



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>



Mapa de flujo de calor radiante de El Salvador utilizando teledetección satelital

Radiant heat flux map of El Salvador using satellite remote sensing

Carlos Pocasangre¹, Luis Castillo², Carlos Martínez¹, Andrés García¹, Douglas Rivas¹, Rubén Henríquez¹

Correspondencia:
carlos.pocasangre@ues.edu.sv

Presentado: 30 de junio de 2021
Aceptado: 20 de septiembre de 2021

- 1 Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Eléctrica
2 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Escuela de Geofísica

RESUMEN

El Salvador está ubicado en una zona de muchos volcanes, forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, posee un intenso vulcanismo de subducción, que da lugar a la presencia de sitios con actividad hidrotermal, los cuales son de interés para la implementación de aplicaciones que hagan uso del recurso geotérmico del territorio. En esta investigación se emplea información satelital, con el propósito de obtener datos geofísicos de emisividad de la superficie del suelo, temperatura ambiente, temperatura superficial terrestre, además de la información espectral que el satélite Landsat 8 es capaz de proporcionar. La obtención de estos datos es de utilidad para el cálculo de índices de vegetación, temperatura superficial, transmisividad y principalmente para el cálculo de flujo de calor en la tierra, que es el objetivo principal del estudio. Con la información obtenida se realizó un mapa del territorio de El Salvador con el que se muestra y clasifica la información referente al flujo de calor, además de realizar análisis en puntos de interés en los que se tiene actividad geotérmica. El mapa generado de flujo de calor fue de utilidad para identificar áreas que presentan manifestaciones hidrotermales superficiales que son de posible interés geotérmico, los flujos de calor en estas áreas fueron obtenidos para cada escena satelital capturada por Landsat 8 en el año 2019 y se analizó el promedio de flujo de calor anual. Se utilizarán zonas volcánicas que presenten altos flujos de calor como referencia de manifestaciones superficiales.

Palabras clave: Landsat; imagen satelital; Temperatura Superficial Terrestre; Emisividad; Flujo de Calor; ASTER GED; EarthExplorer; Google Earth Engine.

ABSTRACT

El Salvador is in a region populated with volcanos in the Pacific Ring of Fire, this gives rise to the presence of geothermal phenomena, which are of interest for the study of the implementation of applications that make

use of this geothermal resource in the country. In this research, the use of remote sensing data obtained from satellite images and other sources is implemented with the goal of obtaining information related to the Earth, like terrain emissivity, land surface temperature, ambient temperature, among various types of spectral information provided by these sources which were implemented. Obtaining this data is highly valuable for calculating various parameters, like vegetation indexes, land surface temperature, atmospheric transmissivity, and radiative heat flux, which is the main goal of this research. With the data obtained, a map of El Salvador will be made, in which the result will show and classify the information regarding the heat flux values. In addition, an analysis of these values in points of geothermal interest is also presented. The heat flux map generated will be useful to identify areas that present surface geothermal manifestations that are of possible geothermal interest, the heat fluxes in these areas will be obtained for each satellite scene captured by Landsat 8 in 2019 and the average annual heat flux. Volcanic areas that present high heat fluxes will be used as a reference for surface manifestations.

Key words: Landsat; Satellite Image; Terrestrial Surface Temperature; Emissivity; Heat Flow; ASTER GED; Earth Explorer; Google Earth Engine.

INTRODUCCIÓN

En El Salvador, los recursos geotérmicos se estiman abundantes debido a la presencia de aguas termales, fumarolas, y pozos de agua caliente, que están distribuidos en todo el territorio y se relacionan con la alta presencia de volcanes y fallas tectónicas. Para conocer más de estas presencias geotérmicas se hicieron estudios geológicos, geofísicos, y geoquímicos que verificarán la presencia de mantos acuíferos subterráneos a temperaturas adecuadas para el aprovechamiento del recurso en una o varias de su diversidad de aplicaciones.

Desde 1953 en El Salvador se han identificado y descrito alrededor de 70 áreas de actividad geotérmica. (Campos, 1988) realizó la investigación que actualmente se tiene como referencia y caracterizó los recursos geotérmicos del país, basándose en el estudio de sus composiciones geoquímicas de fluidos. Los estudios de las presencias geotérmicas se relacionan a mapas para facilitar el reconocimiento, localización y representación de estos fenómenos, con ello caracterizar el recurso geotérmico de la zona.

Actualmente, es posible realizar diversos análisis a partir de la información satelital disponible por las agencias espaciales tales como (NASA,

NASA, s.f.). Alguno de ellos es referente al análisis de vegetación, temperatura superficial de la tierra, emisividad superficial, entre otros. Estas aplicaciones o análisis son posibles dado que los satélites operan en diferentes espectros electromagnéticos denominados bandas, en las cuales se almacena información con la que la superficie terrestre refleja una señal emitida por el satélite, como en el caso de satélites activos; o se limita a reflejar la radiación del sol, como es el caso de los satélites pasivos, análisis como los propuestos por (Lewis., 1998), (Wehner, 1994), (Thomas, May 2008), (Richards, 2012).

Ermida, Soares, Mantas, Götsche, & Trigo (2020) proponen el uso de información satelital para el análisis de presencias geotérmicas, como es el caso de esta investigación, que busca emplear un algoritmo que sea capaz de cuantificar la cantidad de flujo de calor terrestre para ser implementado en la representación del territorio salvadoreño. Esta información se obtiene de la *web* oficial de la agencia espacial: *Earth Explorer* y se procesará con la herramienta *Google Earth Engine* (GEE) que permite la solicitud y tratamiento previo de las imágenes recolectadas.

Al exportar la información pre-procesada desde GEE al servicio *Drive* de la cuenta de Google creada, es posible descargarla para

manipularla en un *Software* de Sistemas de Información Geográfica, en nuestro caso QGIS, en el que se aplican algoritmos y cálculos con la finalidad de obtener la cantidad de Flujo de Calor Radiante (RHF por sus siglas en inglés) y ser representado de forma visual mediante un mapa de la región.

RECURSO GEOTÉRMICO EN EL SALVADOR

El Salvador se encuentra en una región de alta actividad volcánica y sísmica, debido a que está ubicado en el conocido Cinturón de Fuego del Pacífico el cual es producto de diversas actividades de subducción entre placas tectónicas, para el caso de El Salvador la placa de Cocos subduce a la del Caribe. Esta alta actividad hace que la región tenga presencia de fenómenos geotérmicos, que se manifiestan por medio de fumarolas, geiseros, pozos hidrotermales y presencia de compuestos metales provenientes de la cámara magmática o de remanentes de calor magmático en la corteza continental. Para la cuantificación y clasificación del recurso geotérmico, principalmente se hace uso de métodos geológicos, geofísicos y geoquímicos. Actualmente en El Salvador se aprovecha el recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica mediante dos plantas geotérmicas, una en Berlín, Usulután; y otra en la zona norte de la cordillera de Apaneca, Ahuachapán, (Alvarenga Artiga, Amaya Mata, & Sibrián Carballo, 2004), (Prol-Ledesma & Morán-Zenteno, 2018).

INFORMACIÓN SATELITAL

Esta investigación se centra en la estimación de la cantidad del Flujo de Calor en la región de El Salvador, para brindar una herramienta para el análisis de zonas de interés geotérmico, previo a los estudios geológicos, geofísicos y

geoquímicos a realizar para tener una mejor noción de su comportamiento geotérmico.

