</i>	150
<i>Figura 111: Fotografía tomada en el Área de Estudio Respiradero. Fuente: Fotografía propia</i>	152
<i>Figura 112: Fotografía tomada en el Área de Estudio Termopilas. Fuente: Fotografía propia</i>	153
<i>Figura 113: Fotografía tomada en el Área de Estudio Tortuguero. Fuente: Fotografía propia</i>	154
<i>Figura 114: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Respiradero. Fuente: Fotografías propias.....</i>	155
<i>Figura 115: Mediciones y recolección de datos en el Área de Estudio Ausoles Termopilas. Fuente: Fotografías propias</i>	156
<i>Figura 116: Pozo geotérmico instalado por la GEO. Fuente: Fotografía propia</i>	157
<i>Figura 117: Mediciones y recolección de datos en el Área de Estudio Ausoles Tortuguero. Fuente: Fotografía propia</i>	157
<i>Figura 118: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Respiradero. Fuente: Elaboración propia.....</i>	161
<i>Figura 119: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia</i>	162
<i>Figura 120: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia</i>	163
<i>Figura 121: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Respiradero. Fuente: Elaboración propia.....</i>	164
<i>Figura 122: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia.....</i>	165
<i>Figura 123: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia.....</i>	166
<i>Figura 124: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Respiradero. Fuente:</i>	

<i>Elaboración propia</i>	167
<i>Figura 125: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia</i>	168
<i>Figura 126: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia</i>	169
<i>Figura 127: Mapa de ubicación “Ausoles Laguna Agua Caliente, Chilanguera” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia</i>	172
<i>Figura 128: Vista Satelital del Área de Estudio Chilanguera. Fuente: Elaboración propia</i>	173
<i>Figura 129: Fotografías tomadas en el Área de Estudio Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Fotografías propias</i>	174
<i>Figura 130: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Fotografías propias</i>	175
<i>Figura 131: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera.</i>	178
<i>Figura 132: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Chilanguera. Fuente: Elaboración propia</i>	179
<i>Figura 133: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera.Fuente: Elaboración propia</i>	180
<i>Figura 134: Mapa de ubicación “Ausoles Playitas, Conchagua” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia</i>	182
<i>Figura 135: Vista Satelital del Área de Estudio Conchagua. Fuente: Elaboración propia.</i>	183
<i>Figura 136: Fotografías tomadas en el Área de Estudio Ausoles Playitas, Conchagua. Fuente: Fotografías propias</i>	184
<i>Figura 137: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Fotografía propia</i>	185
<i>Figura 138: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Elaboración propia</i>	188
<i>Figura 139: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Elaboración propia</i>	189
<i>Figura 140: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Playitas Conchagua.Fuente: Elaboración propia</i>	190

Índice de Tablas

Tabla 1: Tipos de Energía Geotérmica Según la Temperatura del Lugar. Fuente: LaGeo 2023	12
Tabla 2: Características del producto Landsat 8. Fuente: Earth Observation System, 2022. ..	49
Tabla 3: Rangos espectrales y tamaños de píxel de bandas en el sensor OLI. Fuente: (USGS y NASA, 2013).....	53
<i>Tabla 4: Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS. Fuente: (USGS y NASA, 2013).</i>	55
Tabla 5: Datos descriptivos de la temperatura ambiente de ERA5-LAND. Fuente: ERA5-LAND.....	112
Tabla 6: Especificaciones de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f).	132
Tabla 7: Características técnicas de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f). ..	133
Tabla 8: Especificaciones técnicas del termómetro e hidrómetro OMEGA. Fuente: OMEGA, s/f.....	135
Tabla 9: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia.	142
Tabla 10: Flujo de calor teórico en los puntos marcados de interés. Fuente: Elaboración Propia.	143
Tabla 11: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.	147
Tabla 12: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia	155
Tabla 13: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia	157
Tabla 14: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración Propia.....	158
Tabla 15: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Respiradero. Fuente: Elaboración Propia	159
Tabla 16: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia.....	159
Tabla 17: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia	160
Tabla 18: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración Propia.	170
Tabla 19: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.	170

<i>Tabla 20: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.....</i>	171
Tabla 21: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia	175
Tabla 22: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Elaboración propia.	176
<i>Tabla 23: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.....</i>	181
Tabla 24: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia.	185
Tabla 25: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Playitas, Conchagua. Fuente: Elaboración propia	186
<i>Tabla 26: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración Propia</i>	190

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo del NDVI utilizando como variables la banda NIR y la banda RED	67
Ecuación 2: Cálculo del NDVI utilizando la banda 4 y 5 de LANDSAT 8.....	68
Ecuación 3: Proporción de Vegetación PV	70
Ecuación 4: Cálculo de emisividad a partir de la proporción de vegetación PV.	71
Ecuación 5: Cálculo de emisividad con el valor constante y el valor de corrección introducidos.	71
Ecuación 6: Radiación espectral ($L\lambda$) de la parte superior de la atmósfera (TOA).	73
Ecuación 7: Temperatura de Brillo T_b	75
Ecuación 8: Temperatura superficial LST.	77
Ecuación 9: Reflectancia TOA de la Banda OLI.	81
Ecuación 10: NDVI por medio de la reflectancia de la banda 4 y 5.	83
Ecuación 11: Proporción de Vegetación PV	85
Ecuación 12: Emisividad a partir del método del umbral NDVI.	86
Ecuación 13: Radiancia espectral.....	88
Ecuación 14: Temperatura de Brillo.	90
Ecuación 15: Transmisividad atmosférica de la Banda 10.	98
Ecuación 16: Transmisividad atmosférica de la Banda 11.	98
Ecuación 17: Variable A10.	100
Ecuación 18: Variable A11.	101
Ecuación 19: Variable C10.	103
Ecuación 20: Variable C11.	104
Ecuación 21: Variable L10.....	105
Ecuación 22: Variable L11.....	106
Ecuación 23: Variable B1.	107
Ecuación 24: Variable B0.	108
Ecuación 25: Temperatura Superficial LST.....	109
Ecuación 26: Temperatura Ambiente a partir del DEM.	116
Ecuación 27: Flujo de Calor Radiante RHF a partir del método Monocal Simplificado.....	118
Ecuación 28: Flujo de Calor Radiante RHF a partir del método Ventana Dividida.	122

Glosario

A

Ausoles

Grietas volcánicas desde donde emana agua caliente y azufre desde la superficie.....6

C

Central Geotérmica

Es una instalación donde se genera electricidad renovable a partir del aprovechamiento del calor de las profundidades de la tierra.....9

D

DEM

Digital Elevation Model; es el Modelo de Elevación Digital que representa la superficie de la tierra..... 126

E

Energía Geotérmica

Es aquella que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor interno de la tierra.....6

Emisividad

Es la medición de la capacidad de un objeto o superficie de emitir energía infrarroja.....71

F

Fumarolas

Grieta de la tierra por donde salen gases sulfurosos o vapores de agua cargados de algunas otras sustancias.....6

L

LST

Land Surface Temperature, la Temperatura Superficial Terrestre es un parámetro que determina las temperaturas radiantes efectivas de la superficie terrestre.....63

Landsat 8

Es un satélite de observación de la tierra, construido, lanzado y operado en la colaboración de la NASA con el USGS.....46

LaGeo

Es una empresa generadora de energía eléctrica a base de recursos geotérmicos.....8

N

NDVI

Índice de Vegetación Normalizada, mide el verdor y densidad de la vegetación captada en una imagen satelital.....65

Q

QGIS

Es un software de código abierto de información geográfica que opera en los sistemas Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android, permite manejar formatos de datos vector, datos ráster y bases de datos.....62

R

RHF

Radiative Heat Flux, el Flujo de Calor Radiante representa el calor emitido por radiación desde el suelo.....117

S

Sensor OLI

Sensor Operational Land Imager, recopila datos de imagen para 9 bandas espectrales de onda corta con una resolución espacial de 30 metros para todas las bandas excepto la banda Pan de 15 metros.....51

Sensor TIRS

Sensor Térmico Infrarrojo, recopila datos de imagen para 2 bandas térmicas con una resolución espacial de 100 metros.....53

Shapefile

Es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas.....124

T

Teledetección

Es la técnica de adquisición de datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales.....17

Transmisividad Atmosférica

Es la energía electromagnética que logra pasar a través de la atmósfera y alcanza la superficie terrestre.....118

U

USGS

United States Geological Survey, es una agencia con mayor registro de recolección de datos de satélite SIG gratuitos, que están disponibles a través de su explorador terrestre Earth Explorer.....55

Resumen

El Salvador por ser un país con una gran cantidad de puntos hidrotermales con potencial geotérmico se han realizado diferentes estudios y exploraciones físicas, actualmente LaGeo cuenta con dos centrales de generación geotérmica ubicadas en Ahuachapán y Berlín, sin embargo, no se tiene un registro comparativo del flujo de calor por medio de teledetección con el flujo de calor teórico obtenido por medio de mediciones de temperatura en el área de estudio. Dicha comparación nos muestra que tan variado es el resultado real con el estudiado por medio de teledetección con el fin de lograr acceder a lugares de difícil acceso considerando los parámetros de variación. Es por eso que se ha creado una investigación en la que se utilice métodos de teledetección con datos térmicos de Landsat 8 TIRS en puntos de manifestación de calor y que pueden ser propuestos como posibles puntos de generación geotérmica. La investigación se realizó en 6 áreas hidrotermales las cuales son las siguientes: “Infiernillos de San Vicente” ubicados en el departamento de San Vicente, “Respiraderos” “Ausoles Termopilas” y “Ausoles Tortuguero” ubicados en el departamento de Ahuachapán, “Laguna Agua Caliente, Ausoles y Fumarolas” ubicadas en el departamento de San Miguel y “Ausoles Playita” ubicado en el departamento de La Unión.

Para cada visita de campo se utilizaron instrumentos de medición de temperatura los cuales fueron: cámara termográfica y un termómetro e hidrómetro con termocupla tipo K, de esta forma se tienen mediciones de tipo indirecto y directo respectivamente.

Posteriormente se utilizó teledetección en cada área utilizando imágenes nivel 1 colección 2 de Landsat 8 obteniendo acceso a la Banda 10 y la Banda 11 con el fin de ser utilizadas para el cálculo del LST en el cual se utiliza el método de la ventana dividida, estas imágenes son procesadas en QGIS para obtener el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), la Temperatura de Superficie Terrestre (LST) y finalmente el Flujo de Calor Radiante (RHF).

Palabras claves: Generación Geotérmica, Teledetección, Landsat 8 TIRS, QGIS, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), Temperatura Superficial Terrestre (LST), Flujo de Calor Radiante (RHF), Medidores de Temperatura.

Capítulo 1

1.0 Información del Proyecto

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio geotérmico se realizó en 6 puntos específicos de El Salvador, el primer estudio fue realizado en la zona paracentral, en el departamento de San Vicente, en el municipio de Guadalupe cantón San Francisco Agua Agria. Este complejo volcánico cuenta con fuentes termales y fumarolas conocidas como “Los Infiernillos”. La segunda área de estudio se ubica en el departamento de Ahuachapán, municipio de Turín; cerro Cuyanausul donde se estudiaron 3 manifestaciones hidrotermales, la primera conocida como “Respiradero” ubicada en los alrededores de la finca Brumas, la segunda manifestación conocida como “ausoles Termopilas” ubicada en la finca Termopilas, la tercera manifestación hidrotermal conocida como “ausoles Tortuguero” ubicada en el cantón Tortuguero. En la zona oriental de El Salvador se estudiaron dos puntos con manifestaciones hidrotermales una ubicada en el departamento de San Miguel, municipio Chilanguera conocido como “Laguna Agua Caliente – Ausoles y Fumarolas”. El segundo punto de la zona oriental de El Salvador se ubica en el departamento de La Unión, municipio de Conchagua conocido como “Ausoles Playita” en las costas de la playa Playitas.

Para cada una de las áreas de estudio geotérmico se realizó una visita de campo donde se obtuvo valores de mediciones de temperatura de superficie y temperatura ambiente, utilizando instrumentos de medición directa e indirecta tales como el termómetro e hidrómetro con termocupla tipo k y cámara termográfica respectivamente. Dichas mediciones se comparan con las obtenidas posteriormente vía remota con imágenes satelitales de la misión Landsat 8.

La geotermia o calor de la tierra, es un fenómeno natural asociado a sistemas volcánicos activos. Por su conformación también se conoce como sistema hidrotermal, el cual, aunque no

está conectado directamente a la cámara magmática del volcán, es producto del calor proveniente de ésta (LaGeo, 2023). En El Salvador, hay una serie de volcanes jóvenes, paralelos a la costa del Océano Pacífico, que forman parte del anillo de fuego que rodea el Océano Pacífico, por lo cual es un país volcánico muy activo, comprendiendo en su territorio al menos 170 volcanes, de los cuales 14 son volcanes activos y 6 se encuentran en monitoreo constante ante peligro de erupción. (MARN, 2020). Por lo anterior mencionado, y su larga cadena volcánica, en el país existen puntos importantes de generación, es por ello por lo que a finales de los años 50 se inicia la exploración geotérmica en El Salvador principalmente por la explotación de recursos naturales disponibles y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Con los estudios y exploraciones realizados los resultados obtenidos se tuvieron 28 manifestaciones geotérmicas identificadas a nivel de territorio nacional de las cuales 24 áreas fueron encontradas activas, 12 sistemas fueron considerados como altas temperaturas ($T > 150$ °C) y 12 sistemas con temperaturas baja-intermedia (90-150 °C.) (Alvarado et al., 2022)

Para el caso de El Salvador, estos fenómenos los encontramos a lo largo y ancho de la cadena volcánica que atraviesa el país, desde la zona de Ahuachapán hasta el volcán de San Miguel y Conchagua, formando lo que comúnmente se conoce como campos geotérmicos, entre los cuales podemos mencionar: Los Ausoles de Ahuachapán, El Tronador en Berlín, Los Infiernillos en San Vicente, La Viejona en Chinameca, entre otros. Los primeros campos geotérmicos en El Salvador fueron levantados en los años 70 con financiación del Banco Mundial. Hoy, la capacidad geotérmica instalada es de 204 MW, que se vería aumentada con el desarrollo de nuevos campos en San Vicente y Chinameca, en el centro y oriente del país, y con la modernización y expansión de los campos en Berlín y Ahuachapán (LaGeo, 2023)

La teledetección satelital es actualmente una parte esencial de la exploración geotérmica activa. En esta etapa, los datos infrarrojos térmicos satelitales se pueden usar para estimar la temperatura de la superficie terrestre (LST) y el flujo de calor radiativo (RHF) de cualquier punto geotérmico. El satélite Landsat 8 se lanzó con dos sensores, OLI y TIRS, en 2013. El sensor TIRS tiene dos bandas térmicas con una resolución de 100 m y proporciona los datos térmicos con imágenes de 30 m remuestreadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se trabajó con datos de la colección 2 nivel 1 de Landsat de los archivos del USGS

(NASA, s/f), el sensor OLI tiene nueve bandas visibles a infrarrojos con una resolución de 30 m. Las imágenes TIRS ahora se utilizan para monitorear temperaturas de la superficie. Para superar la limitación de una sola banda térmica y las brechas de imagen en los sensores Landsat anteriores, el objetivo es evaluar el estado térmico de las 6 áreas de estudio, utilizando imágenes TIRS Landsat 8 con el algoritmo de ventana dividida para LST, además se calcula RHF, y se utiliza el método de umbral NDVI para la estimación de la emisividad (Mia et al., 2017a), (Yu et al., 2014)

Áreas Geotermicas estudiadas

- Conchagua, La Unión
- Infiernillos de San Vicente
- Chilanguera, San Miguel
- Cuyanausul (Respiradero, Termopilas y Tortuguero)
Ahuachapán

Elevación (msnm)

- ≤ 0.0 msnm
- 0.0 - 83.9 msnm
- 83.9 - 630.8 msnm
- 630.8 - 1039.5 msnm
- > 1039.5 msnm

Figura 1-2: índice de Áreas Geotérmicas Estudiadas y Elevación Sobre el Nivel del Mar.

Fuente: Elaboración propia.

Áreas Geotérmicas estudiadas

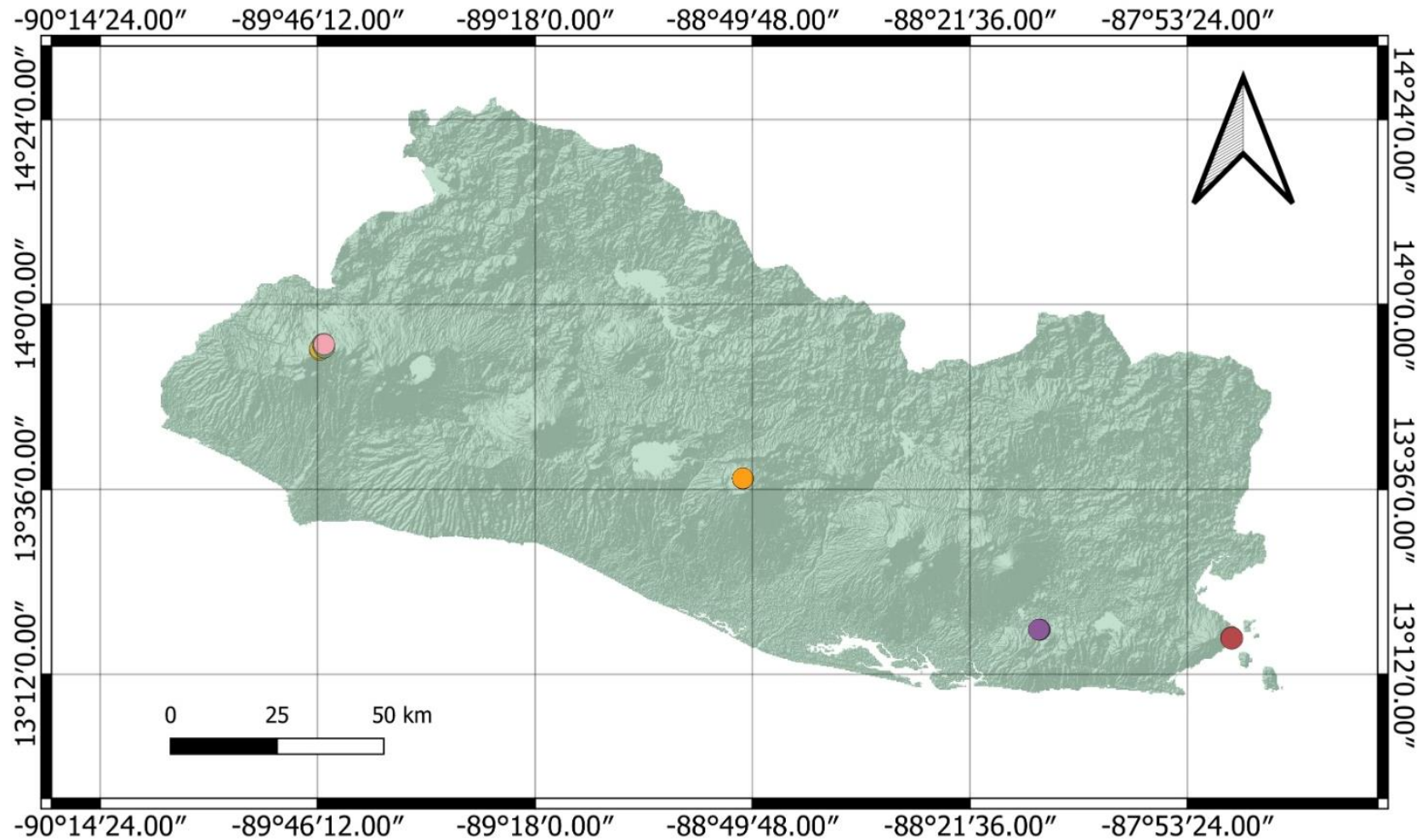


Figura 1: Mapa de Identificación de Áreas Geotérmicas Estudiadas. Fuente: Elaboración propia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Analizar 6 puntos de potencial geotérmico en diferentes regiones de El Salvador, utilizando equipos de medición de temperatura, imágenes satelitales, información previa de investigaciones a fines y programas como QGIS para el tratamiento de imágenes satelitales, de esta forma lograr obtener el flujo de calor de los puntos de interés tanto teórico como por medio de las imágenes satelitales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Mostrar mapas geográficos de cada uno de los puntos de interés con sus respectivas cantidades geofísicas como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, Temperatura Superficial Terrestre y Flujo de Calor, utilizando aplicaciones para el tratamiento de imágenes satelitales.
- ✓ Visitar seis puntos específicos de El Salvador conocidos por su alta presencia de manifestaciones geotérmicas en la superficie terrestre para corroborar la factibilidad del proceso empleado para el cálculo de flujo de calor.
- ✓ Registrar las temperaturas medidas teóricamente en cada uno de los puntos de interés.
- ✓ Demostrar mediante medidas de temperaturas realizadas en campo, que el flujo de calor es similar al resultado obtenido con el procesamiento de imágenes satelitales.
- ✓ Utilizar información geofísica adicional para dar una interpretación de cada punto de estudio.

Capítulo 2

2.0 Marco Teórico

2.1. GENERACIÓN GEOTÉRMICA EN EL SALVADOR.

La geotermia o calor de la tierra, es un fenómeno natural asociado a sistemas volcánicos activos. Por su conformación también se conoce como sistema hidrotermal, el cual, aunque no está conectado directamente a la cámara magmática del volcán, es producto del calor proveniente de ésta. ([Consejo Nacional de la Energía \(CNE\), 2012](#))

El Salvador debido a su particular ubicación en el cinturón de fuego del pacifico, la subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa Caribe provoca diferentes fenómenos: por una parte, una intensa actividad sísmica y por otra la fusión de rocas de la corteza terrestre sometidas a altas temperaturas y presiones.

Se conocen tres sistemas de debilidad tectónica, el más importante de los cuales es el WNW. Se caracteriza por un gran desplazamiento vertical a lo largo de la república, formando un valle o grieta. En este sistema se reconocen cinco ejes:

El primer eje: Forma el límite sur de la cordillera norte y está representado por desviaciones longitudinales de unos 1000 m. El segundo eje: se caracteriza por la actividad volcánica individual en el mar en la parte norte del país. El tercer eje: Está ubicado en el extremo sur. Es el más importante, con divisiones tectónicas (la más importante de las cuales es el de campo traviesa, el cráter central) y con un pequeño volcán individual, parte del cual todavía está activo. También hay depresiones tectónicas volcánicas y domos de lava. Cuarto Eje: Se ubica en el Océano Pacífico, a 25 km de la costa de El Salvador, y se caracteriza por una frecuente actividad

sísmica. El Quinto Eje: Se ubica hacia el sur, forma una trinchera paralela a la costa salvadoreña y muestra cierta actividad sísmica. Hay picos en forma de cono que se elevan a más de 3000 metros sobre el nivel del mar, que se consideran volcanes (Fritz Durr, s/f)

La mayor parte del territorio salvadoreño está cubierta por roca de origen volcánico de carácter riolítico hasta basáltico. Al Norte de los ríos Lempa y Torola afloran rocas de carácter ácido. Se trata de productos piroclásticos de colores claros los cuales se deben considerar litológicamente como rolitas hasta dacitas, además una gran parte de El Salvador está cubierta por una cadena montañosa volcánica que consta de sucesivas características de andesita a basaltos para aglomerar características de andesita; El espesor de esta capa antigua es de más de 1500 m.

En El Salvador, hay una serie de volcanes jóvenes, paralelos a la costa del Océano Pacífico, que forman parte del anillo de fuego que rodea el Océano Pacífico, por lo cual es un país volcánico muy activo, comprendiendo en su territorio al menos 170 volcanes, de los cuales 14 son volcanes activos y 6 se encuentran en monitoreo constante ante peligro de erupción. (MARN, 2020)

Por lo anterior mencionado, y su larga cadena volcánica, en el país existen puntos importantes de generación, es por ello por lo que a finales de los años 50 se inicia la exploración geotérmica en El Salvador principalmente por la explotación de recursos naturales disponibles y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. Con los estudios y exploraciones realizados los resultados obtenidos se tuvieron 28 manifestaciones geotérmicas identificadas a nivel de territorio nacional de las cuales 24 áreas fueron encontradas activas, 12 sistemas fueron considerados como altas temperaturas ($T > 150$ °C) y 12 sistemas con temperaturas baja-intermedia (90-150 °C.)

Cuando entre los estratos rocosos del subsuelo cercanos a un volcán activo, existe un yacimiento de agua conocido como acuífero confinado (retenida por estratos de roca sólida o impermeable) al ser afectado por el calor que emite la cámara magmática del volcán, se calienta a altas temperaturas y se presurizan de tal manera que por su misma presión, a través de las fallas tectónicas existentes o rompiendo los estratos rocosos del subsuelo, salen a la superficie en forma de manantiales de agua caliente, fumarolas, ausoles o geysers.

Para el caso de El Salvador, estos fenómenos los encontramos a lo largo y ancho de la cadena volcánica que atraviesa el país, desde la zona de Ahuachapán hasta el volcán de San Miguel y Conchagua, formando lo que comúnmente se conoce como campos geotérmicos, entre los cuales podemos mencionar: Los Ausoles de Ahuachapán, El Tronador en Berlín, Los Infiernillos en San Vicente, La Viejona en Chinameca, entre otros.

Los primeros campos geotérmicos en El Salvador fueron levantados en los años 70 con financiación del Banco Mundial. Hoy, la capacidad geotérmica instalada es de 204 MW, que se vería aumentada con el desarrollo de nuevos campos en San Vicente y Chinameca, en el centro y oriente del país, y con la modernización y expansión de los campos en Berlín y Ahuachapán.

El Salvador ha sido uno de los líderes mundiales en uso renovable desde el inicio de la explotación minera de Ahuachapán, sin embargo, se ha notado un efecto de enfriamiento por un lado debido al contacto directo con la zona. Producido por la proximidad a pozos renovables. Por otro lado, tiene un efecto de apoyo positivo de soporte en la presión de reservorio.

2.1.1. LAGEO

LaGeo, es una empresa generadora de energía eléctrica a base de recursos geotérmicos, que surge en el año de 1999 como parte del proceso de modernización del Estado salvadoreño.

Actualmente, cuenta con dos campos y centrales en operación, la central geotérmica Ahuachapán, ubicada en el Departamento de Ahuachapán y la central geotérmica Berlín en Alegría, departamento de Usulután, desde las cuales aporta un poco más del 23% de la energía eléctrica que se produce en el país, convirtiendo a El Salvador en uno de los países que hace más uso de la geotermia en su matriz energética en el mundo.

También tiene los derechos de concesión de los campos geotérmicos de San Vicente y de Chinameca, que actualmente se encuentran en la fase de exploración y evaluación del recurso para su potencial desarrollo en ambos campos.

Adicionalmente, trabaja en desarrollar nuevos proyectos energéticos, con el fin de contribuir a satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica del país.

2.1.1.1. Central Geotérmica de Ahuachapán

La Central Geotérmica Ahuachapán se encuentra ubicada a 103 km al occidente de la ciudad capital, en el sector norte de la cordillera de Apaneca conocido como Cantón Santa Rosa Acacalco, municipio y departamento de Ahuachapán.

Inició su construcción en 1972 y su operación comercial en septiembre de 1975 con una unidad de 30MW que utiliza vapor a 5.6 bar; al año siguiente fue adicionada otra unidad de idénticas características, y en 1980 se adiciona la tercera unidad de 35 MW que se diferencia de las dos primeras porque además de vapor a 5.6 bar, utiliza vapor de 1.6 bar producido en los vaporizadores con agua separada de los pozos productores.

El área del campo geotérmico en la que se encuentran los pozos productores es de aproximadamente 2.5 kms², la profundidad de los pozos varía entre 600 y 2,750 metros, y en la actualidad cuenta con 56 pozos perforados entre productores, reinyectores, de monitoreo y otros. (LaGeo, 2023b)



Figura 2: Central Geotérmica de Ahuachapán. Fuente: LaGeo, 2023b

2.1.1.2. Central Geotérmica de Berlín

La Central Geotérmica Berlín se encuentra ubicada a 106 kms aproximadamente al oriente de la ciudad capital, en el sector norte del complejo volcánico de Tecapa, en el Cantón el Zapotillo del Municipio de Alegría en el Departamento de Usulután.

Inició su operación comercial en 1992 con dos unidades a contrapresión (bocapozo) de 5 MW cada una. En 1999 entraron en operación dos unidades a condensación de 28.1 MW c/u; en febrero del año 2007 fueron adicionados 40 MW más con una unidad a condensación; y en diciembre de ese mismo año se adicionaron 9.2 MW, generados con una unidad a Ciclo Binario, que utiliza el agua de reinyección para evaporar Isopentano, el cual funciona como fluido de trabajo.

El área del campo geotérmico es de una extensión de aproximadamente 8 kms², la profundidad de los pozos varía entre 500 y 3,455 metros. En la actualidad cuenta con 37 pozos entre productores, reinyectores y de monitoreo. (LaGeo, 2023d) (LaGeo S.A de C.V, 2017)



Figura 3: Central Geotérmica de Berlín. Fuente: LaGeo, 2023d

2.2. RECURSOS GEOTÉRMICOS EN EL SALVADOR.

2.2.1. Usos Directos de la Energía Geotérmica

El uso directo del calor es uno de los usos comunes más antiguos de la energía geotérmica en

aplicaciones de balnearios, residenciales, agrícolas, acuícolas e industriales. A nivel mundial, el uso directo de la energía geotérmica se puede dividir en dos sectores claros: el sector industrial y el sector residencial y de servicios.

✓ **Procesos Industriales**

El vapor, el calor o el agua caliente de fuentes geotérmicas se pueden utilizar en aplicaciones industriales donde las instalaciones son grandes y consumen mucha energía.

✓ **Sector Residencial y Servicios**

Mediante el uso de sistemas geotérmicos residenciales y terciarios de baja entalpía, es posible entregar diésel, gas natural o GLP (propano y butano), todos ellos fuentes de energía costosas e imposibles de regenerar.

2.2.2. Usos Indirectos de la Energía Geotérmica

Generación de energía: De acuerdo con las características de los recursos geotérmicos, los depósitos geotérmicos de alta temperatura pueden ser utilizados para generar energía, por lo que la generación de energía se realiza mediante turbinas de vapor tradicionales (ciclo Rankine) y centrales eléctricas de ciclo binario.

2.2.3. Utilización en cascada

Como se mencionó, el uso de los recursos geotérmicos depende del nivel de calor del fluido. Por lo general, usan energía que está disponible después del consumo, a menudo después de un proceso geotérmico industrial, beneficiándose de los diferentes niveles de calor necesarios para diferentes aplicaciones. Esta operación se llama operación en cascada. De esta manera, después de generar electricidad, el líquido aún caliente se puede utilizar para calentar la casa. Después del segundo uso, el líquido se puede utilizar para otras aplicaciones con requisitos de temperatura más bajos, calefacción de invernaderos, etc.

2.2.4. Tipos de Energía Geotérmica Según la Temperatura del Lugar

TIPO	TEMPERATURA	USO
Alta Temperatura	$T > 150^{\circ}\text{C}$	Generación de Electricidad
Media Temperatura	$100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	Generación de Electricidad y Utilización Térmica Industrial
Baja Temperatura	$30^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$	Aprovechamiento Térmico en Industrias, en Calefacción y ACS.
Muy Baja Temperatura	$30^{\circ}\text{C} < T$	Calefacción, Refrigeración y ACS (Mediante Bomba de Calor)

Tabla 1: Tipos de Energía Geotérmica Según la Temperatura del Lugar. Fuente: LaGeo 2023

La Geo ha llevado a cabo diversos estudios a lo largo de los años en todo el territorio nacional para poder sacar el máximo provecho a los recursos geotérmicos en el país, analizando diversos puntos calientes. Desde el 2008 la Geo ha llevado un inventario de estas áreas o puntos de interés realizando diversas visitas en donde se presentan manifestaciones hidrotermales en la superficie y distribuidas a lo largo del territorio nacional (LaGeo, 2021a)

Con base en análisis químicos y mediciones de temperatura de fuentes termales, chimeneas y pozos de calor, las áreas geotérmicas del país se pueden dividir en tres categorías de recursos geotérmicos:

- Categoría A: Incluye sistemas por encima de 150°C enfocados a la generación de electricidad mediante condensador y/o instalación binaria.
- Categoría B: Corresponde a un sistema geotérmico con temperaturas entre 90 y 150°C , cuyo calor ofrece un potencial que aún puede ser aprovechado mediante instalación binaria o directa (secado, enfriamiento, etc.)

- Categoría C: El sistema tiene una temperatura de 40 a 80 °C, no para uso industrial, sino para fines de entretenimiento y turismo.

Un total de 21 áreas hidrotermales existen a lo largo del territorio salvadoreño según el plan de visitas que tomo como base de información generada por UNDP en los años 60 y CEL en 1987, incluyendo algunos documentos históricos elaborados por el Dr. Meyer Abich, Historiador Larde y Larín entre otros. Con los diferentes tipos de estudio antes mencionado se identifica y además se confirma la existencia de las áreas hidrotermales en territorio salvadoreño en la cual todavía se mantiene activas, en la tabla 1, se identifica se presenta el listado de las áreas de sistemas de agua caliente identificado por las Naciones Unidas en los años 60, los estudiados por la CEL en el año 1987 y los reconocidos y confirmados por La Geo en el periodo 2008-2010 (LaGeo, 2021a) Cabe destacar que de acuerdo con los estudios geocientíficos desarrollados indican que forman parte de un solo sistema.

2.3. FUNCIONAMIENTO DE UNA CENTRAL GEOTÉRMICA.

El funcionamiento de una central geotérmica o geotermoeléctrica se basa en la compleja operación de un sistema campo-planta.

El campo geotérmico es una extensión de tierra con un mayor gradiente (temperatura) que lo normal. También se conoce como área con calentamiento anómalo, cuya fuente de calor es un acuífero confinado (depósito de agua) almacenado y limitado por una capa sello, impermeable, que conserva el calor y presión, formando lo que se conoce como reservorio geotérmico. Este yacimiento de agua almacenado y calentado de forma natural en el subsuelo por una fuente de calor no muy profunda denominada cámara magmática, usualmente está relacionado con la actividad volcánica. La alta presión que alcanzan estos reservorios (yacimientos de agua y vapor presurizado) muchas veces rompe los estratos rocosos o utilizan las fallas geológicas existentes y salen a la superficie en forma de fumarolas, manantiales de agua caliente, ausoles o geysers.

En el campo geotérmico es el sitio donde se ubican los pozos geotérmicos que desde la superficie

conectan con el reservorio y es a través de éstos que se extrae el vapor que mediante una red de tuberías denominado sistema de acarreo, se conduce hacia la central generadora, donde la energía calorífica del vapor se convierte en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica.

2.3.1. Proceso de Generación

El proceso inicia con la extracción de una mezcla de vapor y agua geotérmica desde del reservorio geotérmico a través de los pozos productores, ya en la superficie, se separan el vapor del agua geotérmica utilizando un equipo llamado separador ciclónico. Una vez separados, el agua se reinyecta nuevamente al subsuelo, mientras que el vapor —agua en estado gaseoso— ya seco es conducido hasta la central generadora.

En la central geotérmica, la fuerza o energía del vapor activa la turbina cuyo rotor gira a unas 3 mil 600 revoluciones por minuto, que a su vez activa el generador, donde el roce con el campo electromagnético transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Del generador salen 13 mil 800 voltios, que se transfieren a los transformadores que los convierte en 115 mil voltios, que son inyectados a las líneas de alta potencia para ser entregados a las subestaciones y de ahí hacia los hogares, fabricas, escuelas y hospitales, entre otros ([LaGeo, 2023c](#)).

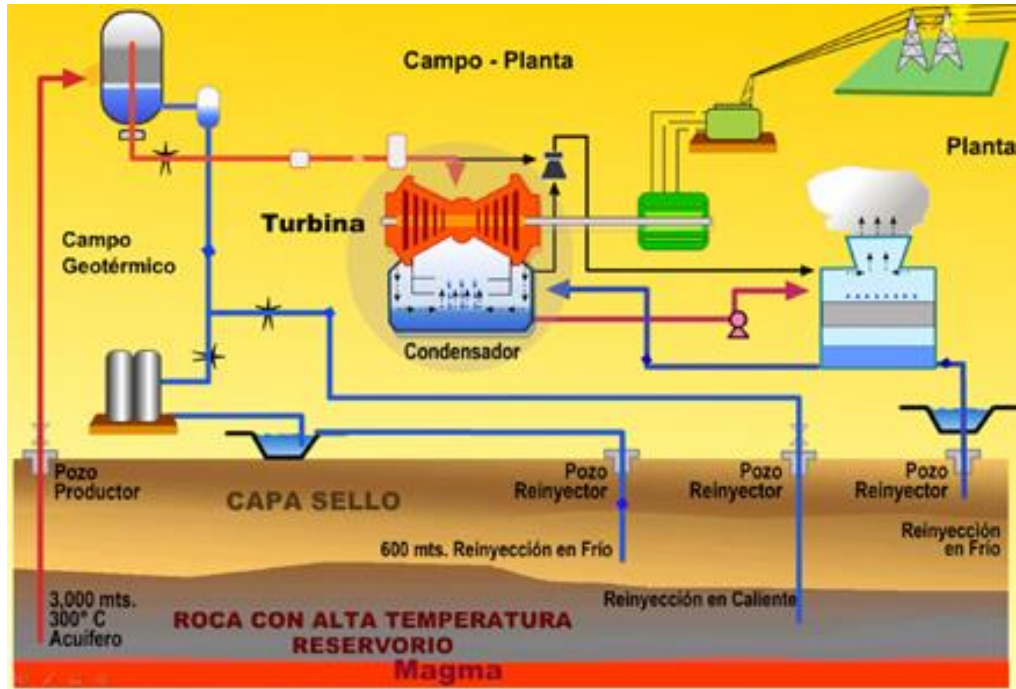


Figura 4: Proceso de Generación Eléctrica en Geotermia. Fuente: LaGeo, 2023c

El vapor geotérmico, después de haber hecho girar la turbina, es condensado —convertido en agua— y reinyectado al subsuelo, donde mediante un proceso de tipo reciclable el agua se puede volver a calentar, convertirse en vapor que puede extraerse nuevamente para volver a impulsar una turbina. De esta forma la geotermia se convierte en una fuente de generación de energía eléctrica limpia, cíclica, renovable y sostenible, ya que con la reinyección se logra recargar el recurso, alargando su vida útil o productiva a través de un aprovechamiento sostenible de la fuente.

La energía geotérmica es reconocida a nivel mundial como fuente de generación de electricidad amigable con el medio ambiente debido a que no produce gases tóxicos ni causantes de efecto invernadero, el uso de áreas de suelo no es extenso y con un manejo adecuado sus implicaciones ambientales son mínimas y fáciles de prevenir o mitigar.

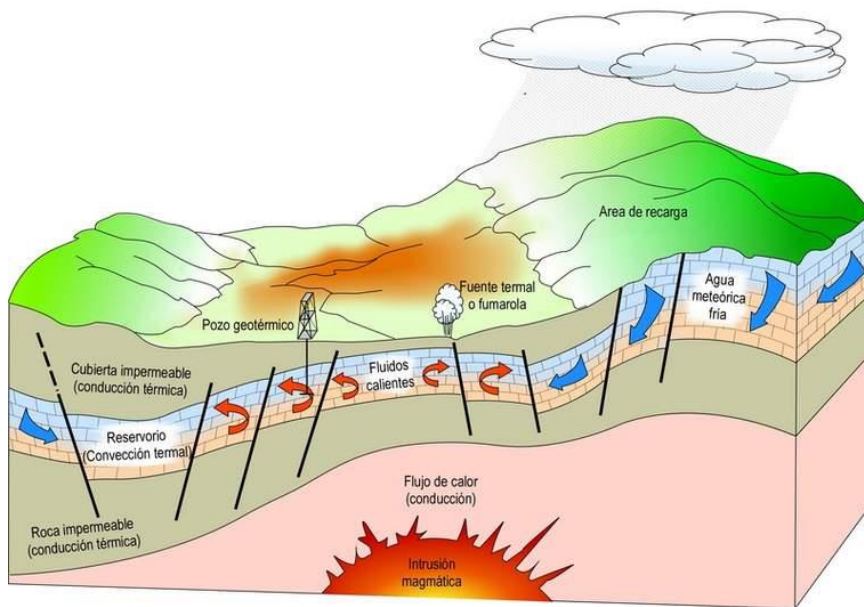


Figura 5: Proceso de Generación Geotérmica. Fuente: El modelo del campo geotérmico proviene de Dickson y Fanelli (2004).

2.3.2. Pozos Geotérmicos

Los pozos geotérmicos han sido creados para aprovechar la energía geotérmica natural, la cual es sustentable y permite cubrir las necesidades de generación de energía eléctrica y de calor en zonas de inviernos fuertes o con déficit de electricidad.

Estos pozos aprovechan la presión del vapor y temperatura debajo de la corteza terrestre para alcanzar su propósito, el cual puede ser diverso:

Desde impulsar turbinas y equipos que requieren alta generación de energía, hasta bombas de calor que permiten la obtención de calefacción para diversas estructuras.

Por lo general, este tipo de pozos se encuentran en regiones con alta actividad geológica, en donde se perfora la superficie terrestre a una determinada profundidad para garantizar su estabilidad. (Geinor Ingeniería y Servicios, 2022)



Figura 6: Pozos Geotérmicos. Fuente: Geinor Ingeniería y Servicios, 2022.

2.4. TELEDETECCIÓN.

La teledetección es el conjunto de instrumentos que permite obtener información de un objeto sin estar en contacto con él, simplemente escaneándolo a distancia. Los usos y aplicaciones que tiene la teledetección espacial son cada vez más y más numerosos y abarcando cada vez más campos, desde agricultura hasta oceanografía, pasando por labores humanitarias o en las fuerzas armadas. Podemos distinguir entre teledetección activa y pasiva en función de cómo trabaja el instrumento. [EOS Data Analytics, 2023e](#)

2.4.1. Teledetección Activa

Se considera teledetección activa al proceso de teledetección que funciona con su propia fuente de emisión o luz. Existen diferencias entre las longitudes de onda captadas, que son cortas (visible, NIR, MIR) y largas (microondas).

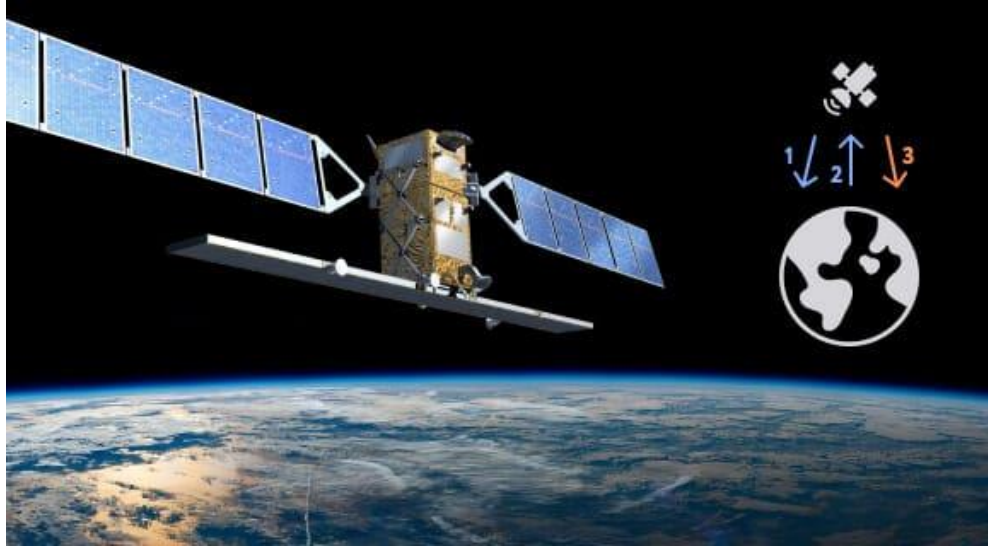


Figura 7: Ilustración de Teledetección Activa. Fuente: EOS Data Analytics, 2023e

✓ Instrumentos de Teledetección Activa

Los sensores remotos dirigen su señal al objeto y luego comprueba la respuesta, es decir, la cantidad recibida. La mayoría de los dispositivos de este tipo de teledetección emplean microondas, ya que son relativamente inmunes a las condiciones meteorológicas. Las técnicas de teledetección activa se diferencian por lo que transmiten (luz u ondas) y por lo que determinan (distancia, altura, condiciones atmosféricas, etc.).

- El radar es un sensor que ayuda a la localización con señales de radio. Su antena emite impulsos y cuando el flujo de energía en la teledetección satelital por radar se encuentra con un obstáculo, se dispersa hasta cierto punto hacia el sensor. Basándose en la cantidad de dispersión y el tiempo de viaje, es posible estimar la distancia a la que se encuentra el objetivo.
- El Lidar determina la distancia con la luz. La detección remota mediante Lidar implica la transmisión de impulsos luminosos y la evaluación de la cantidad recuperada. La ubicación del objetivo y la distancia se obtiene multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz.

- El altímetro láser mide la elevación junto al Lidar.
- Los instrumentos de medición estiman el alcance con uno o dos dispositivos idénticos en plataformas diferentes que se envían señales entre sí.
- La sonda estudia las condiciones meteorológicas emitiendo impulsos, en caso de que se encuentre en la categoría de activo.
- El difusómetro es un dispositivo específico para medir la radiación rebotada (retrodispersada).

✓ Aplicaciones Y Beneficios De La Teledetección Activa

Existen diversas formas de implementación, pues los sensores remotos activos básicamente no tienen restricciones en cuanto a las condiciones de investigación. Los sistemas de teledetección activa funcionan en cualquier momento del día, ya que no requieren luz solar, y son relativamente independientes de las dispersiones atmosféricas.

Los diferentes tipos de esta tecnología encuentran aplicación tanto en las ramas científicas como en industrias. La misión topográfica del Radar Shuttle recogió datos del nivel de elevación de la Tierra. El Lidar en el cielo ayudó a la elaboración de modelos digitales de las superficies de nuestro planeta.

La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la agricultura son frecuentemente combinados para recoger datos físicos que posteriormente se integran en los SIG. Por ejemplo, el empleo de imágenes de sensores remotos en ingeniería permite determinar la topografía y orografía de la Tierra. La contribución de las aplicaciones de teledetección para evitar las catástrofes naturales también es notable.

Los datos obtenidos con instrumentos de teledetección se usan en la agricultura para ayudar a los agricultores en el campo. Asimismo, las ciencias marinas, que precisan de cartografía del

fondo marino, y teledetección se unen para llegar a lugares de difícil acceso. También son usados estos instrumentos en misiones de rescate.

Por su parte, las sondas ayudan a elaborar la previsión meteorológica con datos sobre la humedad, precipitaciones, temperatura y ausencia/presencia de nubes.(EOS Data Analytics, 2023e)

2.4.2. Teledetección Pasiva

A diferencia de los activos, los sensores pasivos no transmiten energía propia al objeto estudiado. La teledetección pasiva depende de la energía natural (rayos solares) que rebota en el objetivo. Por esto, sólo puede aplicarse con suficiente luz solar o de lo contrario no habrá nada que reflejar.

La teledetección pasiva emplea sensores multiespectrales o hiperespectrales que miden la cantidad recibida con múltiples combinaciones de bandas. Estas combinaciones se diferencian por el número de canales (dos longitudes de onda o más). Dichas bandas están en espectros dentro y fuera de la visión humana (visible, IR, NIR, TIR, microondas).



Figura 8: Ilustración de Teledetección Pasiva. Fuente: EOS Data Analytics, 2023e

✓ Instrumentos de Teledetección Pasiva

Los tipos de sensores remotos pasivos más conocidos son varios radiómetros y espectrómetros. Los nombres de los instrumentos identifican claramente lo que miden:

- El espectrómetro distingue y analiza las bandas espectrales.
- El radiómetro determina la potencia de la radiación emitida por el objeto en determinados rangos de banda (visible, IR, microondas).
- El espectrorradiómetro determina la potencia de la radiación en varios rangos de bandas.
- El radiómetro hiperespectral es el tipo de sensor pasivo más preciso que se utiliza en teledetección. Gracias a su altísima resolución, distingue cientos de bandas espectrales estrechas dentro de las regiones visible, NIR y MIR.
- El radiómetro de imágenes escanea el objeto o superficie para reproducir la imagen.
- La sonda detecta las condiciones atmosféricas en sentido vertical.
- El acelerómetro detecta los cambios de velocidad por unidad de tiempo (por ejemplo, lineal o de rotación).

✓ Aplicaciones Y Beneficios De La Teledetección Pasiva

Entre los ejemplos de sensores remotos pasivos en detección remota, Landsat destaca definitivamente como la misión de observación y teledetección de la Tierra más duradera. Ha monitorizado nuestro planeta y registrado los datos obtenidos durante 40 años permitiéndonos analizar la forma en que ha cambiado. La gran ventaja de la misión es que la información es accesible al público y con utilidades que pueden aplicarse en:

- Teledetección y geología: Exploración en zonas de difícil acceso o con formas complejas.
- Detección remota en agricultura y silvicultura: Teledetección aplicada a los recursos naturales, monitorizando los cambios en las tierras de cultivo o los bosques a lo largo de varios años o décadas.
- Teledetección y meteorología: Predicción del tiempo, monitorización de la actividad volcánica y tormentas de arena.
- Teledetección y la protección del medio ambiente: Monitorización de grandes áreas forestales mediante teledetección en situaciones con incendios forestales.
- Detección remota en ciencias marinas: Monitorización del viento, olas, corrientes marinas, temperatura del agua o la salinidad, entre otros.

Enfocados en la agricultura, la teledetección utiliza las propiedades de reflectancia de la vegetación para evaluar la salud de los cultivos con índices de vegetación. Esto es posible porque los valores específicos de los índices de vegetación se correlacionan con ciertas especies en una determinada etapa de crecimiento. Nuestra aplicación EOSDA Crop Monitoring ayuda a las empresas agrícolas de todo el mundo a gestionar sus tareas diarias, así como a comprobar el estado de los campos y mantener una vegetación sana en ellos. [\(EOS Data Analytics, 2023e\)](#)

2.4.3. Teledetección Mediante Microondas

La teledetección mediante microondas incluye tipos activos y pasivos y se basa en el principio de transmitir y recibir señales o solamente recibir. La diferencia radica en la longitud de onda. En este caso concreto, varía de 1 cm a 1 m. A diferencia de las longitudes de onda más cortas, no se ven afectadas por casi ninguna condición atmosférica, excepto las lluvias torrenciales. Su resistencia a los aerosoles permite monitorizar casi en cualquier tiempo y momento.

✓ Teledetección Pasiva Mediante Microondas

Con un escáner o radiómetro, la teledetección pasiva mediante microondas comprueba las emisiones de microondas de los objetivos. Dicho sensor distingue la energía natural y la registra, con la diferencia de que su antena detecta especialmente las microondas y no otras ondas más cortas. El método permite a los especialistas conocer la temperatura y la humedad del objetivo mediante ciertas correlaciones con la cantidad de radiación. La energía detectada por este tipo de sensor es emitida, transmitida o reflejada.

El método proporciona datos para muchas ramas como la meteorología, la hidrología, la agricultura, la ecología o la oceanografía. En particular, permite a los científicos comprobar la humedad del suelo, el agua atmosférica y las concentraciones de ozono; distinguir los vertidos de petróleo y abordar la contaminación del agua.

✓ Teledetección Activa Mediante Microondas

Los sensores remotos activos irradian su propia señal al objetivo y miden la cantidad rebotada. Las diferentes propiedades de retrodispersión de los objetivos, así como el tiempo de viaje, permiten calcular la distancia, conociendo el tiempo que tarda la señal en ir y volver. La cantidad también depende del ángulo de iluminación y de la uniformidad/rugosidad de la superficie.

Un ejemplo de teledetección activa mediante microondas es el radar. Los dos tipos básicos de esta categoría son:

- Con imagen (bidimensional, por ejemplo, los radares);
- Sin imagen (lineales, por ejemplo, altímetros o difusómetros).

Esta tecnología es especialmente útil para la industria aeronáutica y espacial, ciencias marinas y la meteorología, por mencionar algunas. [\(EOS Data Analytics, 2023e\)](#)

2.4.4. El Valor de la Teledetección

Los satélites centrados en la teledetección giran alrededor de nuestro planeta en un intervalo establecido, registrando y proporcionando datos casi en tiempo real. La información obtenida permite analizar no sólo el estado actual de las cosas, sino también los antecedentes históricos.

Los hallazgos tecnológicos alimentan la investigación científica y facilitan las actividades cotidianas de las personas en muchas ramas, tanto prácticas como teóricas. Con múltiples aplicaciones y beneficios de los que disfrutar, aún queda mucho por descubrir. ([EOS Data Analytics, 2023e](#))

2.4.5. Resolución de Imágenes Satelitales

La resolución espacial es el tamaño de un píxel, el punto más pequeño visible para el sensor. Sin embargo, una persona no familiarizada con el tema puede sentirse confundida por esta simplificación. En realidad, el sensor de un satélite de teledetección percibe una imagen a través de su campo de visión instantáneo elíptico (IFOV), que luego se procesa en un píxel cuadrado. Por ejemplo, si observamos una imagen con una resolución espacial de 30 m, no podremos reconocer ningún objeto de menos de 30m en ella y tendremos que buscar algo bastante más grande que esos 30m para empezar a distinguir detalles.

En función de la distancia al objeto y las capacidades del equipo, la teledetección puede realizarse con una resolución espacial baja, media y alta. Por ejemplo, los drones que vuelan cerca del suelo pueden captar imágenes con una resolución espacial excepcionalmente alta. Los satélites, que están mucho más lejos de la Tierra, pueden tomar imágenes de teledetección de la superficie del planeta en cualquiera de las 3 resoluciones, dependiendo del sensor.

Teniendo en cuenta que la tecnología de teledetección está en constante desarrollo, la clasificación en resolución espacial baja, media y alta no es más que un punto de referencia. En la década de 1980, una resolución espacial de 60 metros por píxel en el satélite Landsat de la NASA se consideraba relativamente alta, pero hoy en día se considera excesivamente baja.

Veamos algunos ejemplos reales de resolución espacial en teledetección. Estas tres imágenes satelitales del barrio de Jangokh, en Tashkent (Uzbekistán), sirven para darse cuenta de la diferencia de resolución espacial. La imagen de 0,4 m/px de Kompsat-3A permite ver claramente edificios, carreteras e incluso coches, pero en la mayoría de los casos hay que pagar por ese nivel de detalle. La calidad de las otras 2 imágenes (30m/px) (10m/px) es mucho más borrosa, pero estos datos son gratuitos.



Figura 9: Escala de Resolución Espacial. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).

Ya conocemos el evidente contraste entre las imágenes de satélite de alta resolución espacial y baja. Aunque una mayor resolución espacial proporciona detalles más finos, no siempre son necesarios para un análisis espacial preciso. En algunos casos, basta con una resolución espacial media o incluso baja. Vamos a profundizar en los distintos niveles de resolución espacial de diferentes tipos de satélites, sus ventajas prácticas y sus limitaciones.(EOS Data Analytics, 2023d)

2.4.5.1. Teledetección de Resolución Espacial Media y Baja

Hoy en día se dispone de una enorme cantidad de imágenes de teledetección de resolución espacial media y baja, procedentes, principalmente, de los satélites Sentinel y Landsat. Estos datos, que comprenden 50 años e incluyen diversas bandas espectrales, están a disposición del público de forma gratuita y pueden utilizarse en diversos contextos.

¿Cuáles son los inconvenientes de las imágenes de teledetección de resolución espacial media y baja? Sólo tienen un problema importante: la falta de detalle.

- ✓ Enorme colección de imágenes

Es fácil conseguir imágenes de teledetección de resolución media y baja gracias a la abundancia de recursos disponibles en línea. El servicio en línea de datos de satélite [EOSDA LandViewer](#), por sí solo, proporciona acceso a ocho conjuntos de datos gratuitos de observación de la Tierra. Estos conjuntos de datos proceden de Sentinel 2, Landsat 8 OLI y TIRS, Landsat ETM+ y MODIS. Mediante el uso de distintas fuentes de datos, los usuarios pueden examinar, analizar y descargar imágenes actualizadas con las siguientes características:

- Resolución espacial de 10 a 500 m/píxel;
- Periodo de revisita entre 2 y 16 días;
- Resolución espectral de 4 a 12 bandas y la opción de crear su propia configuración personalizada de combinaciones de bandas.

- ✓ Datos de muchas bandas espectrales disponibles para análisis

La abundancia de información que puede obtenerse de las numerosas bandas espectrales y sus combinaciones hace que estas imágenes sean increíblemente útiles a pesar de su aparente falta de detalle. Con estos datos de teledetección se puede conocer información sobre una amplia gama de objetos y sus propiedades que, de otro modo, serían inaccesibles.

- ✓ Perspectiva histórica

Nuestra actual riqueza en imágenes de teledetección de estas categorías es el resultado directo del proyecto Landsat, que comenzó hace más de medio siglo. Visualizando y analizando imágenes satelitales desde 1982 en EOSDA LandViewer, puede obtener información valiosa sobre la evolución de sus objetos de estudio a lo largo del tiempo.