Para el análisis, se utilizó información satelital disponible del Servicio Geológico de Estados Unidos (*U.S. Geological Survey, USGS*), y mediante la plataforma *EarthExplorer* se tiene acceso a sus catálogos de imágenes. Las imágenes escogidas para este estudio se obtienen del (USGS, 2019), satélite *Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infra-Red Sensor (TIRS)*, y se seleccionó principalmente por sus sensores espectrales OLI/TIRS. En la Tabla 1 se muestran las características espectrales del *Landsat 8*.

Para acceder a las imágenes satelitales de los catálogos de la USGS se usó *Google Earth Engine - GEE* ya que proporciona una interfaz mediante lenguaje *JavaScript* que realiza: la solicitud, procesado y visualización de imágenes satelitales, la búsqueda de resultados de análisis de imágenes hechos por la plataforma y posteriormente su exportación al servicio de *Drive* además clasifica las bandas de interés para manipulación en un Sistema de Información Geográfica (*Geographic Information System – GIS*), como en el caso de QGIS.

ESTIMACIÓN DEL 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 geotermiales y los efectos de radiación solar directa o indirecta. El monitoreo terrestre de flujo de calor utilizando sensores locales puede ser difícil o inviable por los costos de instalación y mantenimiento de equipos. El hecho 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

Tabla 1.

Características del sensor Landsat 8 OLI/TIRS (USGS, 2019)

Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución espacial (metros)
Banda 1 – Aerosol costera	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 (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirros	1.36 – 138	30
Banda 10 – Térmica Infrarroja (TIRS) 1	10.6 – 11.19	100
Banda 11 – Térmica Infrarroja (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

manifestarse en el lugar, 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, entre estos se encuentran los propuestos por (Kaneko & Wooster, 1999), (Mia & Fujimitsu, Study on satellite images based spectral emissivity, land surface temperature and land-cover in and around Kuju Volcano, Central Kyushu, Japan, 2011), (Mia, Bromley, & Fujimitsu, Monitoring heat flux using Landsat TM/ETM + thermal infrared data - A case study at Karapiti ('Craters of the Moon') thermal area, New Zealand, 2012), y (Mia, Nishijima, & Fujimitsu, Exploration and

monitoring geothermal activity using Landsat ETM+ images. A case study at Aso volcanic area in Japan, 2014).

Estimaciones de RHF 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. Debido a ello (Bromley, van Manen, & Mannington, 2011) propone un sistema de reducción de incertidumbres. De acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, el RHF teórico se estima utilizando la ecuación:

$$Q = \tau\sigma\epsilon(T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (1)$$

En la que Q: Flujo de Calor Radiante en W/m²; τ : Transmisividad atmosférica; σ : Constante de Stefan-Boltzmann; ϵ : Emisividad superficial; T_s : Temperatura superficial (LST) en K; T_{amb} : Temperatura ambiente en K. De esta ecuación se puede estimar la potencia total en un área A en la que el calor fluye de forma que $P=AQ$.

Índice de vegetación de diferencia normalizada – NDVI

En un esfuerzo por monitorear las fluctuaciones en la vegetación y entender como estas afectan a su entorno, desde su introducción en 1970 se comenzó a utilizar los sensores remotos instalados en satélites para medir y mapear la densidad de vegetación verde sobre la Tierra. Los científicos desarrollaron algoritmos llamados “Índices de Vegetación” para cuantificar las concentraciones de vegetación verde alrededor del planeta. (Weier & Herring, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 2000), (Weier & Herring, Measuring Vegetation, 2000).

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \quad (2)$$

Donde NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada; NIR es la luz reflejada en la región de espectro infrarrojo; y rojo corresponde a la luz reflejada en el espectro visible de la banda rojo.

La Emisividad superficial

La emisividad de la superficie de un material es la efectividad con la que emite energía como radiación térmica, a mayor nivel de emisividad superficial, mayor será la radiación desde una superficie, por lo que será más probable obtener mediciones confiables de temperatura superficial. La radiación térmica es

radiación electromagnética que puede incluir radiación visible e infrarroja. La emisividad puede tener valores que varían en un rango desde 0 (un espejo puede tener valores muy bajos cercanos a 0) hasta 1 (cuerpo negro). (Planck, 1914) define un cuerpo negro como un objeto físico idealizado que absorbe toda la radiación electromagnética incidente sobre este, independientemente de su frecuencia o ángulo de incidencia. Un cuerpo negro absorbe energía en todas las frecuencias, pero este no solamente absorbe, sino que también emite radiación de cuerpo negro.

Es necesario tomar en cuenta las variaciones en valores de emisividad por píxel a lo largo del tiempo, por ejemplo, en las variaciones de densidad de vegetación anuales provocados por cambios de temporadas o deforestación. Para esto se debe aplicar un factor de corrección que tome en cuenta estas variaciones de vegetación en el tiempo. Este factor de corrección es llamado Fracción de Cobertura de Vegetación (FVC – *Fraction of Vegetation Cover*). (Malakar, y otros, 2018), (Hulley G. , y otros, 2018).

$$FVC = \left(\frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2 \quad (3)$$

Donde $NDVI_{bare}$: Valores de NDVI en píxeles de suelo completamente descubierto (sin vegetación); $NDVI_{veg}$: Valores de NDVI en píxeles cubiertos completamente por vegetación. Los valores de $NDVI_{bare}$ y $NDVI_{veg}$ se establecen siguiendo previos, como $NDVI_{bare}=0.2$ y $NDVI_{veg}=0.86$. Los píxeles con valores menores a $NDVI_{bare}$ son considerados suelo completamente descubierto y los mayores a $NDVI_{veg}$ son considerados completamente cubiertos por vegetación.

Temperatura Superficial Terrestre – LST

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 son esenciales para el cálculo de balance de calor superficial radiante y sensible. 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 distintos tipos de análisis relacionados a la evaluación de condiciones superficiales de la Tierra, tales como la estimación de humedad en el suelo, cobertura y uso de la tierra, 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 de suma importancia para la humanidad. (Mokhari, y otros, 2019), (Kustas & Norman, 1996) nos proponen métodos para el cálculo y monitoreo de la evaporación potencial, mientras que (Peng, Jia, Liu, Li, & Wu, 2018) y (Montanaro, Gerace, & Rohrbach, 2015) exponen la corrección de luz parasita y el buen manejo de contrastes térmicos en la superficie terrestre.

$$T_s = A \frac{T_b}{\varepsilon} + B \frac{1}{\varepsilon} + C \quad (4)$$

Donde: T_b : Temperatura de brillo TOA (Reflectancia en el Techo de la Atmósfera) en el canal TIR; ε : emisividad superficial para el mismo canal; A, B y C: coeficientes determinados a partir de regresiones lineales de simulaciones de un sistema de transferencia radiante para 10 clases.

METODOLOGÍA

Para la estimación de RHF se tiene a disposición un repositorio *open-source* en la plataforma (GEE, s.f.) llamado *Landsat_smw_lst* del cual se obtienen las bandas EM, FVC, LST, y NDVI. Además, para la obtención de temperatura ambiente se ha usado la colección (ERA5-Land_Hourly, s.f.) – *ECMWF climate reanalysis* y para la realización de recorte de las imágenes para el área de interés se usa la colección (LSIB, 2017): *Large Scale International Boundary Polygons, Symplified*, que otorga los límites regionales de los países del mundo.

Repositorio Landsat_smw_lst

Este repositorio está conformado por una serie de funciones que emplean los algoritmos para el cálculo de emisividad, EM; temperatura superficial terrestre, LST; y el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI. Los cálculos los realiza para la especificación en sus variables de entrada: fecha de inicio y fin, región de interés (ROI), satélite *Landsat*, y una bandera para especificar si se requiere agregar o no la banda NDVI a los resultados.

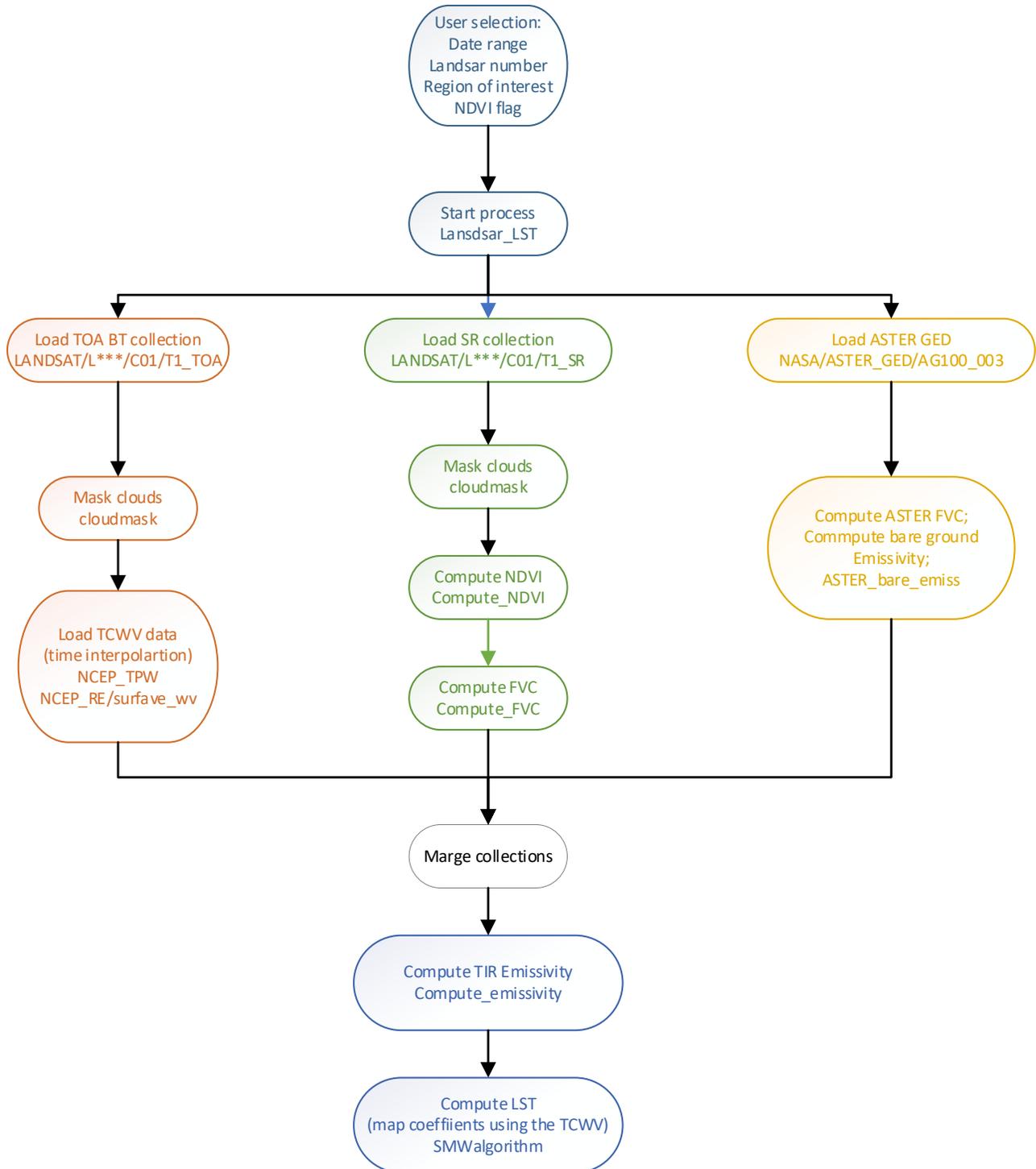
Esta además genera una máscara de nubes para ser removidas de cada imagen de la colección. El repositorio hace uso del *ASTER Global Emissivity Dataset*, que provee mapas de emisividad; *TOA BT (Top Of Atmosphere Brightness Temperature)* que provee la temperatura de brillo de la atmósfera; y *SR (Surface Reflectance)* que provee la reflectancia superficial. El algoritmo empleado se especifica en la Figura 1.

Obtención de imágenes en formato GeoTIFF

A partir del cálculo de LST con el repositorio anteriormente descrito, se ha implementado un nuevo repositorio nombrado (FlujoDeCalor-

Figura 1.

Diagrama de proceso empleado en repositorio landsat_smw_lst.



SV, s.f.) para la exportación de las imágenes en formato GeoTIFF de las bandas de interés: NDVI, LST, EM, y Temperatura Ambiente.

Se realizan dos funciones principales, la primera que exporta de las temperaturas ambientes del país a partir del *ERA5-Land Hourly* en el

que se hace coincidir las fechas y horas de las imágenes captadas por los satélites con las de la colección. La segunda función corresponde a la exportación de las bandas de interés que otorga el repositorio *landsat_smw_lst*.

Tabla 2.

Variables de selección del usuario o de entrada y de salida para los repositorios *landsat_smw_lst* y *Flujo De Calor-SV*.
Elaboración propia.

Entradas	Salidas
landsat: tipo <i>string</i> . Se espera 'L4', 'L5', 'L7', o 'L8'	NDVI
date_start: tipo <i>string</i> . Se espera fecha de inicio para la selección de datos en formato AAAA-MM-DD	FVC
date_end: tipo <i>string</i> . Se espera fecha de finalización para la selección de datos en formato AAAA-MM-DD	TPW
geometry: tipo <i>ee.Geometry</i> . Se espera una región de interés; puede ser un punto o área del mapa GEE.	EM
use_ndvi: tipo <i>boolean</i> . Se espera <i>true</i> o <i>false</i> . Establece si se desea calcular o no los valores de NDVI.	LST

En la Figura 2 se muestra el diagrama del proceso seguido para la exportación de múltiples bandas de las imágenes generadas por el cálculo del LST.

Manipulación en QGIS

Al tener las imágenes en formato GeoTIFF se emplea la manipulación de estas para calcular el flujo de calor, según la ecuación (1). Cabe mencionar que para transmisividad se han obtenido los datos otorgados por (NASA, Atmospheric Parameter Calculator, s.f.)

La Figura 3 muestra el proceso empleado para la exportación de temperatura ambiente, en la cual se hace coincidir las imágenes del *ERA5-Land Hourly* y las imágenes del LST.

RESULTADOS

Una vez obtenido el mapa de Flujo de Calor Radiante, se analizaron puntos de interés

geotérmicos. Los mapas resultantes por zonas se muestran desde la Figura 5 hasta la Figura 7; cada una con su respectivo mapa de resumen; posterior a ello se muestra el resumen anual de RHF para cada zona de El Salvador, en las tres imágenes posteriores se muestran los mapas de la zona occidental, central y oriental de El Salvador y sus respectivas tablas de valores por departamento.

Figura 2.