- ✓ Bajo nivel de detalle

Debido a la falta de detalle de estas imágenes, sólo se pueden distinguir objetos grandes como puentes, canales o trazados urbanos. Incluso el Coliseo, cuyas dimensiones no son nada desdeñables, parecerá un punto.

Teniendo en cuenta estas ventajas y desventajas, queda claro que la resolución espacial media y baja de las imágenes satelitales serán suficientes para tareas concretas que no requieran una alta precisión. Hablemos ahora de las ventajas e inconvenientes de la teledetección de alta resolución espacial. ([EOS Data Analytics, 2023d](#))

2.4.5.2. Teledetección de Alta Resolución Espacial

La mayor ventaja de una resolución espacial alta frente a una resolución espacial baja es el preciso nivel de detalle que muestra. Además, proporciona cobertura cuando y donde se necesita. Sin embargo, las imágenes de mayor calidad suelen ser más caras para los clientes, así como una menor disponibilidad. Otro problema es su escasa cobertura territorial. Veamos con más detalle sus ventajas y desventajas.

- ✓ Alto nivel de detalle

Estas imágenes tienen la ventaja de mostrar detalles más pequeños, como árboles individuales, vehículos, edificios y mucho más. En EOSDA LandViewer, puede elegir entre ocho conjuntos de datos de satélite con la resolución espacial más alta, que va desde los 5 metros (SPOT 5) hasta los 40 centímetros (Kompsat-3A).

- ✓ Cobertura a la carta de cualquier lugar y en cualquier momento

Con la ayuda de los modernos satélites comerciales de alta resolución espacial, ahora es posible obtener información sobre un lugar concreto en un momento determinado. Recorra a estos satélites de alta resolución espacial si los datos que necesita no están fácilmente disponibles en las bases de datos de satélites gubernamentales que siguen trayectorias predefinidas.

EOS SAT, una constelación de satélites cuyo primer satélite fue lanzado a principios de 2023, puede proporcionar una imagen cada dos días del área de interés del cliente al asignarnos una tarea. EOS SAT permitirá estudiar factores naturales y antropogénicos difíciles de evaluar desde tierra y responder lo más rápidamente posible a desplazamientos y catástrofes.

- ✓ Precio elevado

Los datos de alta resolución espacial tienen un precio elevado debido a los sofisticados sensores necesarios para captar imágenes útiles. Estas imágenes pueden obtenerse a un coste reducido a través de sistemas de reventa como EOSDA LandViewer, que sólo cobra a los clientes por la parte de la imagen que corresponde a su área de interés. Es una buena ganga en comparación con el coste de una imagen completa.

- ✓ Área de cobertura reducida

Cuanta más calidad tenga una imagen, menos superficie cubrirá. De ahí que cuando las imágenes son de alta calidad son ideales para la observación y la investigación específicas. Se necesitarían cuatro imágenes satelitales de alta resolución espacial como Pleiades-1, Kompsat-3 o SuperView-1 para cubrir una zona del tamaño de Londres, mientras que una sola imagen Landsat 8 de baja calidad cubre una zona 25 veces el tamaño de esta ciudad.

- ✓ Menor disponibilidad

Las nubes pueden dificultar la obtención de datos de los satélites. Pero en la teledetección de

alta resolución, cuando los satélites se alejan a menudo de una trayectoria predeterminada, esto resulta crucial. Por eso habrá muchas menos imágenes de alta resolución disponibles. Además, debido a la corta historia de la teledetección en alta calidad (según los estándares actuales), desde 2010, dichas imágenes no son óptimas para una investigación exhaustiva de la dinámica de diversos fenómenos y procesos.

Así pues, las imágenes de alta resolución espacial siguen teniendo limitaciones, a pesar de que ofrecen mucha más información sobre los objetos visibles de la superficie terrestre. (EOS Data Analytics, 2023d)

2.4.5.3. Usos de Alta Resolución Espacial

Las imágenes de teledetección de alta calidad, con una resolución espacial de 1 a 5 metros por píxel, así como de menos de 1 metro por píxel, lo que significa muy alta resolución espacial, resultan útiles en áreas donde se necesita el máximo detalle para zonas relativamente pequeñas, como:

- Detección de enfermedades o plagas en los cultivos en la agricultura de precisión;
- Identificación de procesos erosivos del suelo;
- Detección de los bordes de los campos y cartografía de estos;
- Observación y gestión del ganado;
- Detección de la deforestación y gestión forestal;
- Detección y mitigación de anomalías locales;
- Modelado de ciudades en 3D.



Figura 10: Imagen de alta resolución espacial (0,5 m/píxel) procedente de Kompsat 3 en la que se puede distinguir cada árbol de forma individual. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).

2.4.5.4. Usos de Resolución Espacial Media

Las imágenes de resolución media (5-30 metros por píxel) pueden utilizarse para tareas que no requieren una precisión extrema pero sí una amplia cobertura. Los siguientes son algunos ejemplos:

- Monitorización de la salud y el crecimiento de los cultivos;
- Monitorización del contenido de humedad y nutrientes;
- Monitorización de la densidad de la vegetación;
- Detección de plagas y enfermedades;
- Estimación de la pérdida de biodiversidad en terrenos forestales;
- Identificación de anomalías naturales a gran escala;
- Monitorización de las masas de agua;
- Análisis de la expansión urbana.



Figura 11: Imagen de resolución espacial media (10 m/píxel) de Sentinel-2 L2A, que permite distinguir los límites de los campos sin detalles de los mismos. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).

2.4.5.5 Usos de la Baja Resolución Espacial

A pesar de su falta de precisión, la teledetección de baja resolución espacial (30-250 metros por píxel) capta una amplia zona y añade información mediante el muestreo de niveles espectrales que otros métodos no alcanzan. Entre sus áreas de aplicación están incluidas:

- Modelización del crecimiento de los cultivos;
- Predicción del rendimiento;
- Cartografía de tendencias;
- Detección de anomalías a gran escala;
- Monitorización de los cambios en las infraestructuras a gran escala.

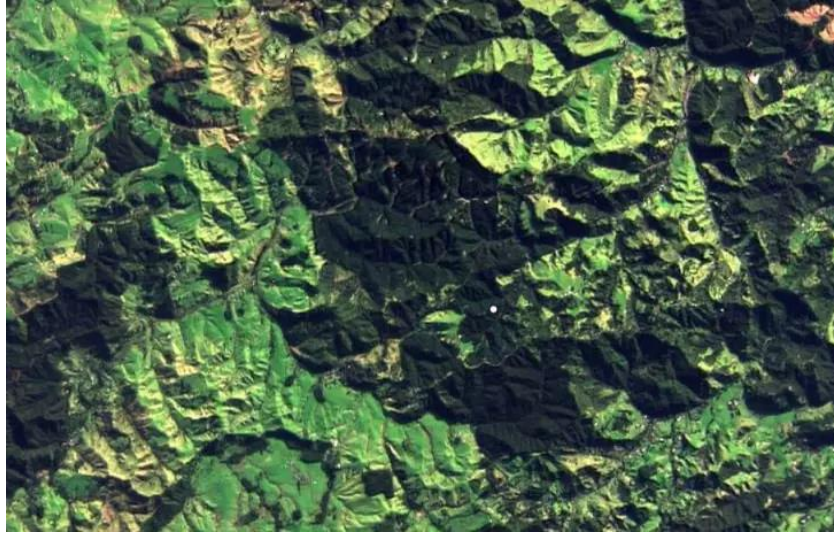


Figura 12: Imagen de baja resolución (30 m/píxel) de Landsat 8 OLI y TIRS, que muestra las características generales del paisaje de una vasta zona. Fuente: EOS Data Analytics. (2023d).

2.4.6. Satélites en Órbita

A lo largo de los años, diferentes tipos de satélites se han hecho indispensables para nosotros, apoyando desde el espacio diversas actividades, desde la radiodifusión y la navegación hasta la teledetección del planeta. Dado que el espectro de utilidad es muy grande, es común clasificar los tipos de satélites en base a su función.

Cada variante tiene sus propias características únicas y órbita alrededor del planeta en un tipo de órbita concreta, que se diferencian entre sí por la altura a la que se encuentra el satélite y la forma en la que gira. Independientemente de su uso, todos estos tipos de satélites nos ayudan a conocer mejor el planeta, a conectar con otras personas situadas en lugares lejanos y a mitigar los desastres, tanto naturales como provocados por el hombre. (EOS Data Analytics, 2023f)

2.4.6.1. Distintos tipos de satélites y su funcionamiento

En los últimos años se han lanzado muchos tipos de satélites para una gran variedad de fines científicos, como la observación de la Tierra, el estudio meteorológico, la navegación, el estudio de los efectos de los vuelos espaciales en los organismos vivos y el conocimiento del cosmos.

En la actualidad, los cuatro tipos de satélites más comunes en función de su aplicación son:

✓ Satélites de Comunicaciones.

Un satélite de comunicaciones, normalmente situado en órbita geoestacionaria y equipado con un transpondedor (receptor y transmisor integrado de señales de radio), puede recibir señales de la Tierra y enviarlas de vuelta al planeta. De este modo, abre canales de interacción entre regiones que antes no podían comunicarse entre sí debido a las grandes distancias u otros obstáculos. Los distintos tipos de satélites de comunicaciones facilitan diversas formas de transmisión de medios, como la radio, la televisión, el teléfono e Internet.

Utilizando este tipo, se pueden retransmitir muchas señales a la vez. Los satélites para radiodifusión y distribución de señales de TV a estaciones terrestres suelen tener transpondedores individuales para cada portadora. En la mayoría de los casos, sin embargo, varias portadoras serán retransmitidas por un solo transpondedor. Por su compatibilidad con los terminales móviles, estos satélites son ideales para las comunicaciones a larga distancia.

✓ Satélites de Observación de la Tierra.

El objetivo de los satélites de observación de la Tierra es monitorizar nuestro planeta desde el espacio e informar de cualquier cambio que observen. Este tipo de tecnología espacial hace posible una monitorización medioambiental constante y reiterada, así como un análisis rápido de los acontecimientos durante emergencias como catástrofes naturales y conflictos armados.

Los objetivos de las misiones de monitorización determinan el tipo de sensores utilizados para la observación de la Tierra. La información recogida varía en función del tipo de sensor empleado y de las bandas de frecuencia disponibles.

Es posible clasificar la observación de la Tierra en los siguientes tipos de satélites:

- **Satélites meteorológicos**, que se emplean para monitorizar y pronosticar las

tendencias meteorológicas y proporcionar datos meteorológicos reales. La órbita GEO es ideal para los diferentes tipos de satélites meteorológicos, ya que proporciona un punto de vista constante que permite a los científicos controlar los patrones de las nubes y predecir sus movimientos.

- **Satélites de teledetección**, cuyas aplicaciones principales están relacionadas con la monitorización medioambiental y la cartografía geográfica. Los satélites usados para los distintos tipos de teledetección giran alrededor de la Tierra en una de las tres órbitas siguientes: polar, LEO no polar o GEO. Los satélites del Sistema de Información Geográfica (SIG) son un tipo de satélite de teledetección cuya función principal es proporcionar imágenes apropiadas para la cartografía SIG y su posterior análisis espacial.

✓ Satélites de Navegación.

Las constelaciones del sistema de navegación están situadas entre 20.000 y 37.000 kilómetros de la superficie terrestre. Este tipo de satélites envían señales que revelan su hora, posición en el espacio y estado de salud. Existen dos grandes tipos de satélites en los sistemas de navegación espacial:

- **Satélites del Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS)**, que emiten señales que los receptores GNSS captan y utilizan con fines de geolocalización, proporcionando cobertura mundial. Galileo en Europa, GPS en Estados Unidos y el Sistema de Navegación por Satélite BeiDou en China son ejemplos de GNSS.
- **Satélites del Sistema Regional de Navegación por Satélite (RNSS)**, un sistema de navegación regional autónomo que proporciona cobertura a escala regional. Por ejemplo, el proyecto IRNSS de la India pretende ofrecer a sus ciudadanos un servicio fiable de localización.

✓ Satélites Astronómicos.

A grandes rasgos, un satélite astronómico es un telescopio gigante en órbita. Este tipo es capaz de ver sin interferencias de la atmósfera terrestre y su tecnología de imágenes infrarrojas puede funcionar de forma normal, sin dejarse engañar por la temperatura de la superficie del planeta. Los satélites usados para la astronomía tienen una visión hasta diez veces mejor que el telescopio más potente de la Tierra.

Hay varios tipos de satélites en función de su actividad:

- Los **satélites astronómicos** se utilizan para investigar distintos tipos de cuerpos celestes y fenómenos en el espacio, desde la creación de mapas de estrellas y superficies planetarias o la toma de imágenes de los planetas de nuestro sistema solar hasta el estudio de los agujeros negros.
- Los **satélites de investigación climática** están equipados con tipos específicos de sensores que permiten a los científicos recopilar datos completos variados sobre los océanos y el hielo, la tierra, la biosfera y la atmósfera del planeta.
- Los **biosatélites** permiten estudiar desde el espacio las células y estructuras de plantas y animales. Al permitir la colaboración entre científicos de distintas regiones, este tipo de satélites desempeña un papel crucial en el progreso de la medicina y la biología. [\(EOS Data Analytics, 2023f\)](#)

2.4.6.2. Satélites de Teledetección.

✓ Sentinel 1

La misión Sentinel-1 es el Observatorio Europeo de Radar para la iniciativa conjunta Copernicus de la Comisión Europea (CE) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Copernicus es una iniciativa europea para la implementación de servicios de información relacionados con el

medio ambiente y la seguridad. Se basa en los datos de observación recibidos de los satélites de Observación de la Tierra y la información basada en tierra.

La misión Sentinel-1 incluye imágenes de banda C que operan en cuatro modos de imágenes exclusivos con diferente resolución (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km). Proporciona capacidad de polarización dual, tiempos de revisita muy cortos y entrega rápida del producto. Para cada observación, se dispone de mediciones precisas de la posición y actitud de la nave espacial.

El radar de apertura sintética (SAR) tiene la ventaja de operar en longitudes de onda que no se ven obstaculizadas por la nubosidad o la falta de iluminación y puede adquirir datos sobre un sitio durante el día o la noche en todas las condiciones climáticas. Sentinel-1, con su instrumento C-SAR , puede ofrecer un monitoreo de área amplia confiable y repetido.

La misión está compuesta por una constelación de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B, que comparten el mismo plano orbital.

Sentinel-1 está diseñado para funcionar en un modo de operación preprogramado y sin conflictos, capturando imágenes de todas las masas de tierra, zonas costeras y rutas de navegación globales en alta resolución y cubriendo el océano global con viñetas. Esto garantiza la confiabilidad del servicio requerido por los servicios operativos y un archivo de datos consistente a largo plazo creado para aplicaciones basadas en series de tiempo largas. ([Insittuto Nacional de Técnica Aeroespacial \(INTA\), 2017](#))

✓ **Sentinel 2.**

Sentinel 2 llevan una cámara multiespectral de alta resolución, con 13 bandas espectrales que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación.

La combinación de la alta resolución y las nuevas capacidades espectrales, así como un campo de visión que abarca 290 kilómetros de anchura y sobrevuelos frecuentes, proporcionará vistas de la Tierra sin precedentes.

La misión se basa en una constelación de dos satélites idénticos en la misma órbita, separados por 180 grados, para lograr una cobertura y una descarga de datos óptimos. Cada cinco días los satélites cubrirán todas las superficies terrestres, grandes islas y aguas costeras.

La misión proporcionará sobre todo información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria. Las imágenes de los satélites serán empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua.

Esto es especialmente importante para predecir la producción de las cosechas, y para aplicaciones relativas a la vegetación de la Tierra.

Sentinel-2A fue lanzada el 23 junio de 2015 y Sentinel-2B en el primer trimestre de 2017. Una vez lanzados, la Comisión Europea asume la propiedad de los satélites. ([ESA Copernicus, 2015](#))

✓ **Landsat 8.**

Landsat 8 (anteriormente Landsat Data Continuity Mission, o LDCM) se lanzó en un cohete Atlas-V desde la Base de la Fuerza Aérea de Vandenberg, California, el 11 de febrero de 2013. El satélite transporta Operational Land Imager (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS) instrumentos.

El OLI mide en las porciones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR, NIR y SWIR) del espectro. El TIRS mide la temperatura de la superficie terrestre en dos bandas térmicas con una nueva tecnología que aplica la física cuántica para detectar el calor. Las imágenes de Landsat 8 tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 metros y multiespectrales de 30 metros a lo largo de una franja de 185 km (115 millas).

Datos de la órbita del satélite Landsat 8

- Gira alrededor de la Tierra en una órbita casi polar sincronizada con el sol (inclinación de 98,2 grados)

- Alcanzó una altitud de 705 km (438 mi)
- Completa una órbita terrestre cada 99 minutos
- Tiene un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial de 10:00 am +/- 15 minutos
- Adquiere alrededor de 740 escenas por día en el sistema de ruta/fila del Sistema de referencia mundial-2 (WRS-2), con una superposición de franjas (o superposición lateral) que varía desde el 7 % en el ecuador hasta un máximo de aproximadamente el 85 % en latitudes extremas.

Instrumentos Landsat 8

Landsat 8 lleva dos sensores. El sensor Operational Land Imager está fabricado por Ball Aerospace & Technologies Corporation. El Sensor Infrarrojo Térmico está construido por el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA. ([EOS Data Analytics, 2023c](#))

2.4.7. Georreferenciación y Sistemas de Coordenadas

La georreferenciación es el uso de coordenadas de mapa para asignar una ubicación espacial a entidades cartográficas. Todos los elementos de una capa de mapa tienen una ubicación geográfica y una extensión específicas que permiten situarlos en la superficie de la Tierra o cerca de ella. La capacidad de localizar de manera precisa las entidades geográficas es fundamental tanto en la representación cartográfica como en SIG.

La correcta descripción de la ubicación y la forma de entidades requiere un marco para definir ubicaciones del mundo real. Un sistema de coordenadas geográficas se utiliza para asignar ubicaciones geográficas a los objetos. Un sistema de coordenadas de latitud-longitud global es uno de esos marcos. Otro marco es un sistema de coordenadas cartesianas o planas que surge a partir del marco global.

Los mapas representan ubicaciones en la superficie de la Tierra que utilizan cuadrículas, gráficas y marcas de graduación con etiquetas de diversas ubicaciones terrestres (tanto en medidas de latitud-longitud como en sistemas de coordenadas proyectadas [como metros de

UTM]). Los elementos geográficos incluidos en diversas capas de mapa se trazan en un orden específico (uno sobre otro) para la extensión del mapa determinada.

Los datasets SIG incluyen ubicaciones de coordenadas dentro de un sistema de coordenadas cartesianas o globales para registrar ubicaciones y formas geográficas. De este modo, es posible superponer capas de datos SIG sobre la superficie de la Tierra. (ArcGIS, 2023)

2.4.7.1. Latitud y Longitud

Un método para describir la posición de una ubicación geográfica en la superficie de la Tierra consiste en utilizar mediciones esféricas de latitud y longitud. Estas son mediciones de los ángulos (en grados) desde el centro de la Tierra hasta un punto en su superficie. Este tipo de sistema de referencia de coordenadas generalmente se denomina sistema de coordenadas geográficas.

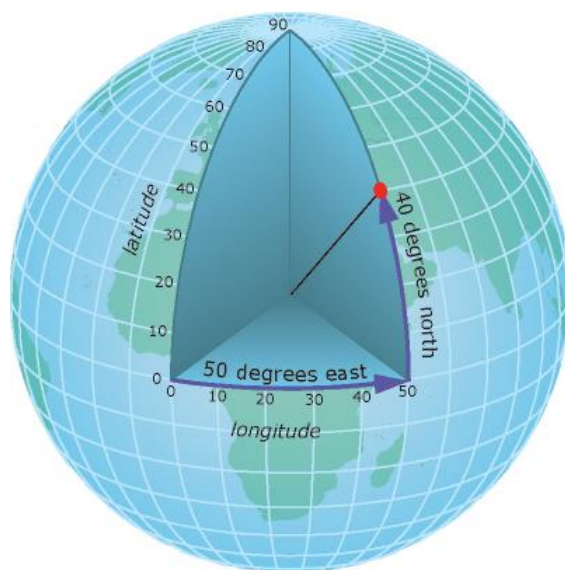


Figura 13: Ilustración de Latitud y Longitud. Fuente: ArcGIS. (2023).

La longitud mide ángulos en una dirección este-oeste. Las mediciones de longitud comúnmente se basan en el meridiano de Greenwich, que es una línea imaginaria que realiza un recorrido desde el Polo Norte, a través de Greenwich, Inglaterra, hasta el Polo Sur. Este ángulo es de

longitud 0. El oeste del meridiano de Greenwich por lo general se registra como longitud negativa y el este, como longitud positiva. Por ejemplo, la ubicación de Los Ángeles, California, tiene una latitud de aproximadamente +33 grados, 56 minutos y una longitud de -118 grados, 24 minutos.

Si bien la longitud y la latitud se pueden ubicar en posiciones exactas de la superficie de la Tierra, no proporcionan unidades de medición uniformes de longitud y distancia. Sólo a lo largo del ecuador la distancia que representa un grado de longitud se aproxima a la distancia que representa un grado de latitud. Esto se debe a que el ecuador es la única línea paralela que es tan extensa como el meridiano. (Los círculos con el mismo radio que la Tierra esférica se denominan círculos grandes. El ecuador y todos los meridianos conforman círculos grandes).

Por encima y por debajo del ecuador, los círculos que definen las líneas paralelas de latitud se vuelven gradualmente más pequeños hasta que se convierten en un solo punto en los Polos Norte y Sur donde convergen los meridianos. Mientras los meridianos convergen hacia los polos, la distancia que representa un grado de longitud disminuye a cero. En el esferoide de Clarke 1866, un grado de longitud en el ecuador equivale a 111,321 kilómetros, mientras que a una latitud de 60° sólo equivale a 55,802 kilómetros. Ya que los grados de latitud y longitud no poseen una longitud estándar, no es posible medir distancias o áreas en forma precisa o visualizar datos fácilmente en un mapa plano o una pantalla de ordenador. Utilizar muchas aplicaciones (aunque no todas) de representación cartográfica y análisis SIG a menudo requiere un marco de coordenadas planas más estable, que suministran los sistemas de coordenadas proyectadas. De forma alternativa, algunos de los algoritmos utilizados para los operadores espaciales tienen en cuenta el comportamiento geométrico de los sistemas de coordenadas esféricas (geográficas). (ArcGIS, 2023)

2.4.7.2 Proyecciones de mapas a través de coordenadas cartesianas

Un sistema de coordenadas proyectadas es cualquier sistema de coordenadas diseñado para una superficie llana, como un mapa impreso o una pantalla de ordenador.

Los sistemas de coordenadas cartesianas en 2D y 3D brindan el mecanismo para describir la

ubicación y la forma geográfica de las entidades utilizando los valores x e y (y, como podrá leer más adelante, utilizando columnas y filas en rásteres).

El sistema de coordenadas cartesianas utiliza dos ejes: uno horizontal (x), que representa el este y el oeste, y otro vertical (y), que representa el norte y el sur. El punto de intersección de los ejes se denomina el origen. Las ubicaciones de los objetos geográficos se definen en relación al origen, utilizando la notación (x,y), donde x se refiere a la distancia del eje horizontal, e y se refiere a la distancia del eje vertical. El origen se define como (0,0).

En la ilustración que se muestra a continuación, la notación (4,3) registra un punto que se encuentra cuatro unidades por encima en x y tres unidades por encima en y desde el origen. (ArcGIS, 2023)

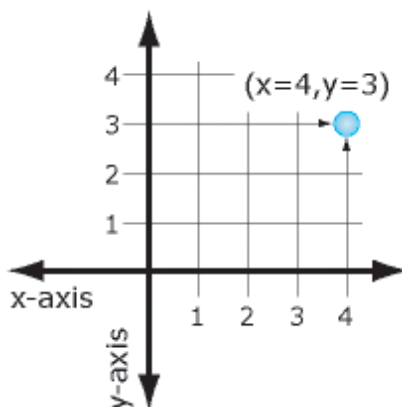


Figura 14: Plano Cartesiano. Fuente: ArcGIS. (2023).

2.4.7.3 Sistemas de Coordenadas en 3D

Cada vez más sistemas de coordenadas proyectadas utilizan un valor z para medir la elevación por encima o por debajo del nivel del mar.

En la ilustración que se muestra a continuación, la notación (2,3,4) registra un punto que está dos unidades por encima de x y tres unidades por encima de y desde el origen, y cuya elevación está cuatro unidades por encima de la superficie de la Tierra (4 metros por encima del nivel del mar). (ArcGIS, 2023)

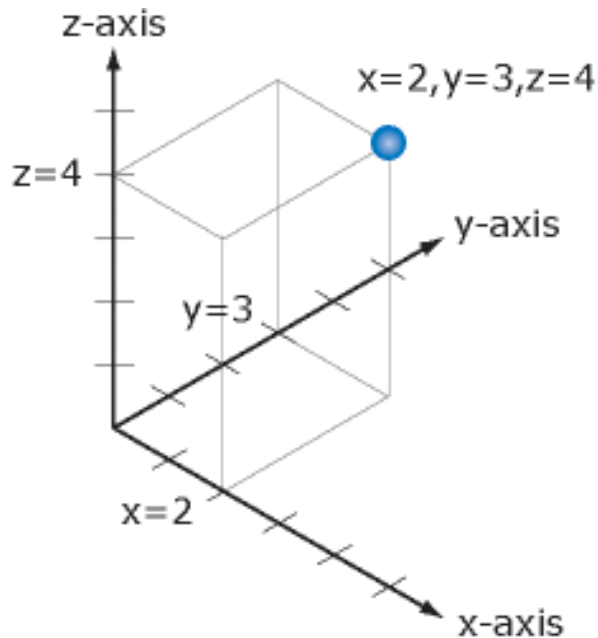


Figura 15: Plano 3D. Fuente: ArcGIS. (2023).

2.4.7.4 Propiedades y distorsión en proyecciones del mapa

Debido a que la Tierra es esférica, uno de los desafíos que deben afrontar los cartógrafos o profesionales de SIG es cómo representar al mundo real por medio de un sistema de coordenadas llanas o planas. Para poder comprender el dilema, piense cómo aplanaría una pelota de básquetbol; esto no se puede hacer sin distorsionar su forma o crear áreas de discontinuidad. El proceso de aplanamiento de la Tierra se denomina proyección, de ahí el término proyección de mapas.

Un sistema de coordenadas proyectadas se define sobre una superficie plana de dos dimensiones. Las coordenadas proyectadas se pueden definir en 2D (x,y) o 3D (x,y,z), donde las mediciones x,y representan la ubicación en la superficie de la Tierra y z representaría la altura por encima o por debajo del nivel del mar.

A diferencia de un sistema de coordenadas geográficas, un sistema de coordenadas proyectadas posee longitudes, ángulos y áreas constantes en las dos dimensiones. Sin embargo, todas las

proyecciones de mapa que representan la superficie de la Tierra como un mapa plano crean distorsiones en algún aspecto de la distancia, el área, la forma o la dirección.

Los usuarios deben lidiar con estas limitaciones utilizando proyecciones de mapa que se adaptan al uso previsto, su ubicación geográfica específica y la extensión deseada. El software SIG también puede transformar la información entre sistemas de coordenadas distintos para admitir la integración de datasets guardados en sistemas de coordenadas que difieren y para respaldar diversos flujos de trabajo fundamentales.

Muchas proyecciones de mapas están diseñadas para fines específicos. Se podría usar una proyección de mapa para preservar la forma y otra para preservar el área (proyecciones conformes frente a proyecciones de áreas equivalentes).

Estas propiedades (la proyección de mapa, junto con esferoide y datum) se convierten en parámetros importantes en la definición del sistema de coordenadas para cada dataset SIG y cada mapa. Al registrar descripciones detalladas de estas propiedades para cada dataset SIG, los equipos pueden volver a proyectar y transformar las ubicaciones geográficas de los elementos de dataset aleatoriamente en cualquier sistema de coordenadas adecuado. Por lo tanto, es posible integrar y combinar información de múltiples capas SIG independientemente de sus sistemas de coordenadas. Esta es una función fundamental de los sistemas SIG. La ubicación precisa comprende la base de casi todas las operaciones SIG. ([ArcGIS, 2023](#))

2.5 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.

Para la medición de la temperatura existen dos métodos, uno de ellos es la forma directa, en la cual el instrumento de medición entra en contacto con la superficie a medir obteniendo los resultados por medio de un termómetro y la forma indirecta es cuando el instrumento de medición no entra en contacto con la superficie a medir obteniendo los resultados por algoritmos y procesos matemáticos.

2.5.1. Termómetro e Hidrómetro con termocupla tipo K

Un termohigrómetro es un instrumento electrónico que es capaz de medir y mostrar la temperatura y la humedad relativa. Es lo suficientemente pequeño para ser portátil o de mano y suele utilizar baterías para su alimentación de energía. Los componentes miden la temperatura y la humedad a través de los cambios en la resistencia eléctrica y muestra de forma continua las medidas en una unidad de pantalla. Algunos modelos están hechos para ayudar a pronosticar el tiempo y pueden incluir características adicionales, mientras que otros son fabricados con fines auxiliares tales como ayudar a la eliminación de moho.

En la mayoría de los casos, el termohigrómetro tendrá un cuerpo metálico o de plástico con una pantalla de cristal líquido (LCD) que muestra las mediciones. La temperatura se mide por los cambios en la resistencia eléctrica debido al calor y puede ser que se mostrará en grados Fahrenheit o Celsius. La humedad relativa del aire es el porcentaje de saturación de vapor de agua en aire y se calcula con los cambios en la resistencia eléctrica causadas por los cambios de humedad. Los termohigrómetros digitales se actualizan continuamente y muestran las mediciones numéricas en la pantalla cuando se enciende.

Algunos tipos de termohigrómetro digital vienen con un sensor inalámbrico que puede ser colocado en una ubicación diferente de la unidad principal. El sensor remoto mide la temperatura y la humedad relativa en esa ubicación y la transmite a la unidad principal. La pantalla de la unidad puede mostrar las mediciones tanto de la ubicación en la unidad principal como la del sensor remoto.

✓ Termopar

Un termopar es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría, se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre.

El termopar tipo K tiene un conductor positivo de níquel-cromo y un conductor negativo de níquel-aluminio. Existen calibraciones tipo R, S, B, G, C y D para alta temperatura que ofrecen un rendimiento de hasta 2320 ° C. Estos están hechos de metales preciosos (platino / rodio y tungsteno / renio). (OMEGA, 2023)

2.5.2. Cámara termográfica

La cámara termográfica utiliza el método indirecto para la medición de temperaturas. Una cámara infrarroja (también conocida como cámara termográfica) detecta y mide la energía infrarroja de los objetos. La cámara convierte los datos infrarrojos en una imagen electrónica que muestra la temperatura aparente de la superficie del objeto medido.

Una cámara infrarroja contiene un sistema óptico que enfoca la energía infrarroja en un detector especial (conjunto del sensor) que contiene miles de píxeles organizados en una cuadrícula.

Cada píxel del conjunto del sensor reacciona a la energía infrarroja concentrada en él y produce una señal electrónica. El procesador de la cámara toma la señal de cada píxel y utiliza un cálculo matemático para crear un mapa de color de la temperatura aparente del objeto. A cada valor de temperatura se le asigna un color diferente. La matriz de colores resultante se envía a la memoria y a la pantalla de la cámara como una imagen de la temperatura (imagen térmica) de ese objeto. (FLUKE, 2023)

Capítulo 3

3.0 Metodología

3.1. INFORMACIÓN SATELITAL

3.1.1. Landsat 8

Landsat 8 es un satélite de observación de la Tierra construido, lanzado y operado en la colaboración de la NASA con el USGS. El estudio de los datos se realiza mediante dos sensores principales. El satélite opera en luz visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico (de onda larga). Las bandas de Landsat 8 están configuradas en 11 diferentes en base a la longitud de onda de su visión.

Uno de los sensores del Landsat 8, Operational Land Imager (OLI), usa 9 bandas en el espectro de la luz visible y el infrarrojo cercano. Otro de los sensores del Landsat 8, Thermal InfraRed Sensor (TIRS), opera en el rango de infrarrojos de onda larga (Longwave InfraRed Light). El satélite proporciona imágenes con una resolución moderada que varía en diferentes bandas desde 15 m por píxel en la más precisa hasta 100 m en el infrarrojo de onda larga, donde la precisión no es vital.

Durante el seguimiento de la cubierta terrestre es posible seleccionar una o varias bandas espectrales del Landsat 8 para crear una imagen más clara debido a las necesidades específicas de los diferentes tipos de investigación, es posible utilizar imágenes en falso color para mejorar el aspecto visual de los datos. La oportunidad que se ofrece es la de sustituir el color verdadero de la imagen por el color requerido.

Con las bandas 2,3,4 (filtros azul, verde y rojo respectivamente) juntas de Landsat 8 se pueden crear combinaciones de banda de color o imágenes RGB normales de luz visible. El objetivo básico de estos filtros es crear un mapa visual de la zona.

La banda 8 es la pancromática de Landsat 8, es decir, en blanco y negro, ya que recoge el mayor número posible de espectros en un solo canal, lo que le permite obtener imágenes más nítidas que en cualquier otra. Debido a que el sensor captura más luz, su resolución es de 15 m por píxel, frente a los 30 m de otros. Cuando se necesitan imágenes más precisas para investigar es posible afinar la foto añadiendo bandas en la combinación. El refinado pancromático de una imagen de mayor resolución con imágenes multiespectrales de menor resolución permite mejorar la resolución de estas últimas y aumentar su valor informativo.

La banda 5 (infrarrojo cercano) es la banda térmica de Landsat 8 y es muy importante en términos de monitorización ecológica, ya que el infrarrojo cercano es el espectro que refleja el agua contenida en las plantas. La combinación de las bandas 3, 4 y 5 de Landsat 8 se utiliza para vigilar las plantas y los bosques con mayor precisión que una simple imagen del verdor. Esta combinación también es útil para el seguimiento del drenaje y los suelos durante los estudios de los cultivos.

Otra de las bandas espectrales de Landsat 8 es la banda 1 (azul profundo/violeta): esta es capaz de recoger el color azul profundo y, por consiguiente, ayuda a vigilar las costas, así como a distinguir las partículas de polvo o humo en el aire.

En Landsat 8, las bandas espectrales 6 y 7 utilizan diferentes partes del infrarrojo de onda corta y son útiles para controlar las rocas y los suelos. Como el espectro es absorbido casi totalmente por el agua, refleja fácilmente las fuentes de agua al analizar la imagen. También se emplean para investigaciones ecológicas y geológicas debido a sus propiedades. Las combinaciones de bandas geológicas permiten especificar las áreas de interés para futuros estudios.

La banda 9 es la menos visible de las bandas de Landsat 8, pero no por ello menos interesante.

Cubre un rango muy estrecho de frecuencias y, dado que la mayoría de ellas son absorbidas por la atmósfera, cualquier cosa que se vea brillantemente se considera que está por encima de la atmósfera. Como la Tierra no es visible en el espectro, esta banda sirve para identificar las nubes y ayuda a filtrarlas cuando es necesario.

Las bandas 10 y 11 son las bandas de infrarrojos térmicos del Landsat 8 y pueden ver el calor. A diferencia de las estaciones meteorológicas que pueden monitorizar la temperatura del aire, esta combinación refleja la cartografía de la temperatura de la superficie del suelo, que suele ser más caliente que el aire. En Landsat 8, esta combinación de bandas térmicas son las más inexactas debido a la dispersión del calor (la resolución de los píxeles es de sólo 100 metros), pero aportan más información en color falso. Esta característica se utiliza para evaluar la humedad del suelo y la evapotranspiración y, por tanto, para definir la tasa de aplicación de agua.

El satélite Landsat 8 toma imágenes de toda la Tierra cada 16 días en un desplazamiento de 8 días desde Landsat 7. El Landsat 8 lleva dos instrumentos de escoba: el Visualizador Terrestre Operativo (OLI – Operational Land Imager) y sensor térmico de infrarrojos (TIRS – Thermal Infra-Red Scanner). Estos dos sensores proporcionan cobertura estacional de la masa terrestre global a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmica); y 15 metros (pancromático). Las bandas espectrales del sensor OLI proporcionan una mejora de los instrumentos Landsat anteriores, con la adición de dos bandas espectrales adicionales: un canal visible azul profundo (banda 1) diseñado específicamente para la investigación de recursos hídricos y zonas costeras, y un nuevo Canal infrarrojo de onda corta (banda 9) para la detección de nubes cirros.

El instrumento TIRS recopila dos bandas espectrales para la longitud de onda cubierta por una sola banda en los sensores TM y ETM+ anteriores. Descripciones de las designaciones de banda para todos los sensores Landsat e información sobre las comparaciones entre Landsat 8 y bandas anteriores también están disponibles.

Ambos sensores proporcionan un rendimiento radiométrico de señal a ruido (SNR) mejorado

cuantificado en un rango dinámico de 12 bits. (Esto se traduce en 4096 potenciales niveles de gris en una imagen en comparación con solo 256 niveles de gris en los instrumentos anteriores de 8 bits). El rendimiento mejorado de señal a ruido permite una mejor caracterización de la tierra cubre estado y condición. Los productos se entregan como imágenes de 16 bits escaladas a 55.000 niveles de gris.

También se incluye una banda de Evaluación de la calidad con cada producto de datos Landsat 8. Esta banda permite a los usuarios aplicar filtros por píxel al Landsat 8 - 33 - Operational Land Imager (OLI) sólo y Landsat 8 OLI / Thermal Infra-Red Sensor (OLI / TIRS) - productos de datos combinados. [Earth Observation System, 2022](#).

Landsat 8, cuenta con 11 bandas espectrales, se muestra la siguiente Tabla.

Banda	Descripción	Longitud de onda (um)	Resolución espacial (m)
Banda 1	Aerosol Costero	0,43 - 0,45	30
Banda 2	Azul	0,45 - 0,51	30
Banda 3	Verde	0,53 - 0,59	30
Banda 4	Rojo	0,64 - 0,67	30
Banda 5	Infrarrojo Cercano	0,85 - 0,88	30
Banda 6	SWIR 1	1,57 - 1,65	30
Banda 7	SWIR 2	2,11 - 2,29	30
Banda 8	Pancromático	0,50 - 0,68	15
Banda 9	Cirrus	1,36 - 1,38	30
Banda 10	Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100
Banda 11	Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100

Tabla 2: Características del producto Landsat 8. Fuente: [Earth Observation System, 2022](#).

Los productos de datos Landsat 8 estándar proporcionados por el Centro EROS de USGS consisten en Números Digitales (DN) cuantificados y calibrados escalonados que representan datos de imágenes multiespectrales adquiridos tanto por el Imager Operacional de Tierra (OLI) como por el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS). Los productos se encuentran en un formato entero sin signo de 16 bits y se pueden reescalar a la reflectancia y / o radiancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) utilizando los coeficientes de reevaluación radiométrica

proporcionados en el archivo de metadatos del producto (archivo MTL). El archivo MTL también contiene las constantes térmicas necesarias para convertir los datos TIRS a la temperatura de brillo del satélite. (EOS Data Analytics, 2023a)

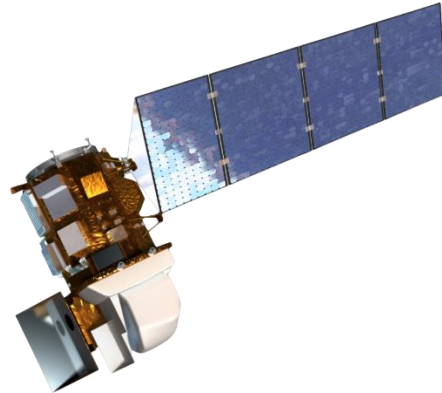


Figura 16: Satélite Landsat 8. Fuente: EOS Data Analytics. (2023a).

3.1.1.1. Operaciones y Gestión

La estructura de gestión Landsat 8, se compone de una asociación en curso entre la NASA y el USGS para obtener imágenes terrestres sostenibles. La NASA contrató a Ball Aerospace & Technologies Corp. (BATC) para desarrollar el OLI y con Orbital Sciences Corporation para construir la nave espacial; NASA GSFC construyó el TIRS. La NASA también fue responsable del lanzamiento del satélite y la finalización de una verificación en órbita de 90 días antes de entregar las operaciones al USGS. El USGS fue responsable del desarrollo del Sistema Terrestre y es responsable de la operación y el mantenimiento del Observatorio y el Sistema Terrestre durante la vida de la misión. En esta función, el USGS captura, procesa y distribuye datos L8 y mantiene el archivo de datos L8.

El Proyecto Landsat en USGS EROS administra las operaciones generales de la misión L8. En esta capacidad, USGS EROS dirige las operaciones de vuelo en órbita, implementa políticas de misión, dirige la estrategia de adquisición e interactúa con las estaciones terrestres internacionales (IGS). USGS EROS captura datos L8 y realiza funciones de preprocesamiento, archivo, generación de productos y distribución. USGS EROS también proporciona una interfaz pública en el archivo para la búsqueda y el pedido de datos (Ariza, 2013)

3.1.1.2. Misión de la Encuesta Global

Una estrategia operativa importante de la misión L8 es establecer y mantener un archivo de datos de encuestas globales. L8 sigue el mismo Sistema de referencia mundial (WRS) utilizado para Landsat 4, 5 y 7, lo que permite que el mundo entero esté a la vista de sus sensores una vez cada 16 días. Además, las operaciones L8 se esfuerzan por capturar sistemáticamente imágenes iluminadas por el Sol y sustancialmente libres de nubes de toda la superficie terrestre de la Tierra (Ihlen, 2019)

3.1.1.3. Descripción General del Observatorio

El Observatorio L8 está diseñado para operar en una órbita heliosíncrona casi circular, casi polar con una altitud de 705 kilómetros (km) en el ecuador, con un ciclo de repetición de 16 días, orbitando completamente la Tierra cada 98,9 minutos. OLI y TIRS recopilan datos de forma conjunta para proporcionar imágenes coincidentes de las mismas áreas de superficie. El Centro de operaciones de la misión (MOC) programa nominalmente la recopilación de 400 escenas OLI y TIRS por día, donde cada escena cubre un área de superficie de 190 por 180 km. El objetivo de la programación y la recopilación de datos es proporcionar una cobertura casi libre de nubes de la masa terrestre mundial para cada estación del año (Ihlen, 2019)

3.1.1.4. Sensor OLI

El sensor Operational Land Imager (OLI) avanza en la tecnología de sensores Landsat, utilizando un enfoque demostrado ya por el sensor Advanced Land Imager ubicado en el satélite experimental de la NASA Observing- 1 (EO-1). En el comienzo los satélites Landsat estaban equipados con sensores "whiskbroom" los cuales empleaban espejos de exploración como instrumentos visión para barrer el campo espectral a través de un ancho de banda superficial y transmitir la luz a unos detectores.

A diferencia del OLI, el cual utiliza un sensor del tipo "pushbroom" compuesto por una serie de baterías larga de detectores, con más de 7.000 detectores por banda espectral, alineados en su plano focal en su respectivo ancho de banda. El diseño del "pushbroom" lo hace un instrumento más sensible proporcionando una mejor información de la superficie terrestre con menos partes móviles. Sus imágenes tienen una resolución espacial de 49 pies (15 m) pancromáticas y 98 pies (30 metros) (incluido el visible, infrarrojo cercano y el infrarrojo de onda corta) a lo largo de 115 millas (185 kilómetros) de ancho de imagen, cubriendo así amplias zonas de la tierra mientras que proporciona una resolución suficiente como para distinguir las características tales como centros urbanos, granjas, bosques y otros tipos de cubiertas del suelo.

El OLI fue diseñado para tener una vida útil de cinco años y detectará las mismas bandas espectrales de los anteriores instrumentos del Landsat (es decir sensores, TM y ETM+), con la excepción de una banda en el infrarrojo térmico. Además de las 7 bandas multiespectrales del anterior Landsat (seis de los cuales han sido refinadas) OLI agregará dos nuevas bandas espectrales, una banda azul "costera" (banda 1) y una banda en el infrarrojo de onda corta "cirros" (banda 9). Estas nuevas bandas, ayudaran a los científicos a medir la calidad del agua y facilitaran la detección de nubes altas y delgadas que previamente han sido difíciles de observar en las imágenes Landsat.

El telescopio tiene cuatro espejos con un diafragma de apertura frontal que es de 135 mm. La matriz de plano focal (FPA) se compone de un sensor de 14 chips ensamblados (SCA), los cuales se enfrían pasivamente. Cada SCA contiene 494 detectores con un adicional de 12 píxeles de vídeo de referencia que no responden a la luz. (NASA, s/f)

El OLI es un sensor de barrido que emplea un telescopio anastigmático de cuatro espejos que enfoca la radiación incidente en el plano focal mientras proporciona un FOV de 15 grados que cubre la franja de tierra de 190 km a lo largo de la pista desde la altitud nominal del Observatorio L8. El muestreo periódico de los detectores transversales a medida que el Observatorio vuela hacia adelante a lo largo de una trayectoria terrestre forma las imágenes digitales multiespectrales

El sensor OLI recopila datos de imagen para 9 bandas espectrales de onda corta con una resolución espacial de 30 metros (m) para todas las bandas excepto la banda Pan de 15 m. La banda OLI Pan, Band 8, también es más estrecha en relación con la banda ETM+ Pan para crear un mayor contraste entre las áreas con vegetación y la tierra sin cobertura vegetal. (Ihlen, 2019)

Nº Banda	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia (\pm nm)	Mínimo inferior (nm)	Máximo superior (nm)
1	Aerosol costero	443	2	433	453
2	Azul	482	5	450	515
3	Verde	562	5	525	600
4	Rojo	655	5	630	680
5	NIR	865	5	845	885
6	SWIR1	1610	10	1560	1660
7	SWIR2*	2200	10	2100	2300
8	Pancromático	590	10	500	680
9	Cirrus	1375	5	1360	1390

Tabla 3: Rangos espectrales y tamaños de píxel de bandas en el sensor OLI. Fuente: (USGS y NASA, 2013).

3.1.1.5. Sensor TIRS

Todo en la Tierra emite radiación térmica infrarroja, término comúnmente conocido como calor. La física nos dice que la cantidad de la radiación emitida es proporcional a la temperatura del objeto. El sensor térmico infrarrojo (TIRS) fue añadido a la carga útil del LDCM (Landsat Data Continuity Mission) cuando se hizo evidente que los gestores de los recursos hídricos se basaban en las mediciones de alta precisión de la energía térmica de la tierra obtenidas por los predecesores del LDCM – el TM del satélite Landsat 5 y Enhanced Thematic Mapper – Plus ETM+ del Landsat 7 – con el fin de hacer un seguimiento del uso de la tierra y el agua. La decisión de añadir el sensor TIRS se hizo después de que el diseño de la misión se había iniciado. Los ingenieros tenían menos de cuatro años para diseñar y construir TIRS por lo que recurrieron a una nueva tecnología desarrollada por la NASA llamada Quantum Well Infrared Photodetectors (QWIPs).

Los detectores QWIPs están hechos de un material que es compatible con el procesamiento de silicio, lo que significa que son las mismas herramientas que utilizan en las instalaciones para hacer chips de computadora. QWIPs son muy fiables, uniformes, y muy adecuados a las necesidades del sensor TIRS. El diseño QWIPs opera en los complejos principios de la mecánica cuántica. Chips semiconductores atrapan electrones en un estado de energía "well" hasta que los electrones se elevan a un estado superior por la luz infrarroja térmica de una determinada longitud de onda. Los electrones elevados crean una señal eléctrica que puede medirse y registrarse para crear una imagen digital. Los satélites Landsat anteriores miden la temperatura superficial del suelo utilizando una sola banda térmica para detectar longitudes de onda largas de la luz emitida por la superficie de la tierra. Los QWIPs en el TIRS sin embargo, detectan dos segmentos del espectro infrarrojo térmico, ambos incluidos dentro de una ventana de transmisión atmosférica, con el fin de producir mejores estimaciones de la temperatura superficial.

Al igual que el sensor OLI, el TIRS es también un sensor "Pushbroom" con un 115-millas (185 kilómetros) de campo de visión (Cross-track). Con una resolución espacial de 328 pies (100 metros) de ancho, esta resolución espacial del TIRS está diseñada para captar las mediciones de consumo de agua en los campos riego, particularmente a través de las grandes llanuras de los Estados Unidos.

Es un sensor de escoba que emplea un plano focal con largas series de detectores fotosensibles. TIRS utiliza fotodetectores infrarrojos de pozo cuántico (QWIP) para medir la energía infrarroja térmica (TIR) de onda larga emitida por la superficie de la Tierra, cuya intensidad es una función de la temperatura de la superficie. Los TIRS QWIP son sensibles a dos bandas de longitud de onda del infrarrojo térmico, lo que permite separar la temperatura de la superficie de la Tierra de la de la atmósfera. El diseño de QWIP opera sobre los principios complejos de la mecánica cuántica. Los chips semiconductores de arseniuro de galio atrapan los electrones en un estado de energía 'bien' hasta que los electrones se elevan a un estado superior mediante la luz infrarroja térmica de una cierta longitud de onda. Los electrones elevados crean una señal eléctrica que se puede leer, registrar, traducir a unidades físicas y usar para crear una imagen digital (Vaughn Ihlen, 2019)

El sensor TIRS, que tiene una vida útil de diseño de tres años, recopila datos de imagen para dos bandas térmicas con una resolución espacial de 100 m en una franja de 190 km. Las dos bandas térmicas infrarrojas abarcan el rango de longitud de onda de las bandas térmicas TM y ETM+ más amplias (10,0–12,5 μm) y representan un avance sobre los datos térmicos de banda única. Los datos generados por TIRS se cuantifican a 12 bits. Aunque TIRS tiene una resolución espacial más baja que la banda 6 de ETM+ de 60 m, las bandas térmicas duales teóricamente deberían permitir la recuperación de la temperatura de la superficie, pero los problemas de luz parásita con la banda 11 impiden el uso de este enfoque.

Una de las diferencias más importantes entre las especificaciones del OLI y el TIRS es que TIRS sólo tiene una vida útil de tres años. Esta característica se especificó con el fin de ayudar a acelerar el desarrollo del TIRS. (Ariza, 2013)

Nº Band	Descripción	Ancho de banda (nm)	Centro Tolerancia ($\pm\text{nm}$)	Mínimo inferior (nm)	Máximo superior (nm)
10	Thermal 1	10800	200	10300	11300
11	Thermal 2	12000	200	11500	12500

Tabla 4: Rangos espectrales y tamaños de píxel de las bandas en el sensor TIRS. Fuente: (USGS y NASA. 2013).

3.1.2. Descarga de imágenes satelitales de Landsat 8

3.1.2.1. Earth Explorer

La agencia USGS (United States Geological Survey) tiene el mayor registro de recolección de datos de satélite SIG gratuitos (imágenes de satélite gratis, tomas aéreas, vehículos no tripulados), que están disponibles a través de su explorador terrestre Earth Explorer.

La selección de imágenes de satélite gratis en Earth Explorer es abrumadora: desde datos ópticos y de radar hasta imágenes de satélite del clima, pasando por modelos digitales del terreno o

DEM. Podrá encontrar 40 años de imágenes de satélite históricas de misiones Landsat de la USGS-NASA, así como una gran variedad de datos de otros sensores de observación remota de la NASA (Terra y Aqua MODIS, ASTER, VIIRS, etc.). También incluye conjuntos de datos de satélite de código abierto proporcionados en colaboración con la ISRO (Resourcesat-1 y 2), la ESA (Sentinel-2) y algunos datos de satélite comerciales de alta resolución (IKONOS-2, OrbView-3, datos históricos SPOT).

EarthExplorer le permite restringir la búsqueda de imágenes de satélite por área, fecha, % de cobertura de las nubes, e incluir tantos sensores como desee. Todas las teselas que coincidan con la búsqueda realizada se pueden previsualizar una por una o todas a la vez.

Además de las opciones estándar de selección del Área de interés (dirección, coordenadas, carga de archivos o dibujo), la interfaz ofrece una búsqueda basada en hitos, que es muy divertida de probar. Puede encontrar todos los hitos posibles, incluso los menos comunes – como caminos antiguos o tumbas – en cualquier parte del mundo.

Para la descarga gratuita de imágenes de satélite del USGS, deberá instalar su aplicación de descarga masiva (Bulk Download Application). Dependiendo del sensor, se pueden descargar varios tipos de datos (Nivel-1,2,3, Imágenes en Color Natural, Imágenes térmicas, etc.).

EE puede utilizarse únicamente para la búsqueda, vista previa y descarga gratuita de datos de satélite. Si desea analizar imágenes, necesitará un software especial.

EarthExplorer es un líder indiscutible entre las fuentes de imágenes de satélite de alta resolución en términos de variedad de datos, pero no es el servicio más fácil de usar, especialmente para alguien no experto. Puede llevar un tiempo familiarizarse con todos los botones, opciones de menú y conjuntos de datos disponibles. ([EOS Data Analytics, 2023b](#))

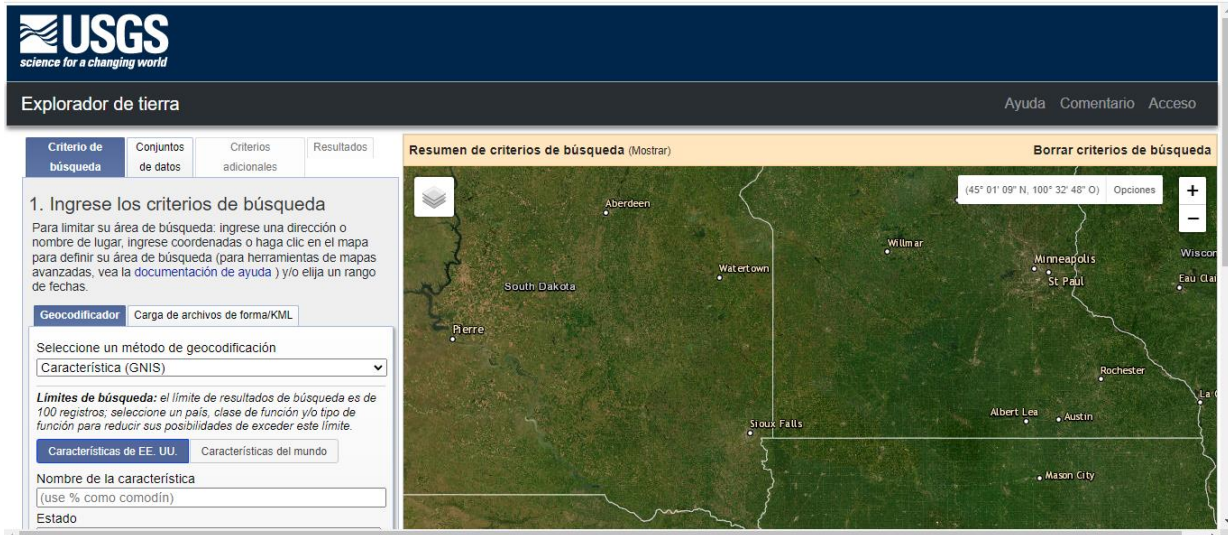


Figura 17: Interfaz de la página Earth Explorer. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer.

3.1.2.2. Descarga de imágenes satelitales de Landsat 8 en Earth Explorer

Para descargar una imagen específica de Landsat 8 seguimos los siguientes pasos:

- ✓ Se inicia sesión con una cuenta creada, debido a que si no se inicia sesión no nos permitirá descargar la imagen satelital, luego seleccionamos el área de interés lo que nos permitirá visualizar las coordenadas, seguidamente procedemos a colocar el periodo de fechas de interés.

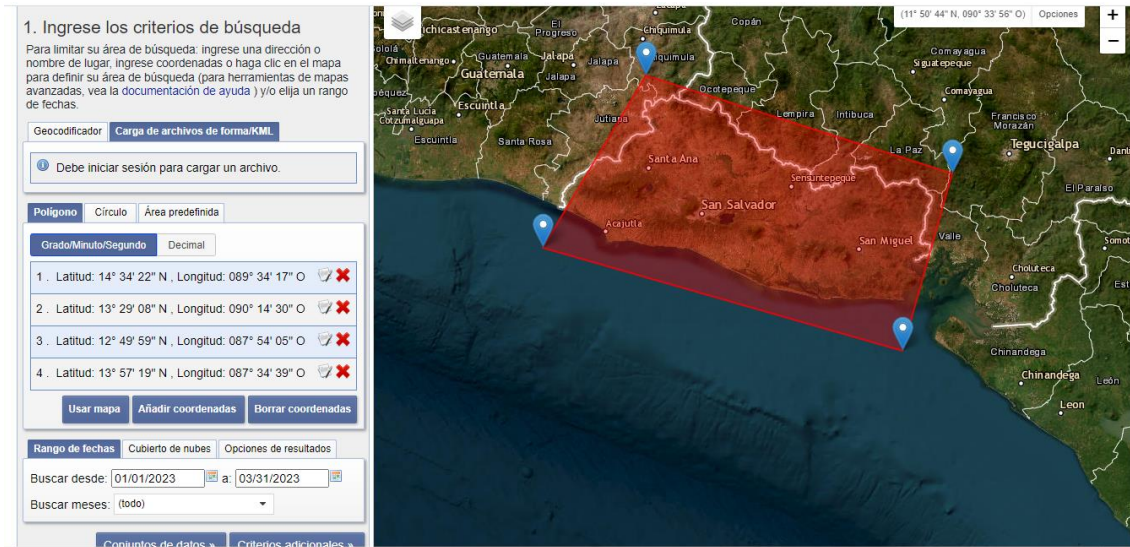


Figura 18: Criterios de búsqueda. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ Siempre en el apartado 1, “criterio de búsqueda” localizamos el apartado “cubierto de nubes” y creamos el filtro de la cantidad de nubosidad existente en la imagen de interés.