Diagrama de proceso implementado para la exportación de bandas de interés a partir del cálculo de LST. Elaboración propia

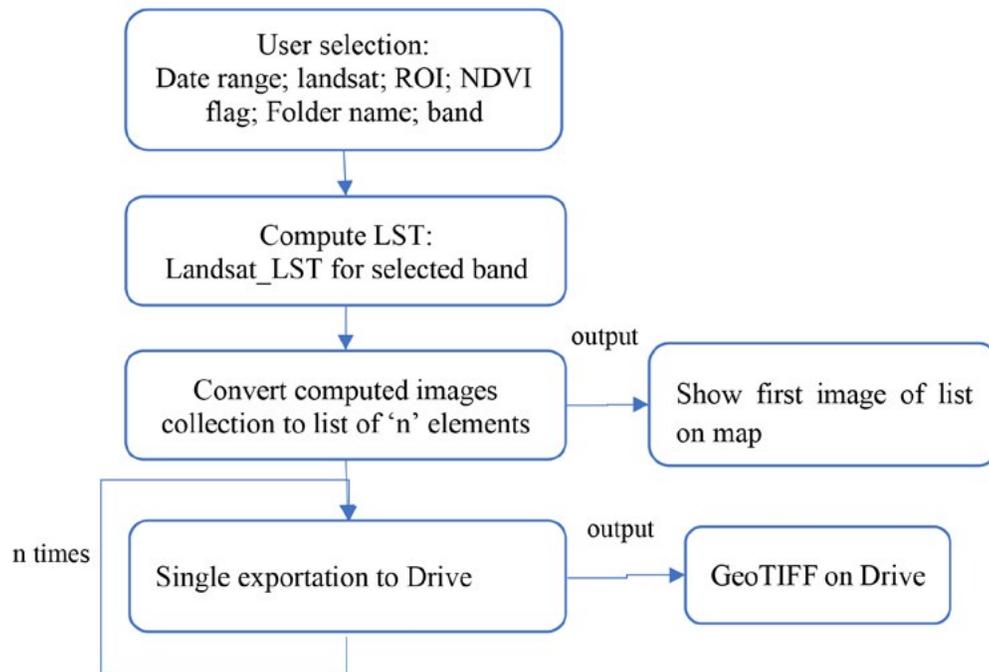


Figura 3.

Diagrama de proceso implementado para la exportación de temperatura ambiente a partir de ERA5-Land Hourly que coincide con datos temporales de Landsat LST. Elaboración propia

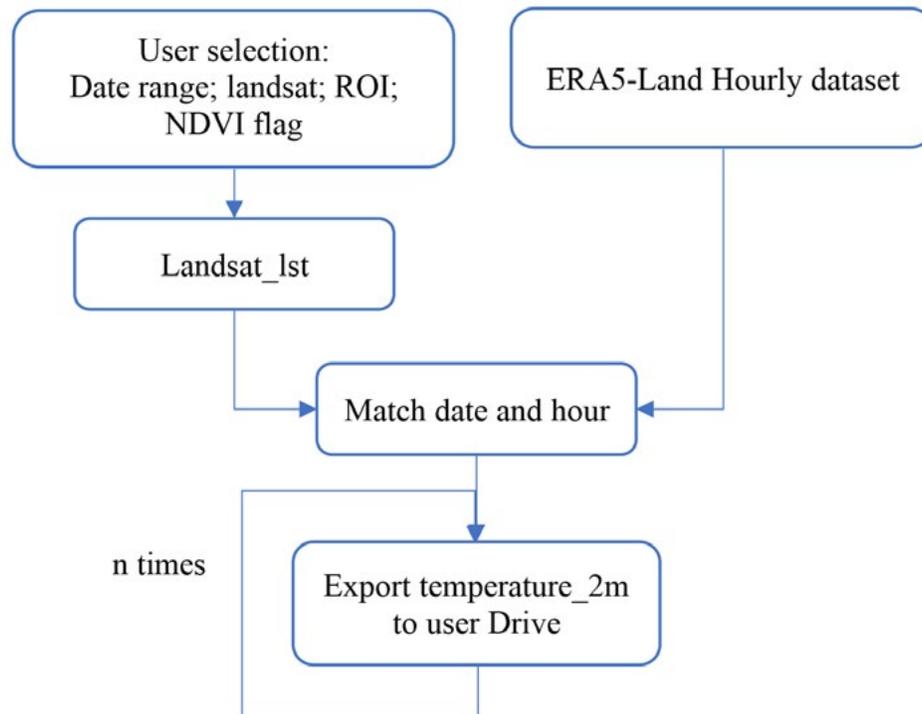


Figura 4
Áreas geotérmicas de El Salvador. (Campos, 1988)

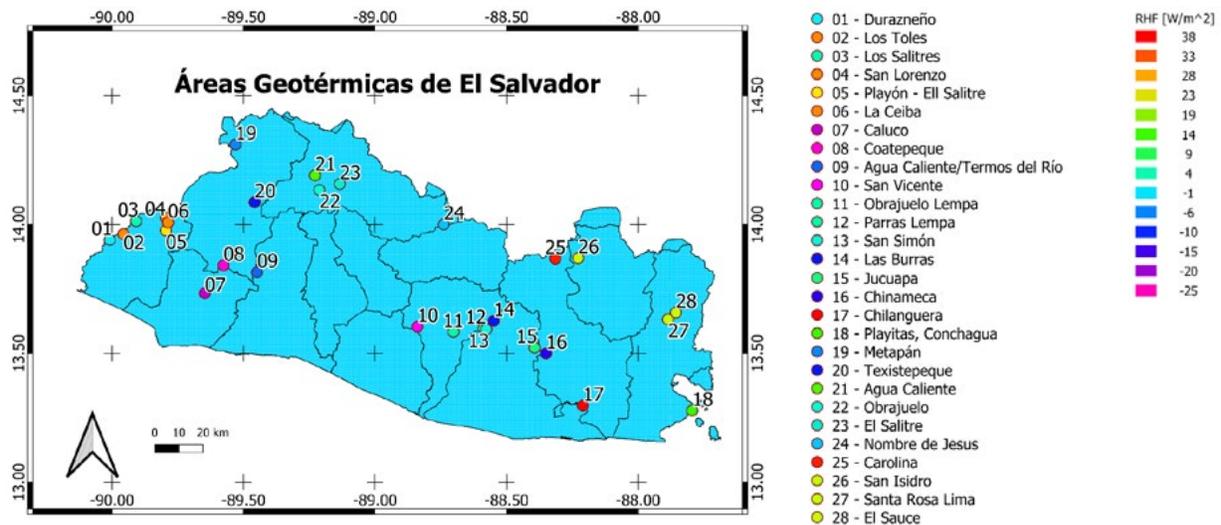
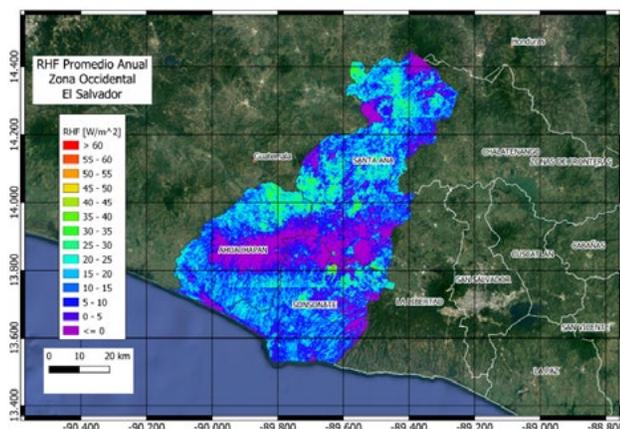
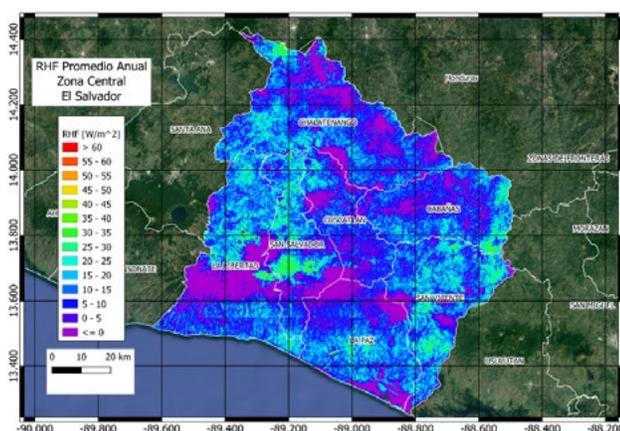


Figura 5.
RHF promedio anual zona occidental de El Salvador.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.
RHF promedio anual zona central de El Salvador.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.
Resumen anual zona occidental.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
Santa Ana	11.59	2029.88	23.52
Ahuachapán	10.56	1192.70	12.59
Sonsonate	10.14	1234.64	12.52
Total		4457.22	48.64

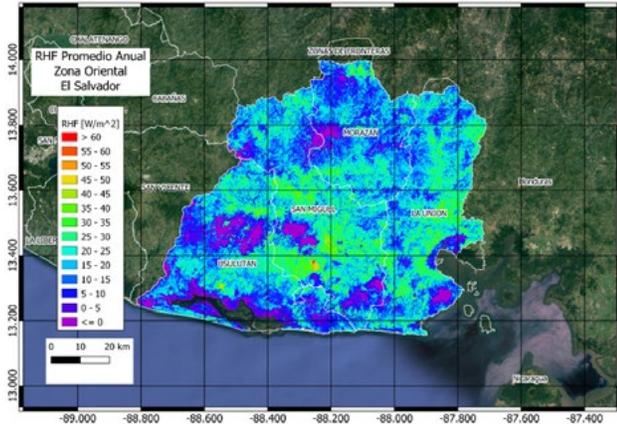
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.
Resumen anual zona central.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
La Libertad	8.98	1635.53	14.68
San Salvador	11.52	901.59	10.38
Chalatenango	8.37	2000.47	16.75
Cuscatlán	6.80	747.36	5.08
La Paz	8.52	1225.57	10.44
Cabañas	9.68	1097.44	10.63
San Vicente	12.96	1201.36	15.57
Total		8809.32	83.53

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6.
RHF promedio anual zona oriental de El Salvador.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.
Resumen anual zona oriental.

Departamento	RHF Promedio [W/m ²]	Área [km ²]	Potencia Total [GW]
Usulután	13.69	2110.72	28.89
San Miguel	18.94	2131.09	40.35
Morazán	15.16	1315.37	19.94
La Unión	19.03	1974.13	37.57
Total		7531.31	126.75

Fuente: Elaboración propia.

Figura 8.
Diagrama de cajas correspondientes a RHF anual a) Zona occidental, b) Zona central, c) Zona oriental