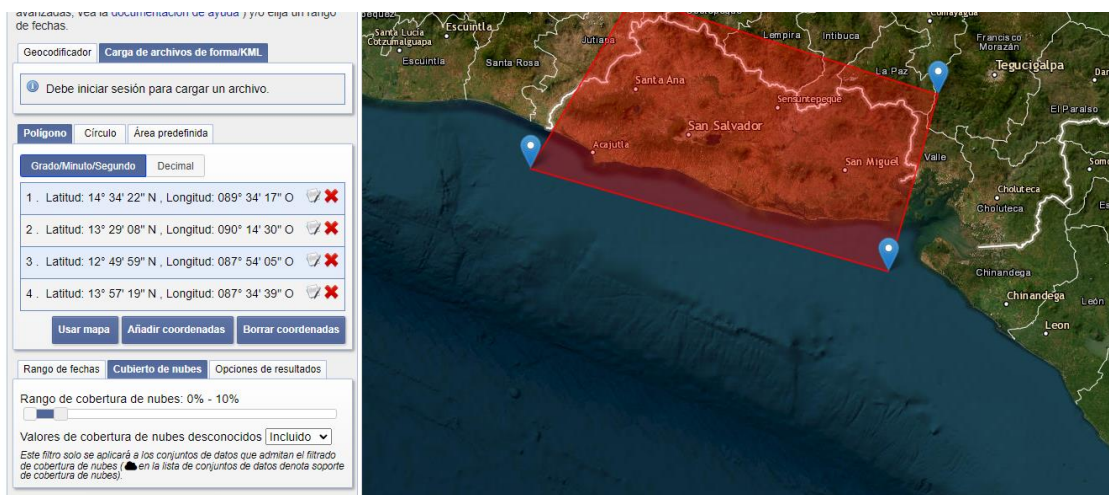


Figura 19: Cobertura de nubes. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ Seguidamente nos dirigimos al apartado 2 “conjuntos de datos” donde seleccionaremos el satélite de interés, en este caso Landsat 8-9 OLI/TIRS C2 L1.

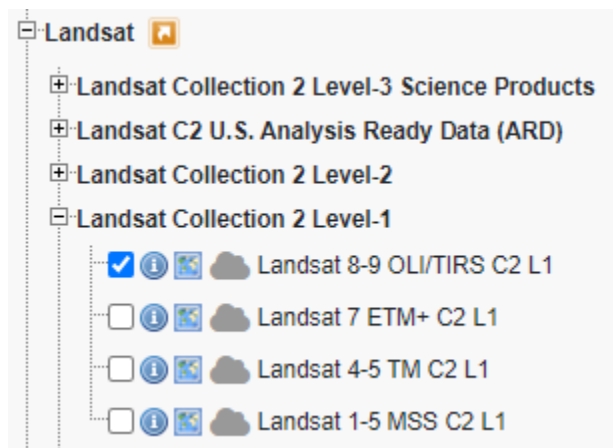


Figura 20: Conjunto de datos. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ Luego nos dirigimos al apartado 3 “Criterios adicionales” donde seleccionamos el número de satélite y el identificador de sensores. En este caso satélite 8 e identificador de sensores OLI-TIRS.

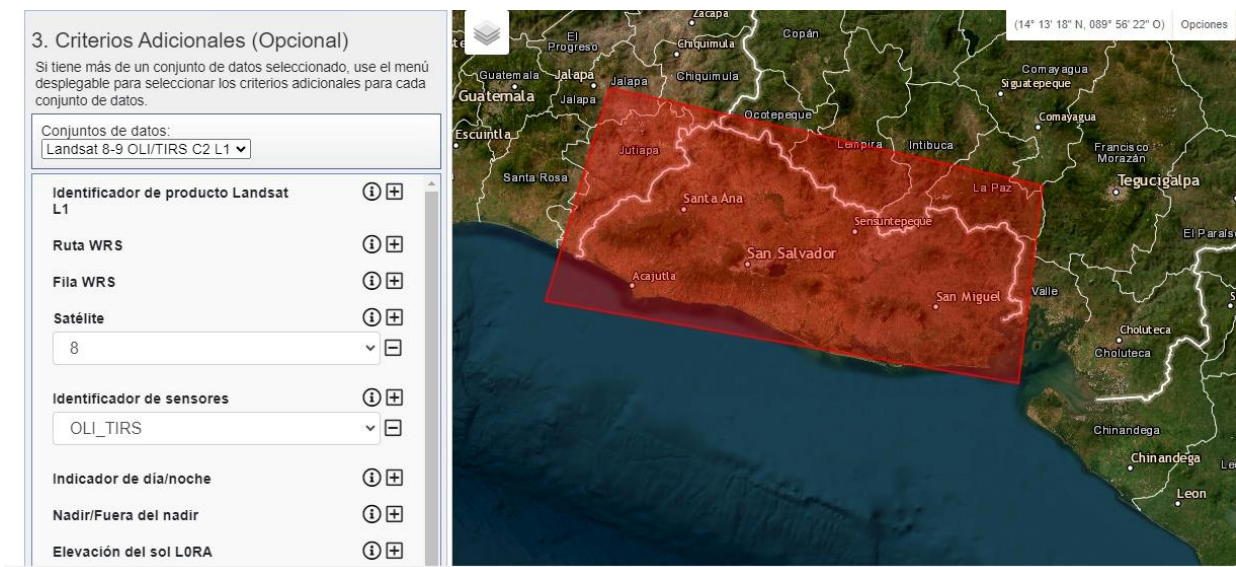


Figura 21: Criterios adicionales. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ Para finalizar nos dirigimos al punto 4 “Resultados” donde nos muestra los resultados obtenidos con los previos pasos finalizados. Son diferentes imágenes que cumplen con los criterios de selección los cuales se pueden verificar antes de ser descargadas.

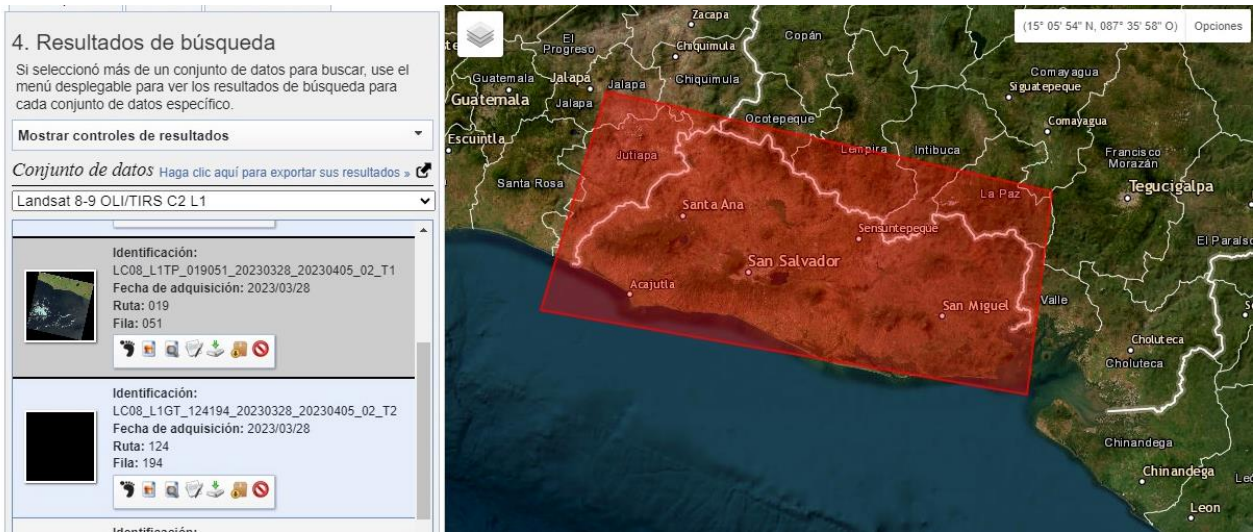


Figura 22: Resultados de búsqueda. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ Al previsualizar la imagen podemos observar y comprobar cuál de ellas cumple los criterios de búsqueda. Al decidirnos por una imagen damos click en descargar y se nos descargara un archivo rar donde se encuentran las diferentes bandas de la imagen.

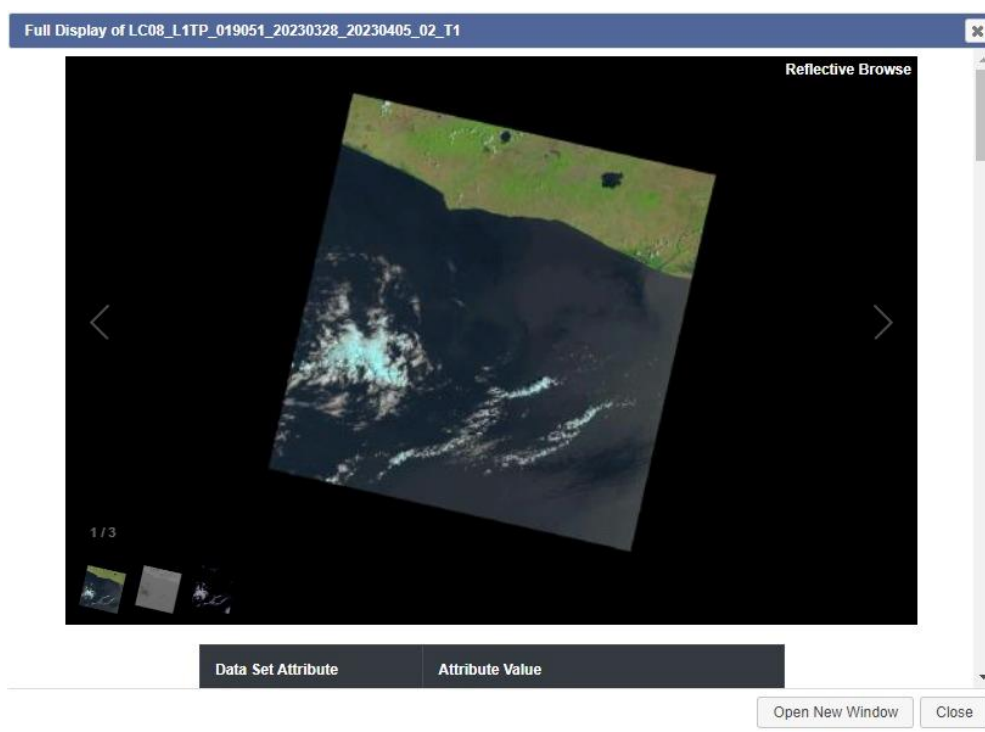


Figura 23: Previsualización de imagen a descargar. Fuente: NASA. (s/f). USGS Earth Explorer

- ✓ La carpeta comprimida que se descargó se muestra a continuación:

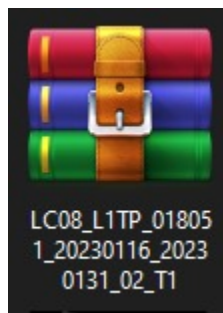


Figura 24: Carpeta comprimida descargada. Fuente: Elaboración propia.

La primera fecha que aparece en el nombre del archivo es cuando pasa el satélite capturando la imagen y la segunda fecha indica el procesamiento y colocación en la base de datos.

- ✓ Al descomprimir la carpeta descargada observamos los diferentes archivos contenidos, los cuales son los siguientes:

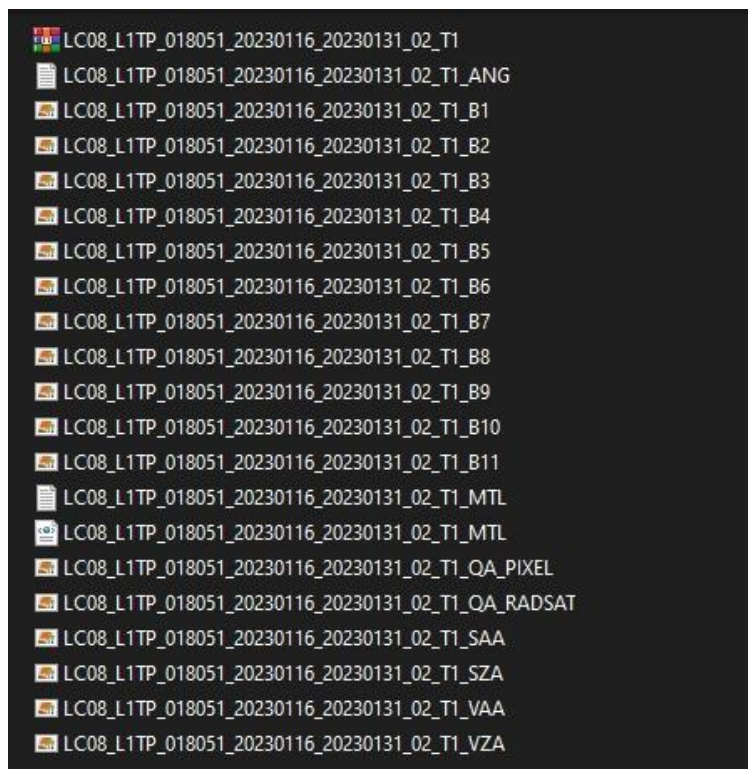


Figura 25: Archivos adjuntos en la carpeta descargada. Fuente: Elaboración propia

3.2. SOFTWARE PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

3.2.1. QGIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto bajo la licencia GNU (General Public License). Además de ser un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) que opera en los sistemas Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android. Está diseñado para soportar numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos.

Ofrece diversas funcionalidades sobre sistemas de información geográfica y percepción remota debido a sus características principales: complementos como gestionar datos vectoriales y datos ráster de diferentes formatos; proyecciones cartográficas y la posibilidad de trabajar con imágenes de diferentes formatos.

También es posible crear mapas y analizar datos espaciales, realizar análisis de datos espaciales dentro de bases de datos espaciales y otros formatos. Ofrece análisis vectorial, muestreo, geoprocésamiento y herramientas de administración de geometrías, así como bases de datos. QGIS se adapta a las necesidades del usuario, ya que cuenta con la arquitectura de complementos, bibliotecas que se pueden utilizar para crear complementos, incluso se pueden crear nuevas aplicaciones con los lenguajes de programación como C++ o Python (QGIS, 2018). En la siguiente tabla se muestra algunas ventajas de Qgis con respecto a otros softwares.

QGIS es un software libre y opera bajo la licencia GNU GPL. El software QGIS puede ser modificado libremente de tal manera que pueda realizar diferentes y más especializadas funcionalidades. Ya existen dos nuevos productos denominados: QGIS Browser y QGIS Server. Estos productos poseen diferentes interfaces del usuario ([front-end](#)).

Una de las grandes versatilidades de QGIS es su facilidad de interconexión con muchas bases de datos geoespaciales tanto autocontenidas como en arquitectura cliente-servidor: GeoPackage, SpatiaLite,³ PostgreSQL/PostGIS y Oracle Database entre otras. (QGIS, 2023)



Figura 26: Logo Qgis. Fuente: QGIS, 2023.

3.3. TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN SATELITAL PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE CALOR

3.3.1. Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre mediante Imágenes de Satélite.

La temperatura Superficial Terrestre o LST (Land Surface Temperature) es un parámetro clave para el análisis de procesos físicos superficiales del planeta ya sea para una escala regional o global. Estimaciones precisas de temperatura superficial radiante son esenciales para el cálculo de balance de calor superficial radiante y sensible. (Bodas-Salcedo, et al., 2008). Es un componente importante para el balance energético de la Tierra, ya que determina las temperaturas radiantes efectivas de la superficie terrestre, esto controla las temperaturas del aire y la radiación de onda larga saliente en condiciones de cielo despejado, lo cual es de mucha utilidad para una variedad de aplicaciones en varios tipos de análisis relacionadas a la evaluación de condiciones superficiales de la Tierra, tales como la estimación de humedad en el suelo, uso de los suelos, análisis de vegetación, cambios climáticos, climas urbanos, monitoreo de incendios, modelos geológicos, manejo de cultivos, manejo de recursos hidrológicos, entre otros, por lo que la obtención de LST de alta resolución se ha convertido en años recientes en algo suma importancia para la humanidad.

Existen muchos algoritmos diferentes para la obtención de LST, tales como métodos mono canal (SC - Single Channel o también llamado Mono Window) que utilizan una sola banda térmica, con estudios influyentes realizados con este método (Jimenez-Munoz et al., 2014) este método fue de gran utilidad debido a que los satélites Landsat 3, Landsat 4, Landsat 5 y Landsat 7 sólo poseían un canal térmico infrarrojo. Mientras que los sensores TM y ETM+ previos poseen solo

una banda térmica infrarroja, el sensor TIRS del Landsat 8 posee dos bandas térmicas adyacentes espectralmente, lo cual es ideal para algoritmos de ventana dividida (SW – Split Window). (Mia et al., 2017b)

3.3.1.1. Temperatura Superficial LST calculada con el método Monocanal simplificado.

Este método es calculado con una sola Banda del sensor TIRS la Banda 10. Obtenida de imagen Landsat 8 Nivel 2 Colección 2 la cual solo posee la Banda 10 del sensor TIRS.

Varios estudios han descrito la estimación de la Temperatura de Superficie del suelo en °C se calcula a partir de la temperatura de brillo [T_b] y de la emisividad [ϵ], conforme a lo establecido por. Ésta puede ser calculada como se muestra a continuación:

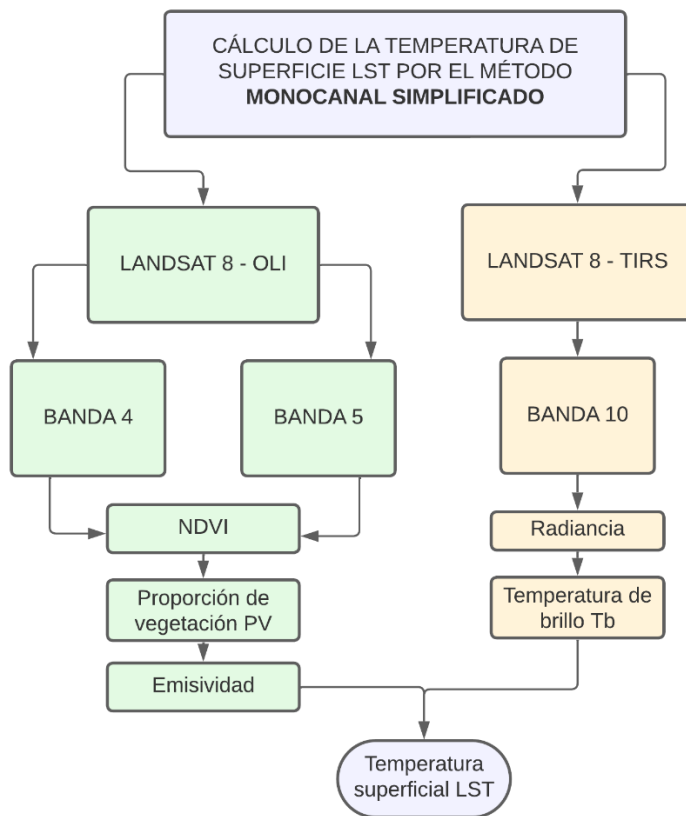


Figura 27: Diagrama de procesos para el cálculo de la temperatura superficial LST por el método monocanal simplificado. Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el cálculo de la temperatura superficial por medio del método **Monocanal Simplificado**, se debe procesar las imágenes de las bandas 4, 5 OLI y la imagen de la banda 10 TIRS. Por lo que se detalla dicho procesamiento. (Jimenez-Munoz et al., 2014), (Pasapera Gonzalez, 2018).

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 8 – OLI, BANDA 4 Y BANDA 5.

3.3.1.1.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI.

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) mide el verdor y la densidad de la vegetación captada en una imagen de satélite. La vegetación sana tiene una curva de reflectancia espectral muy característica de la que podemos sacar partido calculando la diferencia entre dos bandas: la del rojo visible y la del infrarrojo cercano. El NDVI es esa diferencia expresada numéricamente entre -1 y 1.

El NDVI de un cultivo o una planta calculado regularmente durante distintos períodos de tiempo puede revelar mucho sobre los cambios en sus condiciones. En otras palabras, podemos utilizar el NDVI para estimar la salud de las plantas a distancia.

La caída en los valores también puede corresponder a cambios normales, como el momento de la cosecha, por lo que el NDVI debe contrastarse con otros datos disponibles. La interpretación correcta de los valores del NDVI puede ayudar a los agricultores a obtener un mayor y más saludable rendimiento, ahorrar dinero en fertilizantes y cuidar mejor del medio ambiente.

El NDVI ha sido uno de los índices de vegetación más utilizados en la observación remota desde su aparición en la década de los 70. Con el aumento de la disponibilidad de imágenes de teledetección procedentes de satélites y de vehículos aéreos no tripulados, cada vez más personas lo han adoptado en sus actividades más allá del ámbito de la ciencia.

En pocas palabras, el NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cubierta terrestre

(artificial) y a determinar su estado general. También permite definir y visualizar las áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento.

En un esfuerzo por monitorear las fluctuaciones en la vegetación y entender como estas afectan a su entorno, los científicos comenzaron a utilizar los sensores remotos instalados en satélites para medir y mapear la densidad de vegetación verde sobre la Tierra. Utilizando el instrumento Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), los científicos han recolectado imágenes de la superficie del planeta. Al medir meticulosamente las longitudes de onda y la intensidad de la luz visible e infrarroja cercana reflejada por la superficie terrestre de vuelta hacia el espacio, los científicos desarrollaron algoritmos llamados “Índices de Vegetación” para cuantificar las concentraciones de vegetación verde alrededor del planeta.

Para determinar la densidad de vegetación en una región de terreno, se deben observar los distintos colores (longitudes de onda) de la luz solar visible e infrarroja cercana reflejada por las plantas. Como se puede observar a través de un prisma, el espectro de la luz está compuesto por varias longitudes de onda. Cuando la luz solar llega a un objeto, este absorbe ciertas longitudes de onda del espectro y otras son reflejadas. La pigmentación en las hojas de las plantas absorbe la luz visible en el rango de los 0.4 a 0.7 micrómetros para utilizar en el proceso de fotosíntesis. La estructura celular de las hojas, por otra parte, reflejan la luz infrarroja en el rango de los 0.7 a 1.1 micrómetros. A mayor cantidad de hojas verdes sanas en una planta, más se ven afectadas estas longitudes de onda absorbidas y reflejadas.

La clorofila (un pigmento indicador de la salud) absorbe fuertemente la luz visible y la estructura celular de las hojas refleja fuertemente la luz del infrarrojo cercano. Cuando la planta se deshidrata, enferma, padece una enfermedad, etc., la capa esponjosa se deteriora y la planta absorbe más luz del infrarrojo cercano, en lugar de reflejarla. Así, la observación de cómo cambia la luz NIR en comparación con la luz roja proporciona una indicación precisa de la presencia de clorofila, que se correlaciona con la salud de la planta. (EOS, 2023)

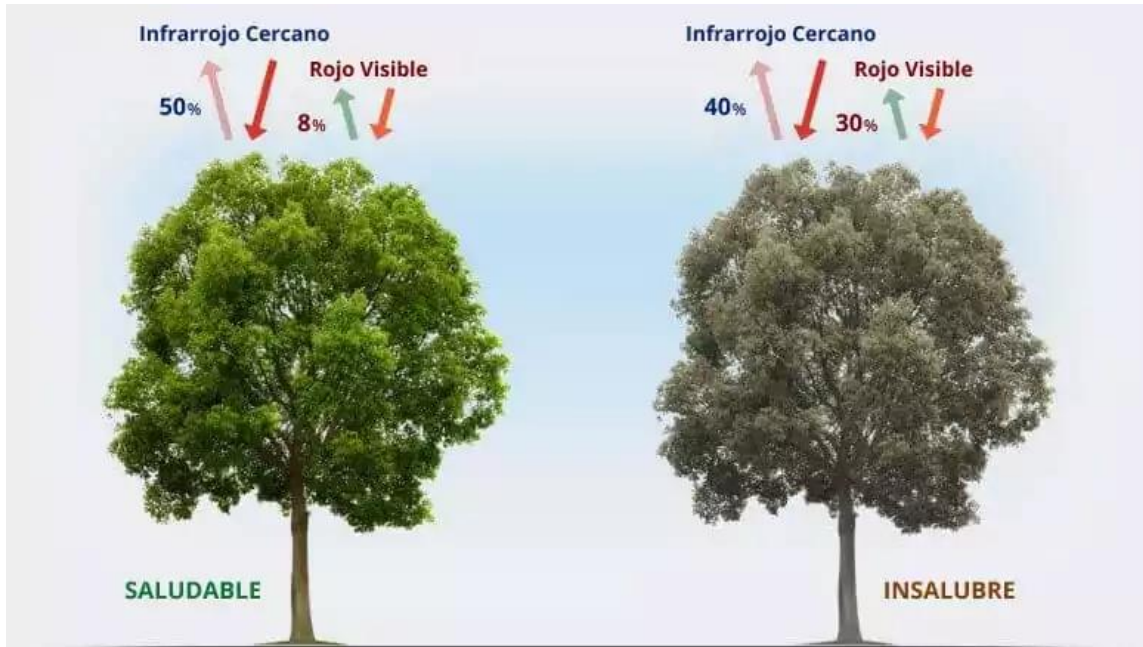


Figura 28: NDVI calculado de las longitudes de onda visibles e infrarrojo cercano reflejadas por la vegetación. Fuente: EOS. (2023).

La vegetación saludable (izquierda) absorbe la mayor parte de la luz visible incidente y refleja una gran parte de la luz infrarroja cercana. La vegetación escasa o poco sana (derecha) refleja más luz visible y menos luz infrarroja cercana.

✓ Cálculo del NDVI

El NDVI se calcula a partir de imágenes de satélite y de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Ecuación 1: Cálculo del NDVI utilizando como variables la banda NIR y la banda RED

Donde:

NIR: Luz reflejada en el espectro del infrarrojo cercano.

RED: Luz reflejada en el rango rojo del espectro.

De acuerdo con la fórmula del NDVI, la densidad de la vegetación (NDVI) en un punto determinado de la imagen es igual a la diferencia de las intensidades de luz reflejada en el rango rojo e infrarrojo dividida por la suma de estas intensidades.

✓ Rango del NDVI

Este índice está definido por valores que van de -1.0 a 1.0, donde los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto.

Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve.

Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales.

✓ Cálculo del NDVI en QGIS.

Para el cálculo del índice NDVI en QGIS, se debe utilizar la Calculadora de Ráster QGIS cargando los datos necesarios. Utiliza la fórmula estándar del NDVI. (EOS, 2023)

Utilizando datos del Landsat 8, la fórmula será:

$$NDVI = \frac{Banda\ 5 - Banda\ 4}{Banda\ 5 + Banda\ 4}$$

Ecuación 2: Cálculo del NDVI utilizando la banda 4 y 5 de LANDSAT 8

Donde:

Banda 5: ondas rojas (0,64-0,67 micrómetros)

Banda 4: ondas NIR (0,85-0,88 micrómetros)

Aplicando la *Ecuación 2* en la calculadora ráster de QGIS obtenemos el ráster del NDVI.

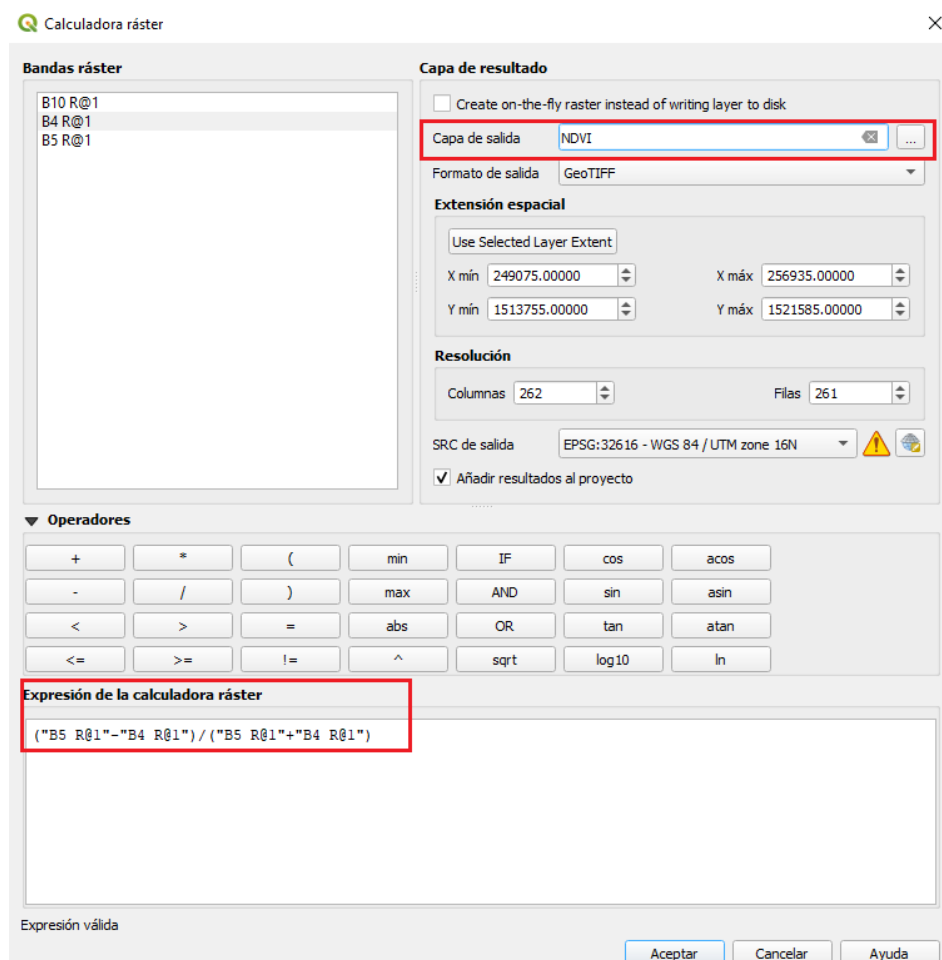


Figura 29: Cálculo del NDVI en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1.2. Proporción de Vegetación PV.

Una vez obtenido el NDVI, se puede utilizar directamente para calcular la emisividad de los píxeles, o bien se puede generar un PV (Proportion of Vegetation). La ventaja de esta segunda opción es que permite aislar la emisividad de las diferentes cubiertas, tomando como referencia

la de la vegetación que puede ser calculada a partir de este índice (Carlson & Ripley, 1997)

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{mín}}{NDVI_{máx} - NDVI_{mín}} \right]^2$$

Ecuación 3: Proporción de Vegetación PV

✓ Cálculo de la Proporción de Vegetación PV en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 3* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de Proporción de vegetación Pv.

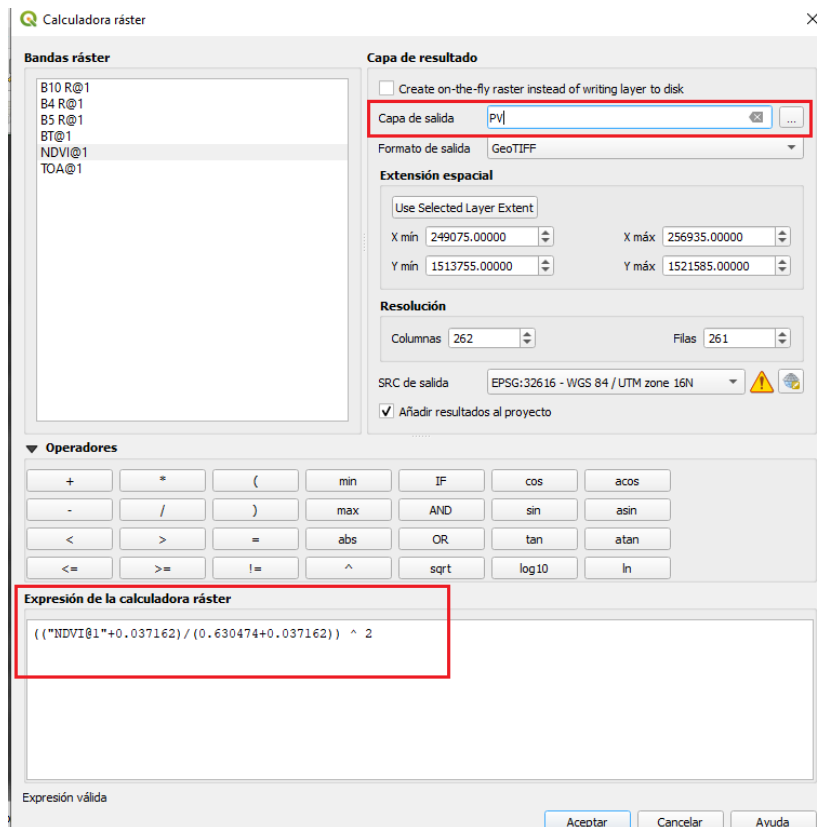


Figura 30: Cálculo de la proporción de vegetación PV en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1.3. Emisividad de superficie terrestre ϵ .

El cálculo de la emisividad de la superficie terrestre trata de aplicar una pequeña corrección al valor tabulado de emisividad media para vegetación en esa banda de ese sensor (0,986). El valor de 0.986 corresponde a un valor de corrección de la ecuación, se refiere al caso de superficie heterogéneas y rugosas. Cuando está compuesta de vegetación y suelo desnudo se utiliza la siguiente ecuación para determinar la emisividad.

$$\epsilon = m P_v + n$$

Ecuación 4: Cálculo de emisividad a partir de la proporción de vegetación P_v .

Donde:

m = valor constante 0.004.

P_v = proporción de vegetación en cada pixel analizado.

n = valor de corrección 0.986.

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

Ecuación 5: Cálculo de emisividad con el valor constante y el valor de corrección introducidos.

✓ Cálculo de la emisividad en QGIS

Aplicando la *Ecuación 5*, obtenemos el ráster de la emisividad ϵ .

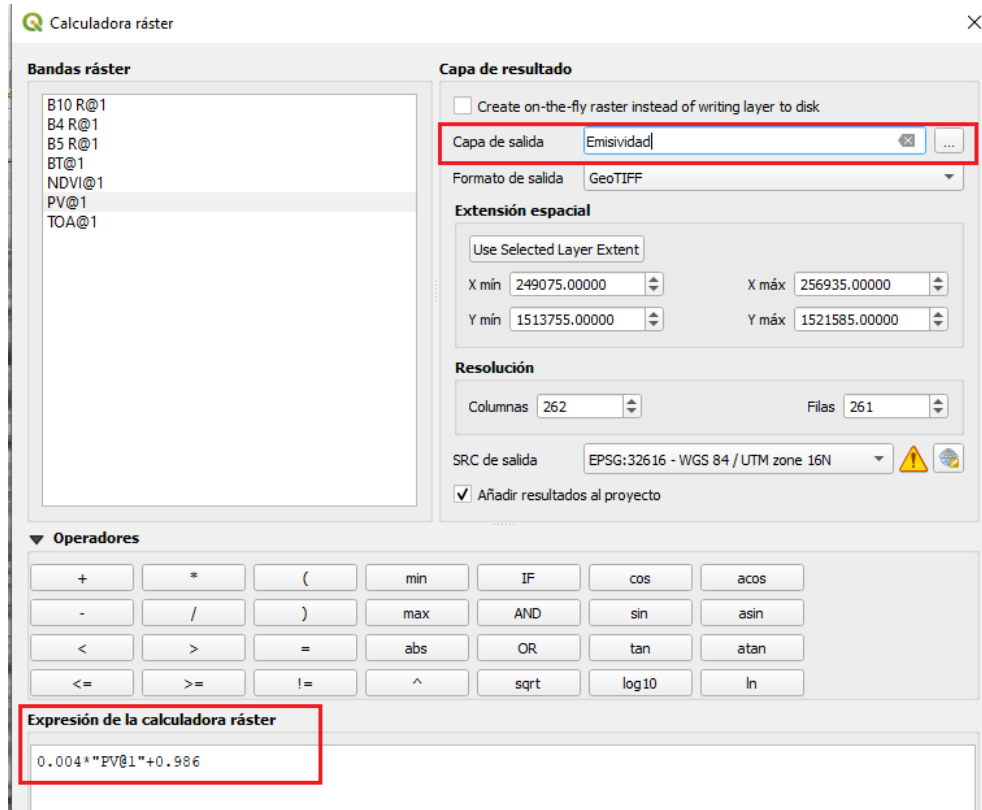


Figura 31: Cálculo de la emisividad ϵ en QGIS. Fuente: Elaboración propia

PROCESAMIENTO DE LAS IMAGEN LANDSAT 8 – TIRS, BANDA 10.

3.3.1.1.4. Radiancia espectral en el sensor Banda 10-TIRS (TOA).

Para obtener la temperatura de brillo efectivo de la banda térmica 10-TIRS de Landsat 8 se realiza la conversión ND a Radiancia. La radiancia es el “Flujo de energía (principalmente energía irradiante o incidente) por ángulo sólido que abandona una unidad de área de una superficie en una dirección dada”. Para determinar la radiación espectral (L_λ) de la parte superior de la atmósfera (TOA). (Ariza, 2013)

- ✓ Top of Atmospheric (TOA) Spectral Radiance (L_λ).

Las imágenes Landsat 8 consisten en una serie cuantificada y calibrada de niveles digitales que pueden ser reescalados a valores de radiancia usando para ello los coeficientes radiométricos

provistos en el archivo de metadato (_MTL.txt), tal y como se describe a continuación:

$$\mathbf{TOA (L_{\lambda}) = ML * Qcal + AL}$$

Ecuación 6: Radiación espectral (L_{λ}) de la parte superior de la atmósfera (TOA).

Donde:

L_{λ} .= Es el valor de radiancia espectral en el techo de la atmosfera (TOA) medida en valores de (Watts /m² * srad * μm))

ML: Factor Multiplicativo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda).

Qcal: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Números Digitales DN).
Corresponde a la banda 10.

AL: Factor Aditivo de reescalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda).

Estos parámetros anteriormente descritos se encuentran en el fichero de metadatos que incluye la imagen LandSat (_MTL.txt), las cuales se obtienen de la plataforma EarthExplore (USGS), a continuación, se muestra el metadato de una imagen satelital captada en el área geográfica de estudio el 28 de marzo del año 2023.

```

QUANTIZE_CAL_MAX_BAND_11 = 65535
QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = LEVEL1_MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2605E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2908E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1894E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0030E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.1378E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5264E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.1448E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1351E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3988E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -63.02425
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -64.53760
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -59.47084
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -50.14916
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -30.68879
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.63202
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.57240
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -56.75505
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.99387
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000
    
```

Figura 32: Factor ML(Multiplicativo) y AL(Aditivo) específico de la banda 10-TIRS. Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.

- ✓ Cálculo del TOA en QGIS.

Aplicando los valores en la *Ecuación 6*, mediante calculadora ráster del software QGIS, Se crea el ráster de radiancia espectral TOA.

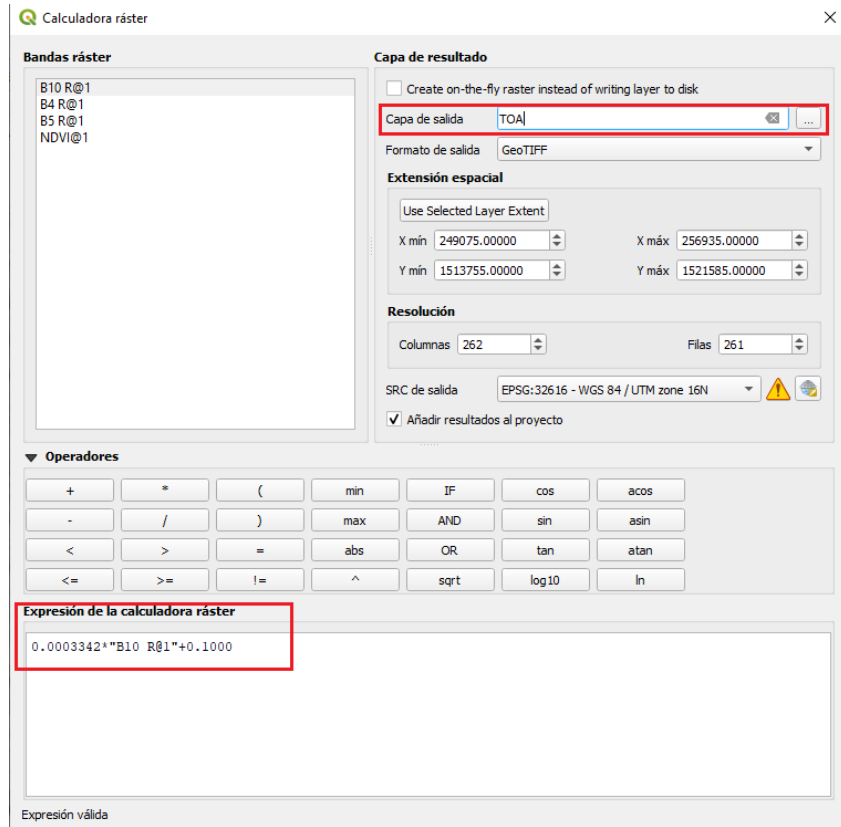


Figura 33: Cálculo de la radiancia espectral (L_{λ}) de la parte superior de la atmósfera (TOA) en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.1.5. Temperatura de brillo T_b .

A partir de los valores de radiancia, utilizando las bandas térmicas fácilmente se puede derivar la temperatura a la altura del sensor. Las bandas del TIRS se pueden convertir a temperatura de brillo utilizando las constantes de calibración que están en el archivo de metadatos. (Ariza, 2013)

$$T_b = \left(\frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1 \right)} \right)$$

Ecuación 7: Temperatura de Brillo T_b .

Donde:

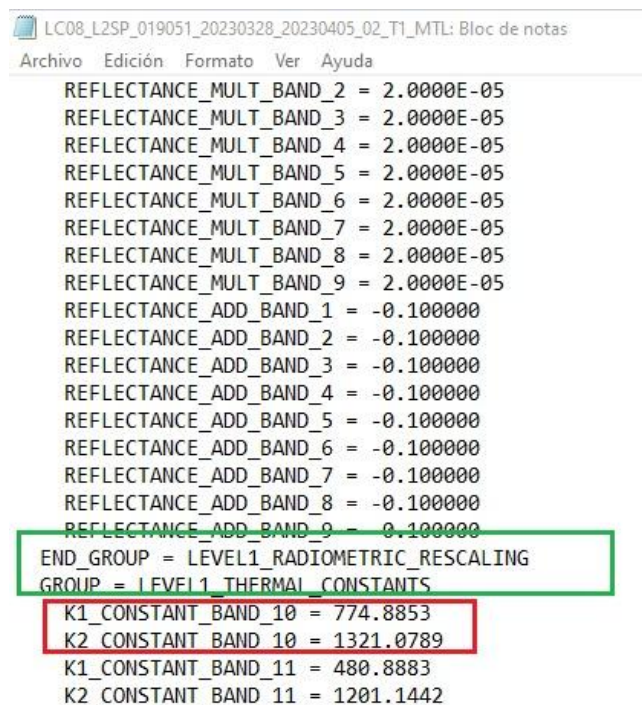
T_b : Temperatura de brillo en grados Celsius.

L_λ : Radiancia espectral en el sensor.

K_1 : Es la constante de conversión térmica específica para la banda termal 10, que lo encontramos en el metadato (K1_CONSTANT_BAND_10).

K_2 : Es la constante de conversión térmica específica para cada banda termal 10, que lo encontramos en el metadato (K2_CONSTANT_BAND_10).

A continuación, se muestra las constantes K_1 y K_2 del sensor TIRS de Landsat 8, del metadato que contiene la imagen satelital captada por el sensor el 28 de marzo del año 2023.



```
LC08_L2SP_019051_20230328_20230405_02_T1_MTL: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000
END_GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442
```

Figura 34: Constantes de conversión térmica K_1 y K_2 , para la banda 10-TIRS. Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.

✓ Cálculo de la temperatura de brillo Tb en QGIS:

Aplicando la *Ecuación 7* en calculadora ráster de QGIS, se obtiene el ráster de temperatura de brillo (Tb).

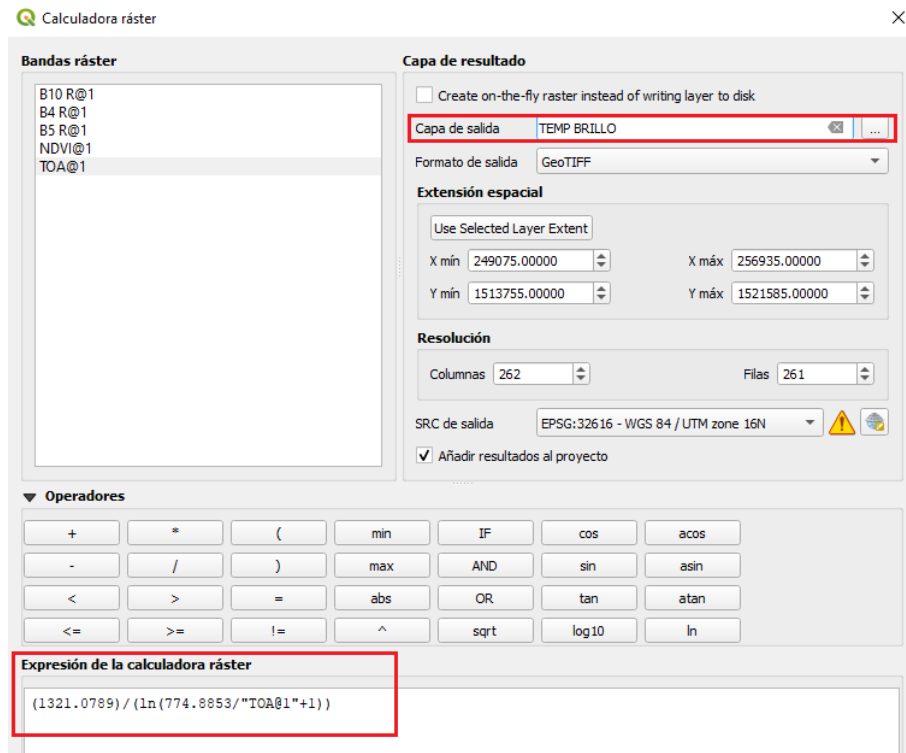


Figura 35: Cálculo de la Temperatura de brillo [Tb] en QGIS. Fuente: Elaboración propia

CÁLCULO DEL LST CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE LAS BANDAS 4, 5 Y 10.

La ecuación de la temperatura superficial LST según (Artis, 1982), (Aslan & Koc-San, 2016) es la siguiente:

$$LST = \frac{Tb}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot Tb}{\rho}\right) \cdot \ln(\epsilon)}$$

Ecuación 8: Temperatura superficial LST.

Donde:

LST : Temperatura Superficial en grados Celsius [°C].

Tb : Temperatura de brillo.

ε = Emisividad de superficie.

λ = Longitud de onda central de la banda térmica emitida = 10.895 μm

$$\rho = \frac{h \cdot c}{\sigma} = 1.4388 \mu\text{m K}$$

h = Constante de Plack = $6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s, que es el cuanto de acción electromagnética que relaciona la energía de un fotón con su frecuencia.

c = Velocidad de la luz en el vacío = 2.998×10^8 m/s

σ = Constante de Boltzmann = 1.380649×10^{-23} J/K, que es el factor de proporcionalidad que relaciona el promedio de la energía cinética de las partículas en un gas con la temperatura termodinámica del gas.

La relación entre la radiación que es emitida y la temperatura de una superficie es formulada matemáticamente por la Leyes de Planck, desplazamiento de Wien (derivada de la Ley de Planck), [Stefan-Boltzmann](#) y [Kirchoff](#).

✓ Cálculo de la temperatura superficial LST en QGIS:

Aplicando la *Ecuación 8*. En calculadora ráster de QGIS, se obtiene el ráster de temperatura superficial (LST).

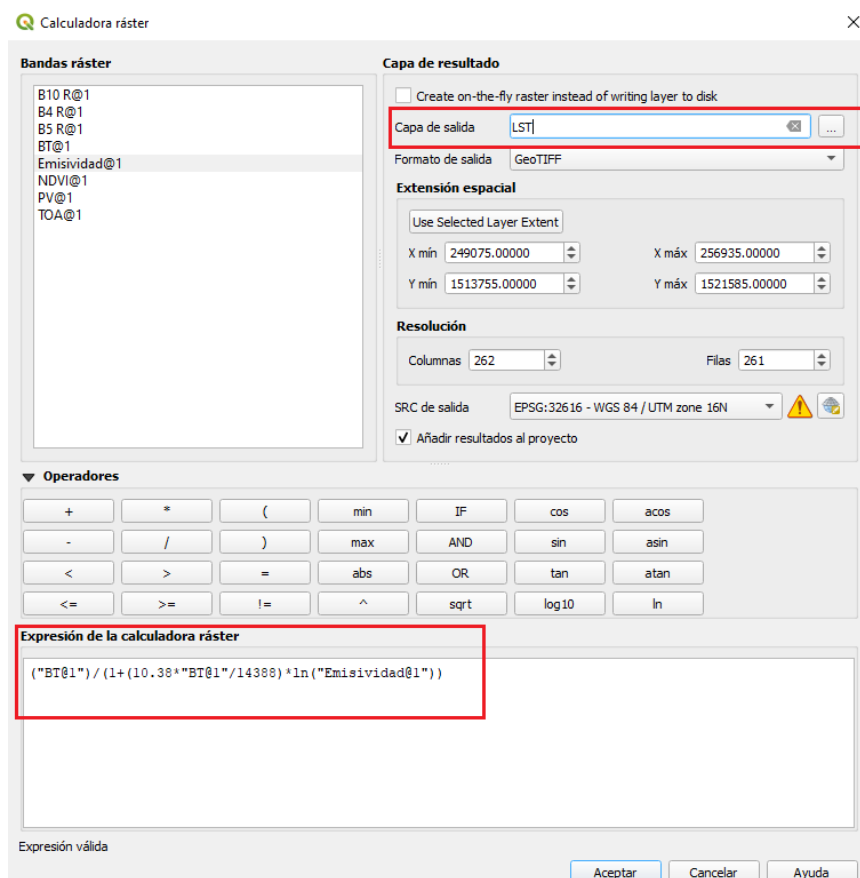


Figura 36: Cálculo de la temperatura superficial LST en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2. Temperatura Superficial LST calculada con el método de Ventana Dividida.

Este método es calculado con dos Bandas del sensor TIRS la Banda 10 y Banda 11. Obtenidas de la imagen Landsat 8 Nivel 1 Colección 2.

El método del algoritmo de ventana dividida para la estimación de Temperatura de superficie terrestre (LST) utiliza la aproximación de las radiancias atmosféricas y la linealización de la ecuación de Planck, se estima la temperatura de la superficie terrestre con este método, ya que el sensor Landsat 8 TIRS tiene dos bandas térmicas. El desarrollo del tratamiento satelital se muestra en el siguiente diagrama de flujo. (Mia et al., 2017b)

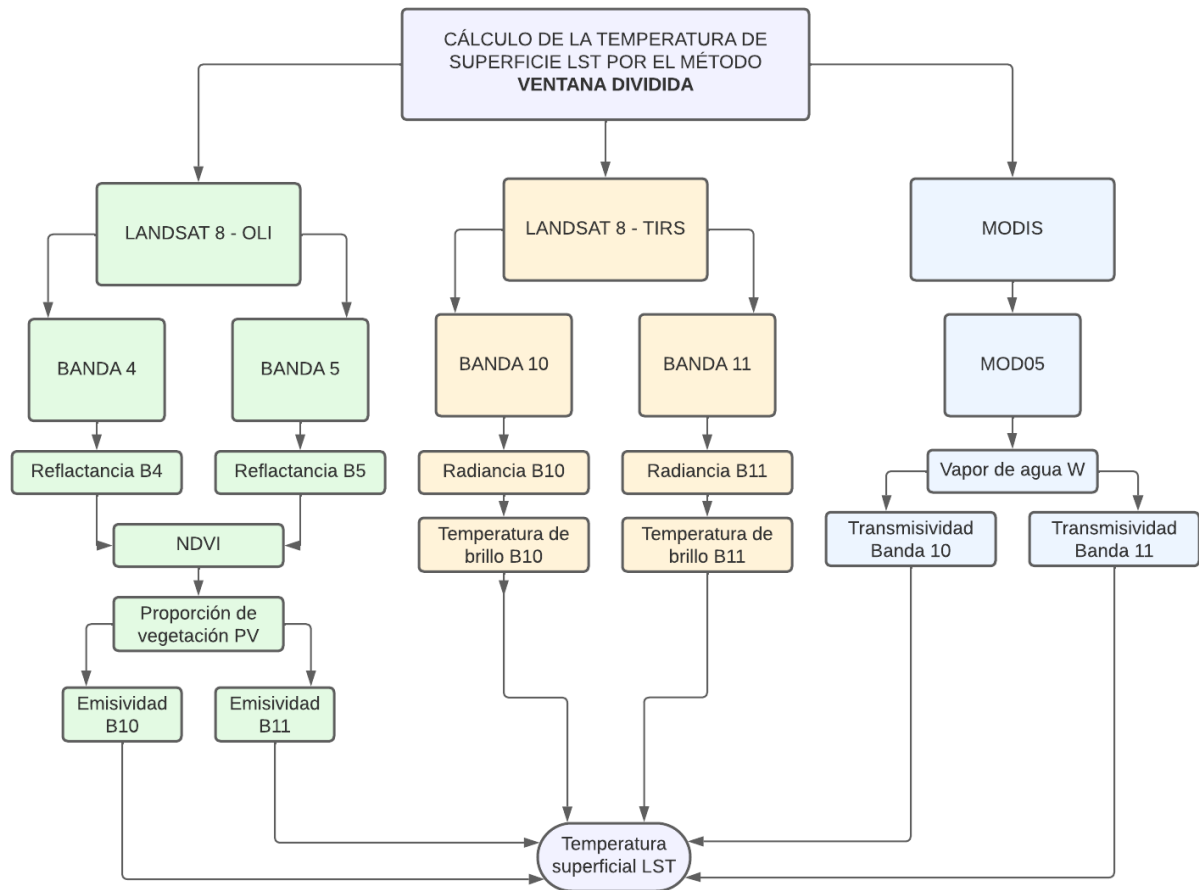


Figura 37: Diagrama de procesos para el cálculo de la temperatura superficial LST por el método ventana dividida. Fuente: Elaboración propia

Para realizar el cálculo de la temperatura superficial por medio del método **Ventana Dividida**, se deben de procesar las imágenes de las bandas 4, 5 OLI y las imágenes de las bandas 10, 11 TIRS, además de procesar la imagen MODIS para el cálculo de vapor de agua W. Por lo que se detalla dicho procesamiento.

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 8 – OLI, BANDA 4 Y BANDA 5.

3.3.1.2.1. Reflectancia de la Banda 4 y la Banda 5.

Se convierte el valor de Nivel Digital (DN) de las bandas OLI en reflectancia TOA (parte superior de la atmosfera), considerando el ángulo de elevación solar.

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho}}{\sin(\theta)}$$

Ecuación 9: Reflectancia TOA de la Banda OLI.

Donde:

ρ_{λ} = reflectancia planetaria TOA (sin unidades)

M_{ρ} = Factor de escala multiplicativo de reflectancia para la banda (a partir de metadatos)

Q_{cal} = valor de píxel

A_{ρ} = factor de escala aditivo de reflectancia de la banda

θ = ángulo de elevación solar

Para la banda 4 y 5 el factor de escala multiplicativo de reflectancia M_{ρ} y factor de escala aditivo de reflectancia A_{ρ} son los siguientes:

```

REFLECTANCE_MULT_BAND_1 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_2 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_3 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_4 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_5 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_6 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_7 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_8 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_MULT_BAND_9 = 2.0000E-05
REFLECTANCE_ADD_BAND_1 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_2 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_3 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_4 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_5 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_6 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_7 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_8 = -0.100000
REFLECTANCE_ADD_BAND_9 = -0.100000

```

Figura 38: Factor de escala multiplicativo y factor de escala aditivo de reflectancia, Fuente: metadatos de la imagen satelital descargada.

$Qcal$ hace referencia al ráster de cada banda, en este caso el ráster de la banda 4 o la banda 5.

θ es el ángulo de elevación solar que se obtiene de metadatos de la imagen descargada, el cual varía dependiendo el lugar de interés.

SUN_AZTMUTH = 74.19534958
SUN_ELEVATION = 66.19371161
EARTH_SUN_DISTANCE = 1.0101969

Figura 39: Ángulo de elevación solar obtenido de metadatos. Fuente: Metadatos.

- ✓ Cálculo de la reflectancia en QGIS.

Para el cálculo de la reflectancia en QGIS se utiliza la calculadora ráster donde se ubica la ecuación correspondiente tanto para la banda 4 como para la banda 5, obteniendo como resultado un ráster de la reflectancia de la banda 4 y un ráster de la reflectancia de la banda 5.