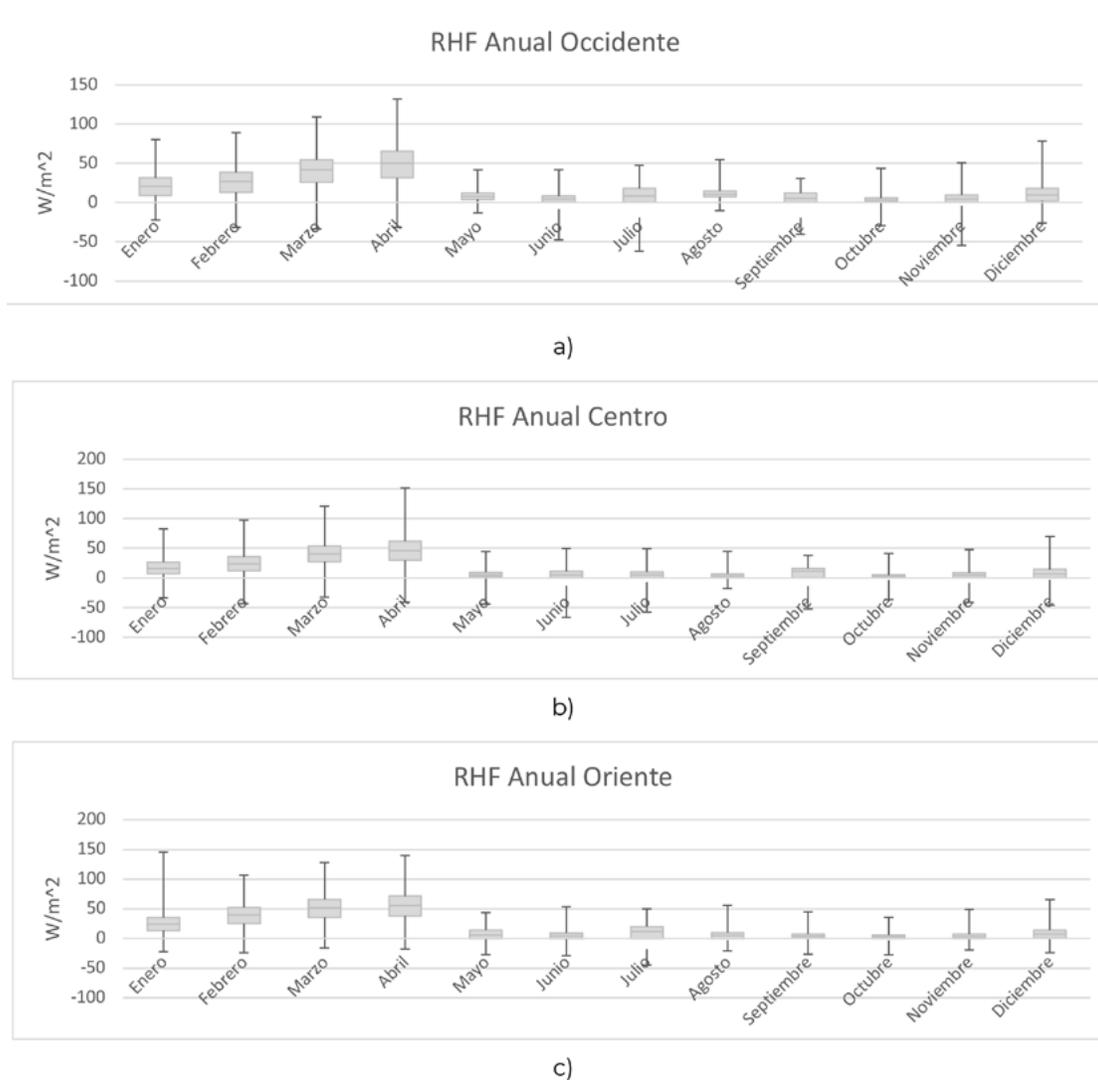
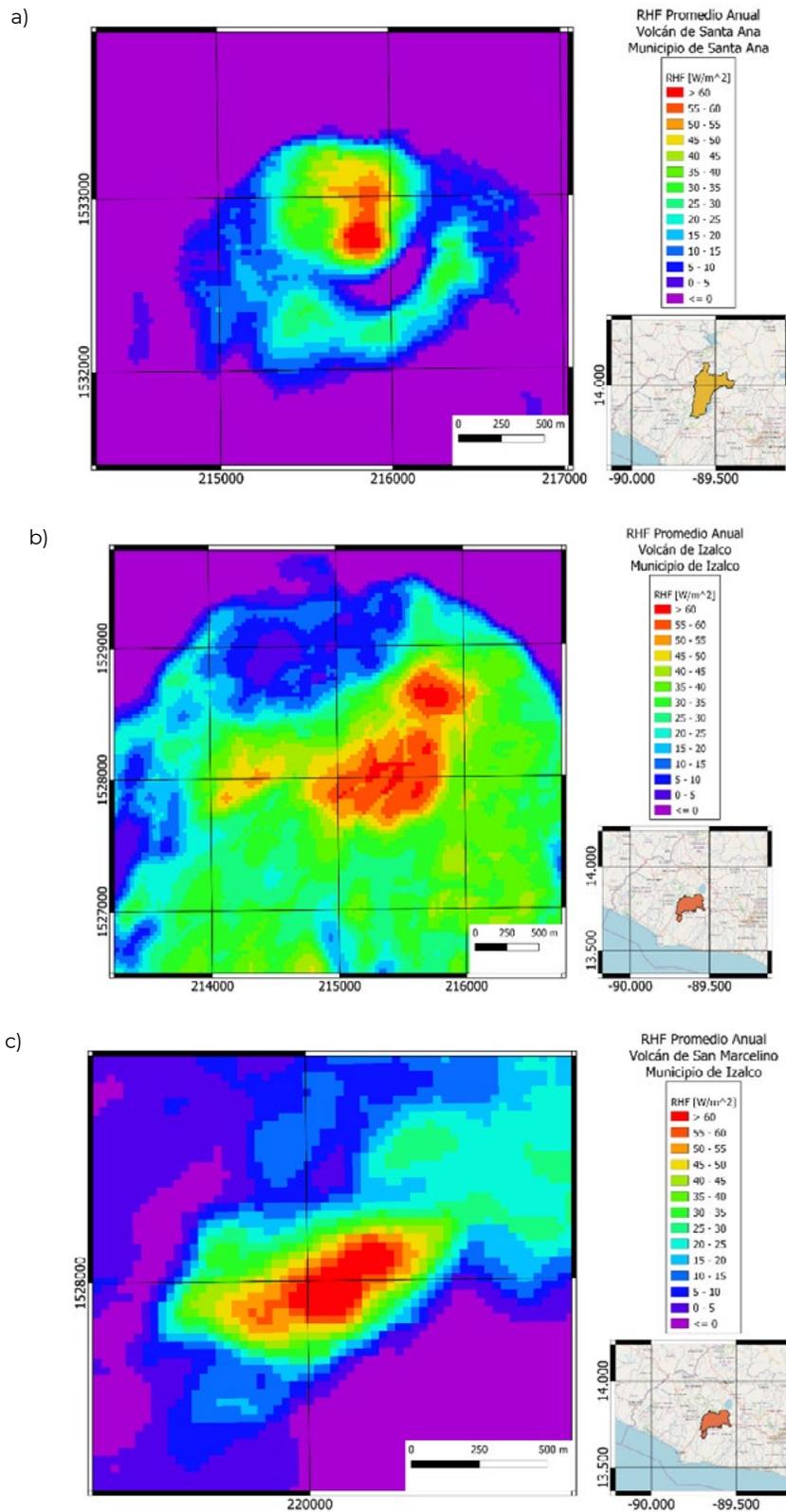
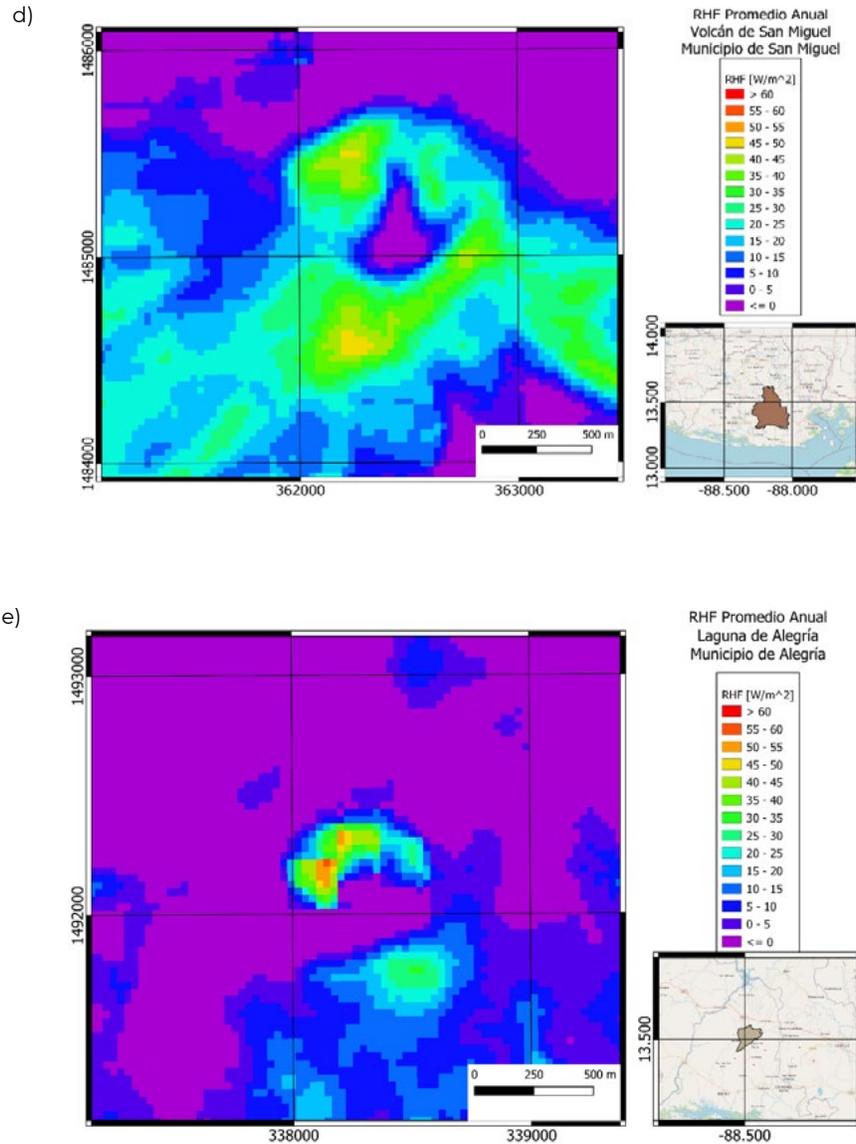


Figura 9.

Imágenes referenciales de RHF promedio a) Volcán de Santa Ana, b) Volcán de Izalco, c) Volcán San Marcelino, d) Volcán de San Miguel, e) Laguna de Alegría. Imagen de RHF se muestran en coordenadas WGS 84/UTM Zone 16N (EPSG:32616); imagen referencial en coordenadas WGS 84 (EPSG:4326).





La Tabla 6 muestra el resumen de los resultados obtenidos para las áreas de interés en las que se muestra un alto valor de Flujo de Calor Radiante de los puntos mostrados en la Figura 4, retomados de la investigación realizada por Tomás Campos; además, se evidencian las zonas volcánicas, que como es de esperarse muestran valores altos de flujo de calor, los cuales se muestran a continuación.

De la investigación de Tomás Campos (Campos, 1988) se encontraron cuatro puntos de interés geotermal con valores que discrepan de lo esperado, esto es debido a su alta cobertura de vegetación, por lo cual estos resultados han sido nombrados falsos negativos.

Tabla 6.

Resumen de resultados de zonas de interés geotérmico.