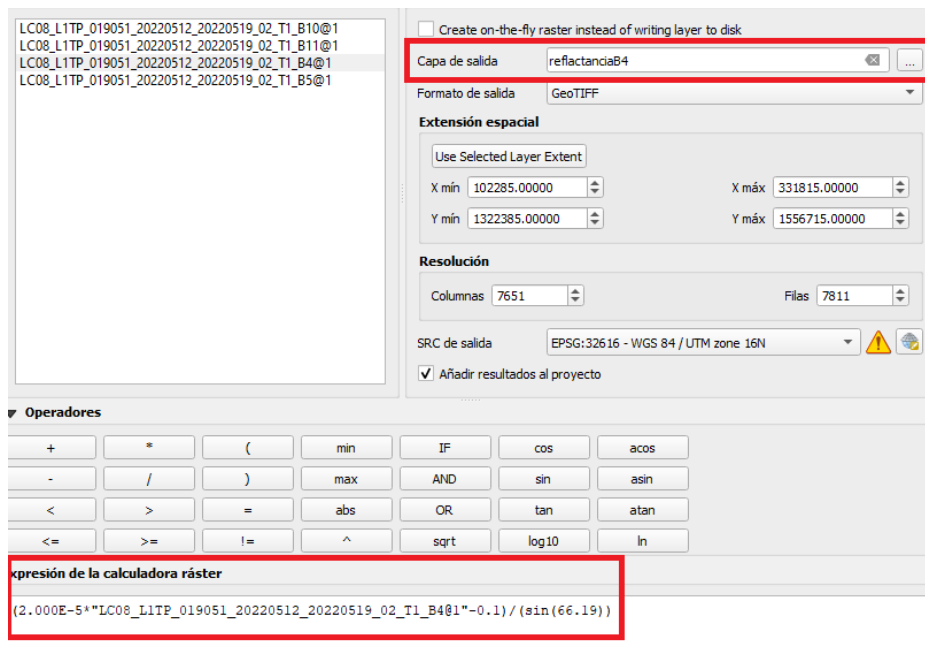


Figura 40: Cálculo de la reflectancia de la banda 4 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

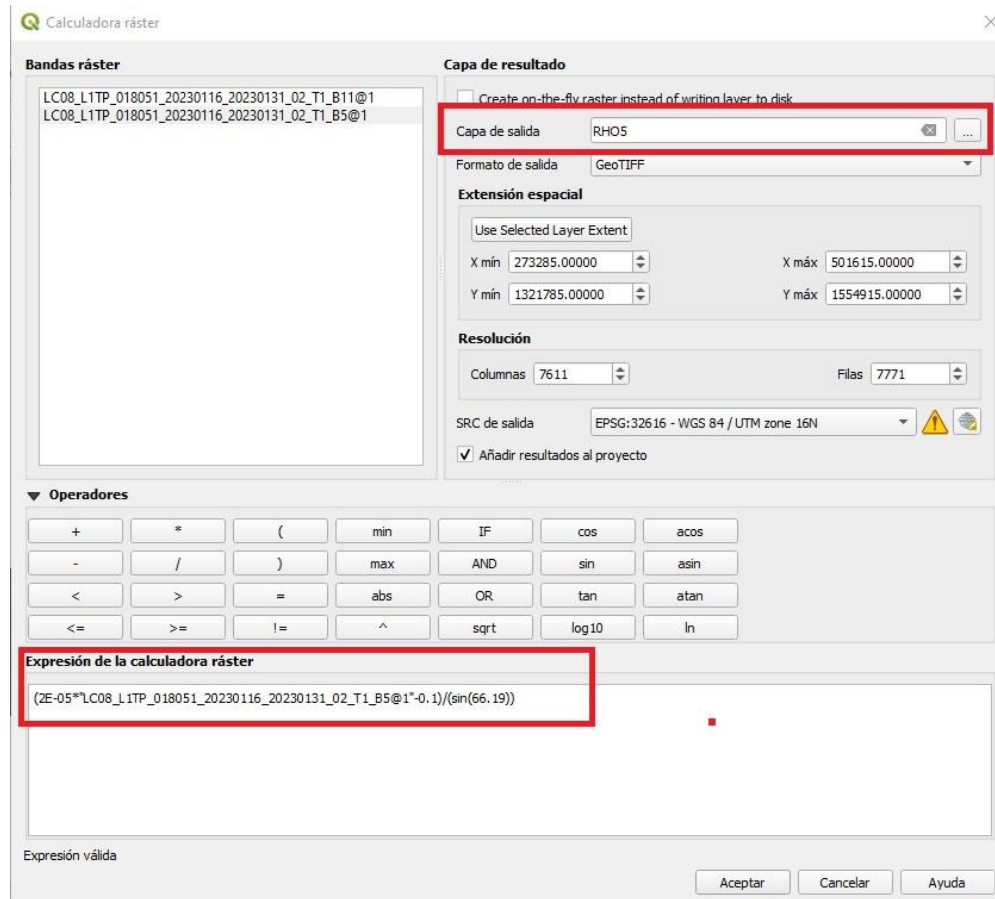


Figura 41: Cálculo de la reflectancia de la banda 5 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.2. Índice de Vegetación Normalizada NDVI.

El NDVI se calcula a partir de imágenes de satélite y de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\text{Reflectancia B5} - \text{Reflectancia B4}}{\text{Reflectancia B5} + \text{Reflectancia B4}}$$

Ecuación 10: NDVI por medio de la reflectancia de la banda 4 y 5.

Donde:

Reflectancia B4: Es la reflectancia calculada de la banda 4.

Reflectancia B5: Es la reflectancia calculada de la banda 5.

✓ Rango del NDVI

Este índice está definido por valores que van de -1.0 a 1.0, donde los valores negativos están formados principalmente por nubes, agua y nieve, y los valores negativos cercanos a cero están formados principalmente por rocas y suelo descubierto.

Los valores muy pequeños (0,1 o menos) de la función NDVI corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve.

Los valores moderados (de 0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores grandes (de 0,6 a 0,8) indican bosques templados y tropicales.

✓ Cálculo del NDVI en QGIS.

Para el cálculo del índice NDVI en QGIS, se debe utilizar la Calculadora de Ráster QGIS cargando los datos necesarios.

Aplicando la *Ecuación 10* en la calculadora ráster de QGIS obtenemos el ráster del NDVI.

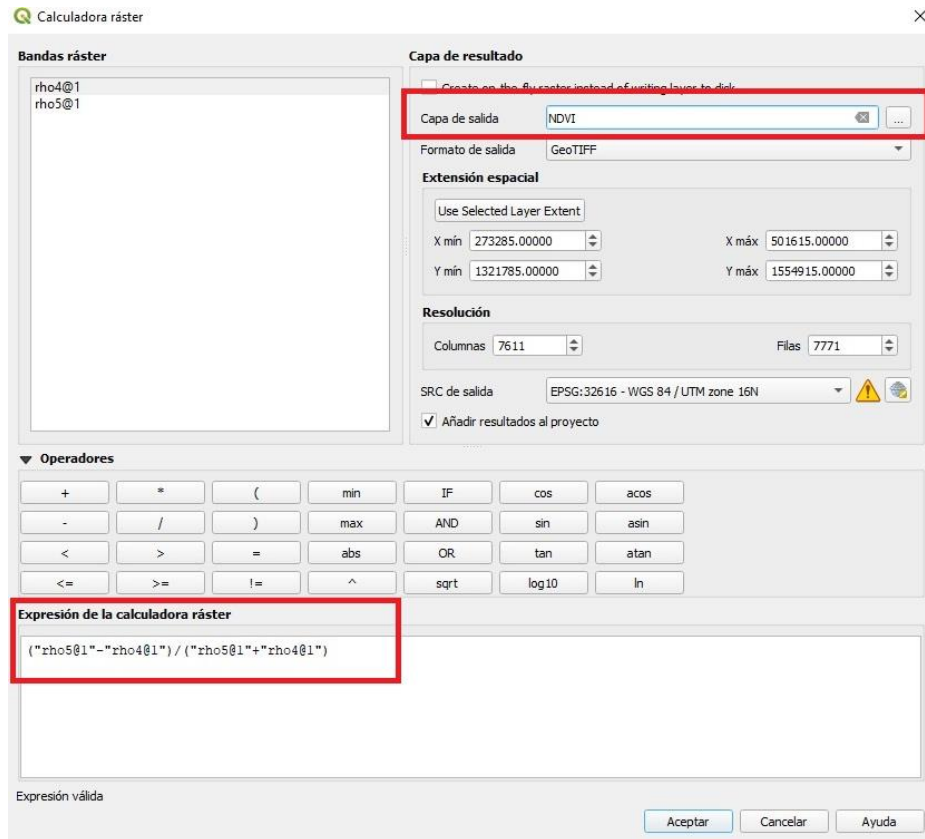


Figura 42: Cálculo del NDVI en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.3. Proporción de vegetación PV.

La fórmula de la proporción de vegetación PV es la siguiente:

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

Ecuación 11: Proporción de Vegetación PV

Donde:

NDVI= Índice de Vegetación Normalizado

NDVI_{min}= Valor mínimo en el rango del ráster NDVI calculado

NDVI_{max}= Valor máximo en el rango del ráster NDVI calculado

- ✓ Cálculo de la Proporción de Vegetación PV en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 11* en la calculadora ráster de QGIS obtenemos el ráster de PV.

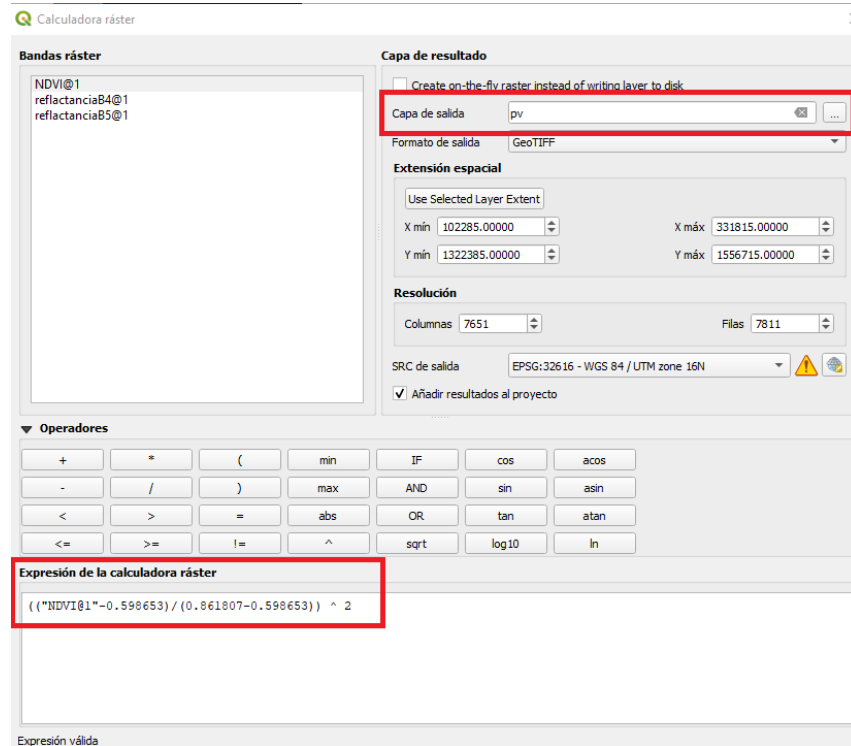


Figura 43: Cálculo de la Proporción de Vegetación PV en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.4. Emisividad de superficie terrestre ϵ de la banda 10 y 11.

La emisividad se puede calcular por el método del umbral NDVI este método consiste en estimar la emisividad del área de estudio de varias superficies terrestres en el rango de 10-12 μm , coincidiendo con el rango térmico de los sensores TIRS (10.5-12.5 μm).

$$\epsilon_t = \left\{ \begin{array}{ll} a_t Q_{red} + b_t & NDVI < 0.2 \\ \epsilon_{v,t} P_v + \epsilon_{s,t} (1 - P_v) + C_t & 0.2 \leq NDVI \leq 0.5 \\ \epsilon_{v,t} + C_t & NDVI \geq 0.5 \end{array} \right.$$

Ecuación 12: Emisividad a partir del método del umbral NDVI.

Donde:

P_v es la proporción de vegetación

$\epsilon_{v,i}$ = emisividad de vegetación (Banda 10 TIRS = 0.9863 y Banda 11 TIRS = 0.9896),

$\epsilon_{s,i}$ = emisividad del suelo (Banda 10 TIRS = 0.9668 y Banda 11 TIRS = 0.9747),

C_i = superficie rugosa = $(1 - \epsilon_{s,i}) * \epsilon_{v,i} * F'$ *(1 - P_v) el factor F' es el factor de geometría y su rango está entre 0 y 1 pero típicamente es de 0.55.

En el caso del suelo desnudo ($NDVI < 0.2$ y $P_v = 0$), la emisividad de la banda 10 y 11 (en la primera sección del umbral) es: $\epsilon_{10} = 0.973 - 0.047\rho_4$ y $\epsilon_{11} = 0.984 - 0.026\rho_4$, y ρ_4 es la reflectancia de las bandas OLI.

- ✓ Cálculo de la emisividad de la banda 10 y 11 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 12* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de emisividad para la banda 10 y para la banda 11.

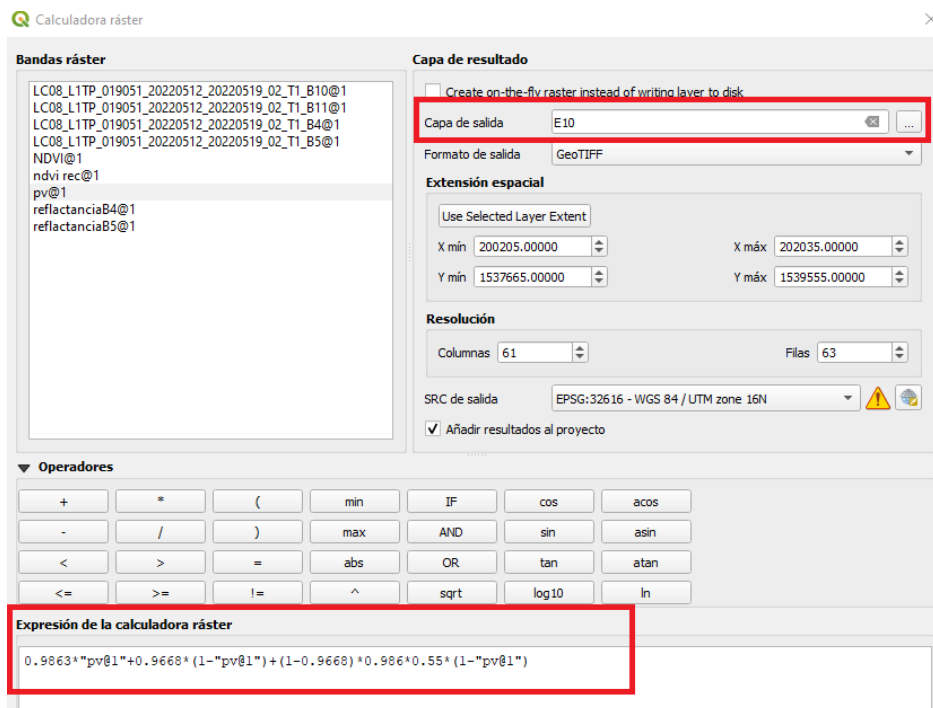


Figura 44: Cálculo de la emisividad de la banda 10. Fuente: Elaboración propia

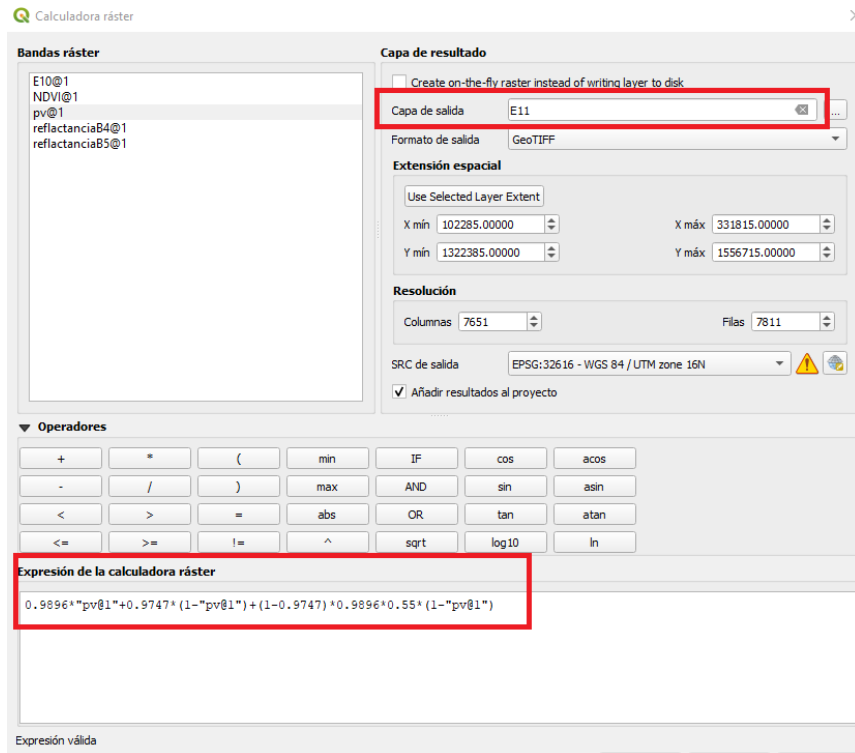


Figura 45: Cálculo de la emisividad de la banda 11. Fuente: Elaboración propia

PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES LANDSAT 8 – TIRS, BANDA 10 Y BANDA 11.

3.3.1.2.5. Radiancia de las bandas térmicas 10 y 11.

Los valores de píxel de la banda 10 y banda 11 se convierten en valores de radiancia utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L$$

Ecuación 13: Radiancia espectral.

Donde:

L_{λ} = radiancia espectral ($W/m^2 * sr * \mu m$),

M_L = Factor de escala multiplicativo de radiancia para la banda (a partir de metadatos),

Q_{cal} = valor de píxel,

A_L = factor de escala aditivo de radiancia de la banda.

```

GROUP = LEVEL1_RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2304E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.2599E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.1610E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 9.7901E-03
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 5.9910E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.4899E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.0218E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1080E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.3414E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -61.51780
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -62.99497
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -58.04933
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -48.95047
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -29.95524
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.44960
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.51091
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -55.39845
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -11.70719
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000

```

Figura 46: Factor de escala multiplicativo y aditivo de radiancia obtenidos de metadatos.

Fuente: Metadatos de imagen satelital descargada.

- ✓ Cálculo de la Radiancia de las Bandas térmicas 10 y 11 en QGIS.

Aplicando la Ecuación 13 en la calculadora ráster para cada una de las Bandas (10 y 11), obtenemos el ráster de Radiancia para la Banda 10 y 11 respectivamente.

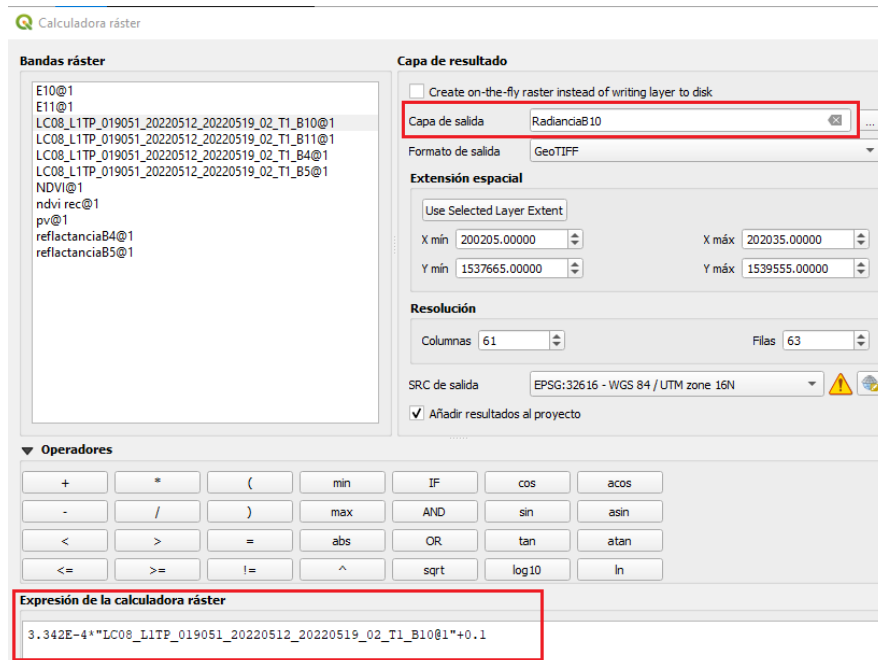


Figura 47: Cálculo de la radiancia de la Banda 10 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

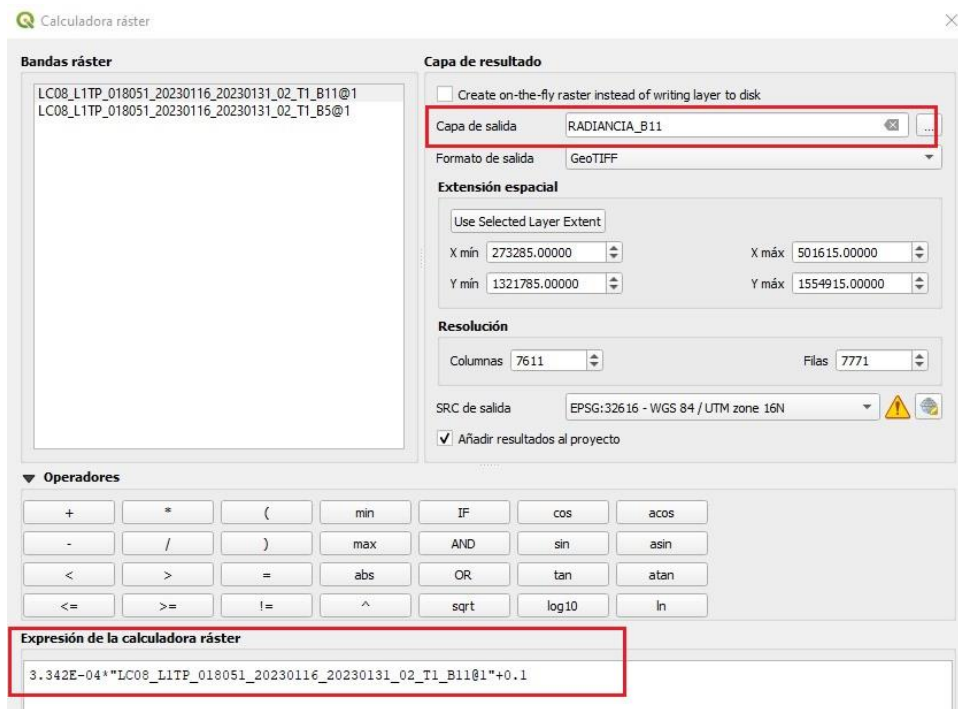


Figura 48: Cálculo de la radiancia de la Banda 11 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.6. Temperatura de brillo de la banda 10 y 11.

Los valores de radiancia de las bandas termales fueron transformados a temperaturas de brillo usando la siguiente ecuación:

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

Ecuación 14: Temperatura de Brillo.

Donde:

T_i = es la temperatura de brillo de las bandas TIRS.

K1 y K2 = coeficientes de conversión térmica de las bandas, obtenidas de la metadata.

```

GROUP = LEVEL1_THERMAL_CONSTANTS
K1_CONSTANT_BAND_10 = 774.8853
K2_CONSTANT_BAND_10 = 1321.0789
K1_CONSTANT_BAND_11 = 480.8883
K2_CONSTANT_BAND_11 = 1201.1442

```

Figura 49: Coeficientes de conversión térmica de las bandas 10 y 11, las cuales se obtuvieron de metadatos. Fuente: Elaboración propia.

L_{λ} = radiancia de las bandas térmicas.

- ✓ Cálculo de la Temperatura de Brillo en QGIS.

Aplicando la Ecuación 14 en la calculadora ráster para cada una de las Bandas (10 y 11), obtenemos el ráster de Temperatura de Brillo de la Banda 10 y 11 respectivamente.

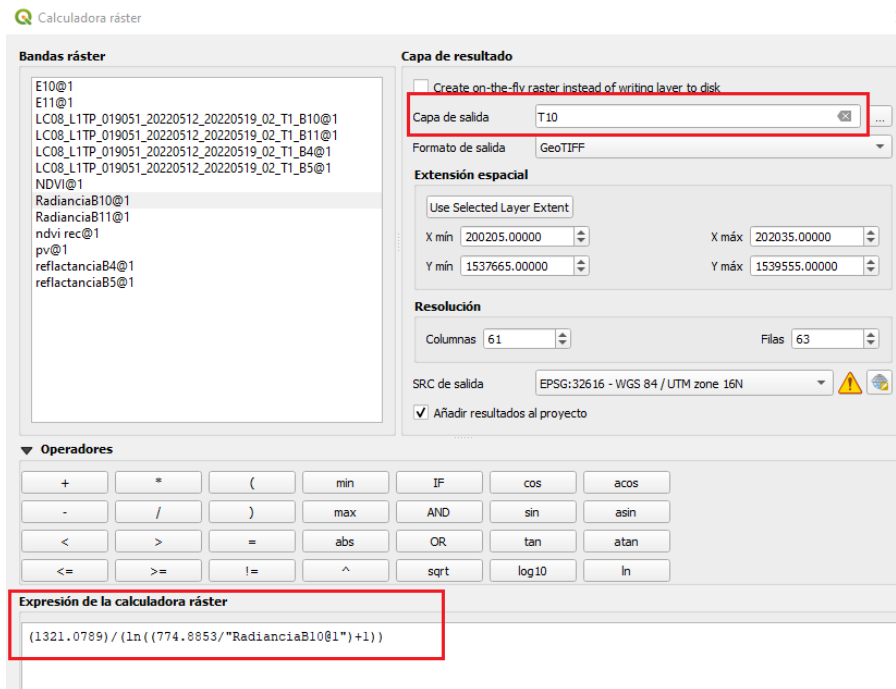


Figura 50: Cálculo de la temperatura de brillo de la banda 10 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

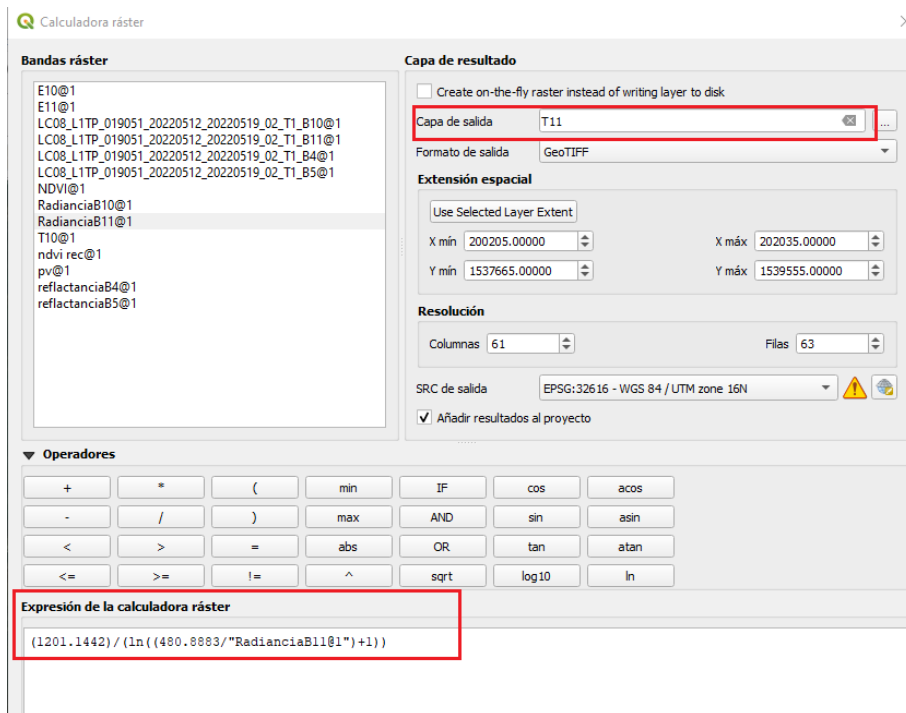


Figura 51: Cálculo de la temperatura de brillo de la banda 11 en QGIS. Fuente: Elaboración propia

PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DE MODIS.

3.3.1.2.7. MOD05_L2.

El producto MODIS Precipitable Water consiste en cantidades de columna de vapor de agua. Durante el día, se aplica un algoritmo de infrarrojo cercano sobre áreas terrestres despejadas del globo y sobre las nubes tanto en la tierra como en el océano. Sobre áreas oceánicas despejadas, se proporcionan estimaciones de vapor de agua. sobre el área extendida de destello. También se aplica un algoritmo infrarrojo para derivar perfiles atmosféricos tanto de día como de noche para el Nivel 2. Hay dos archivos de producto de datos de vapor de agua MODIS: MOD05_L2, que contiene datos recopilados de la plataforma Terra; y MYD05_L2, que contiene datos recopilados de la plataforma Aqua.

Los datos de Nivel 2 se generan con una resolución espacial de 1 km del instrumento MODIS utilizando el algoritmo de infrarrojo cercano durante el día, y con una resolución de píxeles de

5 km x 5 km tanto de día como de noche utilizando el algoritmo de infrarrojos, cuando al menos nueve Los FOV no tienen nubes. El vapor de agua precipitable derivado del infrarrojo se genera como un componente del producto Perfil atmosférico (MOD07) y simplemente se agrega al MOD05 para mayor comodidad. El algoritmo de recuperación solar se basa en observaciones de la atenuación del vapor de agua de la radiación solar reflejada en los canales MODIS del infrarrojo cercano, de modo que el producto se produce solo en áreas donde hay una superficie reflectante en el IR cercano.

El agua precipitable de la columna total en el infrarrojo cercano es muy sensible al vapor de agua de la capa límite, ya que se deriva de la atenuación de la luz solar reflejada desde la superficie. Este producto de datos es esencial para comprender el ciclo hidrológico, las propiedades de los aerosoles, las interacciones entre aerosoles y nubes, el presupuesto energético y el clima. De particular interés es la recopilación de datos de vapor de agua por encima de los cirros, que tiene importantes aplicaciones para los estudios climáticos. (LAADS DAAC, 2023)

- ✓ Descarga de imagen MOD05_L2.

Para obtener la imagen MOD05_L2 ingresamos al sitio web LAADS DAAC de la NASA, la interfaz se muestra en la siguiente figura.

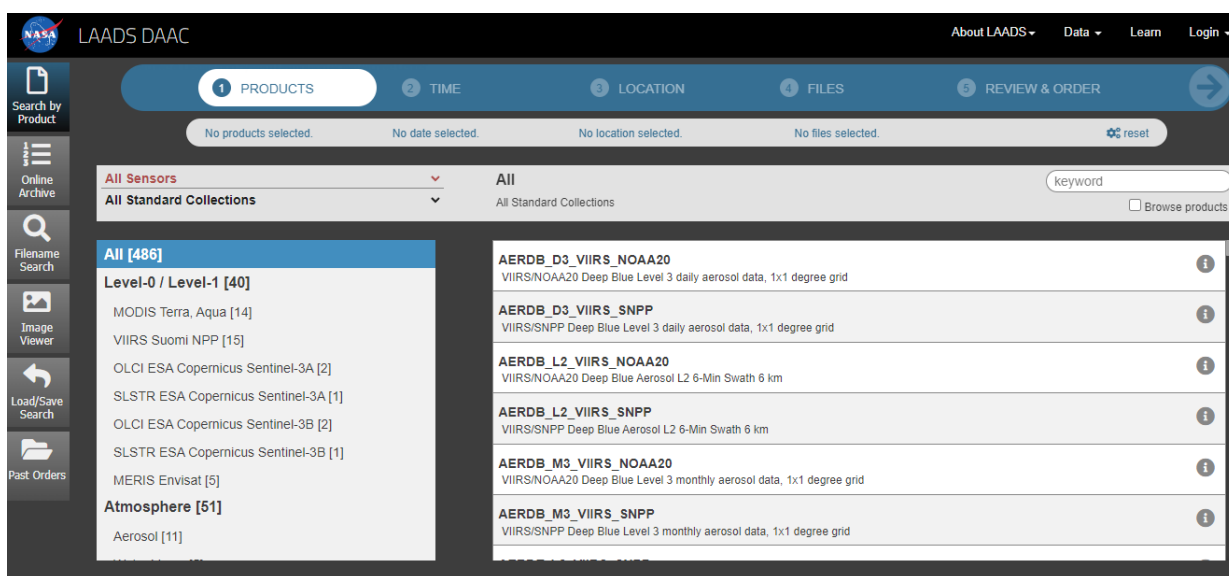


Figura 52: Interfaz del sitio web LAADS DAAC de la NASA. Fuente: LAADS DAAC. (2023).

Posteriormente seguimos 4 pasos para la descarga de la imagen de interés.

1. Seleccionamos el producto MOD05_L2:

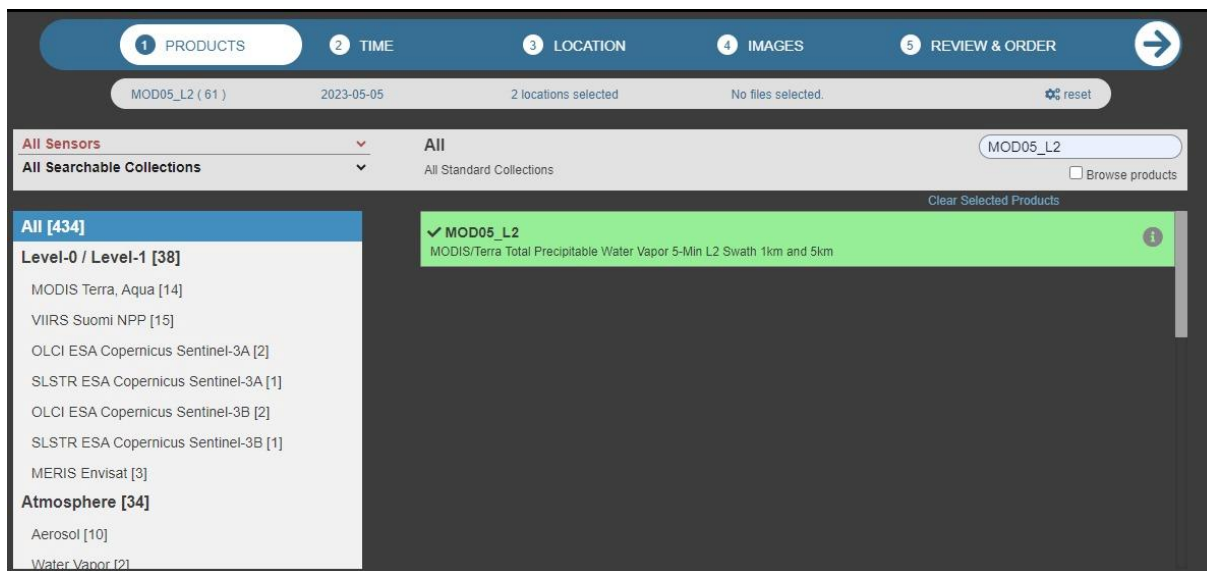


Figura 53: Selección del producto. Fuente: LAADS DAAC. (2023).

2. Posteriormente seleccionamos la fecha de interés, la cual hace referencia a la fecha de la visita de campo.

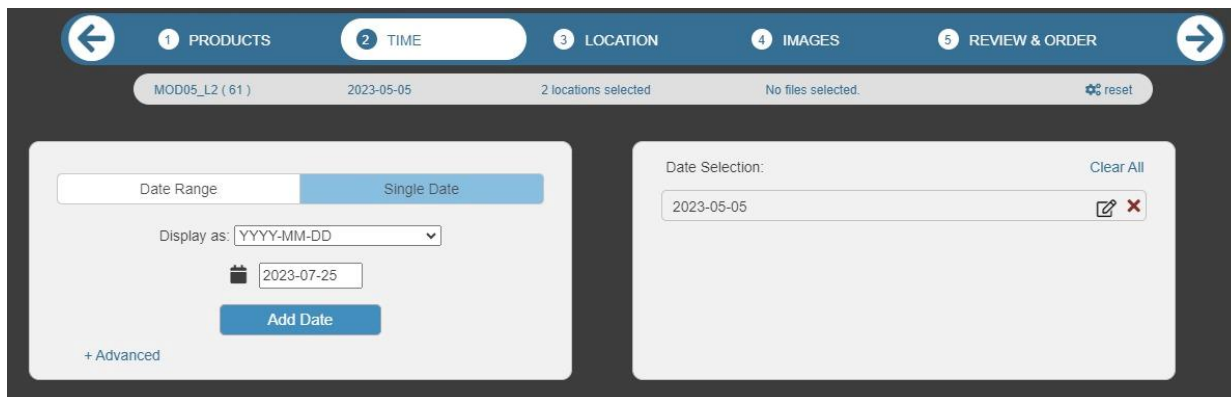


Figura 54: Registro de la fecha de interés. Fuente: LAADS DAAC. (2023).

3. Se selecciona la ubicación de interés

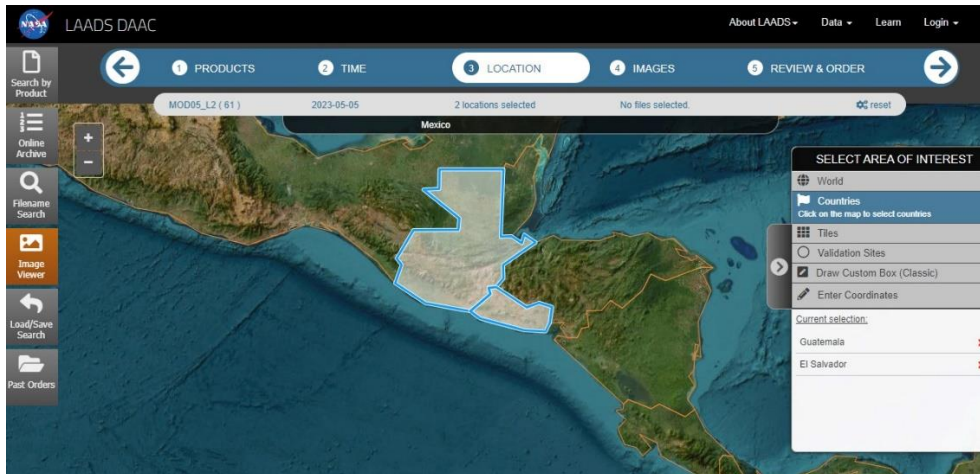


Figura 55: Registro de la ubicación de interés. Fuente: LAADS DAAC. (2023).

4. Se obtiene la imagen con los parámetros de la búsqueda realizada.

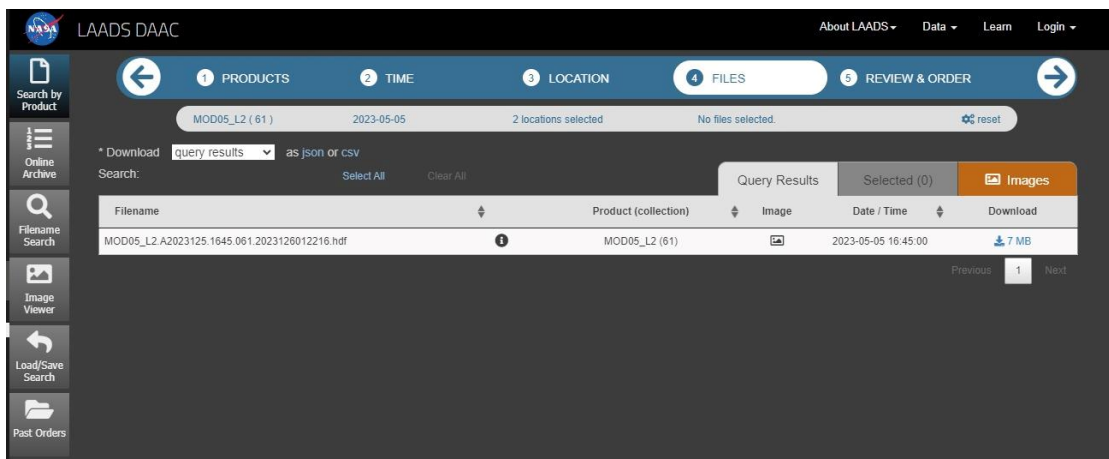


Figura 56: obtención de la imagen, con parámetros de la búsqueda realizada. Fuente: LAADS DAAC. (2023).

✓ MOD05_L2 en QGIS.

Al cargar la imagen en QGIS, se selecciona el vapor de agua del infrarrojo cercano.

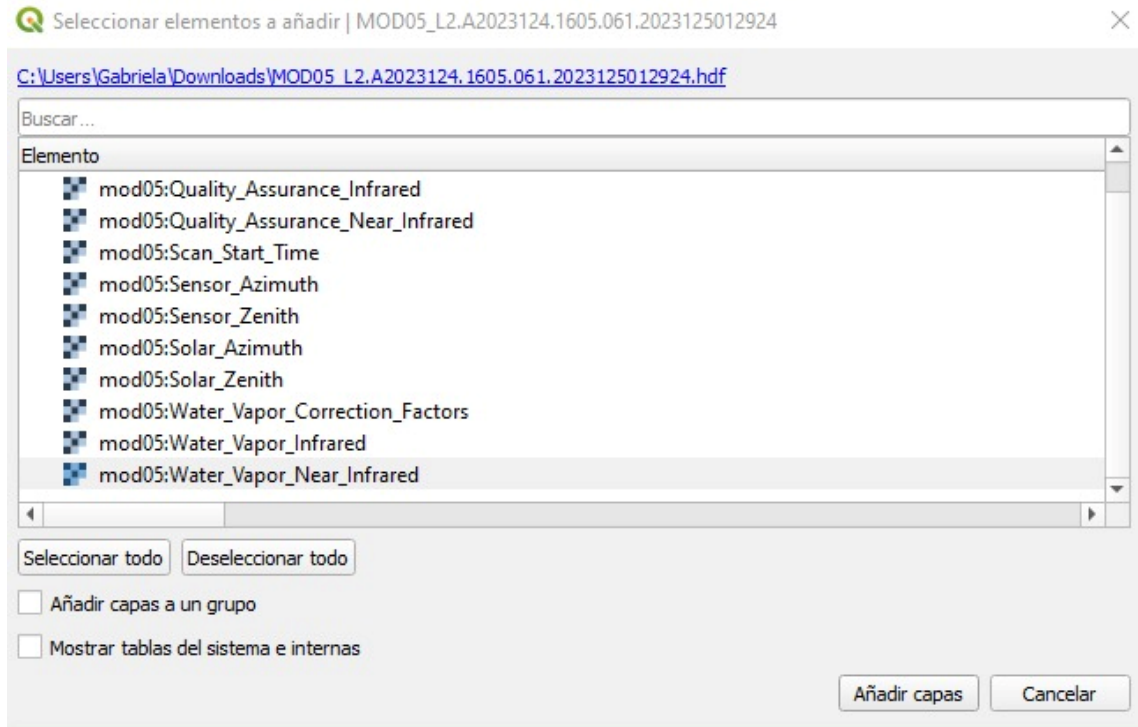


Figura 57: Selección de la capa de interés en nuestro caso vapor de agua del infrarrojo cercano. Fuente: Elaboración propia

Al seleccionar nuestra capa de interés, se muestra la imagen MOD05_L2

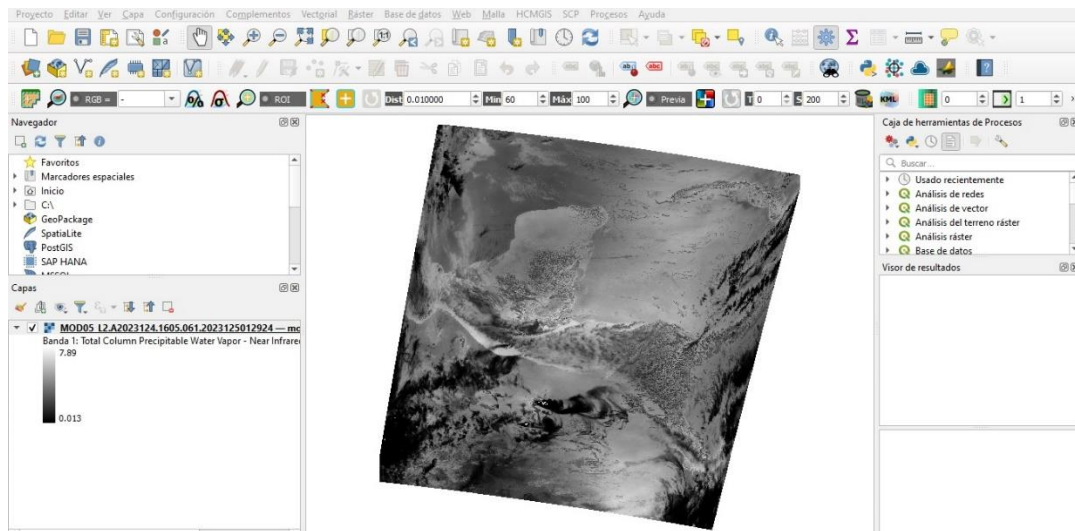


Figura 58: Capa de interés de la imagen MOD05_L2. Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.8. Transmisividad Banda 10 y Banda 11.

✓ Transmisividad Atmosférica

Es la parte de la irradiancia que transmite la superficie receptora. Las radiancias espectrales que son reflejadas desde la superficie terrestre hacia el sensor dependen de muchos factores, destacando las variaciones de la irradiancia solar, las condiciones atmosféricas y meteorológicas, las propiedades reflectivas de la superficie y las condiciones del sensor.

La Tierra siempre recibe radiación electromagnética por medio del Sol, pero antes de que la energía electromagnética del sol alcance a la superficie de la Tierra, esta debe pasar a través de la atmósfera. La atmósfera protege a la Tierra de exposición a radiación de mayor energía que puede ser dañina para la vida, así como los rayos X o los rayos gamma. Cuando la radiación electromagnética pasa a través de la atmósfera, esta interactúa con las moléculas y partículas presentes en la atmósfera. En este proceso, la radiación electromagnética es reflejada o absorbida, y una porción de toda esa energía pasa a través de la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra.

Esto tiene implicaciones significantes en el área de *remote sensing*, ya que la mayor parte de la radiación detectada por sensores pasivos remotos pasa a través de la atmósfera donde interactúa con las moléculas y partículas en esta. En porciones del espectro electromagnético, cantidades significativas de energía son absorbidas por la atmósfera, con muy poca energía alcanzando a la superficie de la Tierra. Toda la radiación detectada por sensores remotos pasa a través de la atmósfera por cierta distancia, la cual puede ser muy grande en el caso de sensores instalados en satélites. (Andrés et al., 2021)

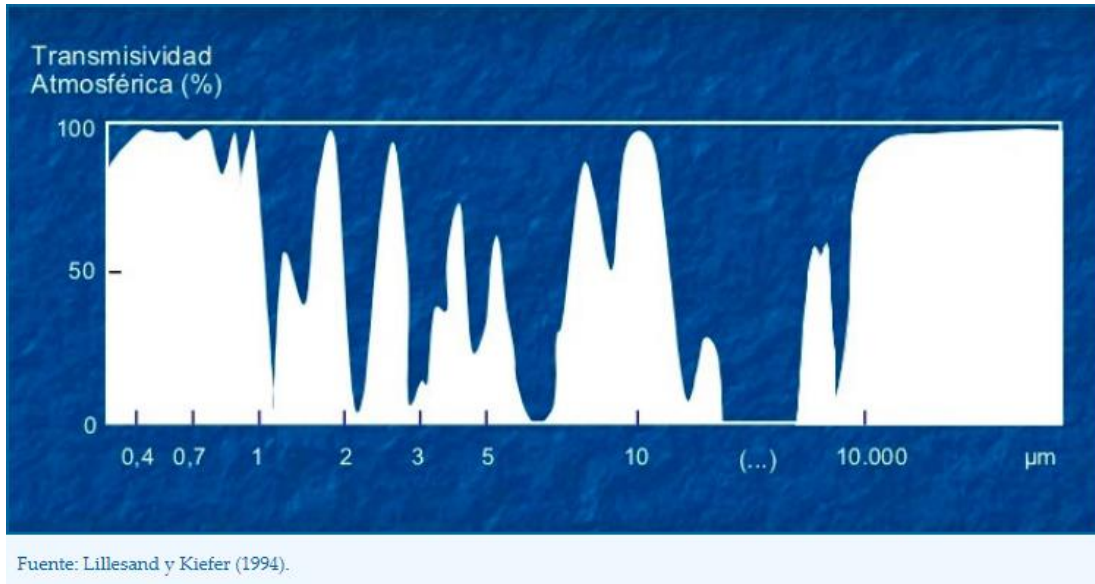


Figura 59: Transmisividad Atmosférica. Fuente: Lillesand y Kiefer 1994.

- ✓ Cálculo de la transmisividad atmosférica de la Banda 10 y la Banda 11

Al tener el ráster de vapor de agua en QGIS, se calcula la transmisividad de las bandas 10 y 11 a partir de la *Ecuación 15* y la *Ecuación 16* que se obtienen de una regresión cuadrática para la cual el valor variable es el vapor de agua.

$$\tau_{10} = -0.0164w^2 - 0.014203w + 0.9715$$

Ecuación 15: Transmisividad atmosférica de la Banda 10.

$$\tau_{11} = -0.01218w^2 - 0.07735w + 0.9603$$

Ecuación 16: Transmisividad atmosférica de la Banda 11.

Donde:

τ_{10} = Transmisividad de la banda 10.

τ_{11} = Transmisividad de la banda 11.

w = Vapor de agua.

- ✓ Cálculo de la transmisividad de la banda 10 y la banda 11 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 15* y la *Ecuación 16* en la calculadora ráster para cada una de las Bandas (10 y 11), obtenemos el ráster de transmisividad de la Banda 10 y 11 respectivamente.

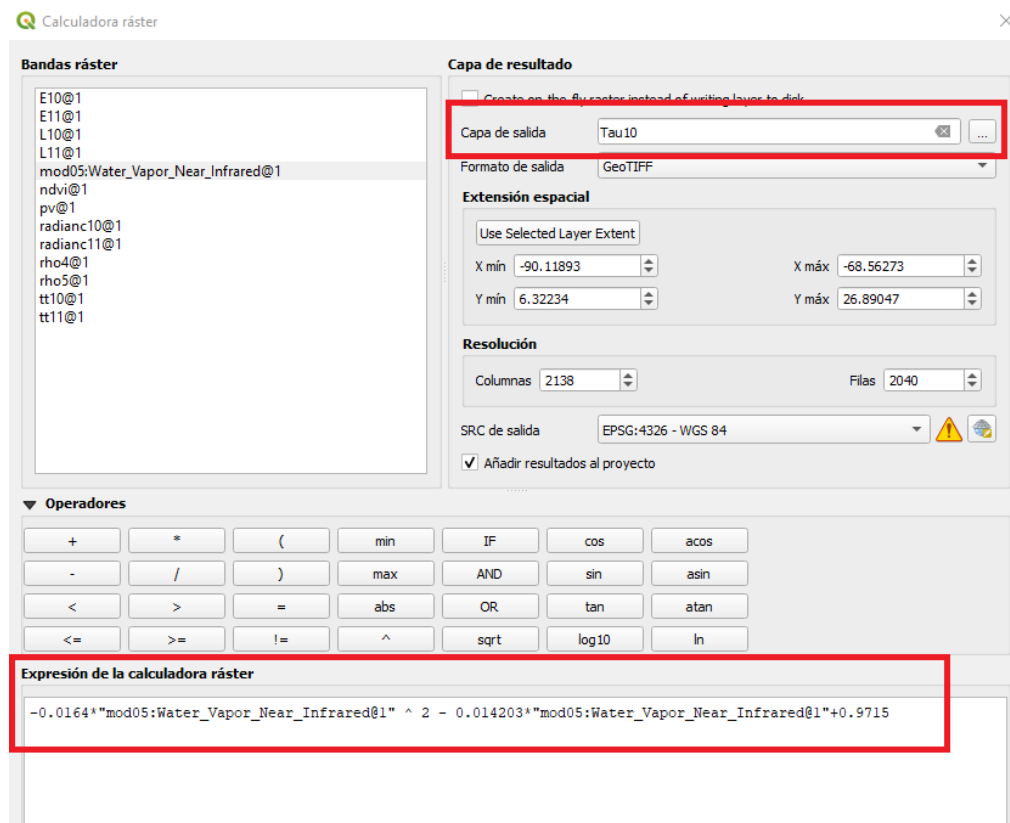


Figura 60: Cálculo de la transmisividad de la Banda 10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

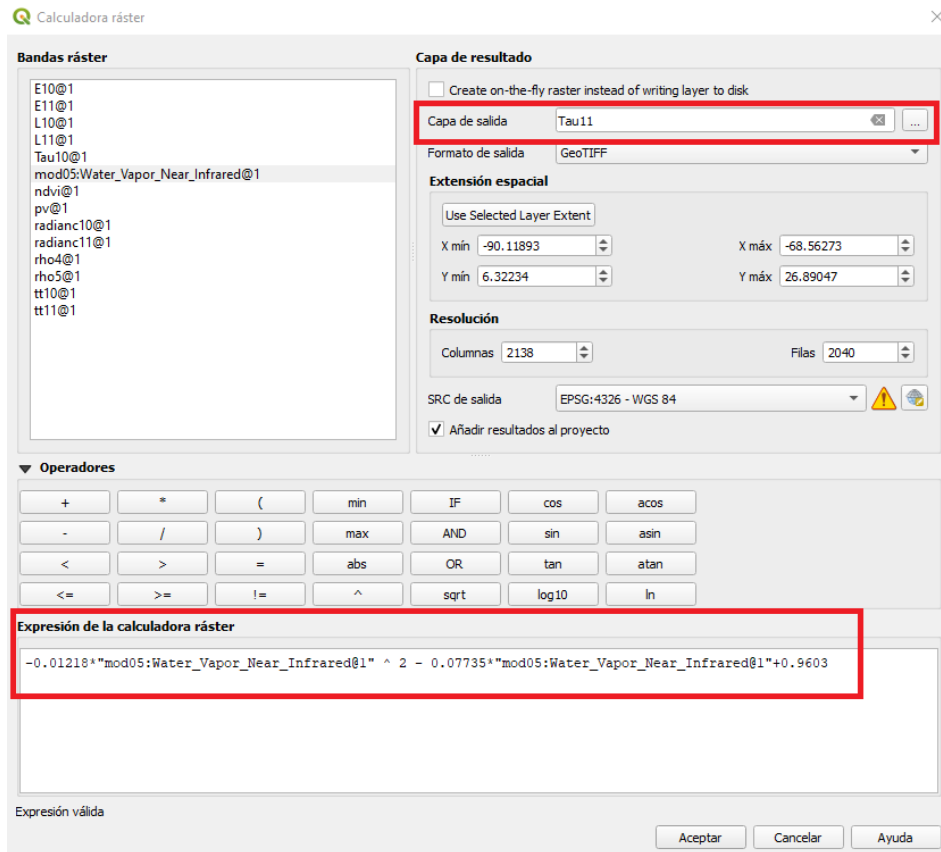


Figura 61: Cálculo de la transmisividad de la Banda 11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

VARIABLES PARA EL CALCULO DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE.

Tomando en cuenta la linealización de la ecuación de Planck (Planck, 1948), se toman en cuenta las siguientes variables las cuales dependen de los resultados obtenidos anteriormente.

3.3.1.2.9. Variable A10.

La fórmula de A10 es la siguiente:

$$A10 = \epsilon_{10} * \tau_{10}$$

Ecuación 17: Variable A10.

Donde:

ϵ_{10} = emisividad de la banda 10

τ_{10} = transmisividad de la banda 10

- ✓ Cálculo de la variable A10 en QGIS.

Aplicando la Ecuación 17 en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de A10.

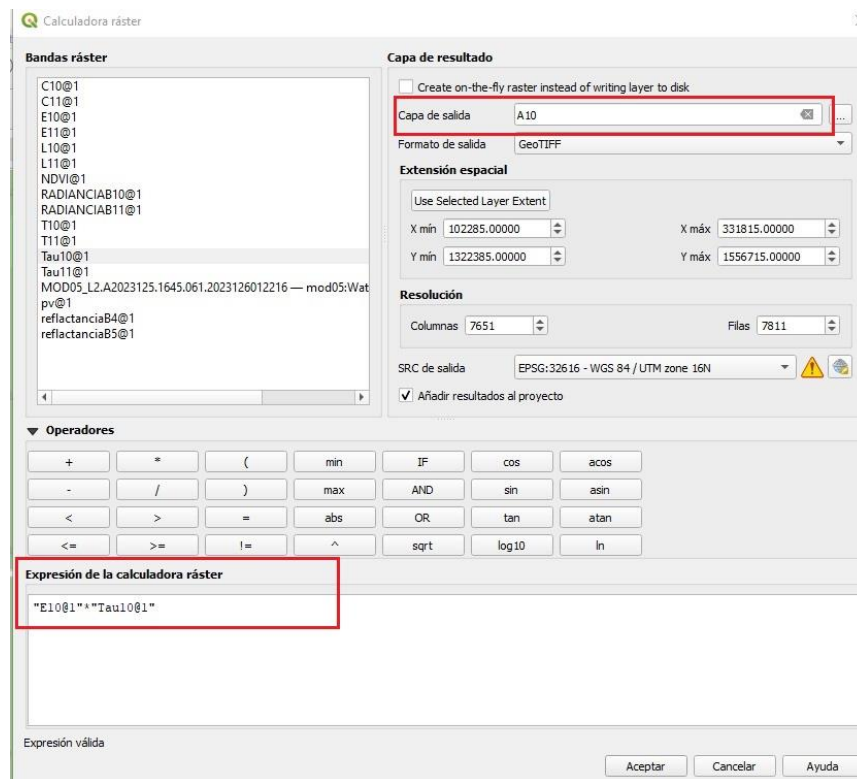


Figura 62: Cálculo de la variable A10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.10. Variable A11.

La fórmula de A11 es la siguiente:

$$A11 = \epsilon_{11} * \tau_{11}$$

Ecuación 18: Variable A11.

Donde:

ϵ_{11} = emisividad de la banda 11

τ_{11} = transmisividad de la banda 11

- ✓ Cálculo de la variable A11 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 18* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de A11.

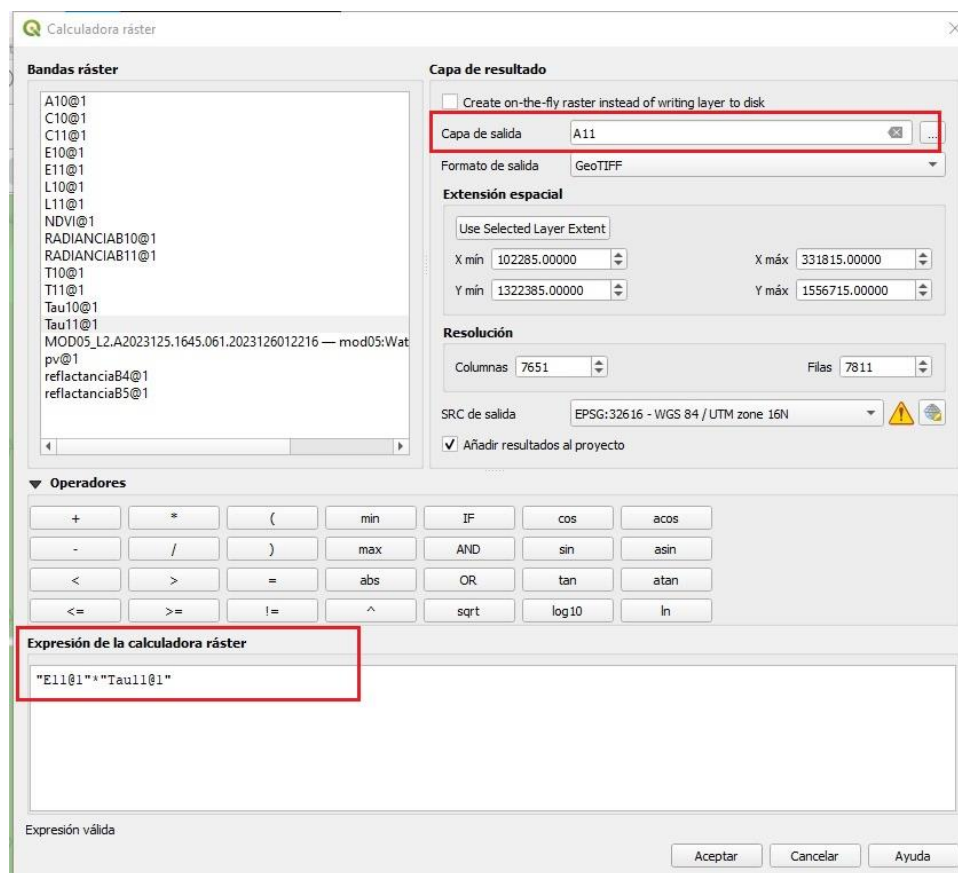


Figura 63: Cálculo de la variable A11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.11. Variable C10.

La fórmula de C10 es la siguiente:

$$C10 = (1 - \tau_{10}) * (1 + (1 - \epsilon_{10}) * \tau_{10})$$

Ecuación 19: Variable C10.

Donde:

ϵ_{10} = *emisividad de la banda 10*

τ_{10} = *transmisividad de la banda 10*

- ✓ Cálculo de la variable C10 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 19* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de C10.

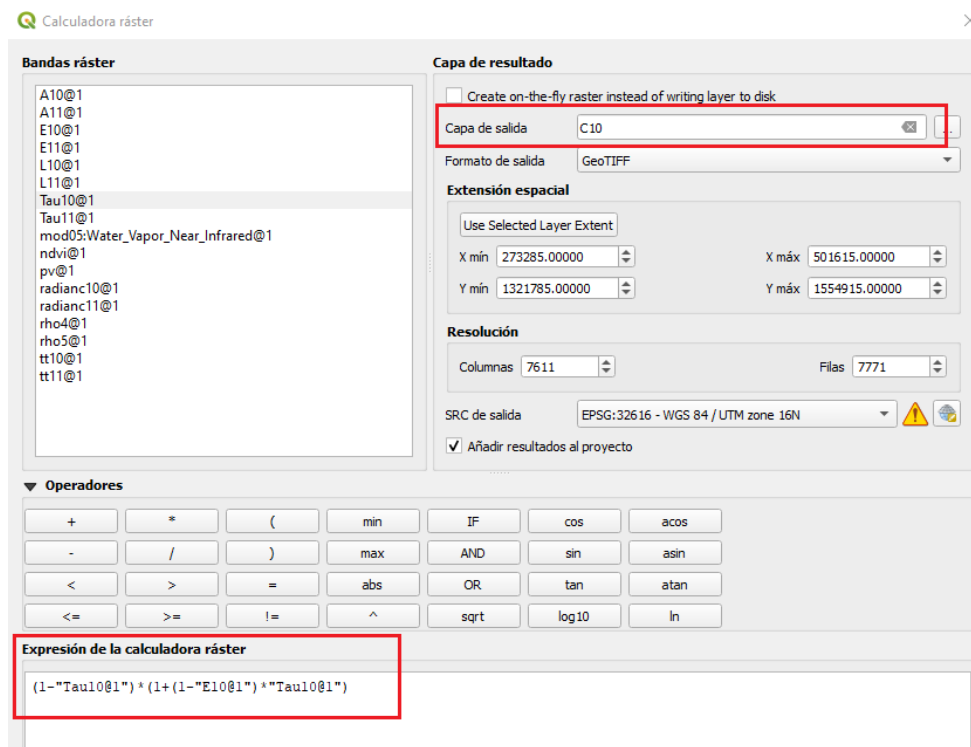


Figura 64: Cálculo de la variable C10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.12. Variable C11.

La fórmula de C11 es la siguiente:

$$C11 = (1 - \tau_{11}) * (1 + (1 - \epsilon_{11}) * \tau_{11})$$

Ecuación 20: Variable C11.

Donde:

ϵ_{11} = emisividad de la banda 11

τ_{11} = transmisividad de la banda 11

✓ Cálculo de la variable C11 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 20* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de C11.

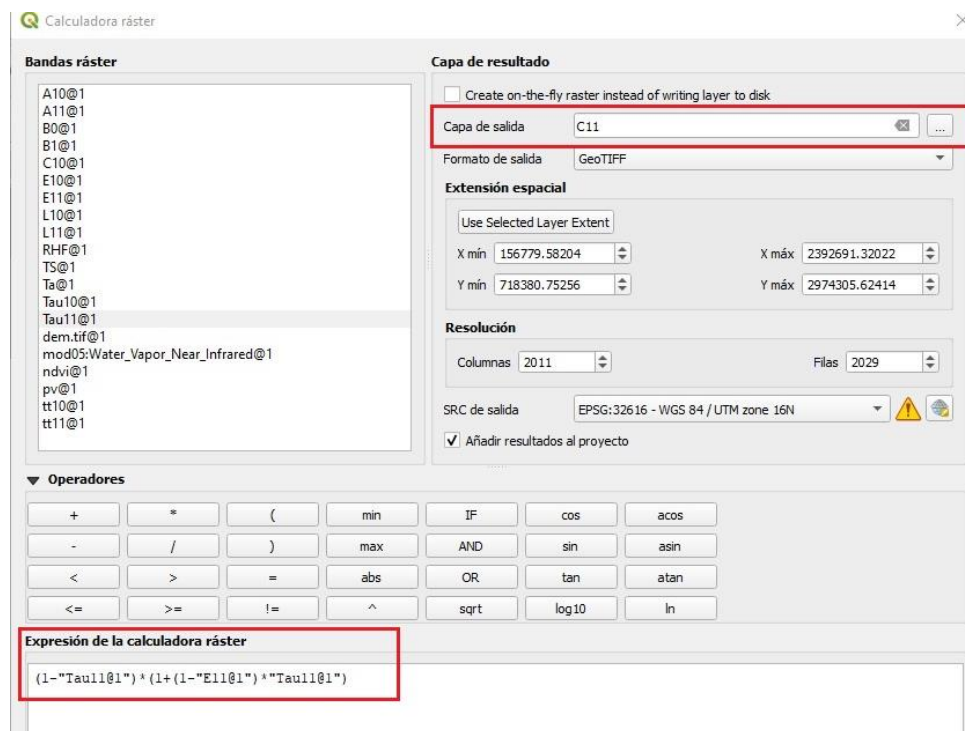


Figura 65: Cálculo de la variable C11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.13. Variable L10.

La fórmula de L10 es la siguiente:

$$L10 = -55.58 + 0.4087T10$$

Ecuación 21: Variable L10.

Donde:

L10 = Parametro de ajuste lineal para la banda 10

T10 = Temperatura de Brillo de la Banda 10

✓ Cálculo de la variable L10 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 21* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de L10.

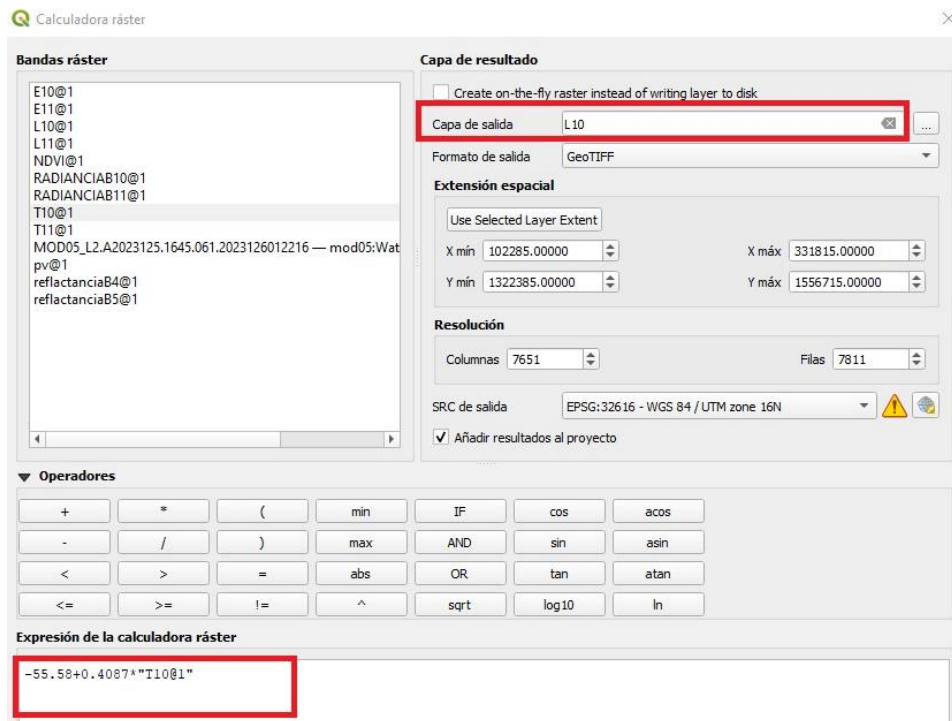


Figura 66: Cálculo de la variable L10 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.14. Variable L11.

La fórmula de L11 es la siguiente:

$$L11 = -59.85 + 0.4442T11$$

Ecuación 22: Variable L11.

Donde:

$L11 =$ *Parametro de ajuste lineal para la banda 11*

$T11 =$ *Temperatura de Brillo de la Banda 11*

- ✓ Cálculo de la variable L11 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 22* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de L11.

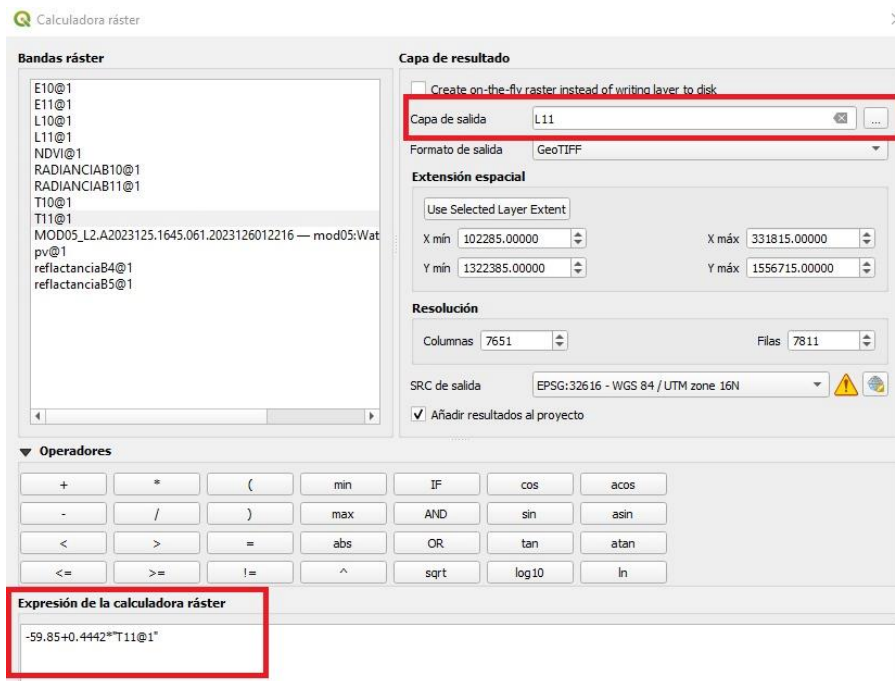


Figura 67: Cálculo de la variable L11 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.15. Variable B1.

La variable B1 se conforma por más variables con el fin de llevar un orden más eficaz evitando perdidas de datos.

La fórmula es la siguiente:

$$B1 = \frac{C10}{C11 * A10} - C10 * A11$$

Ecuación 23: Variable B1.

Donde:

A10 = Variable

A11 = Variable

C10 = Variable

C11 = Variable

✓ Cálculo de la variable B1 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 23* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de B1.

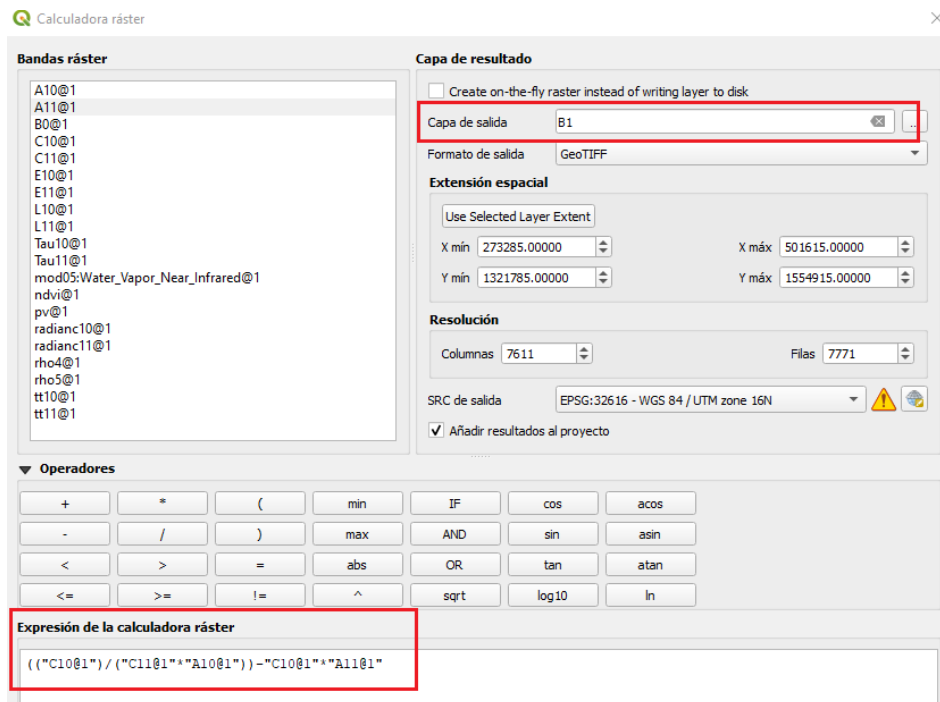


Figura 68: Cálculo de la variable B1 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.1.2.16. Variable B0.

La variable B0 se conforma por más variables con el fin de llevar un orden más eficaz evitando perdidas de datos.

La fórmula es la siguiente:

$$B0 = \frac{(C11(1 - A10 - C10) * L10 - C10(1 - A11 - C11)L11)}{(C11 * A10 - C10 * A11)}$$

Ecuación 24: Variable B0.

Donde:

A10 = Variable

A11 = Variable

C10 = Variable

C11 = Variable

L10 = Parametro de ajuste lineal para la banda 10

L11 = Parametro de ajuste lineal para la banda 11

✓ Cálculo de la variable B0 en QGIS.

Aplicando la *Ecuación 24* en la calculadora ráster, obtenemos el ráster de B0.

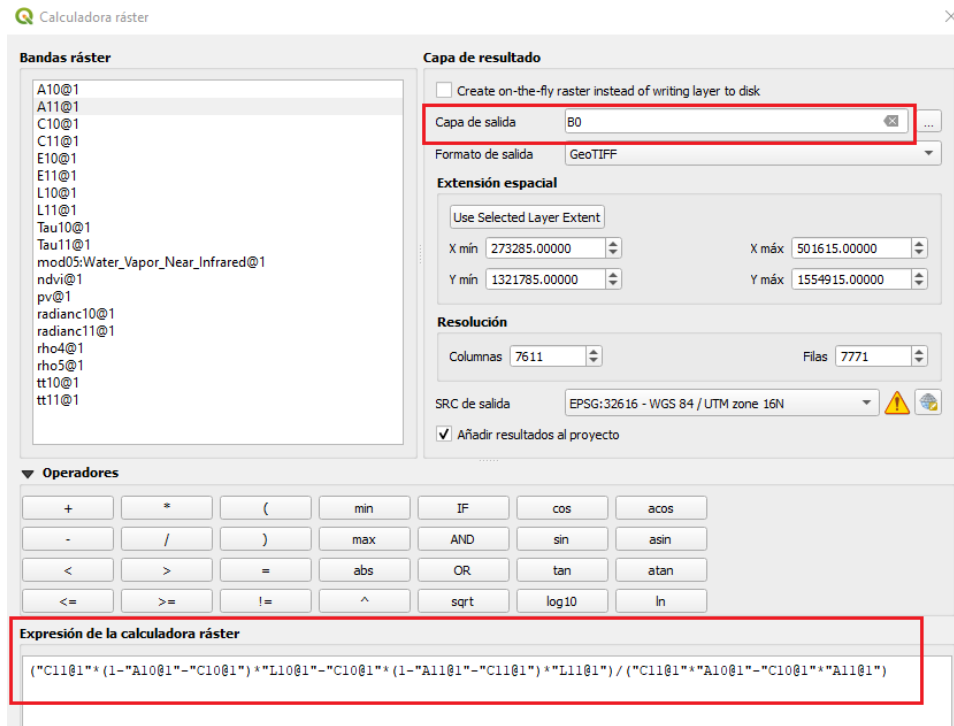


Figura 69: Cálculo de la variable B0 en QGIS. Fuente. Elaboración propia

CÁLCULO DEL LST CON DATOS OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE LAS BANDAS 4, 5, 10,11 (LANDSAT 8) Y VAPOR DE AGUA (MODIS-MOD05_L2)

La ecuación para el cálculo de la temperatura superficial (Mia et al., 2017b) es:

$$T_s = T_{10} + B_1(T_{10} - T_{11}) + B_0$$

Ecuación 25: Temperatura Superficial LST.

Donde:

Ts= LST en Kelvin,

T10 = temperatura de brillo de la banda 10,

T11 = temperatura de brillo de la banda 11,

B1 = Variable

B0 = Variable

✓ Cálculo del LST en QGIS.

Para el cálculo del LST en QGIS se utiliza la calculadora ráster donde se ubica la *Ecuación 25*, obteniendo como resultado un ráster del LST.

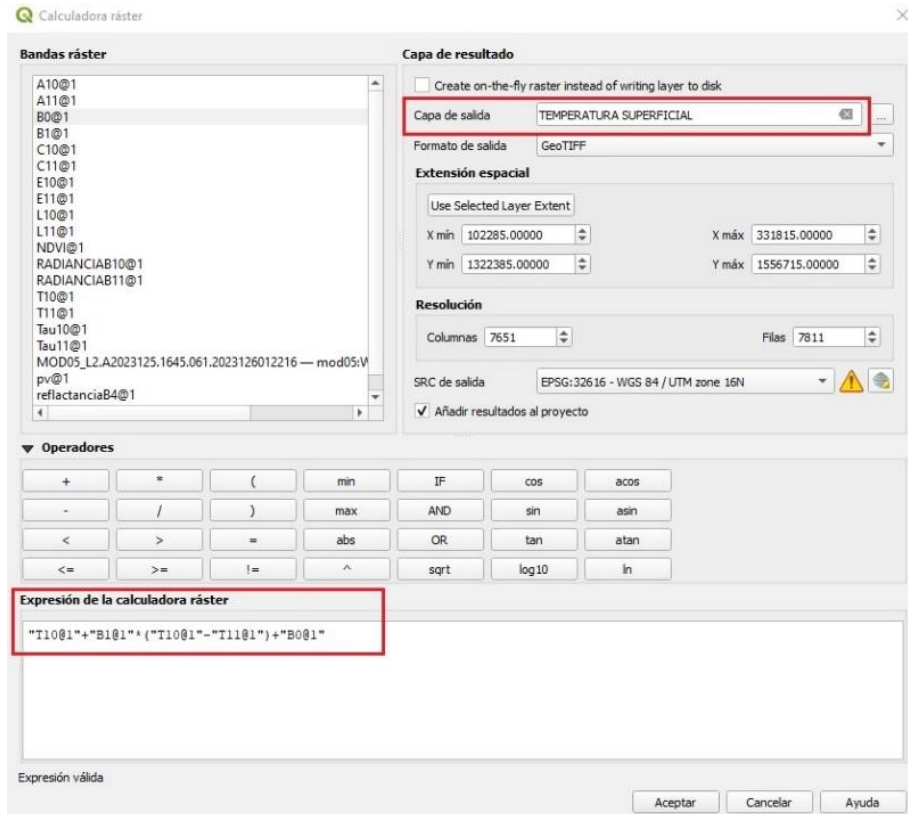


Figura 70: Cálculo de la Temperatura Superficial LST en QGIS. Fuente. Elaboración propia

3.3.2. Temperatura de Ambiente

3.3.2.1. Temperatura de ambiente obtenida por medio de ERA5-LAND. +

ERA5-Land es un conjunto de datos de reanálisis que proporciona una visión coherente de la evolución de las variables terrestres durante varias décadas con una resolución mejorada en comparación con ERA5. ERA5-Land ha reproducido el componente terrestre del reanálisis climático ECMWF ERA5. El reanálisis combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo en un conjunto de datos globalmente completo y consistente utilizando las leyes de la

física. El reanálisis produce datos que se remontan varias décadas atrás en el tiempo, proporcionando una descripción precisa del clima del pasado.

ERA5-Land utiliza como entrada para controlar los campos terrestres simulando las variables atmosféricas de ERA5, como la temperatura y la humedad del aire. Esto se llama el forzamiento atmosférico. Sin la restricción del forzamiento atmosférico, las estimaciones basadas en modelos pueden desviarse rápidamente de la realidad. Por lo tanto, aunque las observaciones no se utilizan directamente en la producción de ERA5-Land, tienen una influencia indirecta a través del forzamiento atmosférico utilizado para ejecutar la simulación. Además, la temperatura del aire de entrada, la humedad del aire y la presión utilizadas para ejecutar ERA5-Land se corrigen para tener en cuenta la diferencia de altitud entre la cuadrícula de forzamiento y la cuadrícula de mayor resolución de ERA5-Land. Esta corrección se llama 'corrección de tasa de caída'.

El conjunto de datos de ERA5-Land, como cualquier otra simulación, proporciona estimaciones que tienen cierto grado de incertidumbre. Los modelos numéricos solo pueden proporcionar una representación más o menos precisa de los procesos físicos reales que gobiernan los diferentes componentes del Sistema Terrestre. En general, la incertidumbre de las estimaciones del modelo crece a medida que retrocedemos en el tiempo, porque el número de observaciones disponibles para crear un forzamiento atmosférico de buena calidad es menor. Los campos de parámetros terrestres de ERA5 se pueden utilizar actualmente en combinación con la incertidumbre de los campos equivalentes de ERA5.

Las resoluciones temporales y espaciales de ERA5-Land hacen que este conjunto de datos sea muy útil para todo tipo de aplicaciones de superficie terrestre, como la previsión de inundaciones o sequías. La resolución temporal y espacial de este conjunto de datos, el período cubierto en el tiempo, así como la cuadrícula fija utilizada para la distribución de datos en cualquier período, permite a los tomadores de decisiones, empresas e individuos acceder y utilizar información más precisa sobre los estados de la tierra. (Copernicus, 2023)

DATOS DESCRIPCIÓN	
Tipo de datos	Cuadrículado
Proyección	Cuadrícula regular de latitud y longitud
Cobertura horizontal	Global
Resolución horizontal	0,1° x 0,1°; La resolución nativa es de 9 km.
Cobertura vertical	Desde 2 m sobre el nivel de la superficie, hasta una profundidad de suelo de 289 cm.
Resolución vertical	4 niveles del modelo de superficie ECMWF: Capa 1: 0 -7 cm, Capa 2: 7 -28 cm, Capa 3: 28-100 cm, Capa 4: 100-289 cm Algunos parámetros se definen a 2 m sobre la superficie.
Cobertura temporal	Enero de 1950 al presente
Resolución temporal	Cada hora
Formato de archivo	GRIB
Frecuencia de actualización	Mensual con un retraso de unos tres meses con respecto a la fecha real.

Tabla 5: Datos descriptivos de la temperatura ambiente de ERA5-LAND. Fuente: ERA5-LAND

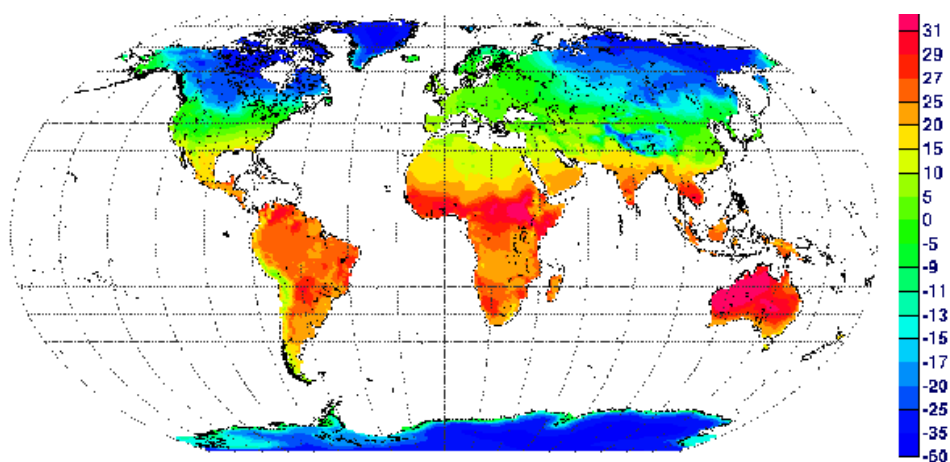


Figura 71: Mapa mundial de la temperatura ambiente de ERA5-LAND. Fuente: ERA5-LAND

Para obtener la temperatura de ambiente es necesario llenar una serie de campos, con el fin de obtener datos más certeros referentes a la fecha de interés.

- ✓ Primeramente, nos dirigimos al apartado “Descargar datos”, visualizamos la variable “Temperatura” y seleccionamos la opción, 2 m de temperatura.

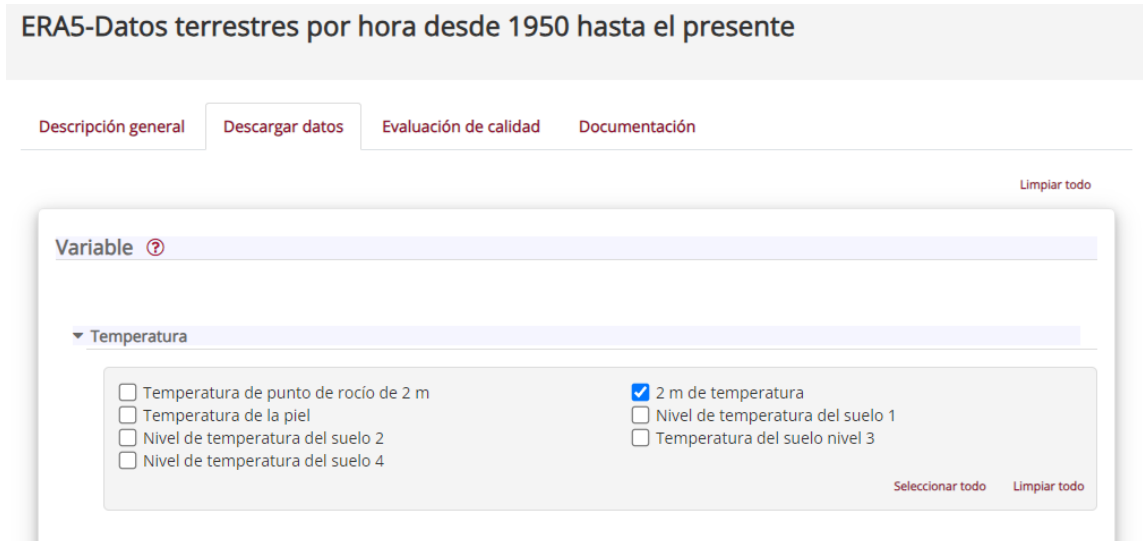


Figura 72: Selección de variable de temperatura. Fuente: ERA5-LAND

- ✓ En el mismo apartado “Descarga datos” bajamos hasta llegar a los apartados “Año”, “Mes”, “Día” y “Tiempo” y seleccionamos los datos de interés. En este caso los datos de la visita de campo.

Año

<input type="radio"/> 1950	<input type="radio"/> 1951	<input type="radio"/> 1952	<input type="radio"/> 1953	<input type="radio"/> 1954	<input type="radio"/> 1955
<input type="radio"/> 1956	<input type="radio"/> 1957	<input type="radio"/> 1958	<input type="radio"/> 1959	<input type="radio"/> 1960	<input type="radio"/> 1961
<input type="radio"/> 1962	<input type="radio"/> 1963	<input type="radio"/> 1964	<input type="radio"/> 1965	<input type="radio"/> 1966	<input type="radio"/> 1967
<input type="radio"/> 1968	<input type="radio"/> 1969	<input type="radio"/> 1970	<input type="radio"/> 1971	<input type="radio"/> 1972	<input type="radio"/> 1973
<input type="radio"/> 1974	<input type="radio"/> 1975	<input type="radio"/> 1976	<input type="radio"/> 1977	<input type="radio"/> 1978	<input type="radio"/> 1979
<input type="radio"/> 1980	<input type="radio"/> 1981	<input type="radio"/> mil novecientos ochenta y dos	<input type="radio"/> 1983	<input type="radio"/> 1984	<input type="radio"/> 1985
			<input type="radio"/> 1986	<input type="radio"/> 1987	<input type="radio"/> 1988
			<input type="radio"/> 1989	<input type="radio"/> 1990	<input type="radio"/> 1991
<input type="radio"/> 1992	<input type="radio"/> 1993	<input type="radio"/> 1994	<input type="radio"/> 1995	<input type="radio"/> 1996	<input type="radio"/> 1997
<input type="radio"/> 1998	<input type="radio"/> 1999	<input type="radio"/> 2000	<input type="radio"/> 2001	<input type="radio"/> 2002	<input type="radio"/> 2003
<input type="radio"/> 2004	<input type="radio"/> 2005	<input type="radio"/> 2006	<input type="radio"/> 2007	<input type="radio"/> 2008	<input type="radio"/> 2009
<input type="radio"/> 2010	<input type="radio"/> 2011	<input type="radio"/> 2012	<input type="radio"/> 2013	<input type="radio"/> 2014	<input type="radio"/> 2015
<input type="radio"/> 2016	<input type="radio"/> 2017	<input type="radio"/> 2018	<input type="radio"/> 2019	<input type="radio"/> 2020	<input type="radio"/> 2021
<input type="radio"/> 2022	<input checked="" type="radio"/> 2023				

Figura 73: Selección del año de interés. Fuente: ERA5-LAND

Mes

<input type="radio"/> Enero	<input type="radio"/> Febrero	<input checked="" type="radio"/> Marzo	<input type="radio"/> Abril	<input type="radio"/> Mayo	<input type="radio"/> Junio
<input type="radio"/> Julio	<input type="radio"/> Agosto	<input type="radio"/> Septiembre	<input type="radio"/> Octubre	<input type="radio"/> Noviembre	<input type="radio"/> Diciembre

[Limpiar todo](#)

Figura 74: Selección del mes de interés. Fuente: ERA5-LAND

Día

<input type="checkbox"/> 01	<input type="checkbox"/> 02	<input type="checkbox"/> 03	<input type="checkbox"/> 04	<input type="checkbox"/> 05	<input type="checkbox"/> 06
<input type="checkbox"/> 07	<input type="checkbox"/> 08	<input type="checkbox"/> 09	<input type="checkbox"/> 10	<input type="checkbox"/> 11	<input type="checkbox"/> 12
<input type="checkbox"/> 13	<input type="checkbox"/> 14	<input type="checkbox"/> 15	<input type="checkbox"/> dieciséis	<input type="checkbox"/> 17	<input type="checkbox"/> 18
<input type="checkbox"/> 19	<input type="checkbox"/> 20	<input type="checkbox"/> 21	<input type="checkbox"/> 22	<input type="checkbox"/> 23	<input type="checkbox"/> 24
<input type="checkbox"/> 25	<input type="checkbox"/> 26	<input type="checkbox"/> 27	<input type="checkbox"/> 28	<input type="checkbox"/> 29	<input type="checkbox"/> 30
<input checked="" type="checkbox"/> 31					

[Seleccionar todo](#) [Limpiar todo](#)

Figura 75: Selección de los días de interés. Fuente: ERA5-LAND

Tiempo ?

<input type="checkbox"/> 00:00	<input type="checkbox"/> 01:00	<input type="checkbox"/> 02:00	<input type="checkbox"/> 03:00	<input type="checkbox"/> 04:00	<input type="checkbox"/> 05:00
<input type="checkbox"/> 06:00	<input type="checkbox"/> 07:00	<input type="checkbox"/> 08:00	<input type="checkbox"/> 09:00	<input checked="" type="checkbox"/> 10:00	<input checked="" type="checkbox"/> 11:00
<input checked="" type="checkbox"/> 12:00	<input checked="" type="checkbox"/> 13:00	<input type="checkbox"/> 14:00	<input type="checkbox"/> 15:00	<input type="checkbox"/> 16:00	<input type="checkbox"/> 17:00
<input type="checkbox"/> 18:00	<input type="checkbox"/> 19:00	<input type="checkbox"/> 20:00	<input type="checkbox"/> 21:00	<input type="checkbox"/> 22:00	<input type="checkbox"/> 23:00

[Seleccionar todo](#) [Limpiar todo](#)

Figura 76: Selección de las horas de interés. Fuente: ERA5-LAND

- ✓ Continuando en el apartado “Descarga datos” nos dirigimos al área geográfica y colocamos las coordenadas de la región de interés y seguidamente colocamos el formato de descarga del archivo.

The screenshot displays the 'Área geográfica' (Geographic Area) section of the ERA5-LAND data download interface. It features two main options: 'Toda la región disponible' (All available region) and 'Extracción de subregión' (Subregion extraction). The 'Extracción de subregión' option is selected, and it includes four input fields for coordinates: 'Norte' (North) with the value 90, 'Oeste' (West) with the value 13, 'Este' (East) with the value 14, and 'Sur' (South) with the value -90. A note below these fields states 'Por favor seleccione coordenadas dentro del rango' (Please select coordinates within the range). Below the geographic area section is the 'Formato' (Format) section, which offers three radio button options: 'GRIB' (selected), 'NetCDF-3 comprimido (experimental)' (compressed NetCDF-3, experimental), and 'NetCDF-3 (experimental, no recomendado)' (NetCDF-3, experimental, not recommended). A 'Limpiar todo' (Clear all) button is located at the bottom right of the interface.

Figura 77: Colocación de las coordenadas de interés y selección del formato de descarga.

Fuente: ERA5-LAND

Finalmente descargamos el archivo y se procesa como ráster en QGIS.

3.3.2.2. Temperatura de ambiente obtenida por medio del Método de Eslava el cual toma como varia el DEM (Digital Elevation Model)

Para obtener los datos de temperatura de ambiente, se tomó partiendo de la elevación del lugar, según la metodología de Eslava en el cual fueron comprobados los métodos de regresión entre la temperatura media anual [°C] y la altitud [m] y resulto que el más adecuado es el de regresión lineal simple ya que los resultados de los análisis de los otros modelos (logarítmico, potencial, exponencial) demostraron que el de regresión lineal presenta los más altos coeficientes de correlación y determinación, el más bajo error típico de estimación, el más bajo coeficiente de variabilidad y los menores residuos entre la temperatura determinada con mediciones y la

calculada a partir de los modelos. Este método paso por controles de calidad el cual fue efectuado 20 veces de lo que se obtuvo la ecuación de la recta de regresión de mínimos cuadrados. (Eslava, 1988)

$$T_a = 28.1 - (0.00553 * \text{Altura DEM})$$

Ecuación 26: Temperatura Ambiente a partir del DEM.

Donde:

Ta= Temperatura ambiente

Altura DEM= Modelo de Elevación Digital, por sus siglas en inglés (Digital Elevation Model)

- ✓ Cálculo de la tempera ambiente en QGIS.

Para el cálculo de la temperatura ambiente en QGIS se utiliza la calculadora ráster donde se ubica la *Ecuación 26*, obteniendo como resultado un ráster de dicha temperatura ambiente.

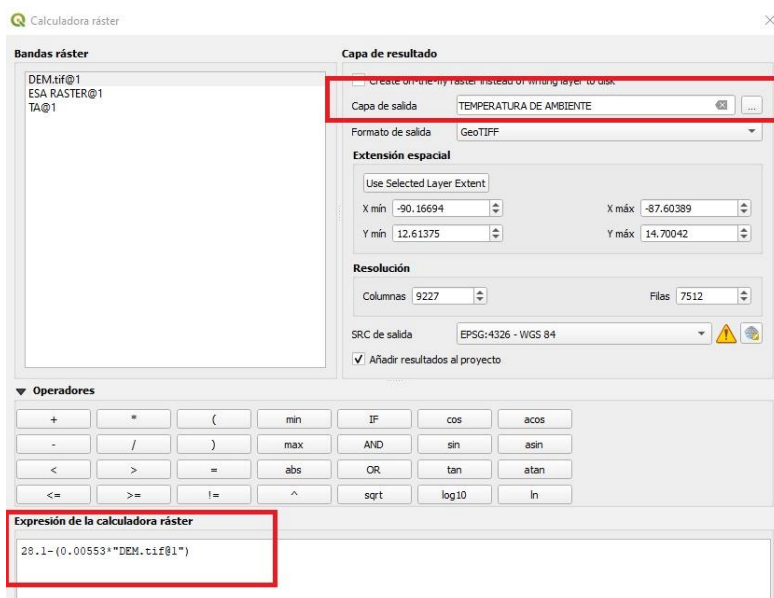


Figura 78: Cálculo de la Temperatura Ambiente por medio del DEM en QGIS. Fuente.

Elaboración propia.

3.3.3. Flujo de Calor Radiante RHF

El Flujo de Calor Radiante (RHF – Radiative Heat Flux) representa el calor emitido por radiación desde el suelo. Está compuesto por flujo de calor de orígenes geotermales más los efectos de radiación solar directa o indirecta. El monitoreo terrestre de flujo de calor utilizando sensores locales puede ser difícil o inviable por muchas razones, como los costos de instalación y mantenimiento, el hecho de que cada sensor solo pueda obtener datos de su ubicación no es ideal para el monitoreo de áreas grandes debido a fluctuaciones de temperatura que puedan manifestarse en una zona, y en el caso de zonas de actividad volcánica podría ser imposible instalar sensores ya que estos podrían ser destruidos por los potenciales riesgos ambientales tales como suelos inestables, flujos de lava o cenizas. Utilizar imágenes térmicas infrarrojas captadas por sensores remotos brinda una solución a todos estos problemas, ya que se pueden obtener datos para áreas grandes de forma remota. Particularmente la serie de satélites Landsat tiene una larga historia de estudios sobre características geotérmicas. (Mia, 2013)

Estimaciones de flujo de calor superficial proporcionan restricciones para la calibración de modelamiento de reservas geotérmicas, y a medida que estos modelos se van refinando, se requieren evaluaciones más precisas de flujo de calor superficial. La evaluación de flujos de calor en grandes áreas de suelo calentado de forma conductiva o por vapores es una tarea difícil, debido a la variabilidad de parámetros como la sensibilidad a las condiciones atmosféricas como presión, temperatura ambiente, lluvia, y la diversidad de los procesos de transferencia de calor presentes en el área y su interacción entre estos. (Mia, 2013)

El calor puede fluir mediante tres procesos: conducción, convección y radiación. El medio por el cual se transmite energía entre cuerpos sin contacto y en él la ausencia de un medio intermedio se conoce como flujo de calor radiativo (RHF).

La transferencia de calor por convección se produce mediante una combinación de conducción molecular y transporte de energía creado por el movimiento de partículas fluidas dentro de fluidos. En caso del flujo conductor de calor, la conducción térmica se produce mediante la transferencia de energía cinética de moléculas o átomos de un cuerpo más caliente a los de un

cuerpo más frío, es decir, cuando existe un gradiente de temperatura dentro de un cuerpo, la energía térmica fluirá desde la región de alta temperatura a la región de baja temperatura.

3.3.3.1. Flujo de Calor Radiante RHF calculado a partir del Método Monocanal Simplificado de la Temperatura Superficial LST

De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, el Flujo de Calor Radiante RHF se ha calculado utilizando la *Ecuación 27* (Paez Cuervo & Torres, 2021)

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

Ecuación 27: Flujo de Calor Radiante RHF a partir del método Monocanal Simplificado.

Donde:

Q_r = Flujo de calor radiante (W/m^2)

τ = Transmisividad Atmosférica

σ = constante de Boltzman ($5.67\text{E-}8 \text{ W/m}^2\text{K}$)

ε = emisividad

T_s = Temperatura de superficie terrestre (K)

T_a = temperatura de ambiente (K).

3.3.3.1.1. Transmisividad Atmosférica.

La transmisividad atmosférica es la energía electromagnética que logra pasar a través de la atmósfera y alcanzar la superficie terrestre. La luz visible es transmitida en mayor parte a través de la atmósfera.

Algunos tipos de radiación electromagnética pasan fácilmente a través de la atmósfera, mientras que otros no. La capacidad de la atmósfera para permitir que la radiación la atraviese es llamada transmisividad, y varía con la longitud de onda de la radiación. (Humboldt State University, 2019).

Para obtener valores de transmisividad atmosférica, se utilizó una herramienta de corrección desarrollada por la NASA. Tradicionalmente, calcular los parámetros de transmisión atmosférica y radiancia ascendente ha sido difícil y requiere de tiempo. El usuario debía investigar dónde conseguir los datos atmosféricos, convertirlos al formato adecuado para realizar un modelo de transferencia radiante, ejecutar el modelo e integrar los resultados. La herramienta Atmospheric Parameter Calculator facilita la computación de estos cálculos. (NASA, 2023)

Ingrese los parámetros para los cuales desea calcular la transmisión atmosférica y la radiancia ascendente:

Año: <input type="text"/>	Mes: <input type="text"/>	Día: <input type="text"/>
Hora GMT: <input type="text"/>	Minuto: <input type="text"/>	
Latitud: <input type="text"/> <small>+ es Norte, - es Sur</small>	Longitud: <input type="text"/> <small>- es Este, - es Oeste</small>	
<input type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico para obtener <i>quada</i> con el número entero más cercano en latitud/longitud <input checked="" type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico interpolado para obtener <i>quada de latitud/longitud dada</i>		
<input type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar de verano de latitudes medias como <i>quada para el perfil atmosférico superior</i> <input checked="" type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar invernal de latitudes medias como <i>quada para el perfil atmosférico superior</i>		
<input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-9 TIRS Banda 10 <input checked="" type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-8 TIRS Banda 10 <input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-7 Band 6 <input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-5 Band 6 <input type="radio"/> Genera solo el perfil atmosférico, no calcula las radiancias efectivas.		
Opcional: Condiciones de la superficie <small>(si no ingresa las condiciones de la superficie, se utilizarán las condiciones de la superficie predichas por el modelo. Si ingresa las condiciones de la superficie, se deben ingresar las cuatro condiciones).</small>		
Altitud (km): <input type="text"/>	Presión (mb): <input type="text"/>	
Temperatura (°C): <input type="text"/>	Humedad relativa (%): <input type="text"/>	
Los resultados se enviarán a la siguiente dirección: Correo electrónico: <input type="text"/>		
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Clear Fields"/>		

Figura 79: Herramienta Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente. NASA. (2023).

La herramienta requiere una fecha específica, la hora en GMT y la localización en latitud y longitud como entradas. Esta herramienta calcula los parámetros para generar perfiles atmosféricos en coordenadas enteras de latitud y longitud. El usuario puede seleccionar si quiere obtener el perfil atmosférico más cercano a las coordenadas ingresadas, o una interpolación para el perfil atmosférico para las coordenadas ingresadas.

Los perfiles atmosféricos son generados por el NCEP. Incorporan datos de satélite y superficiales para predecir una atmósfera global a 28 altitudes. Estas altitudes modeladas son re muestreadas en una cuadrícula de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ y son generadas cada 6 horas. Para la opción de calcular el perfil atmosférico para la latitud/longitud entera más cercana, la herramienta extrae la esquina de la cuadrícula más cercana a las coordenadas ingresadas para dos muestras de tiempo, interpolando la hora ingresada entre estas dos muestras. Para la opción de generar una interpolación para el perfil atmosférico, la herramienta extrae los perfiles para las cuatro esquinas de la cuadrícula en la que se encuentra la coordenada ingresada. Los perfiles de las esquinas son interpolados para el tiempo dado, y los perfiles resultantes son interpolados para la coordenada ingresada por el usuario.

El usuario también puede seleccionar una curva de respuesta espectral si desea utilizar los perfiles atmosféricos en conjunto con los productos de datos Landsat 5, 7, 8 y 9.

Si las condiciones superficiales se encuentran disponibles (altitud en kilómetros, temperatura en grados Celsius, presión en milibares y humedad relativa en porcentaje), el usuario puede ingresar estos datos, de ser así, todas las condiciones superficiales deben ser ingresadas. Las condiciones superficiales serán utilizadas en lugar de las condiciones predichas por el modelo para generar el perfil, y las capas inferiores de la atmósfera serán suavizadas para remover discontinuidades resultantes de cambiar las condiciones superficiales. Los resultados calculados son luego enviados por correo electrónico al usuario y también se muestran en el navegador web.

Ingrese los parámetros para los cuales desea calcular la transmisión atmosférica y la radiancia ascendente:

Año: <input type="text" value="2023"/>	Mes: <input type="text" value="03"/>	Día: <input type="text" value="28"/>
Hora GMT: <input type="text" value="10"/>	Minuto: <input type="text" value="30"/>	
Latitud: <input type="text" value="13.62333"/> <small>+ es Norte, - es Sur</small>	Longitud: <input type="text" value="-88.8508"/> <small>+ es Este, - es Oeste</small>	
<input type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico para obtener ayuda con el número entero más cercano en latitud/longitud		
<input checked="" type="radio"/> Utilice el perfil atmosférico interpolado para obtener ayuda de latitud/longitud dada		
<input type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar de verano de latitudes medias como ayuda para el perfil atmosférico superior		
<input checked="" type="radio"/> Utilice la atmósfera estándar invernal de latitudes medias como ayuda para el perfil atmosférico superior		
<input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-9 TIRS Banda 10		
<input checked="" type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-8 TIRS Banda 10		
<input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-7 Band 6		
<input type="radio"/> Utilice la curva de respuesta espectral Landsat-5 Band 6		
<input type="radio"/> Genera solo el perfil atmosférico, no calcula las radiancias efectivas.		
Opcional: Condiciones de la superficie <small>(si no ingresa las condiciones de la superficie, se utilizarán las condiciones de la superficie predichas por el modelo. Si ingresa las condiciones de la superficie, se deben ingresar las cuatro condiciones).</small>		
Altitud (km): <input type="text"/>	Presión (mb): <input type="text"/>	
Temperatura (°C): <input type="text"/>	Humedad relativa (%): <input type="text"/>	
Los resultados se enviarán a la siguiente dirección: Correo electrónico: <input type="text" value="mp18080@ues.edu.sv"/>		
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Clear Fields"/>		

Figura 80: Ingreso de parámetros en la plataforma Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente: NASA. (2023).

Atmospheric Correction Parameter Calculator

Date (yyyy-mm-dd): 2023-03-28
 Input Lat/Long: 13.623/ -88.851
 GMT Time: 10:30
 L8 TIRS Band 10 Spectral Response Curve
 Mid-latitude winter standard atmosphere
 User input surface conditions
 Surface altitude (km): -999.000
 Surface pressure (mb): -999.000
 Surface temperature (C): -999.000
 Surface relative humidity (%): -999.000
 Band average atmospheric transmission: 0.58
 Effective bandpass upwelling radiance: 3.58 W/m²/sr/um
 Effective bandpass downwelling radiance: 5.39 W/m²/sr/um

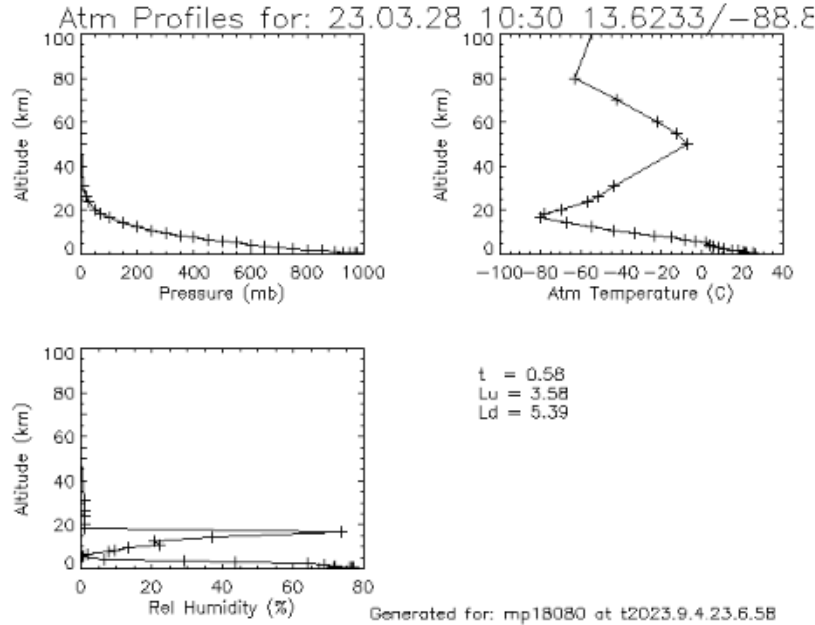


Figura 81: Resultados mostrados por la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA. Fuente: NASA. (2023).

3.3.3.2. Flujo de Calor Radiante RHF calculado a partir del Método Ventana Dividida de la Temperatura Superficial LST

De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, el Flujo de Calor Radiante RHF se ha calculado utilizando la Ecuación 28. (Mia et al., 2017b)

$$Q_r = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4)$$

Ecuación 28: Flujo de Calor Radiante RHF a partir del método Ventana Dividida.

Donde:

Q_r = Flujo de calor radiante (W/m^2)

σ = constante de Boltzman ($5.67E-8 W/m^2K$)

ϵ = promedio de la emisividad de la banda 10 y 11

T_s = Temperatura de superficie terrestre (K)

T_a = temperatura de ambiente (K).

La transmisividad atmosférica no se muestra, ya que en el método ventana dividida de la temperatura superficial LST ya fue calculado para cada banda (10 y 11).

✓ Cálculo del flujo de calor en QGIS.

Para el cálculo del flujo de calor en QGIS se utiliza la calculadora ráster donde se ubica la *Ecuación 28*, obteniendo como resultado un ráster de dicho flujo de calor.

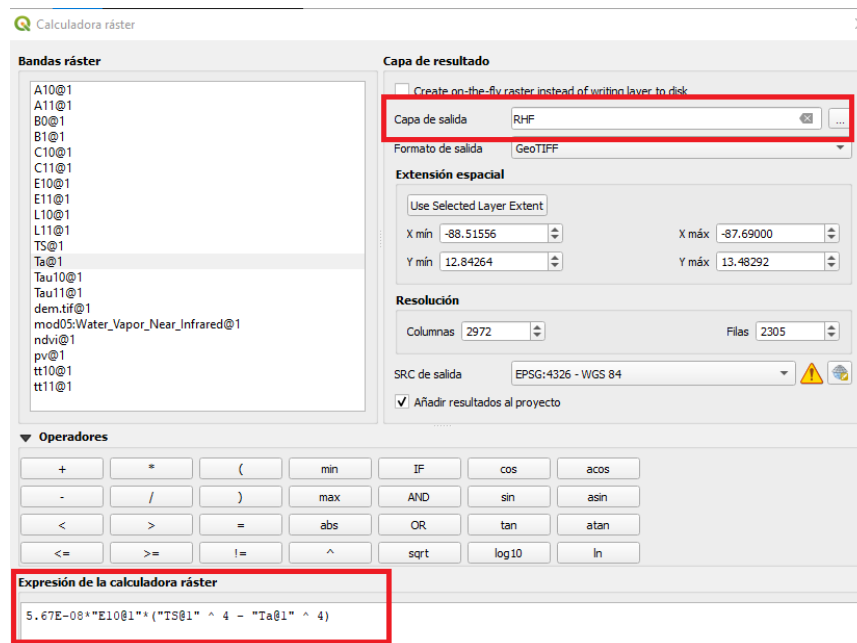


Figura 82: Cálculo del Flujo de Calor en QGIS. Fuente: Elaboración propia

3.4. INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PARA MAPAS DE IMPRESIÓN EN QGIS.

3.4.1. Capa vectorial (shapefile)

Un shapefile es un formato sencillo y no topológico que se utiliza para almacenar la ubicación geométrica y la información de atributos de las entidades geográficas. Las entidades geográficas de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). El espacio de trabajo que contiene shapefiles también puede contener tablas dBASE que, a su vez, pueden almacenar atributos adicionales que se pueden unir a las entidades de un shapefile.

El shapefile es el formato de datos vectorial más popular y extendido en el trabajo con un SIG.

Un shapefile se compone de varios archivos informáticos, sin los cuales no podríamos visualizarlo en un software GIS, El archivo que fue descargado tiene extensión .shp y almacena las entidades geométricas de los objetos.

Los archivos se pueden descargar en la página web GADM. La interfaz se muestra en la siguiente figura donde se selecciona el país de interés, mostrándose una vista previa, posteriormente se descarga el archivo como una capa vectorial. (GADM, 2023)

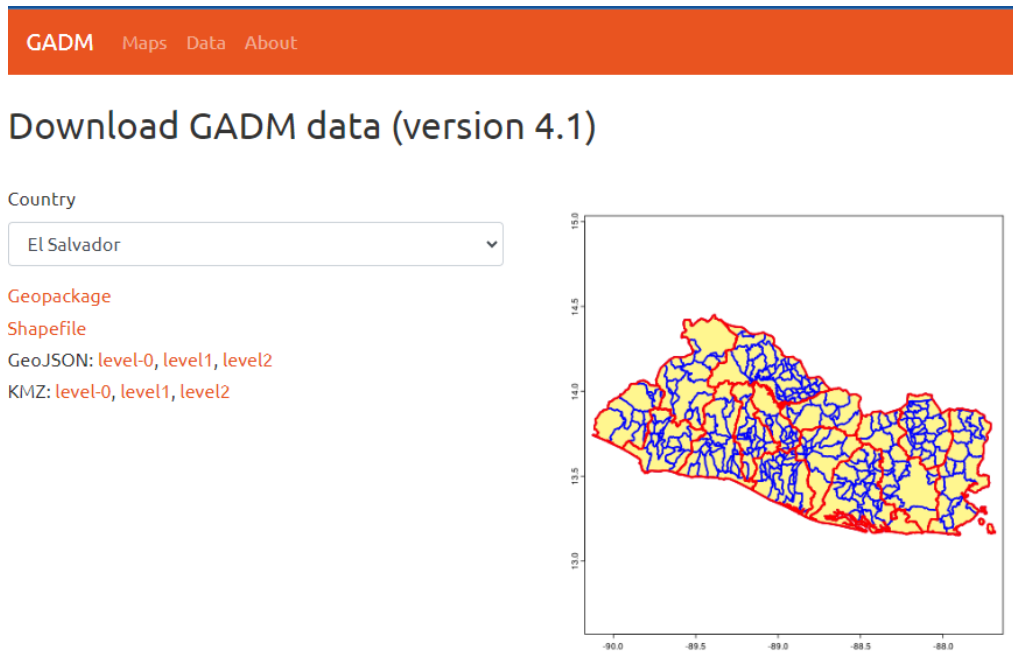


Figura 83: Interfaz de la página web GADM seleccionando el país de interés, en este caso El Salvador. Fuente: GADM. (2023).