Nombre	Zona	Departamento	Municipio	Altura promedio [msnm]	RHF [W/m ²]	Área [m ²]	Potencia Total [MW]
Volcán de Santa Ana	Occidente	Santa Ana	Santa Ana	2218	42.39	435486.24	18.46
Volcán de Izalco	Occidente	Sonsonate	Izalco	1531	53.68	953487.79	51.18
Volcán de San Marcelino	Occidente	Sonsonate	Izalco	1191	52.58	244964.23	12.87
Los Toles	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	365	22.99	241809.8	5.56
Los Salitres	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	340	18.32	158023.88	2.89
San Lorenzo	Occidente	Ahuachapán	San Lorenzo	538	33.39	391339.25	13.06
La Ceiba	Occidente	Ahuachapán	San Lorenzo	563	28.23	277208.9	7.83
El Salitre	Occidente	Ahuachapán	Ahuachapán	544	29.58	174387.66	5.16
Metapán	Occidente	Santa Ana	Metapán	542	24.28	430122.65	10.44
Agua Caliente	Centro	Chalatenango	Agua Caliente	396	27.84	146491.54	4.07
Nombre de Jesús	Centro	Chalatenango	Nombre de Jesús	156	16.74	185865.12	3.11
Infiernillo	Centro	San Vicente	Guadalupe	835	17.47	46778.4	0.63
Obrajuelo Lempa	Centro	San Vicente	San Vicente	113	17.41	224894.23	3.91
Volcán de San Miguel	Oriente	San Miguel	San Miguel	1970	26.77 31.38	344063.79 502670.33	24.97
Playitas	Oriente	La Unión	La Unión	45	19.91	78370.44	1.56
El Sauce	Oriente	La Unión	El Sauce	110	23.97	46214.24	1.11
Chilanguera	Oriente	San Miguel	Chirilagua	40	25.52	221345.33	5.65
San Isidro	Oriente	Morazán	San isidro	288	20.28	160444.5	3.25
Carolina	Oriente	San Miguel	Carolina	200	36.47	82570.04	3.01
Chinameca	Oriente	San Miguel	Chinameca	738	27.91	188895.79	5.27
Jucuapa	Oriente	Usulután	Jucuapa	495	27.6	116718.61	3.22
Laguna de Alegría	Oriente	Usulután	Alegría	1280	27.10	138728.57	3.76
TOTAL							190.97

Figura 10.
Volcán de San Salvador.

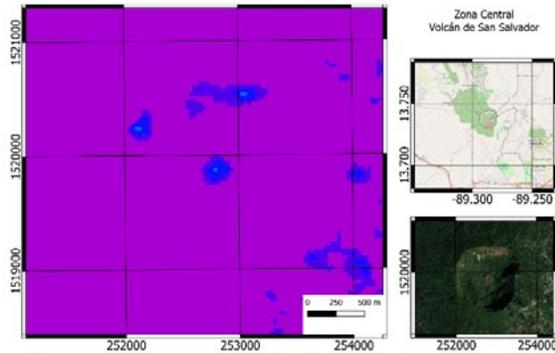


Figura 11.
Cerro pacho, Coatepeque.

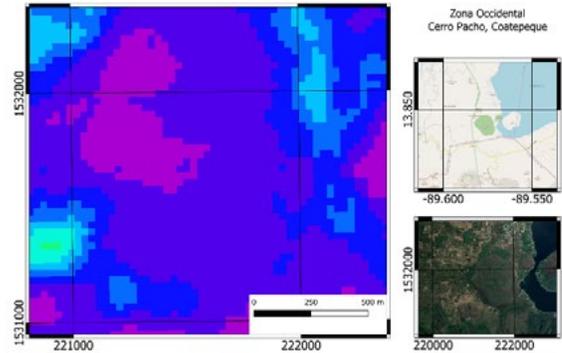


Figura 12.
Agua shuca, Ausoles.

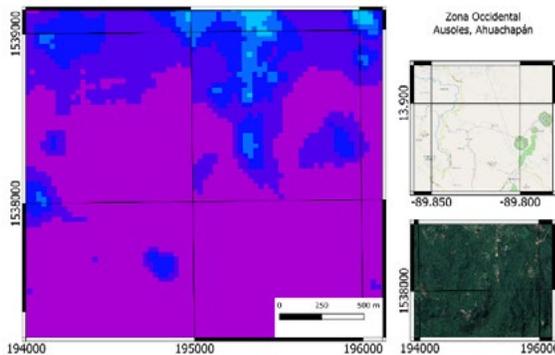
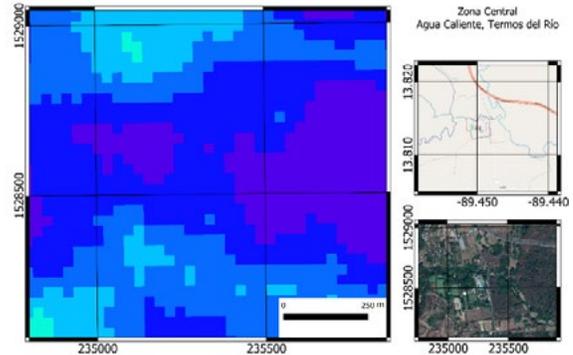


Figura 13.
Agua caliente, Termos del Río.



CONCLUSIONES

El Salvador, tiene un flujo de calor promedio de 11.85 W/m^2 en toda su extensión. En cuanto a la potencia emitida, posee un total de 258.91 GW, de los cuales 48.64 GW corresponden a la zona occidental, 112.42 GW a la zona central, y 97.86 GW a la zona oriental y se describen los puntos analizados en la Tabla 6. La zona oriental de El Salvador posee un Flujo de Calor Radiante – RHF mayor comparativamente a los valores obtenidos en el resto del país.

Dada la metodología empleada para la estimación del Flujo de Calor Radiante – RHF, resulta factible el uso del repositorio de uso libre *landsat_smw_1st* en la plataforma *Google Earth Engine*, ya que este proporciona las

bandas espectrales, el cálculo de emisividad y temperatura superficial del satélite *Landsat* en el rango de fechas especificadas.

A falta de datos atmosféricos, el uso de la herramienta *Atmospheric Parameter Calculator* desarrollada por la NASA y la colección *ERA5-Land Hourly – ECMWF climate reanalysis* en la plataforma GEE, para la corrección de parámetros atmosféricos de puntos y horarios asignados en la plataforma y obtención de la temperatura ambiente de la región, respectivamente, proporciona estimaciones adecuadas para el modelado de Flujo de Calor en el *software* QGIS.

Para el análisis de puntos de interés del mapa RHF resultante se debe realizar una evaluación previa de selección o eliminación de zonas

adecuadas para su interpretación; como en el caso de zonas urbanas en las que se percibe un alto valor RHF tomarse como una zona de interés cuando esta característica corresponde a la alta reflexión realizada por los elementos que se encuentran en estas zonas, para esto es posible realizar una visualización del color natural RGB (4,3,2) o falso RGB para zona urbana (7,6,4) como en el caso de satélites *Landsat 8*; además de realizar observaciones en la geología que se encuentra en la zona a analizar.

Los resultados presentados están limitados a las resoluciones de las imágenes satelitales utilizadas, por lo que existirán zonas en las que el punto real de interés, el flujo de calor no se aprecie debido a la alta presencia de vegetación que obstaculice la identificación satelital de los mismos, o de la naturaleza misma de la región de interés, como el Volcán de San Salvador; Cerro Pacho, Coatepeque; Ausoles, Ahuachapán; y Agua Caliente, Termos del Río que son puntos en los que se esperaba un alto RHF y resultan ser falsos negativos dado su alta cobertura de vegetación.

Las estimaciones de Flujo de Calor Radiante obtenidas no cuentan con respaldo de mediciones locales; además, presentan variaciones respecto a los resultados propuestos por Tomás Campos en sus evaluaciones preliminares sobre el recurso geotérmico de El Salvador, esto es debido a la naturaleza de los estudios implementados.

Los valores de flujo de calor proporcionados pueden ser de utilidad para el mapeo de rasgos superficiales de la descarga de sistemas geotérmicos en El Salvador, siguiendo protocolos de exploración y evaluación de sistemas geotérmicos para la localización y caracterización de manifestaciones hidrotermales, la identificación de cambios en actividad geotérmica y verificaciones de campo y riesgos geológicos. Junto a otros análisis como

geoquímica de fluidos descargados, anomalías geofísicas asociadas a sistemas geotérmicos tales como mínimos de resistividad, anomalías geomagnéticas, anomalías de gradiente geotérmico y anomalías gravimétricas, se pueden integrar todos estos datos utilizando Sistemas de Información Geográfica para generar modelos de sistemas geotérmicos más refinados.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a la Escuela de Ingeniería Eléctrica por la dedicación y apoyo que han brindado a este trabajo. También, al Ing. Miguel Hernández quien proporcionó los datos de mapa geológicos y pedológicos de El Salvador. A los compañeros Kelly Quintanilla y Daniel Henríquez; Carlos Silva; Adonnis Rodríguez; Joél Segovia. Asimismo, agradecer a los editores de este artículo, Julio Cedillos e Ivan Ortiz. Además, esta investigación fue realizada con el apoyo de la Universidad de El Salvador, Centro América.

REFERENCIAS

- Alvarenga Artiga, K., Amaya Mata, J., & Sibrián Carballo, M. (2004). *Evaluación y análisis de los beneficios de la ecoeficiencia en los procesos de la perforación de pozos geotérmicos*. Ciudad Universitaria: Universidad de El Salvador.
- Baldrige, A. M., Hook, S. J., Grove, C. I., & Rivera, G. (2009). The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 711-715.
- Bromley, C. J., van Manen, S. M., & Mannington, W. (2011). Heat flux from steaming ground: reducing uncertainties. En *Thirty-Sixth WORKshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California: Stanford Geothermal Program.
- Campos, T. (1988). *Geothermal Resources of El*

- Salvador. *Preliminary Assessment*. Great Britain: Pergamon Press plc.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing*, 62(3), 241-252.
- Caselles, V., Rubio, E., & Badenas, C. (1997). Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the 8–14, μm Wave band: Analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 490-521.
- ERA5-Land_Hourly. (s.f.). *ECMWF climate reanalysis*. Obtenido de https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_LAND_HOURLY
- Ermida, S. L., Soares, P., Mantas, V., Göttsche, F.-M., & Trigo, I. F. (2020). Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sensing*, 12(9), 1471.
- FlujoDeCalor-SV. (s.f.). *GeoTIFF de las bandas NDVI, LST, EM y Temperatura Ambiental*. Obtenido de https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/gm15001/FlujoDeCalor-SV
- GEE. (s.f.). *Landsat smw list*. Obtenido de https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/sofiaermida/landsat_smw_lst
- Hulley, G. C., & Hook, S. J. (2010). Generating Consistent Land Surface Temperature and Emissivity Products Between ASTER and MODIS DATA for Earth Science Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(4), 1304 - 1315.
- Hulley, G. C., Hook, S. J., & Baldrige, A. M. (2009). Validation of the North American ASTER Land Surface Emissivity Database (NAALSED) version 2.0 using pseudo-invariant sand dune sites. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2224-2233.
- Hulley, G., Hook, S., Abbott, E., Malakar, N., Islam, T., & Abrams, M. (2018). The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth's emissivity at 100 m spatial scale. *Geophysical Research Letters*, 42(19), 7966-7976.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J., & Martínez, P. (2009). Comparison Between Fractional Vegetation Cover Retrievals from Vegetation Indices and Spectral Mixture Analysis: Case Study of PROBA/CHRIS Data Over an Agricultural Area. *Sensors*, 9(2), 768-793.
- Kaneko, T., & Wooster, M. J. (1999). Landsat infrared analysis of fumarolic activity at Unzen Volcano: time-series comparison with gas and magma fluxes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 89, 81-94.
- Kustas, W., & Norman, J. (1996). Use of remote sensing for evapo-transpiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 495-516.
- Lewis, F. M. (1998). *Principles and applications of imaging radar*.
- LSIB. (2017). *Large Scale International Boundaru Polygons Symplified*. Obtenido de https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USDOS_LSIB_SIMPLE_2017
- Malakar, N. K., Hulley, G. C., Hook, S. J., Laraby, K. G., Cook, M., & Schott, J. R. (2018). An Operational Land Surface Temperature Product for Landsat Thermal Data: Methodology and Validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-19.
- Mia, M. B., & Fujimitsu, Y. (2011). Study on satellite images based spectral emissivity, land surface temperature and land-cover in and around Kuju Volcano, Central Kyushu, Japan. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 1, 177-191.

- Mia, M. B., Bromley, C. J., & Fujimitsu, Y. (2012). Monitoring heat flux using Landsat TM/ETM + thermal infrared data - A case study at Karapiti ('Craters of the Moon') thermal area, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 235, 1-10.
- Mia, M. B., Nishijima, J., & Fujimitsu, Y. (2014). Exploration and monitoring geothermal activity using Landsat ETM+ images. A case study at Aso volcanic area in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 275, 14-221.
- Mokhari, A., Noory, H., Purshakouri, F., Haghghatmehr, P., Afrasiabian, Y., Razavi, M., . . . Naeni, A. S. (2019). Calculating potential evapotranspiration and single crop coefficient based on energy balance equation using Landsat 8 and Sentinel-2. *Sensing*, 154, 231-241.
- Montanaro, M., Gerace, A., & Rohrbach, S. (2015). Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor. *Applied Optics*, 54(13), 3963-3978.
- NASA. (s.f.). *Atmospheric Parameter Calculator*. Obtenido de <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>
- NASA. (s.f.). *NASA*. Obtenido de <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Ogawa, K., & Schmugge, T. (2004). Mapping Surface Broadband Emissivity of the Sahara Desert Using ASTER and MODIS Data. *Earth Interactions*, 8(7), 1-14.
- Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H., & Wu, J. (2018). Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 215, 255-267.
- Peres, L., & DaCamara, C. (2005). Emissivity maps to retrieve land-surface temperature from MSG/SEVIRI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8), 1834-1844.
- Planck, M. (1914). *The Theory of Heat Radiation* (Segunda ed.). Philadelphia, P. Blakiston's Son & Co.
- Prihodko, L., & Goward, S. N. (1997). Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment*, 60(3), 335-346.
- Prol-Ledesma, R. M., & Morán-Zenteno, D. J. (2018). *Heat flow and geothermal provinces in Mexico*. Cd. Universitaria: Elsevier Ltd.
- Ren, H., Liu, R., Qin, Q., Fan, W., Yu, L., & Du, C. (2017). Mapping finer-resolution land surface emissivity using Landsat images in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6764-6781.
- Richards, J. A. (2012). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. (5th ed.). Springer Publishing Company, Incorporated.
- Ruíz, J. A. (2019). *Tensor Decomposition and Deep Learning Neural Networks for Multispectral Image Compression and Semantic Segmentation*.
- Thomas, C. (May 2008). Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46.5.
- USGS. (Noviembre de 2019). *Landsat 8 Data Users Handbook*. Recuperado el 25 de Enero de 2021, de <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8-data-users-handbook>
- Valor, E., Caselles, V., Coll, C., & Rubio, E. (1997). Thermal band selection for the PRISM instrument: 1. Analysis of emissivity-temperature separation algorithms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(10), 11145-11164.
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., &

Zhao, S. (2015). An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289.

Wehner, D. R. (1994). *High-Resolutions Radar*. 2nd.

Weier, J., & Herring, D. (2000). *Measuring Vegetation*. Recuperado el 1 de Febrero de 2021, de <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>

Weier, J., & Herring, D. (2000). *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Recuperado el 1 de Febrero de 2021, de https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php