✓ Procesamiento en QGIS

Se seleccionan los archivos .shp y se abren en QGIS mostrándose como una capa vectorial de El Salvador, con los departamentos respectivos del país. Esta capa vectorial se utilizó para presentar capas de Modelo de Elevación Digital y Temperatura de ambiente.

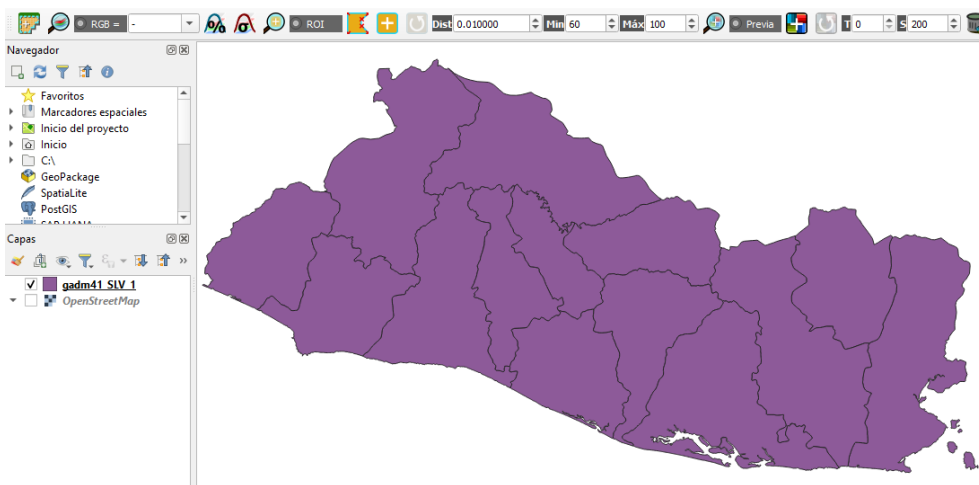


Figura 84: Capa del mapa de El Salvador mostrado en QGIS. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. DEM (Digital Elevation Model)

Se utiliza un complemento del software QGIS para agregar la capa de Modelo de Elevación Digital, el nombre de dicho complemento es OpenTopography. Se utiliza para este caso, la opción del modelo de elevación Copernicus GLO-30.

El DEM de Copernicus es un modelo de superficie digital (DSM) que representa la superficie de la tierra. Este DSM se deriva de un DSM editado llamado WorldDEM, donde se ha incluido el aplanamiento de masas de agua y el flujo constante de ríos, se ha aplicado en la edición de costas.

El producto WorldDEM se basa en los datos de los satélites de radar adquiridos durante la misión TanDEM-X, que está financiada por una asociación público-privada entre el Estado Alemán, representado por el centro Aeroespacial Alemán (DLR) y Airbus Defence and Space. OpenTopography proporciona acceso al DSM global de 30 m (GLO-30) ([OpenTopography, 2023](#))

NOTA:

1. La cobertura de GLO-30 no es completamente global porque el Programa Copernicus no ha hecho público un pequeño subconjunto de mosaicos que cubran países específicos.
2. El espaciado longitudinal de las celdas aumenta en función de la latitud para latitudes al norte de 50N y al sur de 50S. Para mantener uniformes las dimensiones de los píxeles, OpenTopography vuelve a muestrear los datos al norte de los 50 grados de latitud y al sur de -50 grados de latitud para generar un producto consistente de 30 m o 90 m para los datos a los que se accede a través de la interfaz web o API.
3. GLO-30 está disponible de forma gratuita para el público en general.

Plataforma : Datos satelitales	Área de estudio : 146.540.912 km ²	Resolución de trama : 30 metros	Fecha de la encuesta : 01/01/2011 - 01/07/2015
Metadatos completos	Cita de datos	Licencia de uso : Q	Financiador : ESA Socios : DLR, Airbus
Otros productos de datos disponibles: Copernicus 90m , descarga masiva de ráster (es necesario iniciar sesión), API global			

Figura 85: Características de Open Topography GLO-30. Fuente: OpenTopography. (2023).



Figura 86: Logo de Open Topography. Fuente: OpenTopography. (2023).

✓ Cálculo del DEM en QGIS

Selección de plugin

En la selección de Modelo de Elevación Digital se selecciona Copernicus Global 30 m. La capa de proyección es EPSG:4326

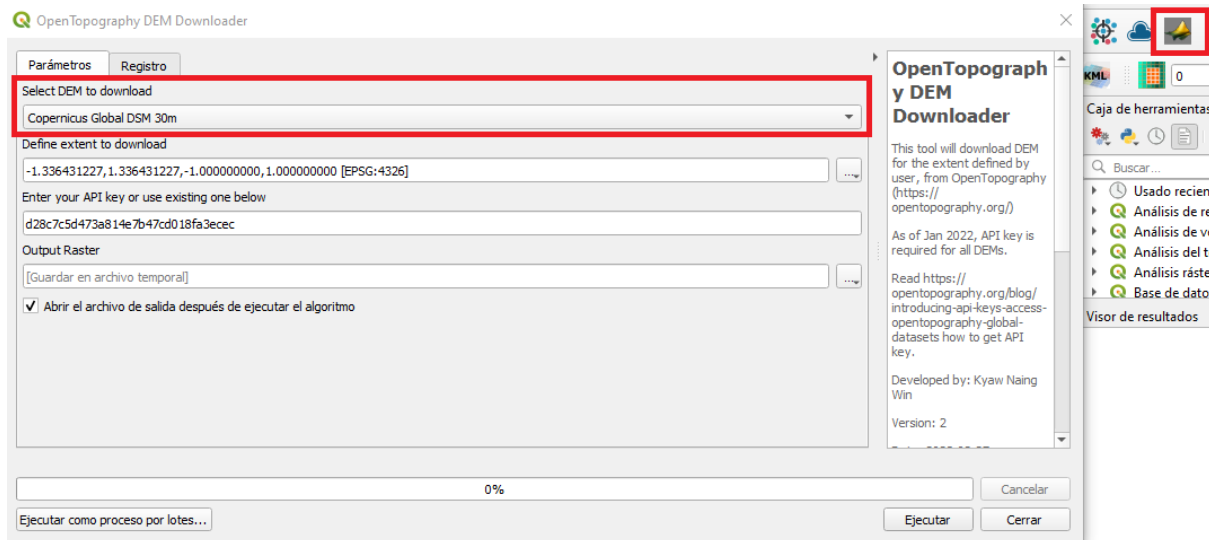


Figura 87: Selección de Modelo de Elevación Digital capa de proyección EPSG: 4326.

Fuente: Elaboración propia

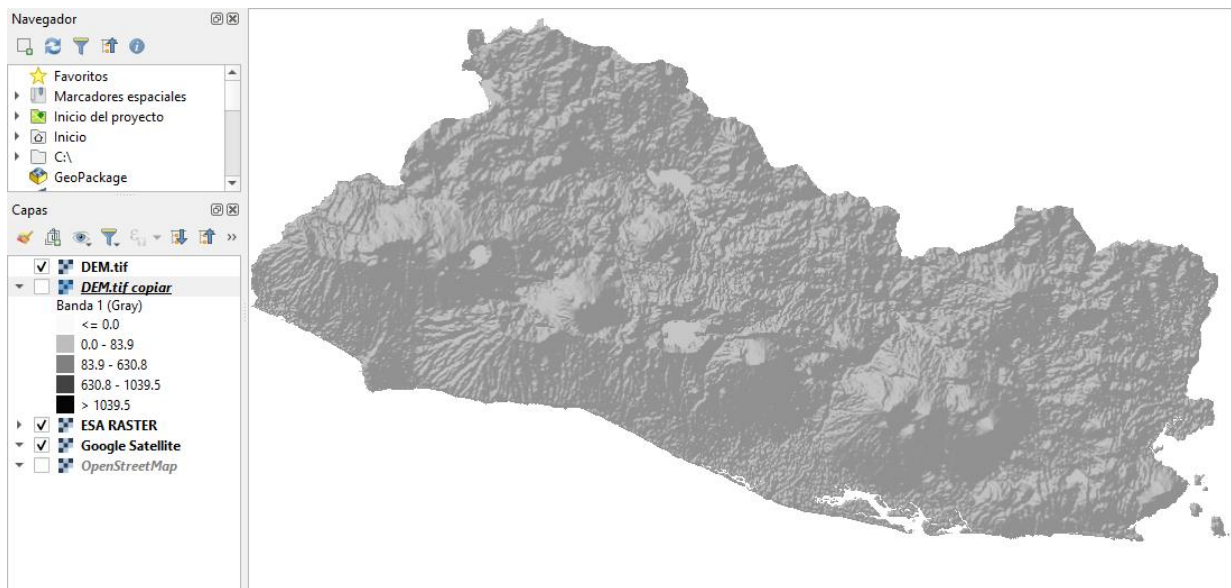


Figura 88: Presentación del DEM en el mapa de El Salvador. Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Georreferencia en mapas de impresión

SISTEMA UTM

El sistema de coordenadas UTM trata de un sistema completo de cartografía en la Tierra. Para ello se divide en una serie de zonas rectangulares mediante una cuadrícula y se aplica una proyección con unos parámetros geodésicos concretos para cada una de dichas zonas. Aunque en la actualidad se utiliza el único elipsoide (WGS-84) originalmente este no era único para todas las zonas.

Con el sistema UTM, las coordenadas de un punto no se expresan como coordenadas terrestres absolutas, sino mediante la zona correspondiente y las coordenadas relativas a la zona UTM en la que nos encontremos. (Olaya, 2020)

- ✓ Proyecciones de coordenadas en QGIS

En la presentación de mapas de impresión se selecciona la georreferencia con la que se quiere proyectar las coordenadas de ubicación de las áreas estudiadas.

Georreferencia “Project CRS: EPSG:4326-WGS 84”

Este sistema es una proyección global que utiliza el método de Latitud y Longitud, las unidades de medida son grados, minutos y segundos.

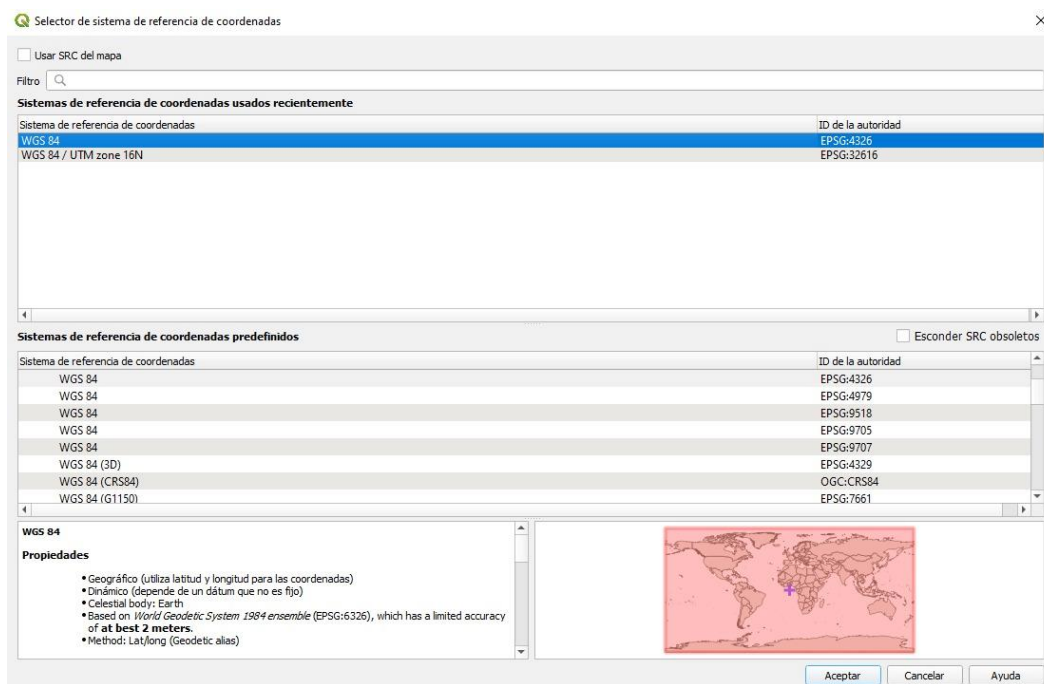


Figura 89: Selector de sistema de referencia de coordenadas WGS 84 en QGIS. Fuente: software QGIS.

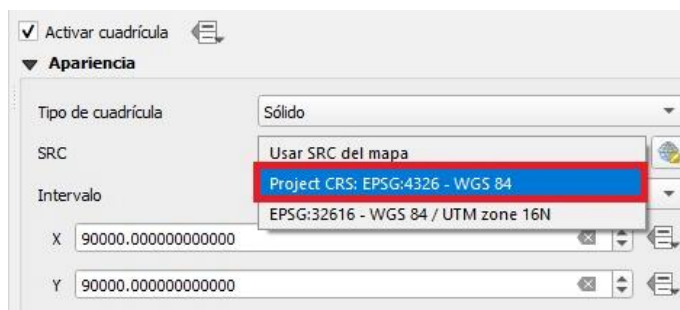


Figura 90: Selección de la georreferencia de interés, Project CRS: EPSG:4326-WGS 84. Fuente: software QGIS.

Posteriormente se especifica en el apartado dibujar coordenadas el formato que queremos mostrar, en este caso “Grados, minutos, segundo”.

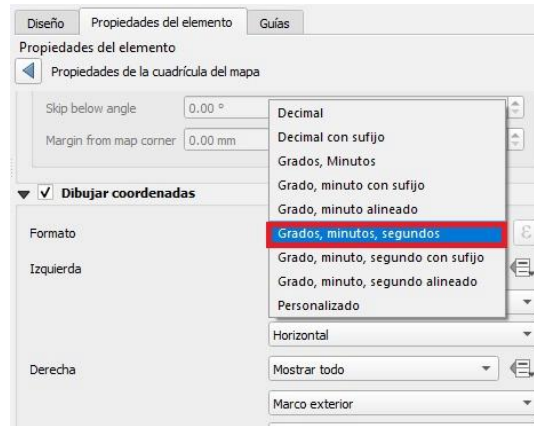


Figura 91: Especificación de coordenadas, Grados, minutos, segundos. Fuente: software QGIS.

Georreferencia “EPSG:32616-WGS 84/UTM zone 16N”

Este sistema es una proyección de una zona específica la cual incluye las siguientes ciudades y/o países: Ontario, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Galápagos, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Estados Unidos. Este tipo de georreferencia utiliza el método de proyección de coordenadas cartesianas, la unidad de medida son metros. (Olaya, 2020)

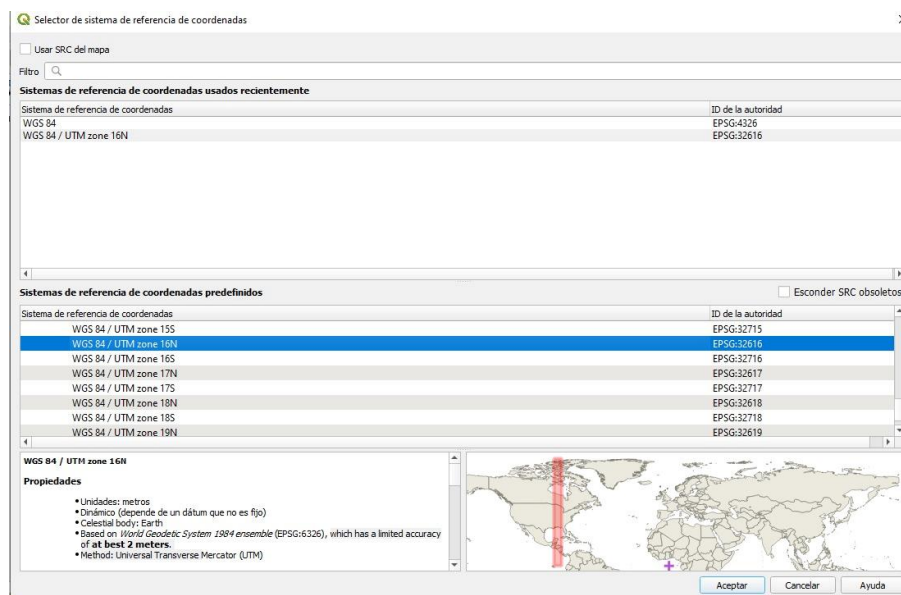


Figura 92: Selector de sistema de referencia de coordenadas WGS 84/UTM zone 16N en QGIS. Fuente: software QGIS.

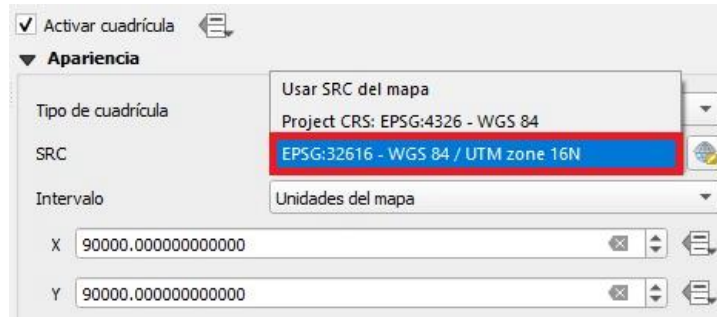


Figura 93: Selección de la georreferencia de interés, EPSG:32616-WGS 84/UTM zone 16N.

Fuente: software QGIS.

Posteriormente se especifica en el apartado dibujar coordenadas el formato que queremos mostrar, en este caso “Decimal”.

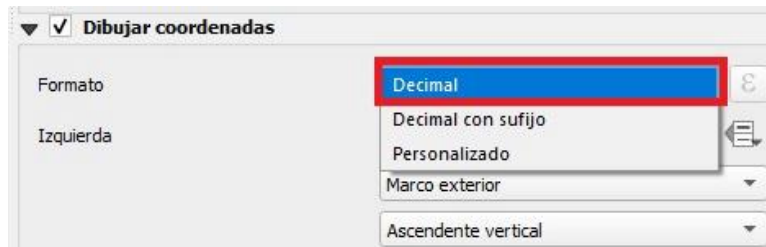


Figura 94: Especificación de coordenadas, Decimal. Fuente: software QGIS.

3.5. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN CAMPO.

3.5.1. Cámara Termográfica I7

Serie i de FLIR

Las cámaras infrarrojas de la serie i mejora las opciones con una sólida gama de nuevas opciones que se adaptan al nivel de detalle que requiere su aplicación. El i7, ahora con una resolución térmica de un 36 % mayor que la anterior y un campo de visión más amplio para ayudarle a obtener imágenes con mayor claridad, escanear más imágenes y almacenar una escena completa en una sola imagen.

Especificaciones de cámara termográfica FLIR i7	
Número de píxeles	19,600
Exactitud	Exactitud de la temperatura calibrada con $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o 2% de lectura
Rango de temperatura	-20 hasta 250 $^{\circ}\text{C}$
Modos de medición	Medición mínima, máxima y puntual (centro)

Tabla 6: Especificaciones de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f).

El almacenamiento de imágenes radiométricas es de hasta 5000 archivos de imágenes JPEG con todas las mediciones de temperatura directamente en la cámara, listos para descargar para análisis adicionales e informes personalizados.

La forma de carga es por medio de batería recargable de iones de litio –proporciona >5 horas de uso continuo, es reemplazable y cuenta con un sistema de carga en la cámara.

Incluye –Tarjeta miniSD 2G con adaptadores, batería recargable de iones de litio con adaptador/cargador de CA de 100-240 V, cable mini USB, software de generación de informes FLIR Tools, obturador de lente manual incorporado y estuche rígido.(FLIR, s/f)



Figura 95: Características de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f).



Figura 96: Cámara termográfica FLIR i7 utilizada en campo. Fuente: Elaboración propia

CARACTERÍSTICAS	FLIR i3	FLIR i5	FLIR i7
Sensibilidad térmica (NETD)	<0,15°C a 25°C	<0,1°C a 25°C	<0,1°C a 25°C
Campo de visión/distancia mínima de enfoque	12,5° x 12,5°/0,6 m (2 pies)	21° x 21°/0,6 m (2 pies)	29° x 29°/0,6 m (2 pies)
Tipo de detector: microbolómetro no refrigerado de matriz de plano focal (FPA)	60 x 60 píxeles	100 x 100 píxeles	140 x 140 píxeles
Modos de medición	Lugar	Lugar	Punto, área (máx./mín.)
Isoterma	—	—	Arriba abajo
CARACTERÍSTICAS COMUNES			
Rango de temperatura	- 4°F a 482°F (-20°C a 250°C)		
Almacenamiento de imágenes	5000 Imágenes (memoria de tarjeta microSD)		
Emisividad	Tabla de Emisividad; 0,1 a 1,0 ajustable		
Cuadros por segundo	9Hz		
Enfocar	Enfoque libre		
Rango espectral	7,5 a 13 μm		
Mostrar	LCD en color de 2,8" incorporada		
Modos de imagen	Térmico - Paletas (Iron, Rainbow y Black/White)		
Controles de configuración	Fecha/hora, °C/°F, 21 idiomas		
Tipo de batería/tiempo de funcionamiento	Li-Ion/ >5 horas, la pantalla muestra el estado de la batería		
Cargando sistema	En cámara, adaptador de CA; 3 horas al 90% de capacidad		
Choque/Vibración/Caída / Encapsulación; Seguridad	25G, IEC 60068-2-29 / 2G, IEC 60068-2-6 / A prueba de caídas 2 m (6,6 pies) IP43; UL, CSA, CE, PSE y CCC		
Dimensiones y peso	8,8x3,1x3,4" (223x79x85mm)/<12,9oz (365g), incluida la batería		
Garantía	5/2/10 (Cámara-2 años, Batería-5 años, Detector-10 años)		

Tabla 7: Características técnicas de la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: FLIR. (s/f).

Al momento de medir temperatura con la cámara termográfica, se debe ajustar a la emisividad dependiendo del material que se quiere medir. En nuestro caso, se ajustó a agua y tierra.

- ✓ Mediciones de temperatura con cámara termográfica FLIR i7

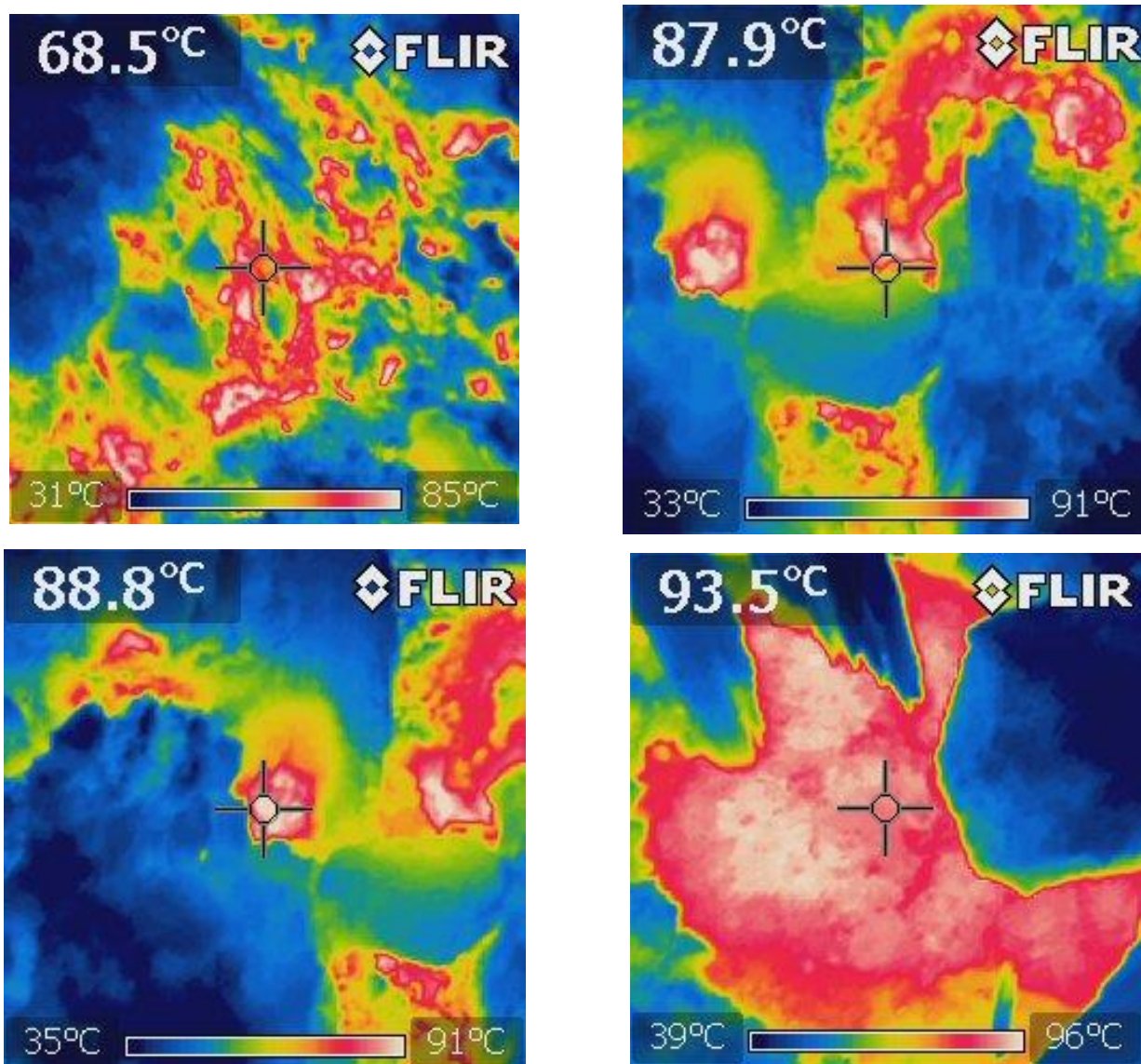


Figura 97: Imágenes térmicas tomadas en las visitas de campo con la cámara termográfica FLIR i7. Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Medidor de Temperatura y Humedad Portátil

El modelo HH414 es un medidor portátil de temperatura y humedad, con alto rendimiento con capacidad de registro de datos. Ofrece una pantalla de cuatro variables para mostrar la

temperatura y la humedad desde una sonda portátil y un termopar tipo K separado conectado a través de un enchufe de termopar tipo SMP estándar a la entrada T2 junto con un reloj de tiempo real. Las alarmas alta y baja se pueden configurar en las entradas T1, T2 y RH. La sonda de temperatura/humedad utiliza un sensor capacitivo de polímero y semiconductor. (OMEGA, s/f)



Figura 98: Termómetro e hidrómetro OMEGA. Fuentes: OMEGA. (s/f), Elaboración propia.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TERMÓMETRO E HIDRÓMETRO (OMEGA)	
Tamaño de Batería	9V
Temperatura ambiente máxima	50°C (122°F)
Temperatura ambiente mínima	0°C (32°F)
Rango de humedad de la sonda	0.0% a 99.9% HR
Rango de temperatura de la sonda	-20 a 60°C (-4 °F a 140°F)
Tipo de pantalla	LCD
Estilo del medidor	Portátil
Fuente de alimentación	Batería de 9V/adaptador de CA
Número de entradas	3
TC rango de temperatura	>-200C a 1370C (-328F a 2498F)

Tabla 8: Especificaciones técnicas del termómetro e hidrómetro OMEGA. Fuente: OMEGA, s/f

3.6. INSTRUMENTO DE GEOLOCALIZACIÓN (GARMIN GPSMAP 64S)

Garmin utiliza el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) el cual es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio. El GPS se compone de tres elementos: los satélites alrededor de la Tierra, estaciones terrestres de seguimiento, control y los receptores de GPS. La resolución de ubicación es de 2 a 3 metros. Para el uso del geolocalizador se configuró el sistema para que solo recibiera comunicación con sistemas GPS (satélites construidos por Estados Unidos) aunque dispone de otros satélites para su comunicación. (GARMIN, 2023)

El dispositivo puede usar los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS). Los cuales son:

GPS: una constelación de satélites construida por los Estados Unidos.

GLONASS: una constelación de satélites construida por Rusia.

GALILEO: una constelación de satélites creada por la Agencia Espacial Europea.

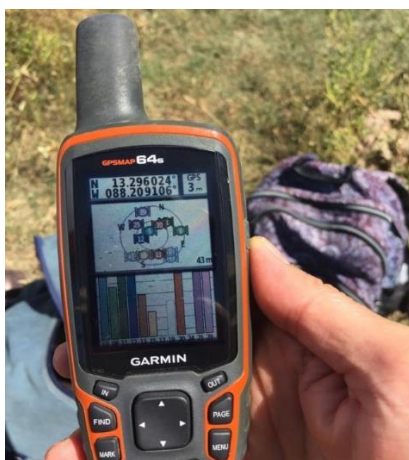


Figura 99: GARMIN comunicándose con satélites GPS. Fuente: Fotografía propia

Capítulo 4

4.0 Desarrollo

4.1. INFIERNILLOS: AGUA AGRIA; GUADALUPE, SAN VICENTE.

4.1.1. Área de Estudio

El presente estudio se realizó en la zona paracentral-oriental de El Salvador, limitado al Norte por Tepetitán, al Oeste por San Francisco Aguas Agrias, Verapaz y Guadalupe, al Sureste por San Cayetano Istepeque y San Vicente respectivamente. El área geotérmica de esta zona se localiza en el flanco Norte del volcán de San Vicente, en la base cercana a la cumbre del volcán a unos 800 msnm.

El volcán se sitúa 60 km al este de San Salvador, El Salvador. Este complejo volcánico cuenta con fuentes termales y fumarolas conocidas como “Los Infiernillos” las cuales poseen variada intensidad, de donde se eligió una fumarola de intensidad moderada que no superó una temperatura de 100 °C.

El Volcán de San Vicente está ubicado hacia el centro del territorio de El Salvador, aproximadamente a unos 5 km al Oeste de la cabecera del departamento de San Vicente, también llamada San Vicente. Este tiene una altura de 2,180 m.s.n.m. (metros sobre el nivel el mar), y sus coordenadas geográficas son latitud 13.595° Norte y longitud 88.838° Oeste.

Su principal rasgo estructural consiste en que presenta dos cúspides prominentes que están compuestas principalmente por flujos de lava andesítica.



Figura 100: Fotografía tomada en la visita de campo, camino a los infiernos. Fuente: fotografía propia.

Mapa de elevación y ubicación

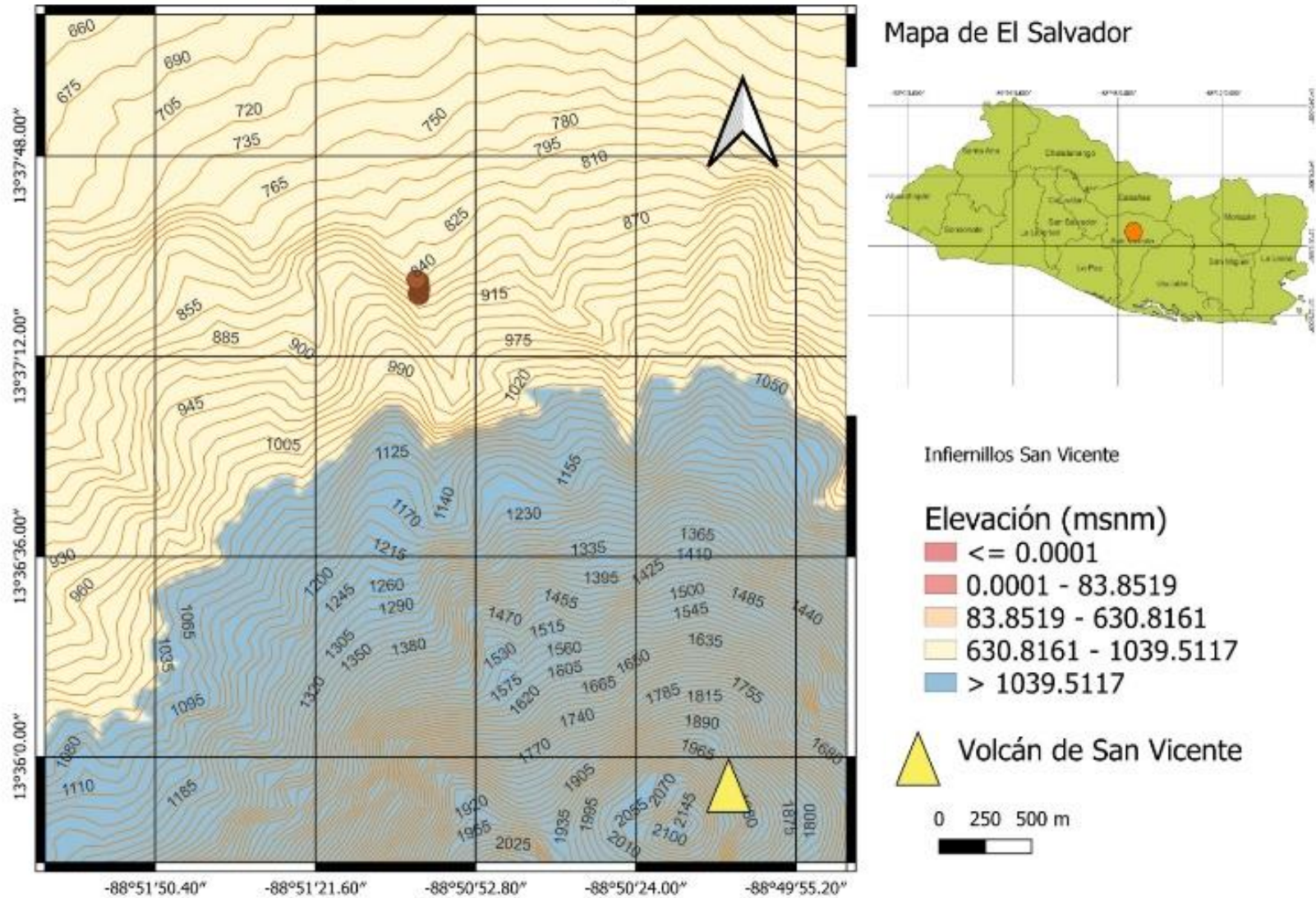


Figura 101: Mapa de ubicación “Infiernillos San Vicente” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Visita de Campo

El día 31 de marzo del año 2023 se realizó una visita de campo a los infiernillos de San Francisco Agua Agria, Guadalupe San Vicente; El Salvador.

Al realizar la visita de campo, se observó a simple vista la falla tectónica con fumarolas visibles, detectando potencial geotérmico, por lo que nos dirigimos a marcar puntos a los cuales se realizaron mediciones térmicas, obteniendo como resultado temperaturas cercanas a los 100 °C. En dichos puntos se realizaron diferentes mediciones de temperatura, cada punto con una distancia de 8 metros aproximadamente en un total de 88 metros en tierra firme dentro de la falla tectónica.

El área de estudio se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 15,513 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.



Figura 102: Vista Satelital del Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Mediciones y Recolección de Datos

Al llegar al área de interés se procedió a realizar inspecciones en la zona, marcando puntos de coordenadas con el geocalizador GARMIN GPSMAP 64S y a la vez haciendo orificios para insertar la termocupla del termómetro e hidrómetro y en los mismos se realizó la medición de temperatura con cámara termográfica.



Figura 103: Fotografías tomadas en el área de estudio. Fuente: Fotografías propias

4.1.4. Datos Recolectados

Las mediciones realizadas se reportan en la *Tabla 9*.

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura medida a una profundidad de 20cm con termocupla tipo K [°C]	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Porcentaje de Humedad [%]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Distancia en metros
							Latitud	Longitud	
1	31/3/23	10:30	36.5	38.8	35	37.4	13.62306	-88.8508	Punto inicial
2	31/3/23	10:38	79.5	84	34	39.9	13.6231	-88.85088	8
3	31/3/23	10:45	54.3	52	33.9	38.9	13.62323	-88.85086	16
4	31/3/23	10:58	35.3	39.4	34.5	37.8	13.6233	-88.85078	24
5	31/3/23	11:08	45.4	46.3	41.5	31.3	13.62341	-88.85078	32
6	31/3/23	11:14	44.3	41.7	38	36.5	13.62351	-88.85079	40
7	31/3/23	11:20	46.6	51.7	37.5	37.2	13.62362	-88.8508	48
8	31/3/23	11:28	39.3	38	34	38.2	13.62365	-88.85082	56
9	31/3/23	11:35	95.9	99	44	38.1	13.62364	-88.85084	64
10	31/3/23	11:42	56.3	50	36	37.4	13.62374	-88.85081	72
11	31/3/23	11:49	39.8	42.9	34	36.5	13.6238	-88.85088	80
12	31/3/23	11:56	41.8	42.2	35	36.9	13.62384	-88.85095	88

Tabla 9: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante

Con los datos recolectados se procede a realizar el cálculo del flujo de calor radiante utilizando la Ecuación 27.

Para la obtención de la transmisividad atmosférica se utilizó el valor de 0.65 obtenido por medio de la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA, explicado en el capítulo 3 sección **Transmisividad Atmosférica**.

De la tabla de datos recolectados se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 10*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	25.17
2	409.54
3	127.17
4	32.48
5	34.00
6	25.22
7	101.31
8	26.27
9	503.64
10	98.38
11	59.86
12	48.49

Tabla 10: Flujo de calor teórico en los puntos marcados de interés. Fuente: Elaboración Propia.

4.1.6. Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por Medio de Teledetección Satelital.

Posteriormente a la visita de campo se trabajó con las imágenes del sensor OLI y TIRS Colección 1 Nivel 2 de Landsat 8 el sensor capturo la imagen el día 28 de marzo del 2023 a las 16:18 horas. Dicha imagen utilizada no corresponde a la fecha de la visita, pero es la más próxima.

Teniendo la imagen descargada se procede a realizar el tratamiento en el programa QGIS, en primer lugar, se desarrolla el flujograma del método Ventana Dividida para el cálculo de la Temperatura Superficial LST detallado en la sección **3.3.1.2**. Para el procesamiento de las bandas OLI se obtuvo el Índice de Vegetación Normalizada NDVI de la región de interés (infiernillos) utilizando la *Ecuación 10*. El valor del NDVI se divide en cuatro categorías para diferentes tipos de cobertura terrestre: vegetación completamente saludable ($NDVI > 0,5$), tierra mixta ($NDVI =$

0,2–0,5), tierra desnuda (NDVI = 0–0,2) y agua o humedal (NDVI < 0). El valor NDVI también se utilizó para la estimación de la emisividad de esta área de estudio mediante el método de umbral NDVI.

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 0.00 a 0.50 por lo que se define, como tierra mixta y tierra desnuda.

Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

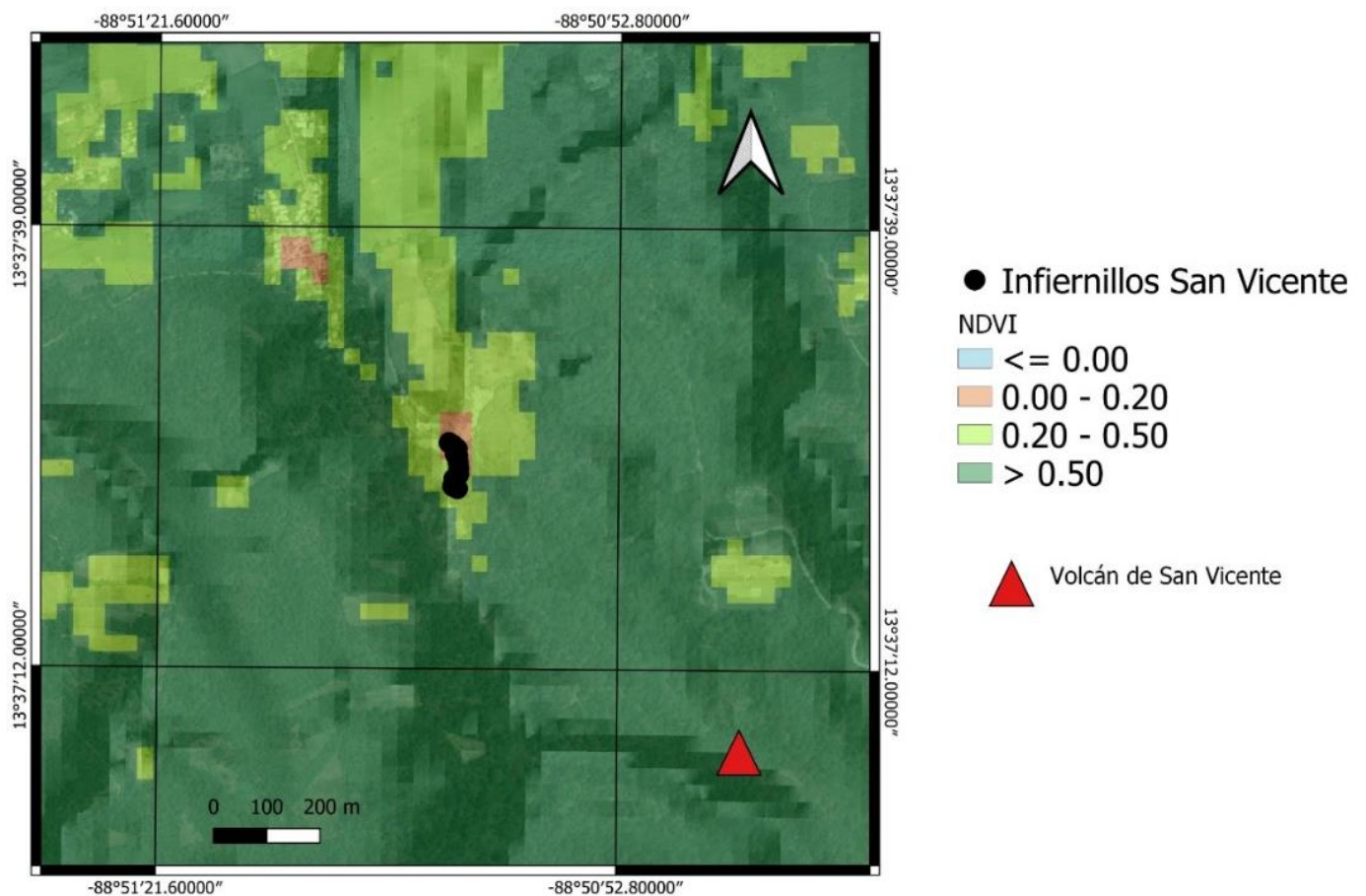


Figura 104: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

La emisividad se estimó para las dos bandas térmicas de los sensores TIRS por separado utilizando el método de umbral NDVI con la *Ecuación 12*. Los resultados mostraron que los valores oscilan entre 0,97 y 0,98. Demostrando que se encuentra en suelo desnudo.

Realizando los pasos especificados en el diagrama de flujo de la sección **3.3.1.2**, para las bandas TIRS, MODIS y las bandas procesadas OLI, se realiza el cálculo de la temperatura superficial LST por medio de la *Ecuación 25*.

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 25 a 40°C.

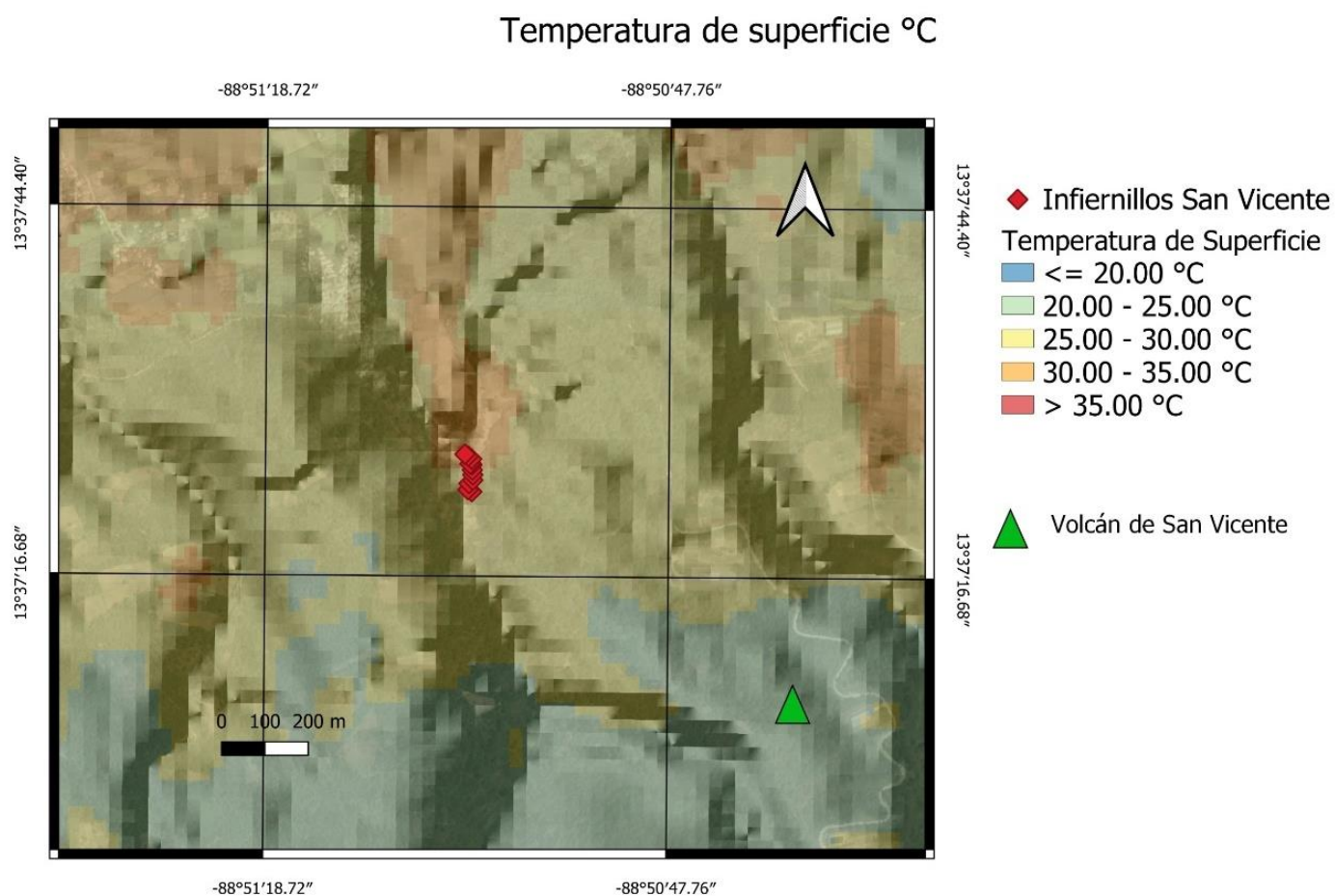


Figura 105: Estado Térmico del área de estudio utilizando la temperatura de superficie terrestre. Fuente: Elaboración propia

La temperatura ambiente se calculó con la *Ecuación 26* y finalmente se calculó el Flujo de Calor Radiante (RHF) del lugar estudiado utilizando la *Ecuación 28*.

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 20 W/m² y 60 W/m².

Los valores de flujo de calor resultantes de las mediciones en campo y los valores obtenidos por medio del tratamiento satelital se comparan en la *Tabla 11*.

En el punto 2 el flujo de calor teórico reporta un valor elevado debido a que la temperatura medida con cámara termográfica está a una distancia de aproximadamente 5 centímetros del punto por lo que la medición es de 84 °C, en el resultado por teledetección no se logra apreciar dicha temperatura debido a que los pixeles tienen una medida de 30 metros y la separación de los puntos es 8 metros.

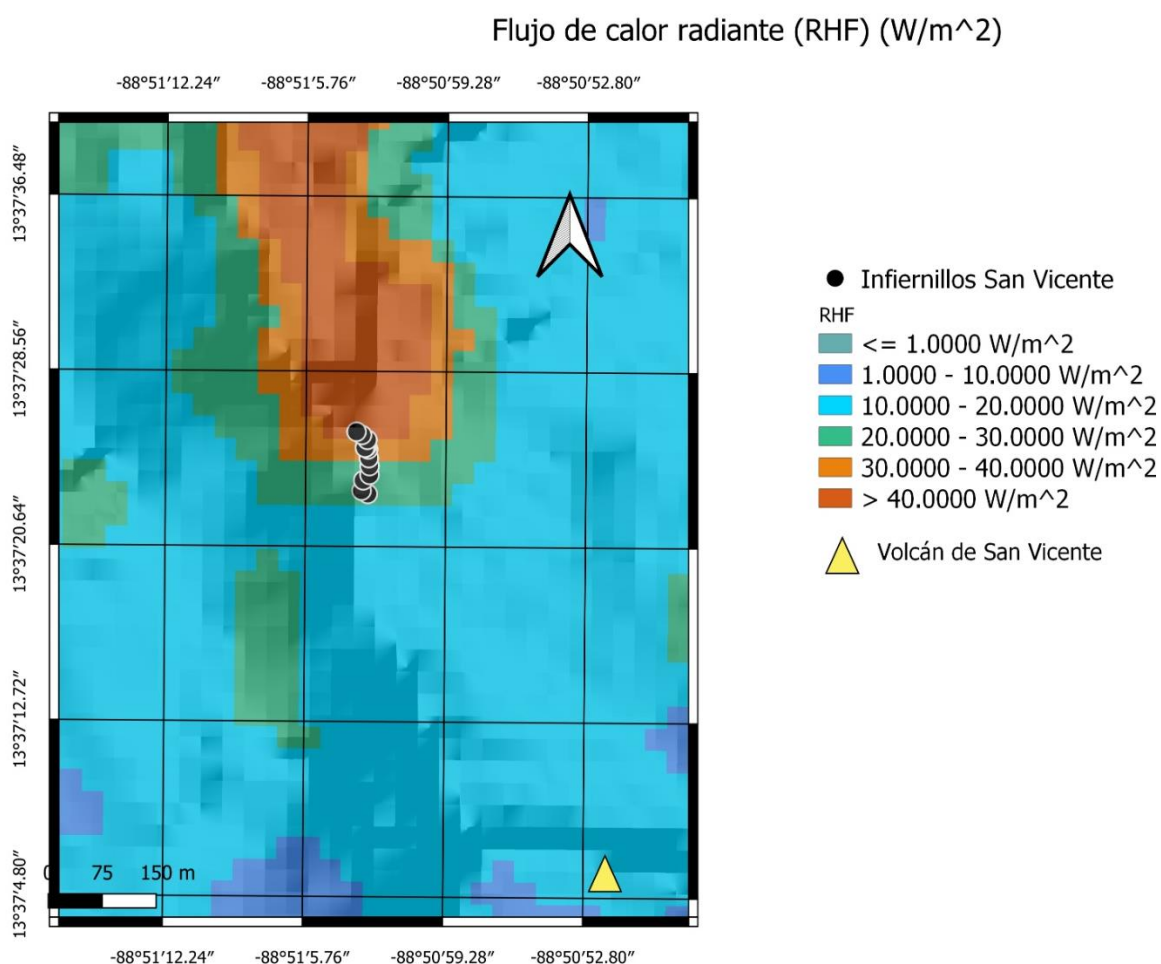


Figura 106: Flujo de Calor Radiante (RHF) en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m ²]
1	25.17	20.84
2	409.54	20.81
3	127.17	26.51
4	32.48	25.53
5	34.00	25.53
6	25.22	32.39
7	101.31	32.39
8	26.27	32.39
9	503.64	33.46
10	98.38	32.39
11	59.86	40.71
12	48.49	40.72

Tabla 11: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.

4.2. AUSOLES CERRO CUYANAUSUL, AHUACHAPAN.

4.2.1. Área de Estudio

El presente estudio se realizó en la zona occidental de El Salvador, en el departamento de Ahuachapán específicamente en las faldas del cerro Cuyanausul.

El grupo de los ausoles Cuyanausul se encuentran en diferentes puntos del cerro, uno de ellos ubicado en la finca Las Brumas el cual es conocido por el nombre “Ausoles Respiraderos”, el segundo punto hidrotermal se encuentra en la finca Termopilas conocido por el nombre “Ausoles Termopilas” y el tercer punto visitado se encuentra ubicado en el cantón Tortuguero, y son conocidos como “Ausoles Tortugueros”.

Para llegar se desvía en Turín, encontrando más próximo los Ausoles Tortuguero, siguiendo la calle principal y desviándose en la finca las Termopilas se encuentran los Ausoles Termopilas y siguiendo la calle principal se llega a la finca El Ingenio donde caminado se puede llegar a los Ausoles Respiraderos.

En la siguiente figura se puede observar el mapa de elevación y ubicación de los tres puntos visitados con potencial geotérmico ubicados en el cerro Cuyanausul.

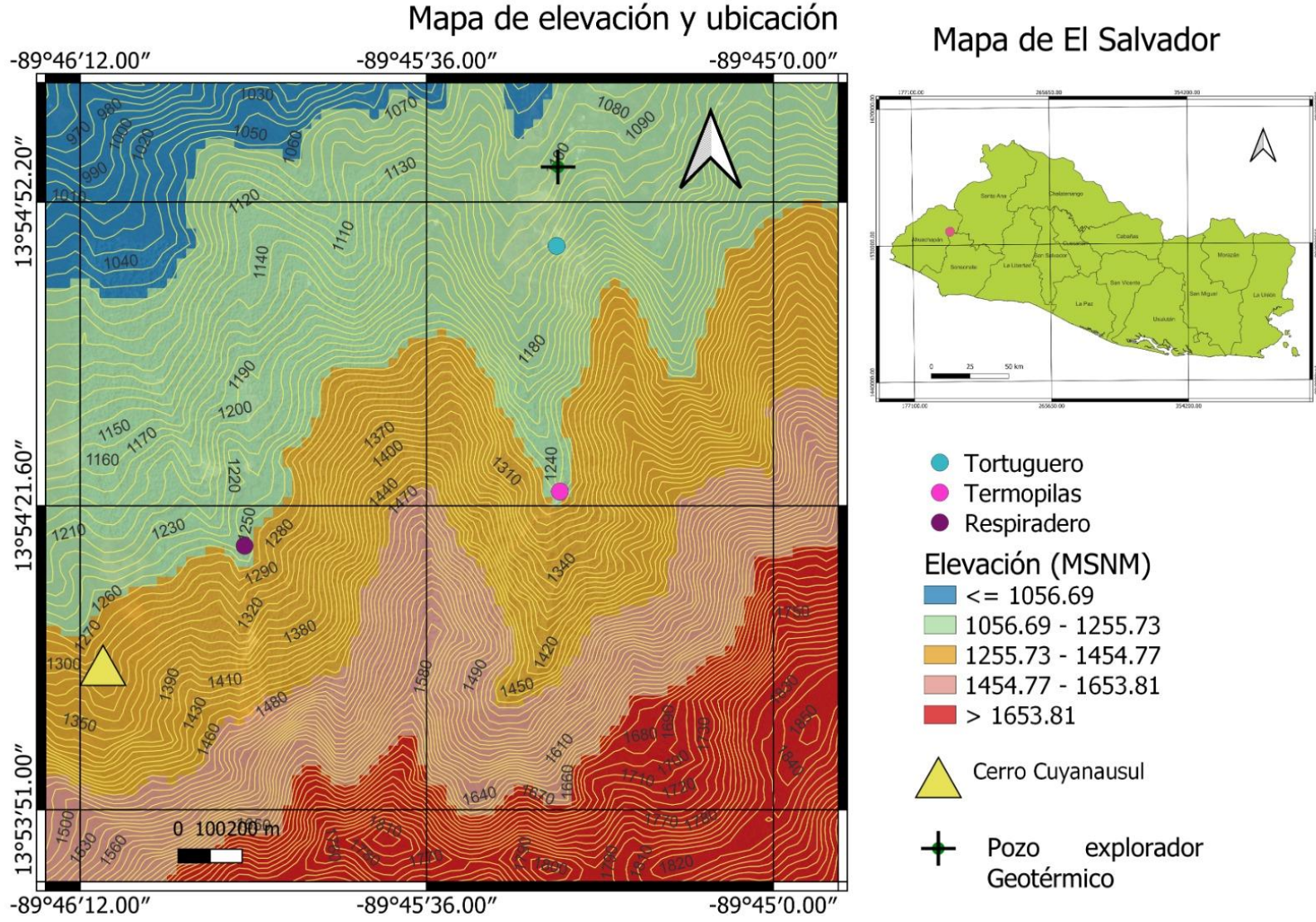


Figura 107: Mapa de ubicación “Ausoles Cerro Cuyanausul” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1. Área Ausoles Respiradero

El área de estudio de los Ausoles Respiradero se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 21,213 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.

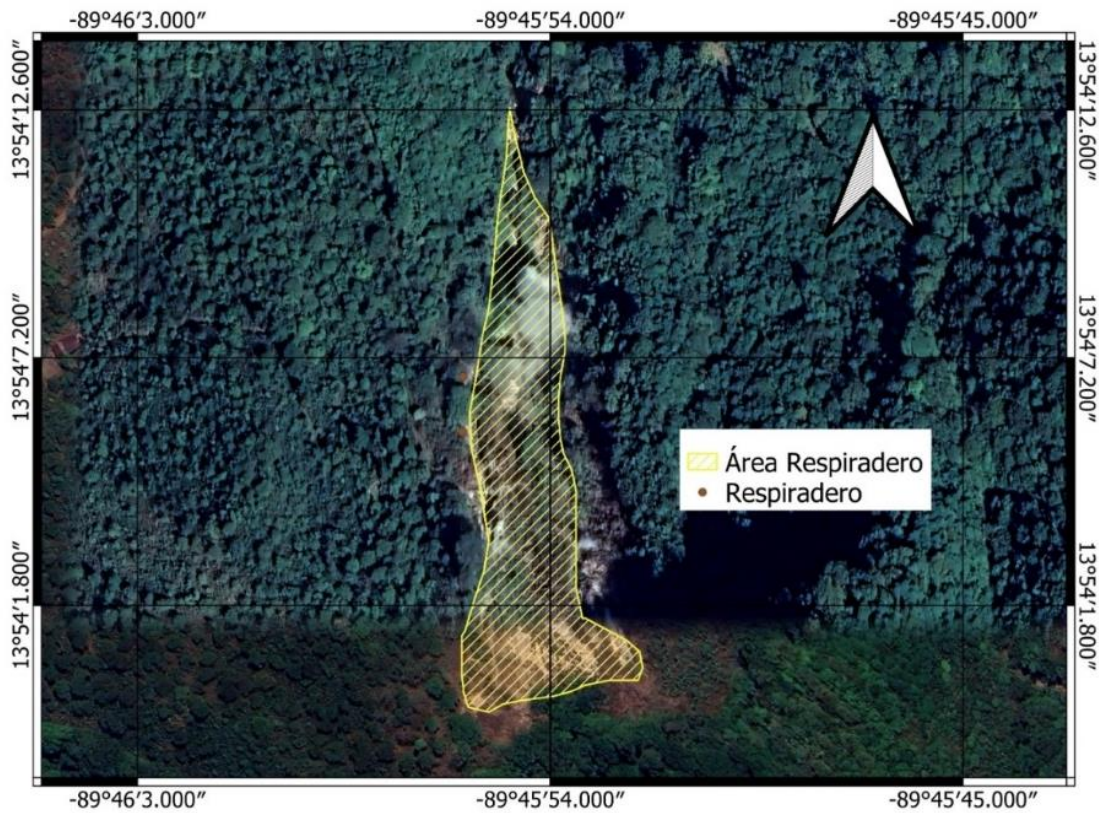


Figura 108: Vista Satelital del Área de Estudio Respiradero. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2. Área Ausoles Termopilas

El área de estudio de los Ausoles Termopilas se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 3,750 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.

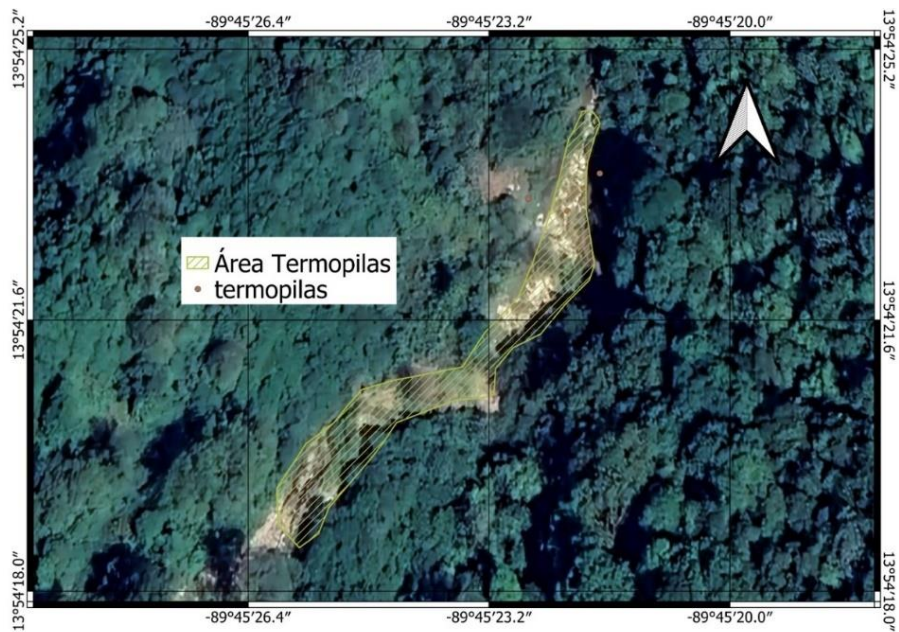


Figura 109: Vista Satelital del Área de Estudio Termopilas. Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3. Área Ausoles Tortuguero

El área de estudio de los Ausoles Tortuguero se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 47,389 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.

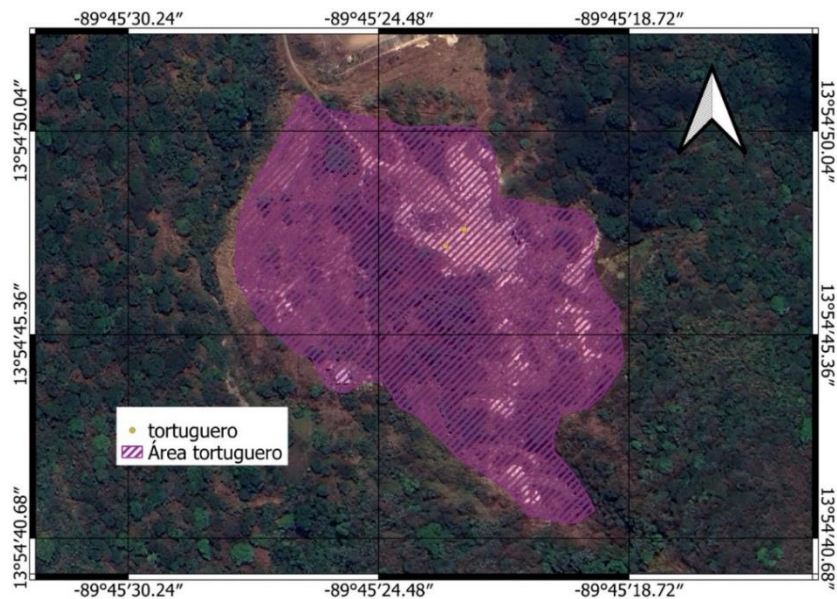


Figura 110: Vista Satelital del Área de Estudio Tortuguero. Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Visita de Campo

El día 05 de mayo del año 2023 se realizó una visita de campo a los ausoles del cerro Cuyanausul, Ahuachapán; El Salvador.

Al realizar la visita de campo, se inspecciono 3 puntos con potencial geotérmico, el primer lugar fue Ausoles Respiradero, el segundo fue Ausoles Termopilas y el tercer punto inspeccionado fue Ausoles Tortuguero. Al llegar a los puntos específicos se observó a simple vista la falla tectónica con fumarolas visibles, detectando potencial geotérmico, por lo que nos dirigimos a marcar puntos a los cuales se realizaron mediciones térmicas, obteniendo como resultado temperaturas cercanas a los 100 °C.

4.2.2.1. Visita de Campo Ausoles Respiradero

El día 5 de mayo del 2023 se realizó la visita de campo a los Ausoles Respiradero, llegando con vehículo 4x4 a la finca El Ingenio la cual se encuentra a una elevación de 1258 metros sobre el nivel del mar, a partir de ese punto se llegó al destino caminando alrededor de 40 minutos, el área con potencial geotérmico se encuentra ubicado en la finca Las Brumas encontrándose a una elevación de 1375 metros sobre el nivel del mar.

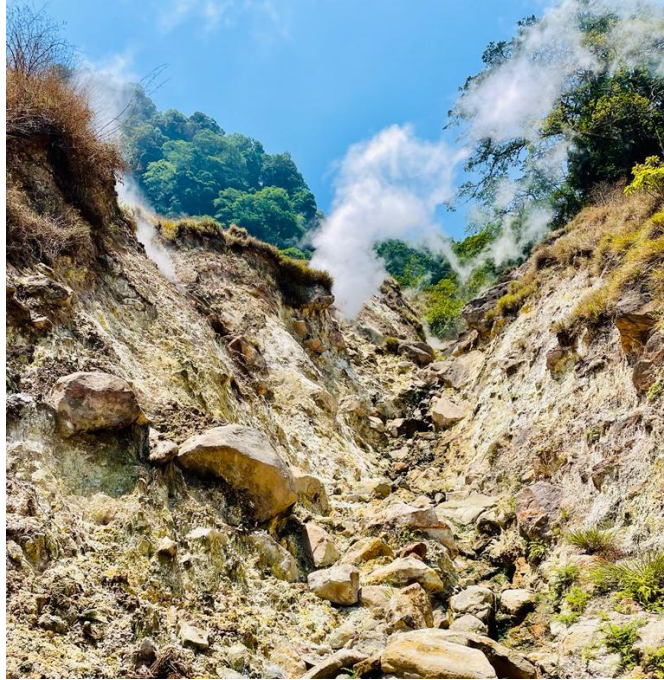


Figura 111: Fotografía tomada en el Área de Estudio Respiradero. Fuente: Fotografía propia

4.2.2.2. Visita de Campo Ausoles Termopilas

El día 5 de mayo del 2023 se realizó la visita de campo a los Ausoles Termopilas, llegando con vehículo 4x4 a la finca Termopilas la cual se encuentra a una elevación de 1178 metros sobre el nivel del mar, a partir de ese punto se llegó al destino caminando alrededor de 50 minutos, el área con potencial geotérmico se encuentra ubicado en una quebrada la cual fue recorrida para llegar al área de interés, la región hidrotermal se encuentra a una elevación de 1274 metros sobre el nivel del mar.



Figura 112: Fotografía tomada en el Área de Estudio Termopilas. Fuente: Fotografía propia

4.2.2.3. Visita de Campo Ausoles Tortuguero

El día 5 de mayo del 2023 se realizó la visita de campo a los Ausoles Tortuguero, llegando con vehículo 4x4 a los pozos geotérmicos construidos por la GEO la cual se encuentra a una elevación de 1107 metros sobre el nivel del mar, a partir de ese punto se llegó al destino caminando alrededor de 10 minutos, el área con potencial geotérmico se encuentra a una elevación de 1137 metros sobre el nivel del mar.

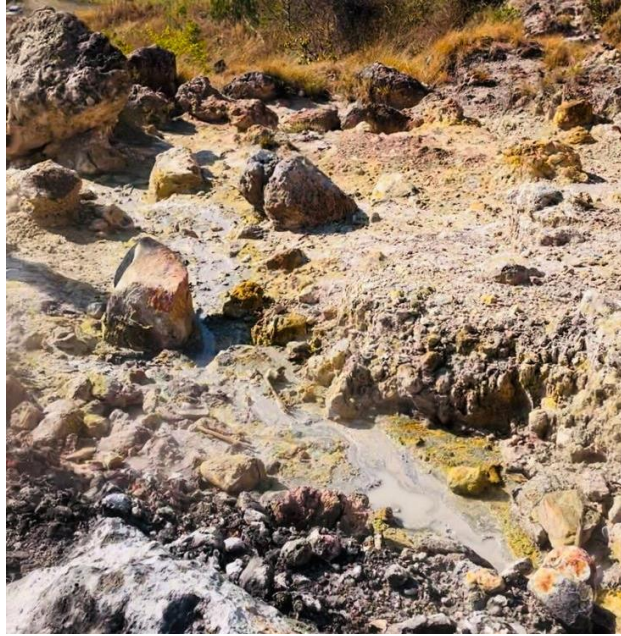


Figura 113: Fotografía tomada en el Área de Estudio Tortuguero. Fuente: Fotografía propia

4.2.3. Mediciones y Recolección de Datos

Al llegar al área de interés se procedió a realizar inspecciones en la zona, marcando puntos de coordenadas con el geolocalizador GARMIN GPSMAP 64S y a la vez haciendo orificios para insertar la termocupla del termómetro e hidrómetro y en los mismos se realizó la medición de temperatura con cámara termográfica incluyendo temperaturas en el agua de la zona hidrotermal.

4.2.3.1. Ausoles Respiradero

En los Ausoles Respiradero se tomaron mediciones termográficas en varios puntos de la zona hidrotermal marcando la zona con un geolocalizador que nos indica la elevación a nivel del mar y las coordenadas donde se sitúa.

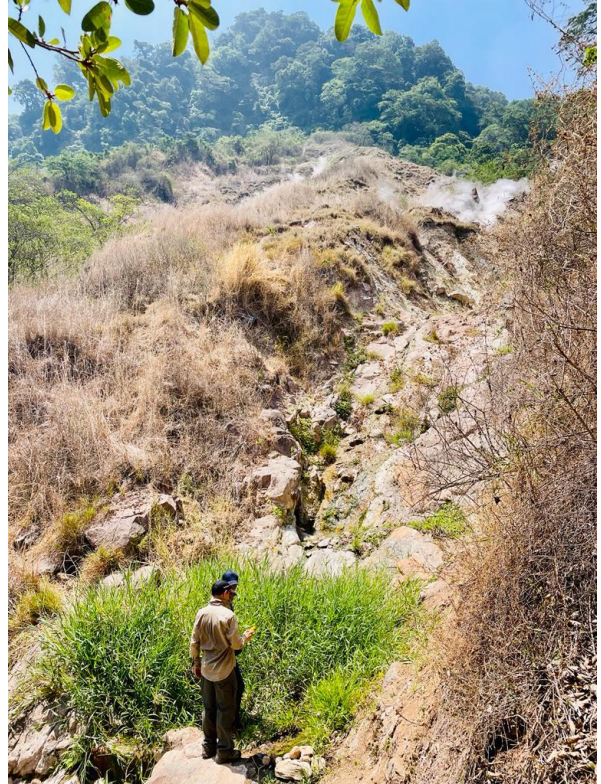


Figura 114: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Respiradero. Fuente: Fotografías propias

➤ **Datos Obtenidos:**

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Elevación a nivel del mar
					Latitud	Longitud	
1	5/5/2023	09:42	-	29.00	13.908746	-89.765004	1,258
2	5/5/2023	10:28	-	32.00	13.90198	-89.768178	1,375
3	5/5/2023	10:45	50.00	32.00	13.901551	-89.65532	1,380
4	5/5/2023	11:00	60.00	35.00	13.901306	-89.765381	1,387
5	5/5/2023	11:08	65.00	36.00	13.901605	-89.78351	1,359
6	5/5/2023	11:14	81.00	38.00	13.901885	-89.765527	1,361
7	5/5/2023	11:33	65.00	37.00	13.902021	-89.765728	1,369

Tabla 12: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia

El punto 1 fue tomado en la finca El Ingenio y el punto 2 en la finca Las Brumas, del punto 3 al punto 7 fueron medidos en el área de ausoles respiradero.

4.2.3.2. Ausoles Termopilas

En los Ausoles Termopilas se tomaron mediciones termográficas en varios puntos de la zona hidrotermal marcando la zona con un geolocalizador que nos indica la elevación a nivel del mar y las coordenadas donde se sitúa.



Figura 115: Mediciones y recolección de datos en el Área de Estudio Ausoles Termopilas.

Fuente: Fotografías propias

➤ **Datos Obtenidos:**

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura medida a una profundidad de 20cm con termocupla tipo K [°C]	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Porcentaje de Humedad [%]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Elevación sobre el nivel del mar
							Latitud	Longitud	
1	5/5/2023	12:27	-	-	34.00	-	13.914002	-89.759876	1,178
2	5/5/2023	01:08	-	-	36.00	-	13.906448	-89.7563	1,210
3	5/5/2023	01:15	63.00	55.00	38.00	34.80	13.906541	-89.756036	1,262
4	5/5/2023	01:25	92.00	91.00	43.00	56.30	13.906486	-89.756094	1,274
5	5/5/2023	01:35	95.00	85.00	42.00	37.00	13.906403	-89.756156	1,265
6	5/5/2023	01:40	47.00	45.00	38.00	36.50	13.90642	-89.756348	1,264

Tabla 13: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia

4.2.3.3. Ausoles Tortuguero

En los Ausoles Tortuguero se tomaron mediciones termográficas en varios puntos de la zona hidrotermal marcando la zona con un geolocalizador que nos indica la elevación a nivel del mar y las coordenadas donde se sitúa, en este sitio se encuentra un pozo geotérmico construido por la GEO con fines exploratorios.



Figura 116: Pozo geotérmico instalado por la GEO. Fuente: Fotografía propia



Figura 117: Mediciones y recolección de datos en el Área de Estudio. Fuente: Fotografía propia

➤ **Datos Obtenidos:**

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura medida a una profundidad de 20cm con termocupla tipo K [°C]	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Elevación sobre el nivel del mar
						Latitud	Longitud	
1	5/5/2023	03:17	-	-	35.00	13.914745	-89.756912	1,107
2	5/5/2023	03:38	89.00	90.00	43.00	13.913167	-89.756325	1,137
3	5/5/2023	03:45	88.00	87.00	39.00	13.913272	-89.756252	1,137
4	5/5/2023	03:50	75.00	70.00	38.00	13.91337	-89.756126	1,140

Tabla 14: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración Propia.

El punto numero 1 pertenece a la ubicación de los pozos exploratorios de la GEO.

4.2.4. Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante

Con los datos recolectados se procede a realizar el cálculo del flujo de calor radiante utilizando la *Ecuación 27*.

Para la obtención de la transmisividad atmosférica se utilizó el valor de 0.52 obtenido por medio de la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA, explicado en el capítulo 3 sección **Transmisividad Atmosférica**.

4.2.4.1. Ausoles Respiradero

De la tabla de datos recolectados en ausoles Respiradero se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 15*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	-
2	-
3	64.55
4	95.40
5	113.86
6	183.70
7	110.43

Tabla 15: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Respiradero. Fuente: Elaboración Propia

4.2.4.2. Ausoles Termopilas

De la tabla de datos recolectados en ausoles Termopilas se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 16*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	-
2	-
3	64.22
4	219.42
5	190.39
6	25.21

Tabla 16: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia

4.2.4.3. Ausoles Tortuguero

De la tabla de datos recolectados en ausoles Tortuguero se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 17*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	-
2	213.86
3	211.80
4	129.81

Tabla 17: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia

4.2.5. Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital

Posteriormente a la visita de campo se trabajó con las imágenes del sensor OLI y TIRS Colección 1 Nivel 2 de Landsat 8 el sensor capturo la imagen el día 12 de mayo del 2022 a las 16:18 horas. Dicha imagen utilizada no corresponde a la fecha de la visita debido a que las más cercanas a la fecha de la visita se encontraban con nubes que cubrían el lugar de interés y se optó por una de un año anterior para mantener los parámetros climáticos de la época del año.

Teniendo la imagen descargada se procede a realizar el tratamiento en el programa QGIS, en primer lugar, se desarrolla el flujograma del método Ventana Dividida para el cálculo de la Temperatura Superficial LST detallado en la sección 3.3.1.2. Para el procesamiento de las bandas OLI se obtuvo el Índice de Vegetación Normalizada NDVI de la región de interés (Ausoles Respiraderos, Ausoles Termopilas y Ausoles Tortuguero) utilizando la Ecuación 10. El valor del NDVI se divide en cuatro categorías para diferentes tipos de cobertura terrestre: vegetación completamente saludable ($NDVI > 0,5$), tierra mixta ($NDVI = 0,2-0,5$), tierra desnuda ($NDVI = 0-0,2$) y agua o humedal ($NDVI < 0$). El valor NDVI también se utilizó para la estimación de la emisividad de esta área de estudio mediante el método de umbral NDVI.

4.2.5.1. NDVI en Ausoles Respiradero

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 0.2 a 0.7 por lo que se define, como tierra mixta y vegetación saludable.

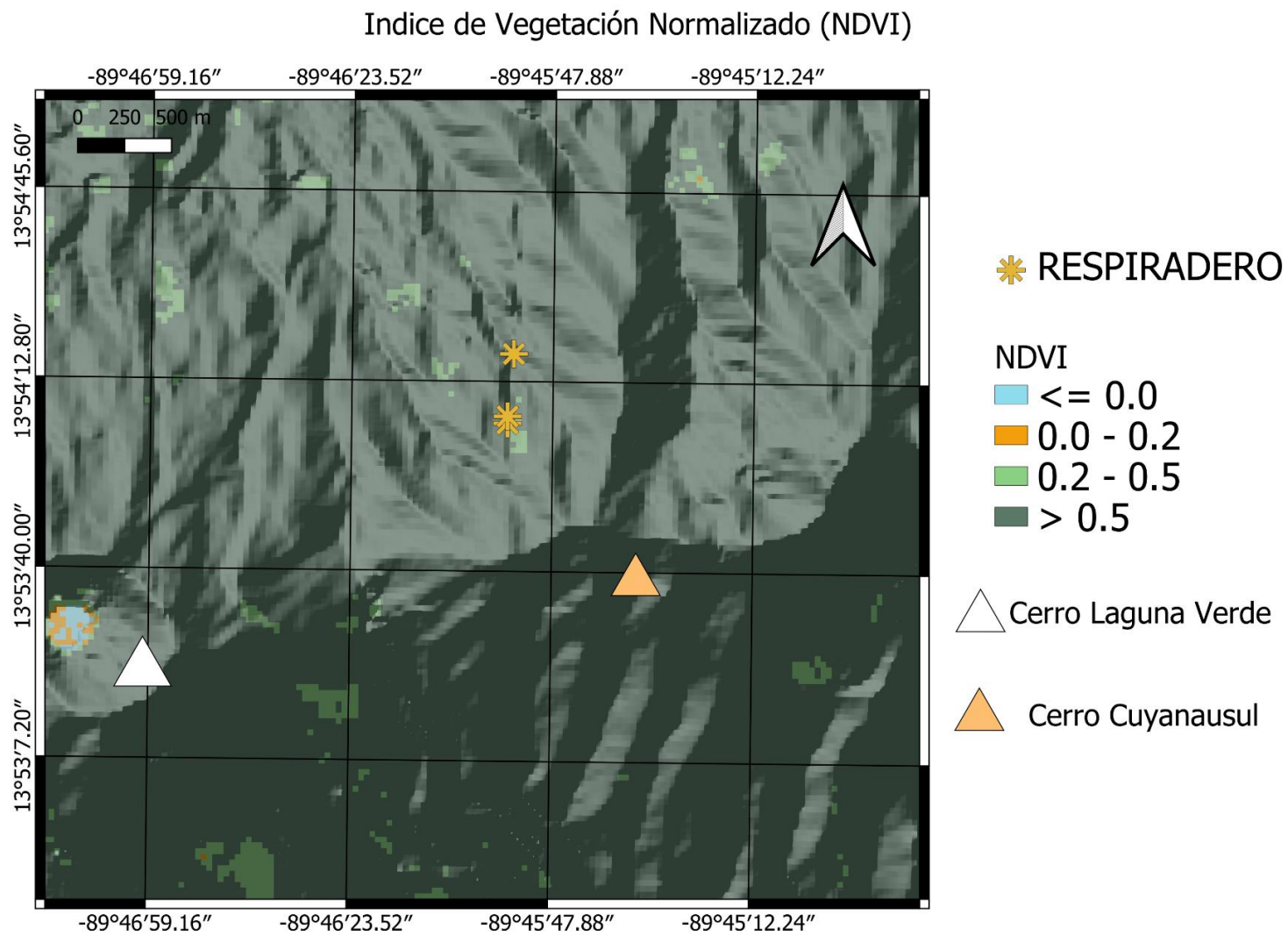


Figura 118: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Respiradero. Fuente:

Elaboración propia

4.2.5.2. NDVI en Ausoles Termopilas

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 0.2 a 0.75 por lo que se define, como tierra mixta y vegetación saludable.

Indice de Vegetación Normalizado (NDVI)

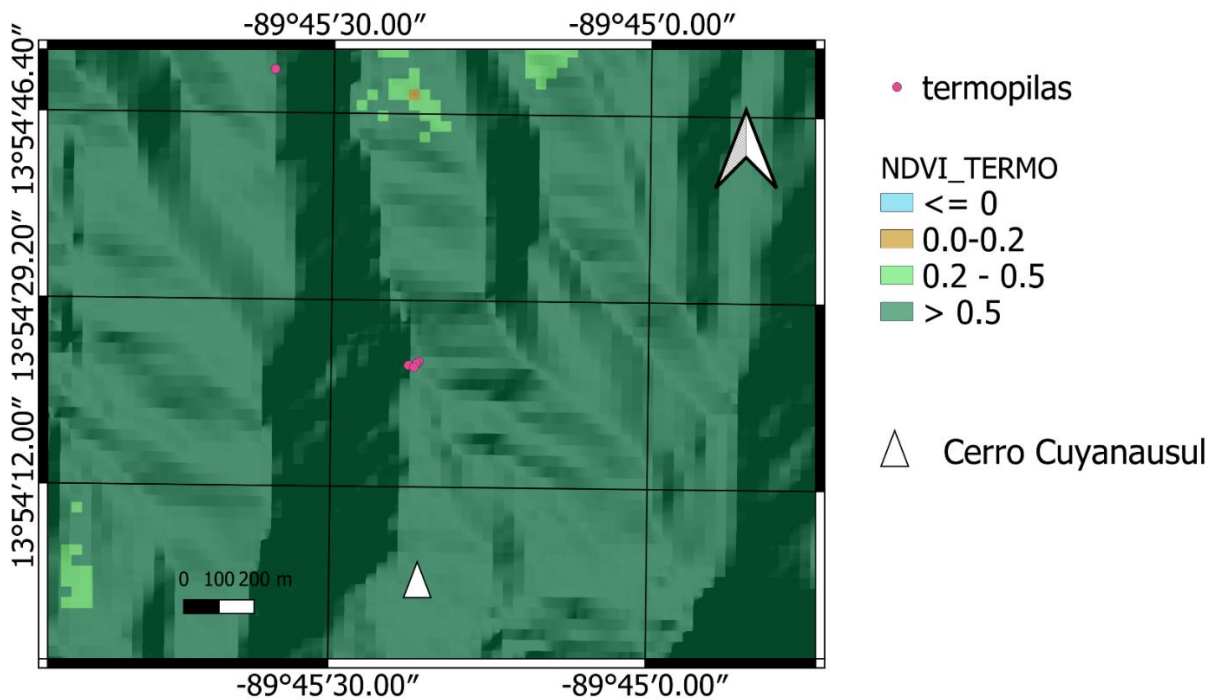


Figura 119: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia

4.2.5.3. NDVI en Ausoles Tortuguero

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 0.0 a 0.5 por lo que se define, como tierra mixta y tierra desnuda.

Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

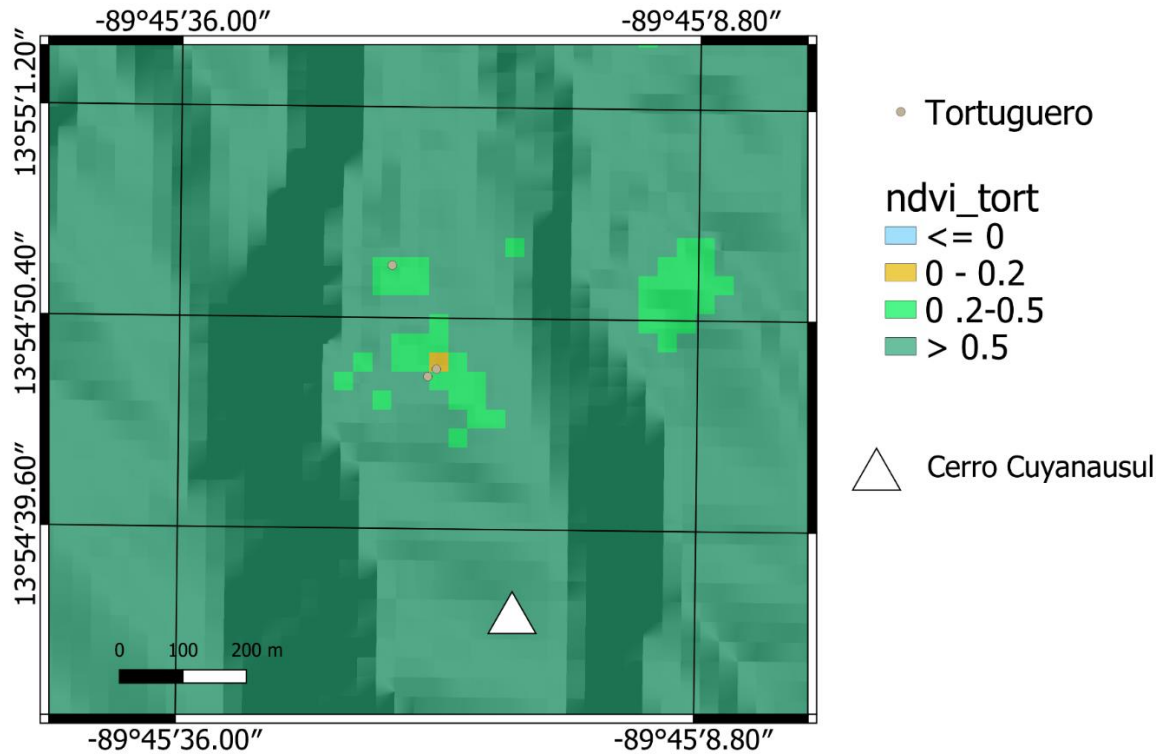


Figura 120: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Asoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia

4.2.5.4. LST Asoles Respiradero

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 25 a 40°C.

Temperatura de Superficie (°C)

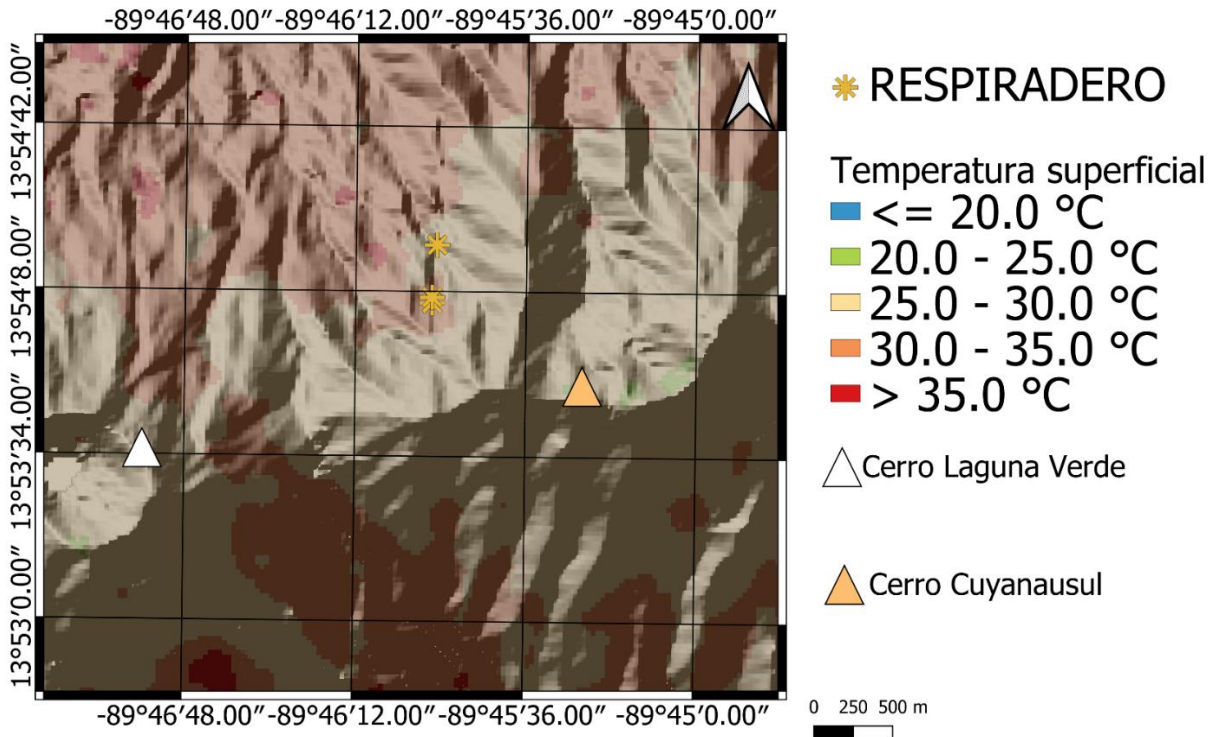


Figura 121: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Respiradero.

Fuente: Elaboración propia

4.2.5.5. LST Ausoles Termopilas

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 25 a 35°C.

Temperatura Superficie Terrestre (°C)

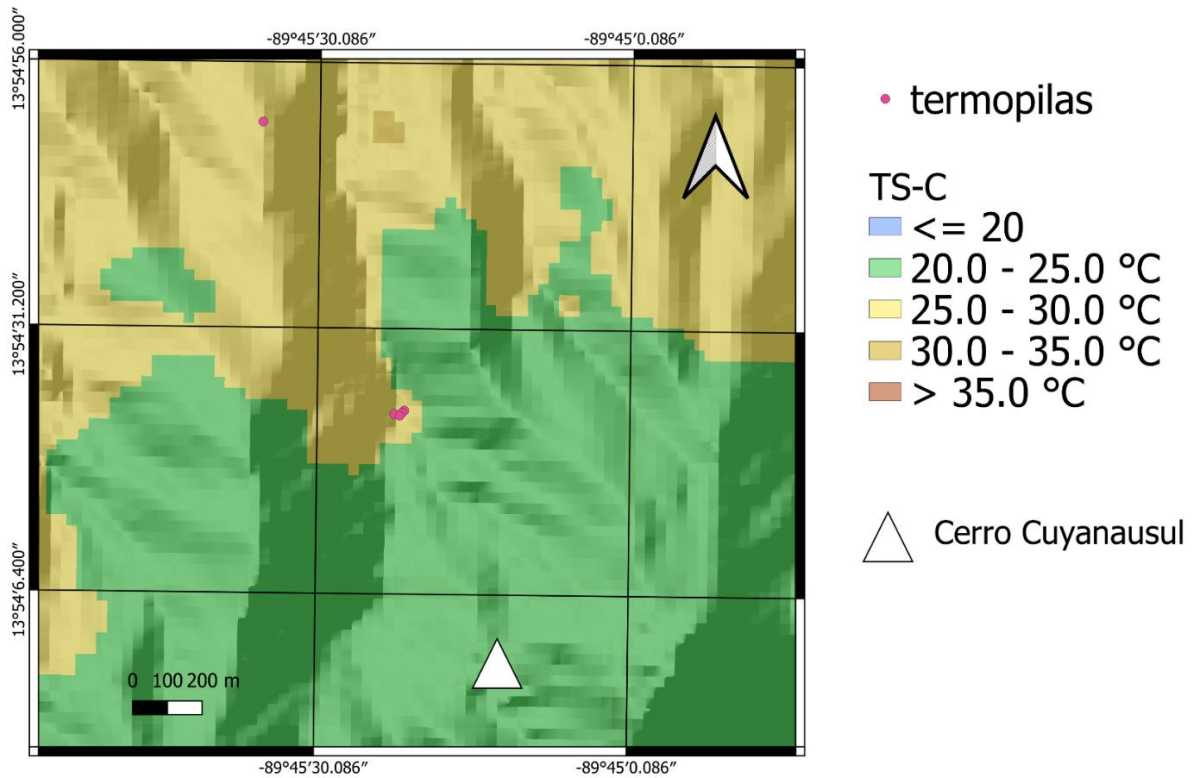


Figura 122: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Termopilas.

Fuente: Elaboración propia

4.2.5.6. LST Ausoles Termopilas

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 25 a 35°C

Temperatura Superficial Terrestre (°C)

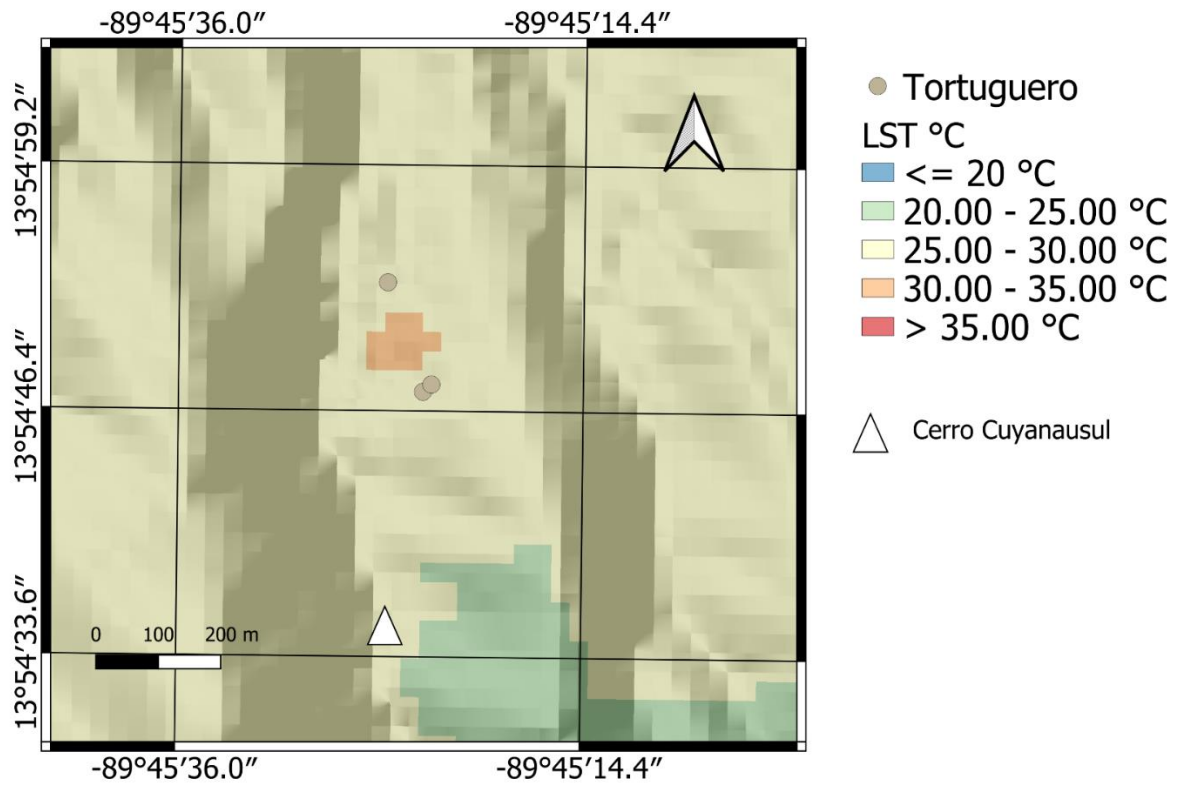


Figura 123: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Tortuguero.

Fuente: Elaboración propia

La temperatura ambiente se calculó con la *Ecuación 26* y finalmente se calculó el Flujo de Calor Radiante (RHF) de las áreas estudiadas utilizando la *Ecuación 28*.

4.2.5.7. RHF Ausoles Respiradero

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 30 W/m² y 70 W/m².

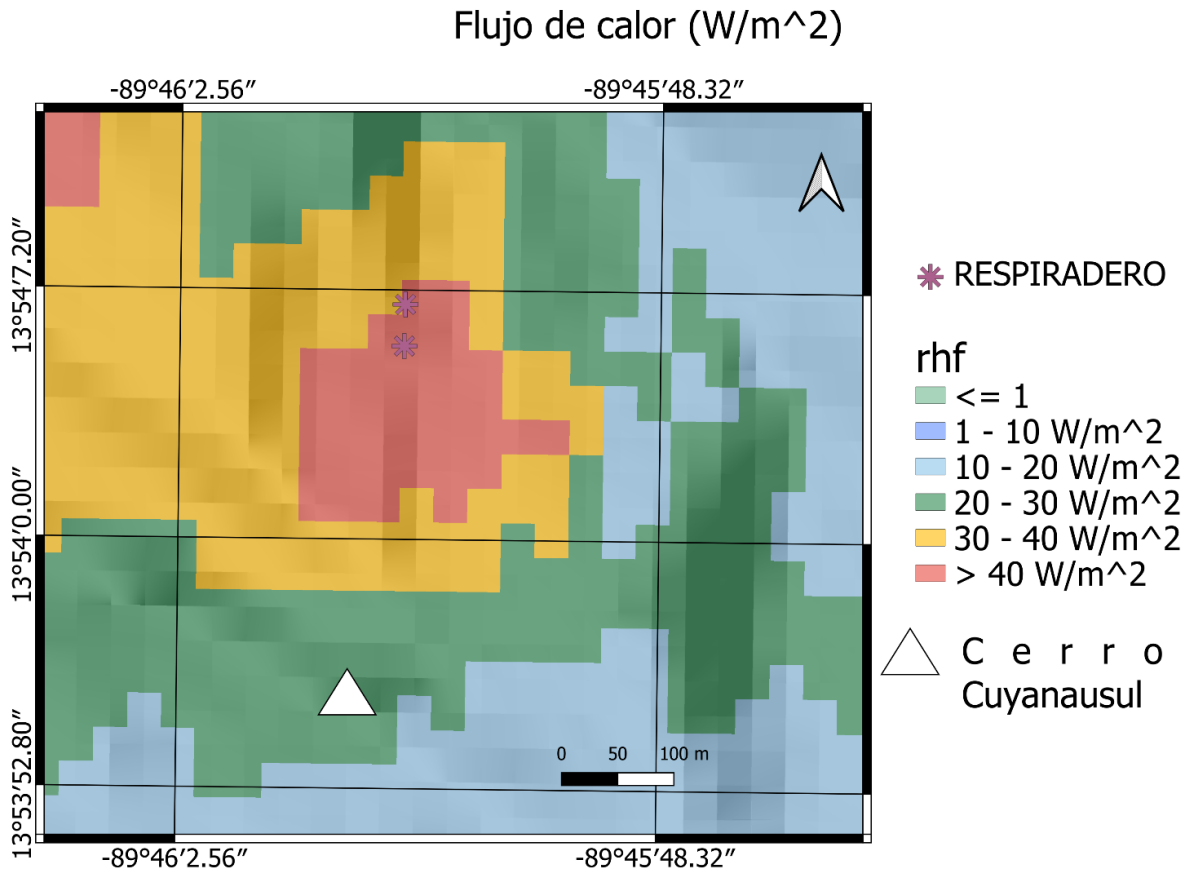


Figura 124: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Respiadero. Fuente: *Elaboración propia*

4.2.5.8. RHF Ausoles Termopilas

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 20 W/m² y 30 W/m².

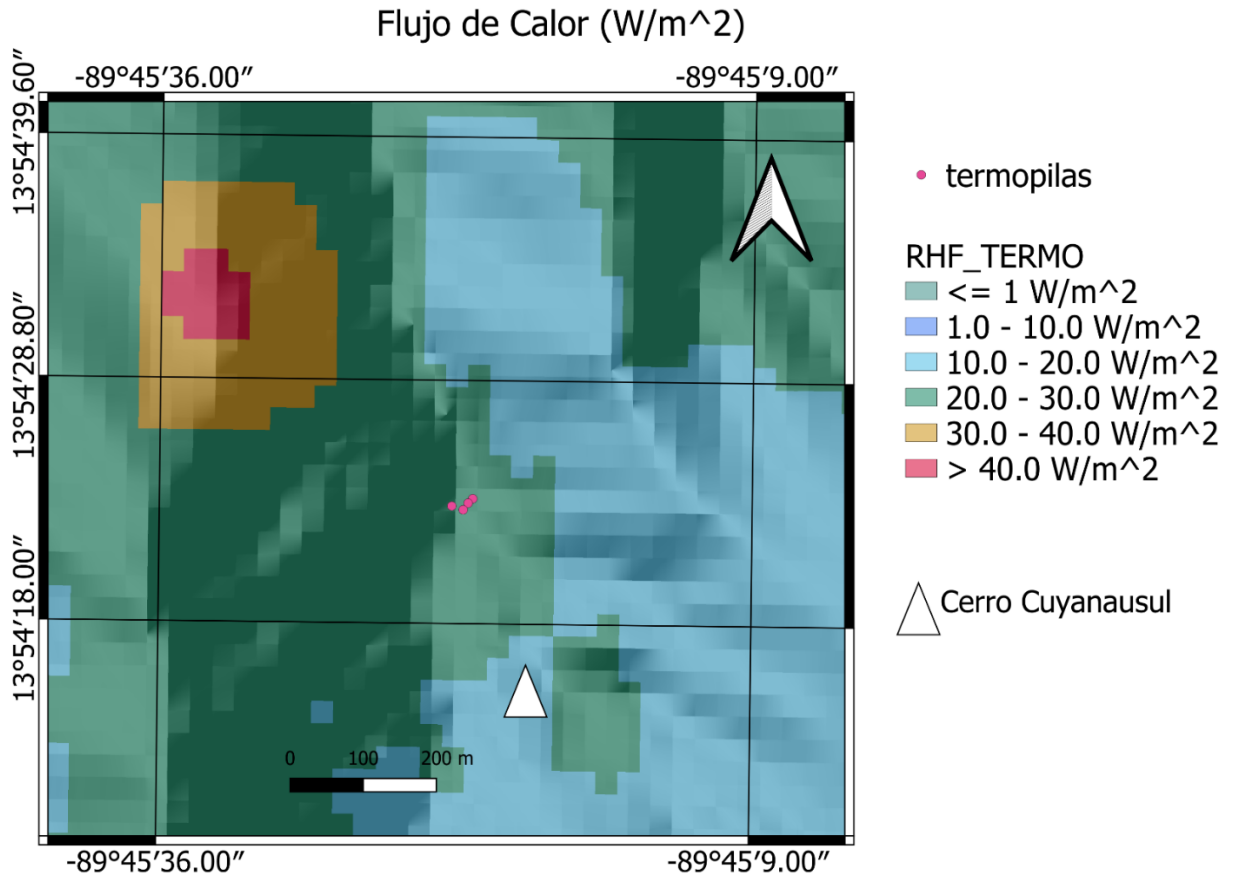


Figura 125: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Termopilas. Fuente: Elaboración propia

4.2.5.9. RHF Ausoles Tortuguero

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de $40 W/m^2$ y $80 W/m^2$.

Flujo de calor (W/m^2)

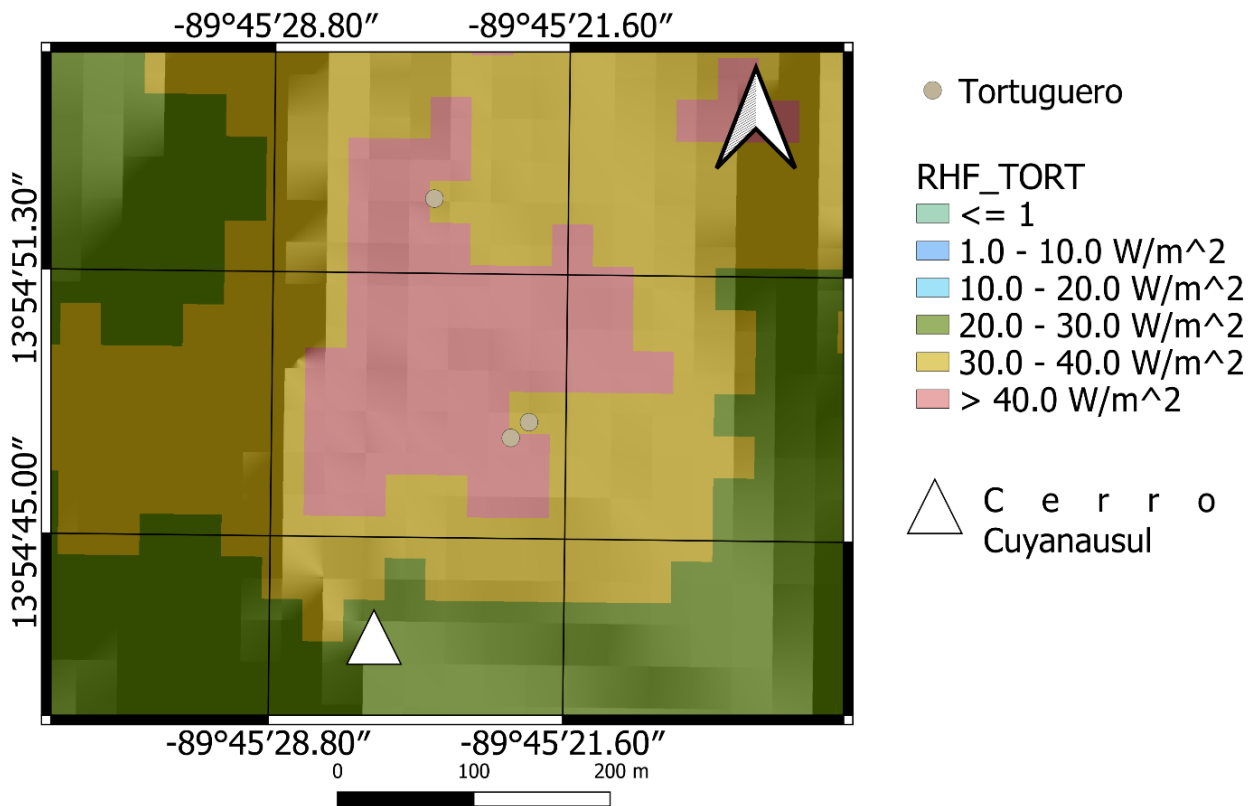


Figura 126: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Tortuguero. Fuente: Elaboración propia

Los valores de flujo de calor resultantes de las mediciones en campo y los valores obtenidos por medio del tratamiento satelital se comparan en los siguientes apartados.

4.2.5.10. Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Respiradero

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m ²]
1	-	-
2	-	-
3	64.55	45
4	95.40	60
5	113.86	68
6	183.70	70
7	110.43	65

Tabla 18: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración Propia.

4.2.5.11. Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Termopilas

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m ²]
1	-	-
2	-	-
3	64.22	21.50
4	219.42	30.00
5	190.39	29.80
6	25.21	20.00

Tabla 19: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5.12. Comparación de RHF (Teórico – Teledetección) Ausoles Tortuguero.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m ²]
1	-	-
2	213.86	73.00
3	211.80	70.25
4	129.81	68.50

Tabla 20: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia.

En el flujo de calor teórico se reportan algunos valores elevados debido a que la temperatura medida con cámara termográfica está a una distancia de aproximadamente 5 centímetros del punto, en el resultado por teledetección no se logra apreciar temperaturas tan exactas debido a que los pixeles tienen una medida de 30 metros.

4.3. AUSOLES CHILANGUERA, SAN MIGUEL.

4.3.1 Área de Estudio

El presente estudio se realizó en la zona oriental de El Salvador, en el departamento de San Miguel específicamente en Chilanguera en los ausoles conocidos como Laguna Agua Caliente.

En la siguiente figura se puede observar el mapa de elevación y ubicación del punto de interés visitado el cual presenta potencial geotérmico y está ubicado en Chilanguera San Miguel.

Mapa de ubicación y de elevación

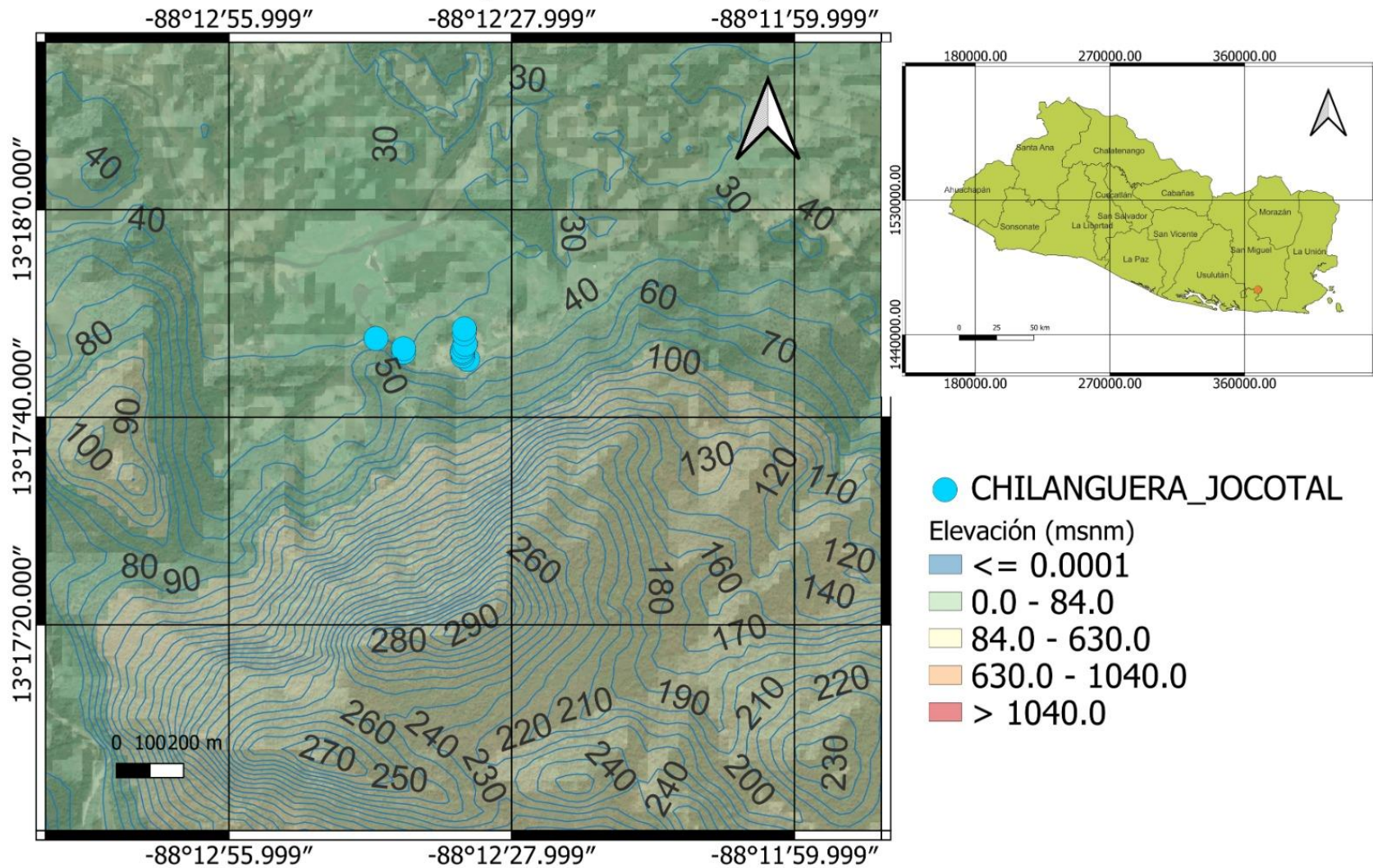


Figura 127: Mapa de ubicación “Asoles Laguna Agua Caliente, Chilanguera” con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia

El área de estudio de los Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 18,586 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.

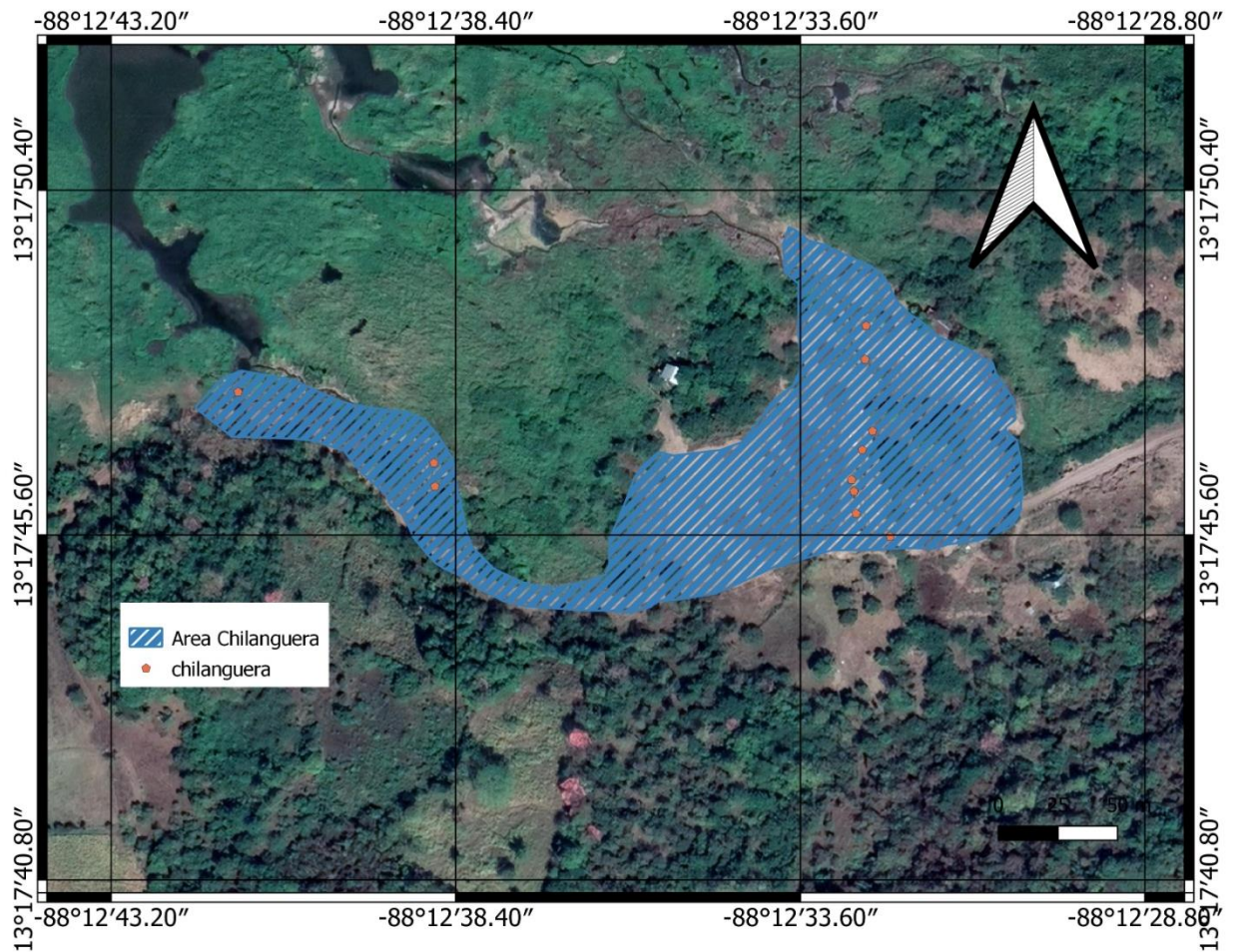


Figura 128: Vista Satelital del Área de Estudio Chilanguera. Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Visita de Campo

El día 20 de julio del año 2023 se realizó una visita de campo a los ausoles Laguna Agua Caliente de Chilanguera, San Miguel; El Salvador.

Al realizar la visita de campo, se observó a simple vista la falla tectónica con fumarolas y lagunas visibles, detectando potencial geotérmico, por lo que nos dirigimos a marcar puntos a los cuales

se realizaron mediciones térmicas, obteniendo como resultado temperaturas cercanas a los 100 °C. En dichos puntos se realizaron diferentes mediciones de temperatura en tierra firme dentro de la falla tectónica, además de mediciones en lagunas dentro de la falla.

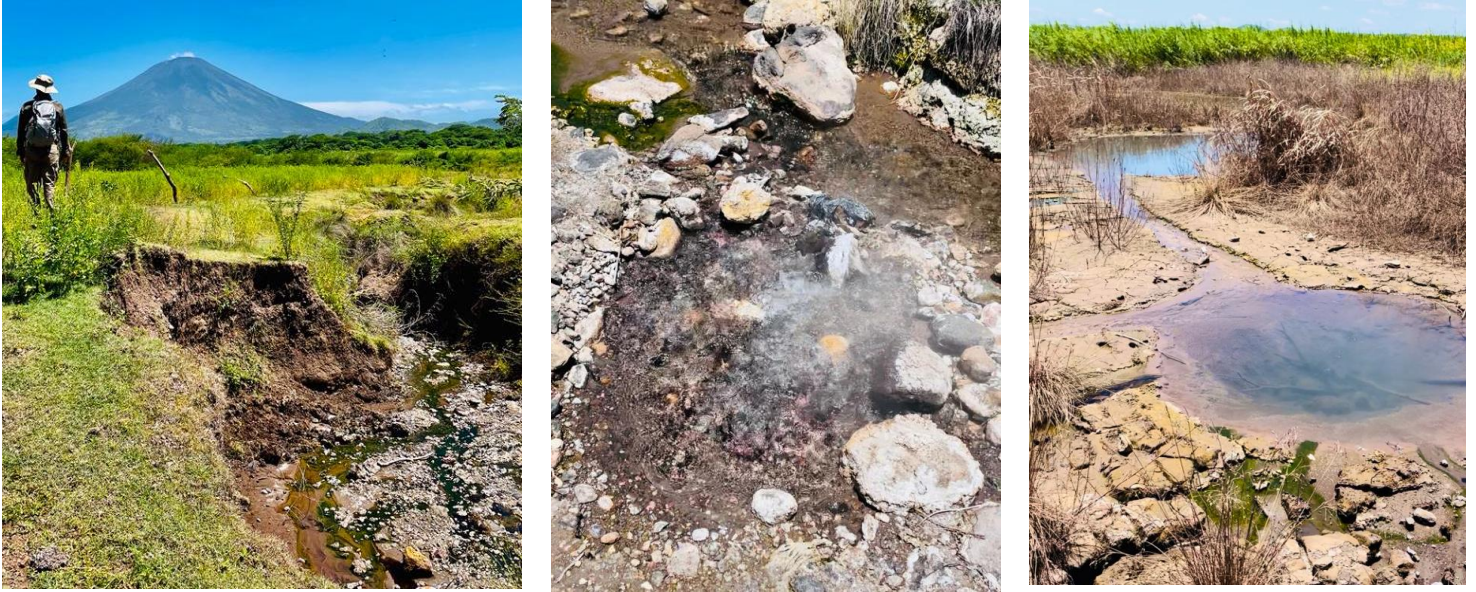


Figura 129: Fotografías tomadas en el Área de Estudio Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Fotografías propias

4.3.3. Mediciones y Recolección de Datos

Al llegar al área de interés se procedió a realizar inspecciones en la zona, marcando puntos de coordenadas con el geolocalizador GARMIN GPSMAP 64S y a la vez haciendo orificios para insertar la termocupla del termómetro e hidrómetro y en los mismos se realizó la medición de temperatura con cámara termográfica incluyendo temperaturas en el agua de la zona hidrotermal.



Figura 130: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Fotografías propias

4.3.4. Datos Recolectados

Las mediciones realizadas se reportan en la *Tabla 21*.

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura medida a una profundidad de 20cm con termocupla tipo K [°C]	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Elevación sobre el nivel del mar
							Latitud	Longitud	
1	20/7/2023	10:30	-	-	44.00	-	13.296026	-88.209102	42
2	20/7/2023	10:40	47.80	51.00	40.00	38.70	13.295995	-88.208986	39
3	20/7/2023	10:45	46.80	50.00	45.00	38.80	13.114995	-88.208986	40
4	20/7/2023	10:50	45.70	49.00	39.00	38.20	13.112995	-88.208986	40
5	20/7/2023	11:00	49.80	48.50	40.20	39.80	13.296083	-88.209118	40
6	20/7/2023	11:05	41.50	54.00	40.00	37.80	13.296169	-88.209126	40
7	20/7/2023	11:12	43.00	48.00	40.20	35.80	13.296214	-88.209135	42
8	20/7/2023	11:17	43.50	50.00	40.50	38.30	13.296329	-88.209094	41
9	20/7/2023	11:24	52.80	55.00	41.00	41.80	13.296402	-88.209054	40
10	20/7/2023	11:30	50.30	50.00	41.40	41.80	13.296677	-88.209083	37
11	20/7/2023	11:40	52.30	54.90	43.40	45.20	13.296809	-88.209079	37
12	20/7/2023	11:45	90.00	93.00	42.00	45.00	13.296278	-88.210751	39

Tabla 21: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia

De las mediciones obtenidas se especifica que el punto 1 se tomó como referencia de la llegada al área de interés, de los puntos 2 al punto 11 fueron medidos en tierra dentro de la falla tectónica y el punto 12 fue medido en un pozo de agua a punto de ebullición.

4.3.5. Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante

Con los datos recolectados se procede a realizar el cálculo del flujo de calor radiante utilizando la *Ecuación 27*.

Para la obtención de la transmisividad atmosférica se utilizó el valor de 0.50 obtenido por medio de la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA, explicado en el capítulo 3 sección **Transmisividad Atmosférica**.

De la tabla de datos recolectados se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 22*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	-
2	39.56
3	18.32
4	35.46
5	29.53
6	51.08
7	27.68
8	34.09
9	51.56
10	30.99
11	42.80
12	225.30

Tabla 22: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Elaboración propia.

4.3.6. Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital

Posteriormente a la visita de campo se trabajó con las imágenes del sensor OLI y TIRS Colección 1 Nivel 2 de Landsat 8 el sensor capturo la imagen el día 16 de enero del 2023 a las 16:18 horas. Dicha imagen utilizada no corresponde a la fecha de la visita debido a que las más cercanas a la fecha de la visita se encontraban con nubes que cubrían el lugar de interés.

Teniendo la imagen descargada se procede a realizar el tratamiento en el programa QGIS, en primer lugar, se desarrolla el flujograma del método Ventana Dividida para el cálculo de la Temperatura Superficial LST detallado en la sección 3.3.1.2. Para el procesamiento de las bandas OLI se obtuvo el Índice de Vegetación Normalizada NDVI de la región de interés (Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera) utilizando la *Ecuación 10*. El valor del NDVI se divide en cuatro categorías para diferentes tipos de cobertura terrestre: vegetación completamente saludable ($NDVI > 0,5$), tierra mixta ($NDVI = 0,2-0,5$), tierra desnuda ($NDVI = 0-0,2$) y agua o humedal ($NDVI < 0$). El valor NDVI también se utilizó para la estimación de la emisividad de esta área de estudio mediante el método de umbral NDVI.

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 0.0 a 0.5 por lo que se define, como tierra desnuda y tierra mixta.

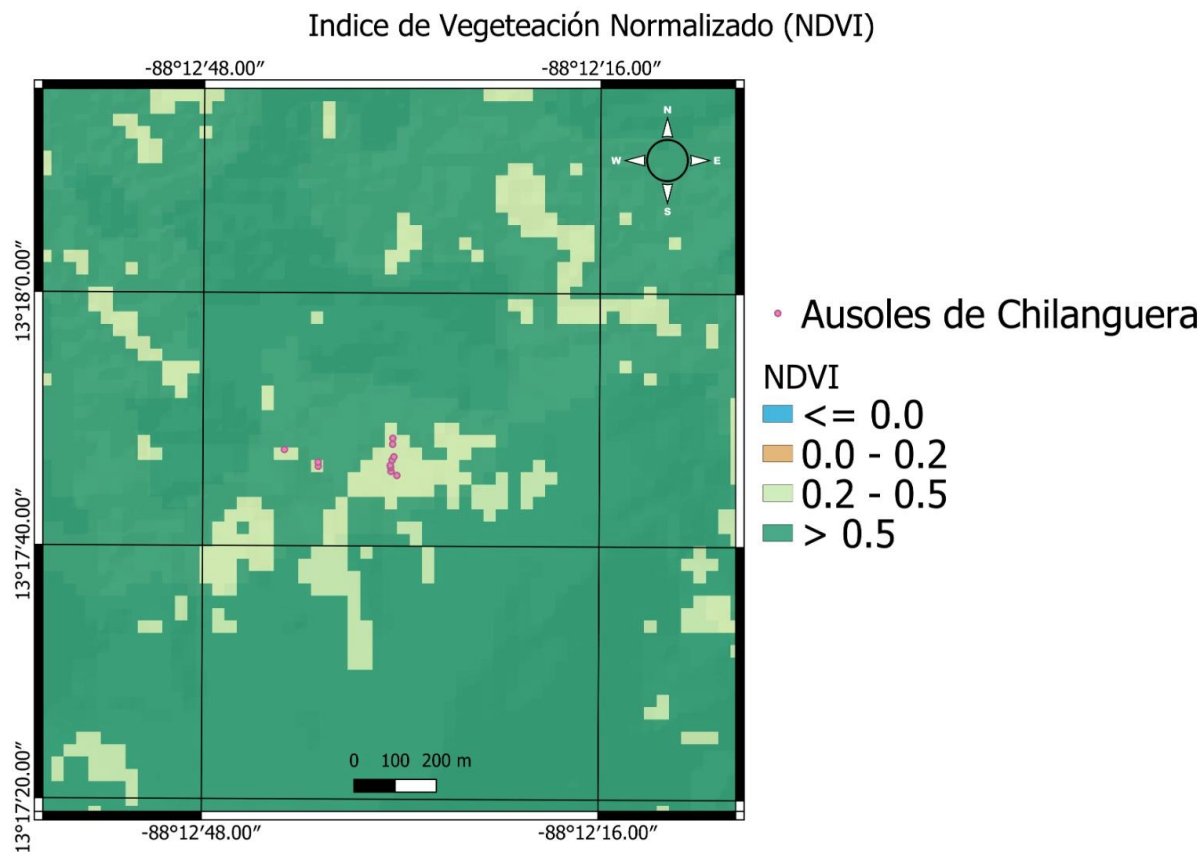


Figura 131: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Elaboración propia

La emisividad se estimó para las dos bandas térmicas de los sensores TIRS por separado utilizando el método de umbral NDVI con la *Ecuación 12*.

Realizando los pasos especificados en el diagrama de flujo de la sección **3.3.1.2**, para las bandas TIRS, MODIS y las bandas procesadas OLI, se realiza el cálculo de la temperatura superficial LST por medio de la *Ecuación 25*.

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 28.74 a 33.95°C.

Temperatura de Superficie Terrestre (°C)

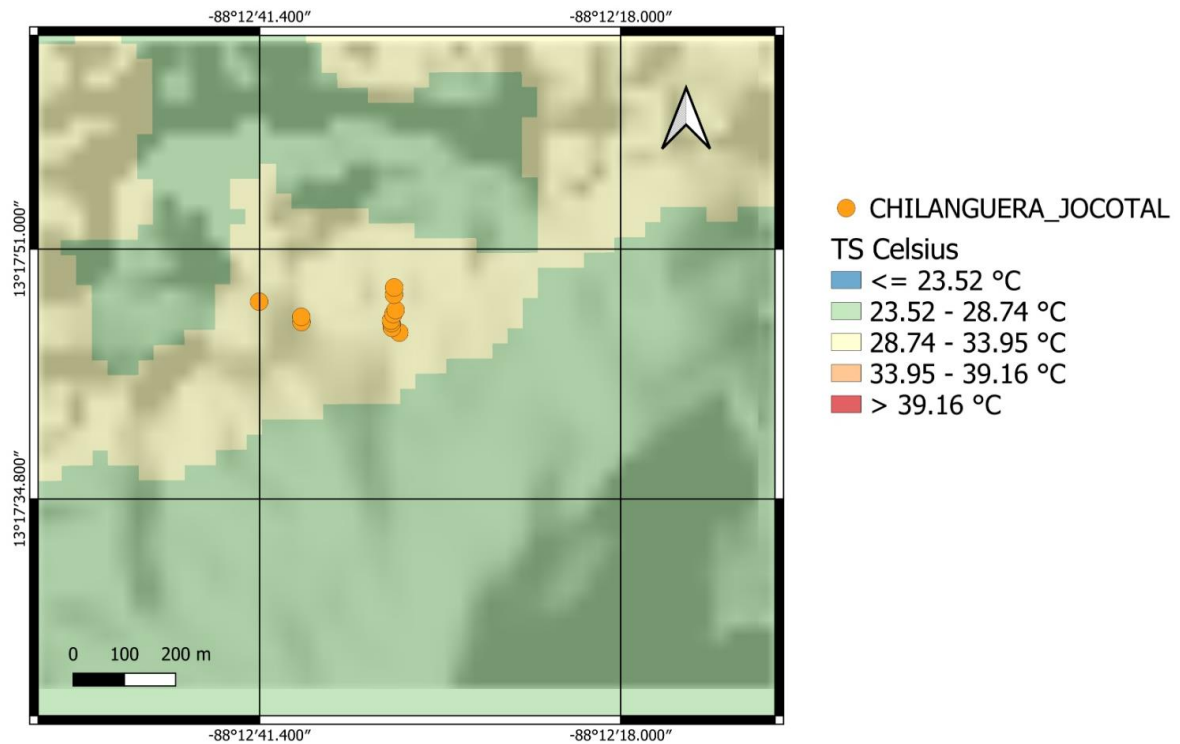


Figura 132: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Chilanguera.

Fuente: Elaboración propia

La temperatura ambiente se calculó con la *Ecuación 26* y finalmente se calculó el Flujo de Calor Radiante (RHF) de las áreas estudiadas utilizando la *Ecuación 28*.

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 20 - 40 W/m².

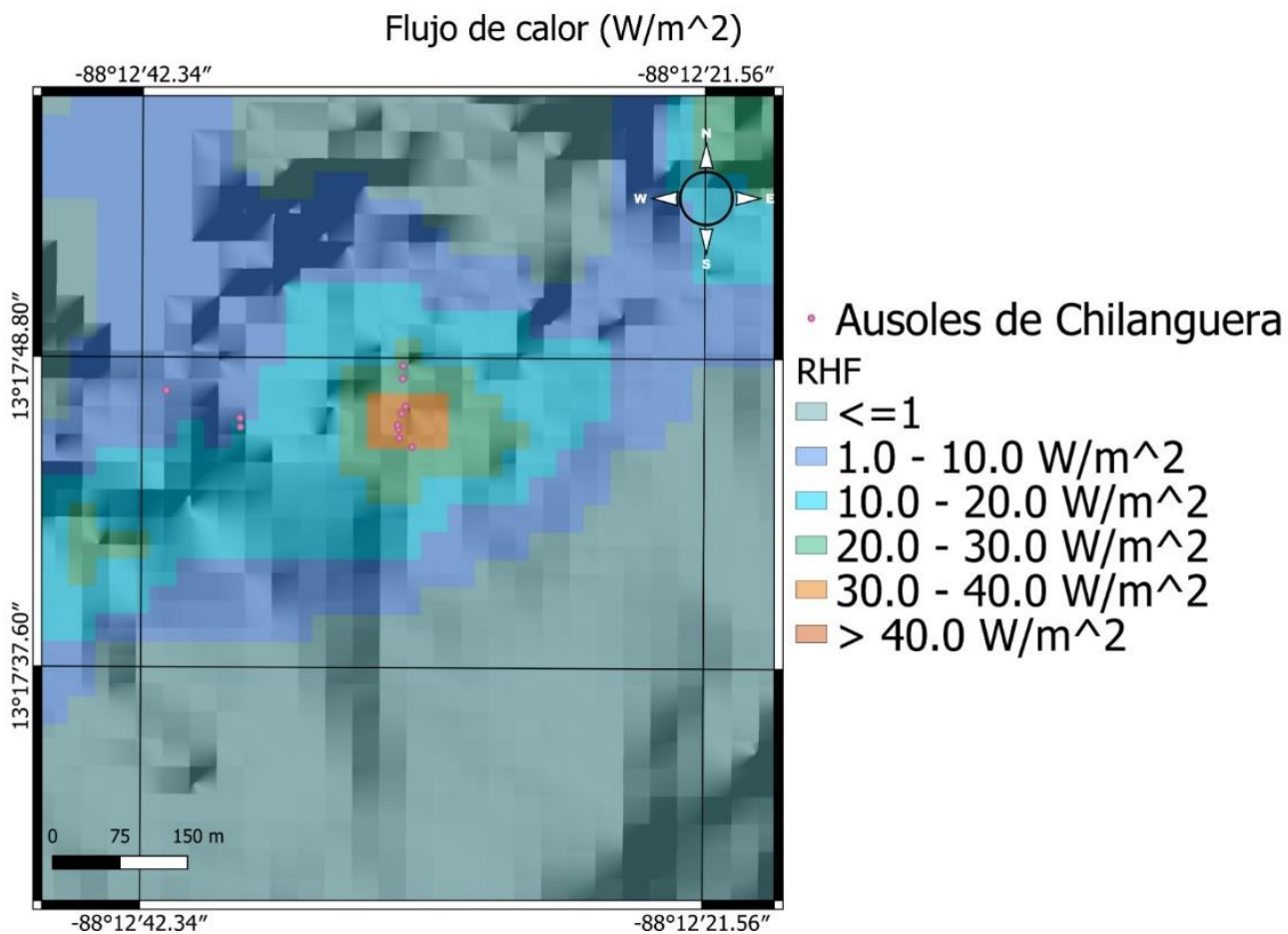


Figura 133: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera. Fuente: Elaboración propia

Los valores de flujo de calor resultantes de las mediciones en campo y los valores obtenidos por medio del tratamiento satelital se comparan en la *Tabla 23*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m^2]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m^2]
1	-	-
2	39.56	25.00
3	18.32	20.00
4	35.46	35.00
5	29.53	30.00
6	51.08	39.50

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m ²]
7	27.68	30.00
8	34.09	34.00
9	51.56	40.00
10	30.99	25.00
11	42.80	29.80
12	225.30	30.00

Tabla 23: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración propia

En el flujo de calor teórico se reportan algunos valores elevados debido a que la temperatura medida con cámara termográfica está a una distancia de aproximadamente 10 centímetros del punto, en el resultado por teledetección no se logra apreciar temperaturas tan exactas debido a que los pixeles tienen una medida de 30 metros, la medición en la que se observa mayor desviación es el punto 12 la cual se tomó en un pozo de agua a punto de ebullición y al tener un área menor a 30 metros no se logra apreciar exactamente en los pixeles de las mediciones por medio de imágenes satelitales.

4.4. AUSOLES CONCHAGUA, LA UNIÓN.

4.4.1. Área de Estudio

El presente estudio se realizó en la zona oriental de El Salvador, en el departamento de La Unión específicamente en Conchagua en los ausoles conocidos como Ausoles Playitas.

En la siguiente figura se puede observar el mapa de elevación y ubicación del punto de interés visitado el cual presenta potencial geotérmico y está ubicado en Conchagua La Unión.

Mapa de elevación y ubicación

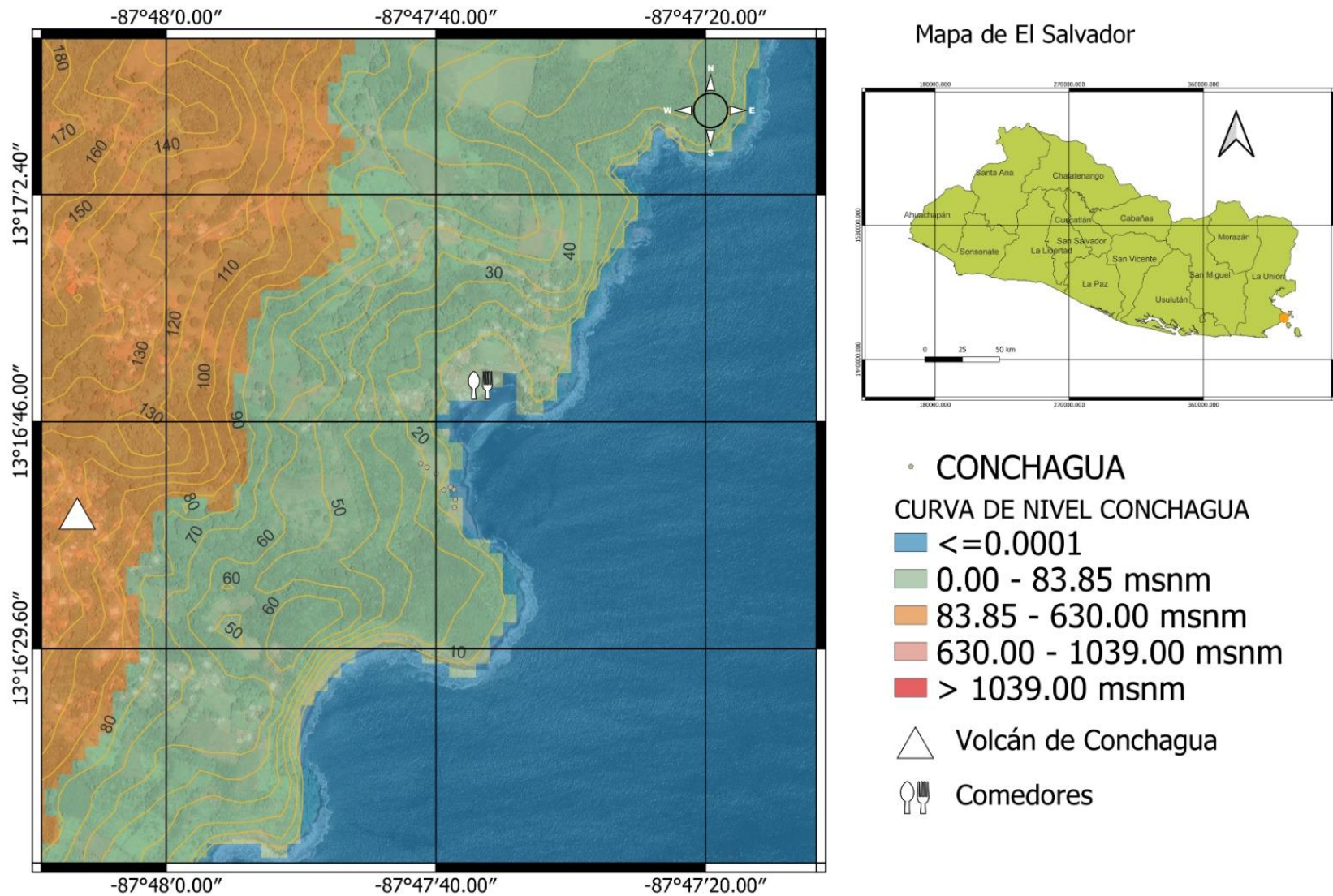


Figura 134: Mapa de ubicación "Asoles Playitas, Conchagua" con datos de elevación espacial sobre el nivel medio del mar con líneas de contorno. Fuente: Elaboración propia

El área de estudio de los Ausoles Playitas Conchagua se encuentra delimitada en la siguiente imagen con 7,197.81 m², mostrando los puntos en los cuales se realizaron mediciones termográficas.

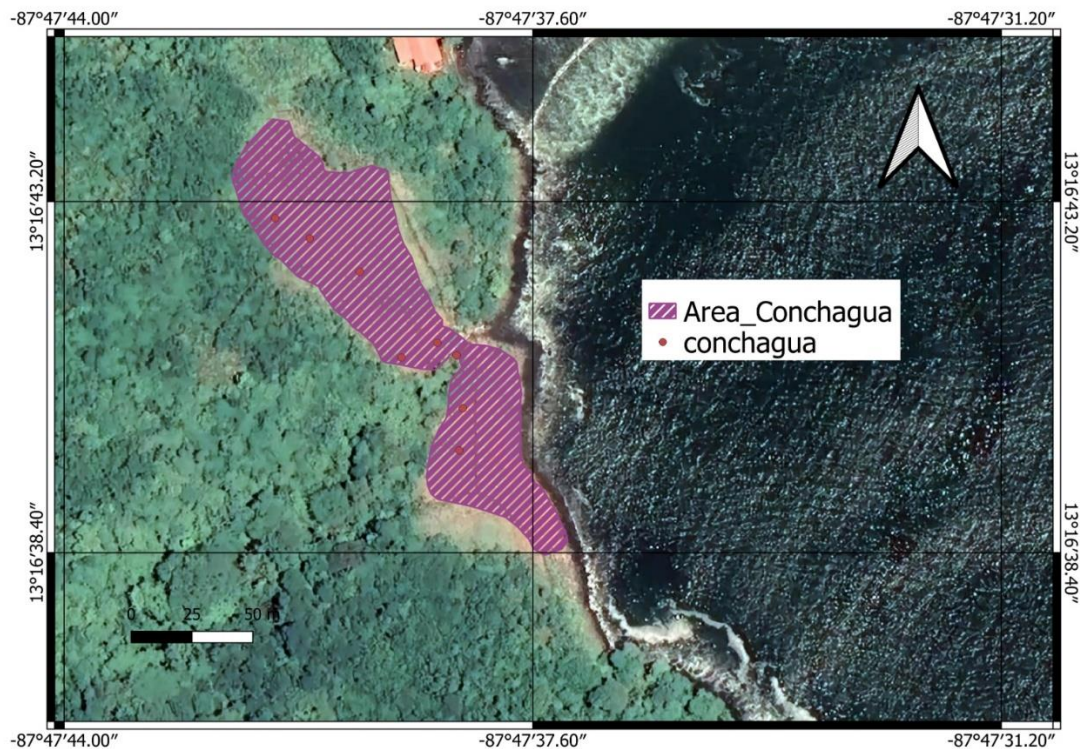


Figura 135: Vista Satelital del Área de Estudio Conchagua. Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Visita de Campo

El día 20 de julio del año 2023 se realizó una visita de campo a los ausoles Playitas de Conchagua, La Unión; El Salvador.

Al realizar la visita de campo, se observó a simple vista la falla tectónica con fumarolas visibles, detectando potencial geotérmico, por lo que nos dirigimos a marcar puntos a los cuales se realizaron mediciones térmicas, obteniendo como resultado temperaturas menores a los 100 °C. En dichos puntos se realizaron diferentes mediciones de temperatura en tierra firme dentro de la falla tectónica, además de mediciones en pequeñas concentraciones de agua dentro de la falla.



Figura 136: Fotografías tomadas en el Área de Estudio Ausoles Playitas, Conchagua. Fuente: Fotografías propias

4.4.3. Mediciones y Recolección de Datos

Al llegar al área de interés se procedió a realizar inspecciones en la zona, marcando puntos de coordenadas con el geolocalizador GARMIN GPSMAP 64S y a la vez haciendo orificios para insertar la termocupla del termómetro e hidrómetro y en los mismos se realizó la medición de temperatura con cámara termográfica incluyendo temperaturas en el agua de la zona hidrotermal.



Figura 137: Mediciones realizadas en el Área de Estudio Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Fotografía propia

4.4.4. Datos Recolectados

Las mediciones realizadas se reportan en la Tabla 24.

Punto	Fecha de medición	Hora de medición	Temperatura medida a una profundidad de 20cm con termocupla tipo K [°C]	Temperatura superficial con cámara Termográfica [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Humedad Relativa [%]	Coordenadas obtenidas con GARMIN		Elevación sobre el nivel del mar
							Latitud	Longitud	
1	20/7/2023	15:20	39.00	53.90	40.00	46.30	13.2780	-87.7942	20
2	20/7/2023	15:30	40.10	42.20	42.30	57.30	13.2781	-87.794	17
3	20/7/2023	15:45	36.40	40.00	36.70	54.30	13.2786	-87.7947	37
4	20/7/2023	15:50	41.00	48.80	37.20	47.80	13.2785	-87.7946	34
5	20/7/2023	16:00	41.10	47.00	38.80	46.90	13.2784	-87.7944	30
6	20/7/2023	16:15	90.00	92.00	40.00	47.00	13.2780	-87.7940	17
7	20/7/2023	16:20	98.00	97.00	42.00	47.50	13.2778	-87.7940	16
8	20/7/2023	16:30	46.00	47.00	40.50	46.80	13.2777	-87.7940	15

Tabla 24: Datos recolectados en la visita de campo. Fuente: Elaboración propia.

De las mediciones obtenidas se especifica que, de los 8 puntos, el punto 6 representa mediciones en agua a punto de ebullición dentro de la falla y el punto 7 representa la medición en lodo proveniente de una cueva dentro de la falla indicando altas temperaturas bajo tierra, el resto de puntos medidos fueron en tierra dentro de la falla tectónica.

4.4.5. Cálculo Teórico del Flujo de Calor Radiante

Con los datos recolectados se procede a realizar el cálculo del flujo de calor radiante utilizando la *Ecuación 27*.

Para la obtención de la transmisividad atmosférica se utilizó el valor de 0.53 obtenido por medio de la página web Atmospheric Parameter Calculator de la NASA, explicado en el capítulo 3 sección **Transmisividad Atmosférica**.

De la tabla de datos recolectados se obtuvo el flujo de calor radiante teórico mostrando el resultado en la *Tabla 25*.

Nº	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m ²]
1	53.73
2	11.64
3	11.75
4	43.19
5	30.50
6	240.36
7	262.33
8	24.37

Tabla 25: Flujo de Calor Teórico en Ausoles Playitas, Conchagua. Fuente: Elaboración propia

4.4.6. Cálculo del Flujo de Calor Radiante RHF por medio de Teledetección Satelital

Posteriormente a la visita de campo se trabajó con las imágenes del sensor OLI y TIRS Colección 1 Nivel 2 de Landsat 8 el sensor capturo la imagen el día 16 de enero del 2023 a las 16:18 horas. Dicha imagen utilizada no corresponde a la fecha de la visita debido a que las más cercanas a la fecha de la visita se encontraban con nubes que cubrían el lugar de interés.

Teniendo la imagen descargada se procede a realizar el tratamiento en el programa QGIS, en primer lugar, se desarrolla el flujograma del método Ventana Dividida para el cálculo de la Temperatura Superficial LST detallado en la sección 3.3.1.2. Para el procesamiento de las bandas OLI se obtuvo el Índice de Vegetación Normalizada NDVI de la región de interés (Ausoles Playitas Conchagua) utilizando la *Ecuación 10*. El valor del NDVI se divide en cuatro categorías para diferentes tipos de cobertura terrestre: vegetación completamente saludable ($NDVI > 0,5$), tierra mixta ($NDVI = 0,2-0,5$), tierra desnuda ($NDVI = 0-0,2$) y agua o humedal ($NDVI < 0$). El valor NDVI también se utilizó para la estimación de la emisividad de esta área de estudio mediante el método de umbral NDVI.

Los valores del NDVI, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de <0 representando agua y entre 0.0 a 0.5 definiéndose, como tierra desnuda y tierra mixta.

Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

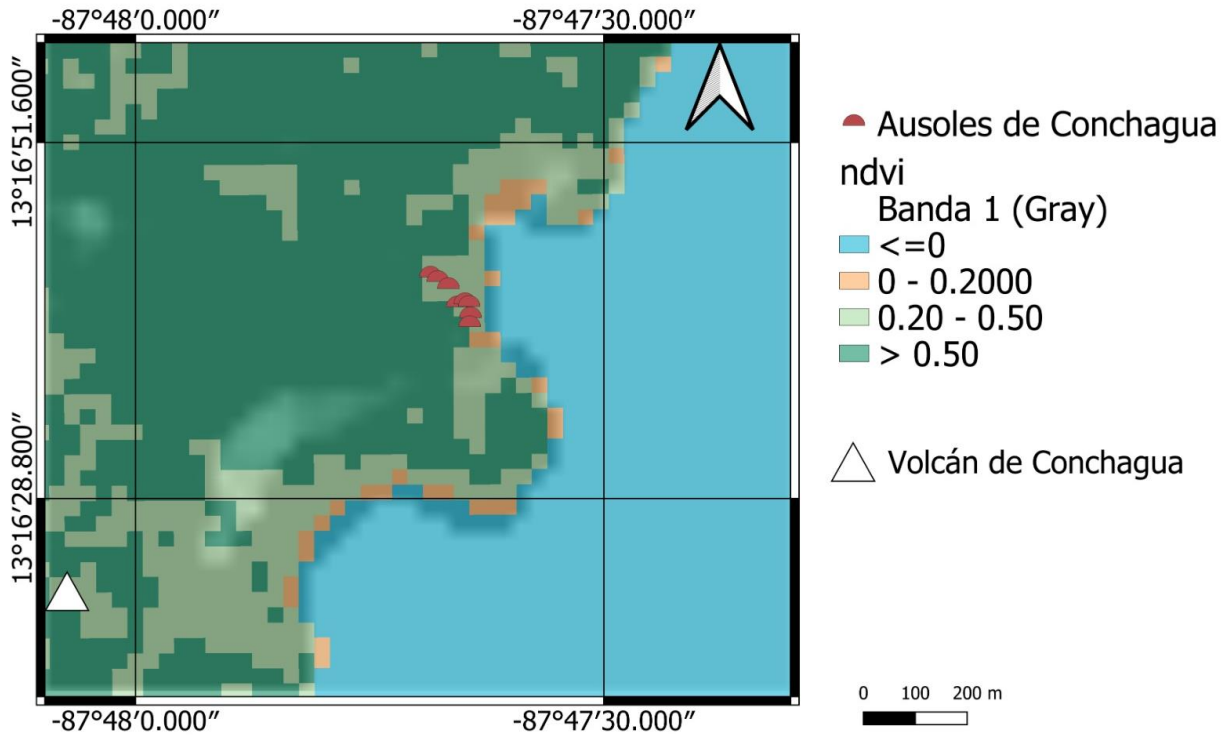


Figura 138: Mapa de cobertura terrestre, Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) de los Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Elaboración propia

La emisividad se estimó para las dos bandas térmicas de los sensores TIRS por separado utilizando el método de umbral NDVI con la Ecuación 12.

Realizando los pasos especificados en el diagrama de flujo de la sección 3.3.1.2, para las bandas TIRS, MODIS y las bandas procesadas OLI, se realiza el cálculo de la temperatura superficial LST por medio de la Ecuación 25.

Los valores del LST, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 28.74 a 33.95°C.

Temperatura de Superficie Terrestre (°C)

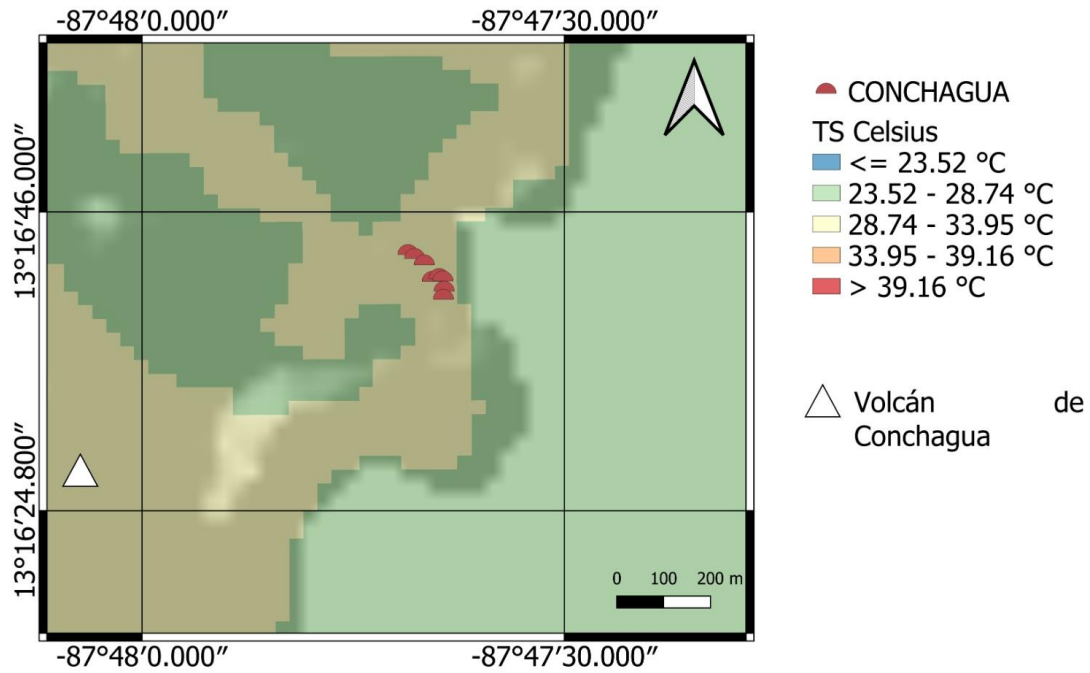


Figura 139: Mapa de Temperatura Superficial Terrestre (LST) de los Ausoles Playitas Conchagua. Fuente: Elaboración propia

La temperatura ambiente se calculó con la Ecuación 26 y finalmente se calculó el Flujo de Calor Radiante (RHF) de las áreas estudiadas utilizando la Ecuación 28.

Los valores RHF, obtenidos en el área de estudio se encontraron en el rango de 10 - 30 W/m².

Flujo de calor (W/m^2)

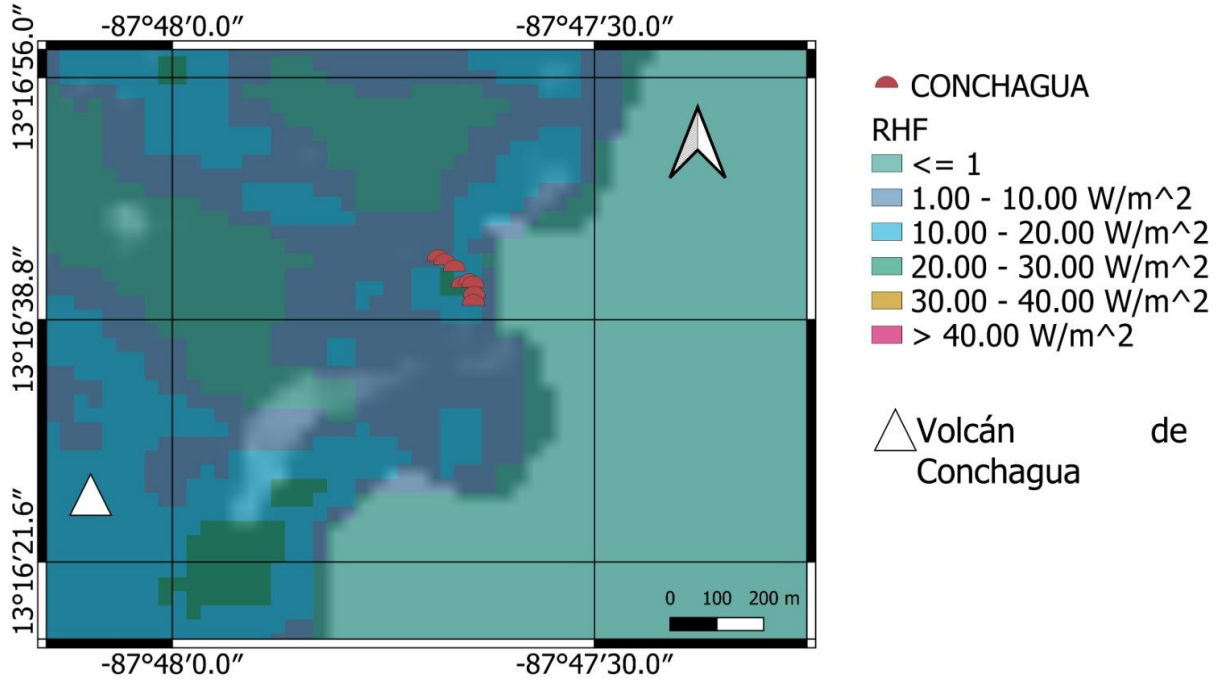


Figura 140: Mapa de Flujo de Calor Radiante (RHF) de los Ausoles Playitas Conchagua.

Fuente: Elaboración propia

Los valores de flujo de calor resultantes de las mediciones en campo y los valores obtenidos por medio del tratamiento satelital se comparan en la *Tabla 26*.

N°	FLUJO DE CALOR TEÓRICO [W/m^2]	FLUJO DE CALOR POR MEDIO DE TELEDETECCIÓN [W/m^2]
1	53.73	30
2	11.64	10.00
3	11.75	10.50
4	43.19	30.00
5	30.50	25.00
6	240.36	30.00
7	262.33	30.00
8	24.37	23.00

Tabla 26: Comparación de Flujo de Calor Radiante (RHF) teórico y por medio de teledetección. Fuente: Elaboración Propia

En el flujo de calor teórico se reportan algunos valores elevados debido a que la temperatura medida con cámara termográfica está a una distancia de aproximadamente 10 centímetros del punto, en el resultado por teledetección no se logra apreciar temperaturas tan exactas debido a que los pixeles tienen una medida de 30 metros, la medición en la que se observa mayor desviación es el punto 6 la cual se tomó en un pozo de agua a punto de ebullición y el punto 7 el cual se tomó en una pequeña cueva proveniente del interior de la tierra, por lo que al tener un área menor a 30 metros no se logra apreciar exactamente en los pixeles de las mediciones por medio de imágenes satelitales.

Capítulo 5

5.0 Conclusiones

Durante la etapa de investigación y selección de fuente de datos satelitales se realizó comparaciones entre los satélites de tipo óptico y radar, tomando en cuenta Landsat 8 y Sentinel 1. Sentinel 1 es de tipo radar, la resolución de sus imágenes son de mejor resolución, pero no posee sensores térmicos, por lo que su aplicación no era la adecuada para la investigación. En cambio, el sensor TIRS (Thermal Infra-Red Sensors) de Landsat 8 se adopta para la estimación de temperatura superficial terrestre y flujo de calor radiativo.

Con la metodología “monocanal” para el cálculo de temperatura de superficie terrestre, se considera únicamente una banda del sensor TIRS, se obtienen temperaturas que no son acorde a una temperatura registrada, por lo que ese método no es muy adecuado para este tipo de estudios. Se retoma una metodología con más estructura como es la “ventana dividida”, se considera las dos bandas del sensor TIRS. Y con esta metodología se puede tener una mejor lectura de temperatura superficial terrestre.

A partir de este estudio, encontramos que los valores medidos no son exactos a los obtenidos por medio de imágenes satelitales por diferentes razones en las que destaca; la resolución que es de 30 metros, la hora a la que se tomaron las mediciones ya que difiere de la hora a la que el satélite captura la imagen y además la fecha exacta de la imagen satelital que difiere de la fecha que se tomaron las mediciones, otra de las razones por la que los datos obtenidos no son iguales es por el aire en el ambiente el cual hace que la temperatura superficial en el suelo sea diferente unos centímetros sobre él. Este resultado indica que ciertamente existe una actividad térmica y que a

pesar que los datos no son totalmente exactos, nos puede dar una idea del tipo de generación térmica que podemos obtener, de esta manera nos es de gran utilidad el querer usar la teledetección en lugares de difícil acceso.

Se utilizó información geofísica adicional, DEM (Digital Elevation Model) para obtener de forma alternativa la temperatura ambiente, el cual fueron comparados con los obtenidos en campo por medio del geolocalizador y se comprobó que los resultados son aceptables, el método se utiliza con base al autor Eslava, 1988 el cual utiliza como variable principal el DEM, obteniendo como resultado temperaturas ambientes de entre 20 a 35°C.

Se analizaron y visitaron 6 puntos específicos de El Salvador donde se comprobó su potencial geotérmico y se comparó los resultados teóricos obtenidos en campo con los datos obtenidos por medio del tratamiento de imágenes satelitales.

Infiernillos San Vicente

Los Infiernillos, Agua Agria, ubicados en las faldas del volcán de San Vicente, posee una grieta en la cual pasa agua a punto de ebullición y a los alrededores de la grieta se encuentran pequeñas fumarolas provenientes de paredones, piedras o pequeños nacimientos de agua. El área estudiada es de aproximadamente 15,513 m² y presenta un RHF teórico entre 25 W/m² y 503 W/m² y un RHF por medio de teledetección entre 20 W/m² y 60 W/m². Con los valores comparativos se determina que los Infiernillos se encuentran en dos categorías, cercanos a la grieta en la categoría C con una temperatura entre 40 y 80°C, y dentro de la grieta se encuentra en la categoría B con una temperatura entre 80 y 150°C. Por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para **Generación de Electricidad y Utilización Térmica Industrial** en la categoría B y para fines de **Entretenimiento, Turismo y/o Calefacción Térmica** en la categoría C (LaGeo).

Asoles de Ahuachapán

En el departamento de Ahuachapán se realizó una visita de campo donde se visitaron 3 áreas específicas del cerro Cuyanausul.

- ✓ **Ausoles Respiraderos:** Posee una grieta muy pronunciada en la cual pasa agua a punto de ebullición el acceso a la grieta es riesgoso por lo que las mediciones en la grieta se realizaron en las orillas. El área estudiada es de aproximadamente 21,213 m² y presenta un RHF teórico entre 64.55 W/m² y 183.70 W/m² y un RHF por medio de teledetección entre 45 W/m² y 70 W/m². Con los valores comparativos se determina que los Ausoles Respiraderos se encuentran en la categoría C con una temperatura entre 40 y 80°C, por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para fines de **Entretenimiento, Turismo, Calefacción Térmica o generación eléctrica en la zona cercana** (LaGeo); cabe aclarar que dentro de la grieta no se realizaron mediciones por precaución y que dentro de esta se puede encontrar temperaturas más elevadas.

- ✓ **Ausoles Termopilas:** Se encuentra en las orillas de una quebrada la cual se recorrió para llegar al área con potencial geotérmico, en dicha área se observa fumarolas, grietas y pozos con hervideros de lodo. El área estudiada es de aproximadamente 3,750 m² y presenta un RHF teórico entre 25.21 W/m² y 219.42 W/m² y un RHF por medio de teledetección entre 20 W/m² y 30 W/m². Con los valores comparativos se determina que los Ausoles Termopilas se encuentran en la categoría C con una temperatura entre 40 y 80°C, por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para fines de **Entretenimiento, Turismo o Calefacción Térmica** (LaGeo); cabe aclarar que dentro de los pozos la temperatura fue mayor (95°C) y que a mayor profundidad se puede encontrar temperaturas más elevadas.

- ✓ **Ausoles Tortuguero:** Se encuentra en zona libre y descubierta donde se pudo observar pozos exploratorios de la GEO. En el área con potencial geotérmico se observan fumarolas, grietas y pozos con hervideros de lodo y agua. El área estudiada es de aproximadamente 47,389 m² y presenta un RHF teórico entre 129.81 W/m² y 213.86 W/m² y un RHF por medio de teledetección entre 68.50 W/m² y 73.00 W/m², la diferencia se debe a que las temperaturas medidas se encontraban dentro de grietas y pequeños hervideros de agua y lodo. Con los valores comparativos se determina que los Ausoles

Termopilas se encuentran en la categoría B con una temperatura entre 80 y 150°C, por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para **Generación de Electricidad y Utilización Térmica Industrial** (LaGeo); cabe aclarar que a mayor profundidad se puede encontrar temperaturas más elevadas.

Ausoles Laguna Agua Caliente Chilanguera, San Miguel

Los Ausoles Laguna Agua Caliente, Chilanguera, Pertenece al Sitio Ramsar Área Natural Protegida Laguna El Jocotal, correspondiente al Área de Conservación San Miguel Tecapa, posee una grieta en la cual pasa agua a punto de ebullición y a los alrededores de la grieta se encuentran pequeñas fumarolas provenientes de piedras o pequeños nacimientos de agua, además, se encuentran pequeñas lagunas con hervideros. El área estudiada es de aproximadamente 18, 586 m² y presenta un RHF teórico entre 18.32 W/m² y 225.30 W/m² y un RHF por medio de teledetección entre 20 W/m² y 40 W/m². Con los valores comparativos se determina que los Ausoles Laguna Agua Caliente se encuentra en categoría C, con una temperatura entre 40 y 100°C. Por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para fines de **Entretenimiento, Turismo y/o Calefacción Térmica**. (LaGeo)

Ausoles Playita Conchagua, La Unión

Los Ausoles Playita, Conchagua, se encuentra en las faldas del Volcán de Conchagua, a orillas del Golfo de Fonseca, la zona es conocida por la presencia de manifestaciones tales como alteraciones hidrotermales y los “respiraderos” del volcán que han sido erosionados por la acción de las mareas. Presenta rocas efusivas básicas, posee pequeñas grietas con poca presencia geotérmica y pequeños nacimientos de agua. El área estudiada es de aproximadamente 7,197.81 m² y presenta un RHF teórico entre 11.64 W/m² y 53.73 W/m² en tierra del área hidrotermal y un RHF por medio de teledetección entre 10 W/m² y 30 W/m². Con los valores comparativos se determina que los Ausoles Playitas se encuentra en categoría C, con una temperatura entre 40 y 80°C. Por lo que el potencial geotérmico puede ser utilizado para fines de **Entretenimiento, Turismo y/o Calefacción Térmica**. (LaGeo)

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, E., Morales, R., & Vargas, K. (2022). *Mapa de Potencial Geotérmico de El Salvador*.

Andrés, M., Molina Rubén, G., Henríquez, A., Douglas, M., Rivas, A., Para, D., Al, O., & De, T. (2021). *MAPA DE FLUJO DE CALOR DE EL SALVADOR UTILIZANDO TELEDETECCIÓN SATELITAL Y PROCESAMIENTO DE DATOS*.

ArcGIS. (2023). *Georreferenciación y sistemas de coordenadas*.
<https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000s000000.htm>

Ariza, A. (2013). *Productos LDCM-Landsat 8*.

Artis, D. A. C. W. H. (1982). Remote Sensing Environ. *Remote Sensing Environ.; (United States)*.

Aslan, N., & Koc-San, D. (2016). Analysis of relationship between urban heat island effect and Land use/cover type using Landsat 7 ETM+ and Landsat 8 OLI images. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41*, 821–828. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-821-2016>

Paez Cuervo, A. M., & Torres, V. (2021). *Metodología para la estimación de flujo de calor Geotérmico a partir de imágenes satelitales Landsat 9-OLI-TIRS en la cuenca sedimentaria llanos orientales*.

Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment, 62*(3), 241–252.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)

Consejo Nacional de la Energía (CNE). (2012). *Plan Maestro para el desarrollo de la Energía Renovable*.<https://estadisticas.cne.gob.sv/wp->

content/uploads/2017/02/Resumen_Plan_Maestro.pdf

Copernicus. (2023). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*.
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

EOS. (2023). *NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada*.
<https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>

EOS Data Analytics. (2023a). *Bandas Landsat 8: Combinaciones Y Usos En Imágenes*.
<https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/>

EOS Data Analytics. (2023b). *Imágenes De Satélite Gratis: Fuentes De Datos Para Todos*.
<https://eos.com/es/blog/imagenes-de-satelite-gratis/>

EOS Data Analytics. (2023c). *Landsat 8*. <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>

EOS Data Analytics. (2023d). *¿Qué Es La Resolución Espacial En Una Imagen Satelital?*
<https://eos.com/es/blog/resolucion-espacial/>

EOS Data Analytics. (2023e). *Teledetección Satelital: Tipos, Usos Y Aplicaciones*.
<https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>

EOS Data Analytics. (2023f). *Tipos De Satélites: Sus Órbita Y Funciones*.
<https://eos.com/es/blog/tipos-de-satelites/>

ESA Copernicus. (2015). *SENTINEL 2*.
https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2/

Eslava, J. (1988). *Geofísica Colombiana N° 1, Octubre de 1992 PERFIL ALTITUDINAL DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE EN COLOMBIA*.

FLIR. (s/f). *FLIR i-Series*.

FLUKE. (2023). *Como funcionan las camaras termograficas*. <https://www.fluke.com/es-sv/informacion/blog/captura-de-imagenes-termograficas/como-funcionan-las-camaras-infrarrojas>

Fritz Durr. (s/f). *SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL AREA DE GEOLOGIA*. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://www.snet.gob.sv/Geologia/Deslizamientos/Documentos/Geologia-general/3-mapageo.htm>

GADM. (2023). *GADM*. https://gadm.org/download_country.html#google_vignette

GARMIN. (2023). *GPSMAP 64S*. <https://www.garmin.com/es-ES/p/140022>

Geinor Ingeniería y Servicios. (2022, marzo 30). *Pozos Geotérmicos*. <https://www.geinor.com/pozos-geotermicos/>

Ihlen, V. (2019). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*.

Insittuto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). (2017, junio 17). *Sentinel-1, -2 y -3*. https://www.inta.es/INTA/gl/blogs/copernicus/BlogEntry_1507278650016

Jimenez-Munoz, J. C., Sobrino, J. A., Skokovic, D., Mattar, C., & Cristobal, J. (2014). Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), 1840–1843. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2312032>

LAADS DAAC. (2023). *MOD05_L2 - MODIS/Terra Total Precipitable Water Vapor 5-Min L2 Swath 1km and 5km*. https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/MOD05_L2

LaGeo. (2023). *LaGeo*. <http://www.lageo.com.sv/>

LaGeo. (2021a). *ESTADO ACTUAL DE LA GEOTERMIA EN LA REGIÓN DE LOS PAÍSES MIEMBROS DEL SICA*.

LaGeo. (2023b). *Central Geotérmica Ahuachapán*. <http://lageo.com.sv/CentralAhuachapan.html>

LaGeo. (2023c). *¿Cómo funciona una central geotérmica?* <http://www.lageo.com.sv/ComoFuncionaUnaCentralGeotermica.html>

LaGeo. (2023d). *Geotérmica Berlín*. <http://lageo.com.sv/CentralBerlin.html>

LaGeo S.A de C.V. (2017). *Prospecto de Emisión La Geo, S.A de C.V.* www.bolsadevalores.com.sv

MARN. (2020). *MARN*. <https://www.marn.gob.sv/>

Mia, M. B. (2013). *DEPARTMENT OF EARTH RESOURCES ENGINEERING GEOTHERMAL EXPLORATION AND MONITORING BASED ON HEAT FLOW AND HYDROTHERMAL ALTERATION USING SATELLITE REMOTE SENSING TECHNIQUES*.

Mia, M. B., Fujimitsu, Y., & Nishijima, J. (2017a). Thermal Activity Monitoring of an Active Volcano Using Landsat 8/OLI-TIRS Sensor Images: A Case Study at the Aso Volcanic Area in Southwest Japan. *Geosciences (Switzerland)*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences7040118>

Mia, M. B., Fujimitsu, Y., & Nishijima, J. (2017b). Thermal Activity Monitoring of an Active Volcano Using Landsat 8/OLI-TIRS Sensor Images: A Case Study at the Aso Volcanic Area in Southwest Japan. *Geosciences (Switzerland)*, 7(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences7040118>

- NASA. (s/f). *USGS Earth Explorer*. Recuperado el 2 de octubre de 2023, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- NASA. (2023). *Atmospheric Correction Parameter Calculator*. <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Informacion Geografica*.
- OMEGA. (s/f). *HH414*.
- OMEGA. (2023). *Termopar*. <https://es.omega.com/prodinfo/termopares.html>
- OpenTopography. (2023). *Digital Elevation Model (DEM)* . <https://opentopography.org/>
- Pasapera Gonzalez, J. (2018). *ESTIMACIÓN LA EMISIVIDAD Y LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE CON EL SÁTELITE LANDSAT 8*.
- Planck, M. (1948). *The Theory Of Heat Radiation*.
- QGIS. (2023). *QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio*. <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Vaughn Ihlen. (2019). *Lanzamiento de productos científicos Landsat*. <https://eros.usgs.gov/doi-remote-sensing-activities/2019/usgs/release-landsat-science-products>
- Yu, X., Guo, X., & Wu, Z. (2014). Land surface temperature retrieval from landsat 8 TIRS-comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829–9852. <https://doi.org/10.3390/rs6109829>