



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ANÁLISIS DE ANOMALÍAS TERMALES EN EL VOLCÁN UBINAS ASOCIADAS A PERIODOS ERUPTIVOS USANDO IMÁGENES LANDSAT L8 Y L7

Informe Técnico N°042-2024/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Noviembre, 2024

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo
Norabuena

Informe Técnico

Análisis de anomalías termales en el volcán Ubinas asociadas a periodos eruptivos usando imágenes Landsat L8 y L7

Autor

Ivonne Lazarte

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del
Perú Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ANÁLISIS DE ANOMALÍAS TERMALES EN EL VOLCÁN UBINAS
ASOCIADAS A PERIODOS ERUPTIVOS USANDO IMÁGENES
LANDSAT L8 Y L7**

Arequipa – Perú
Noviembre, 2024

RESUMEN

Se presenta los resultados del procesamiento y tratamiento de imágenes satelitales Landsat (TM, ETM+ y OLI) del volcán Ubinas de los periodos eruptivos 2006–2009, 2013–2017 y 2019, para la detección y seguimiento de anomalías térmicas empleando el sistema VOLCANOMS. Se analizaron 53 escenas de imágenes Landsat 8 y 7 del periodo 2006–2019, identificándose 23 anomalías térmicas. El valor más alto de radiancia registrada ocurrió el 11 de mayo del 2007, con $277 \text{ W/m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda SWIR1, $125 \text{ W/m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda SWIR2 y $23 \text{ W/m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda TIR. Debido a las diferencias en la frecuencia de toma de datos y número limitado de anomalías identificadas, no se ha establecido una relación clara entre los valores de radiancia térmica con los datos de sismicidad, aunque estas anomalías se han estado observando durante periodos de intensa actividad sísmica de tipo largo periodo, asociadas a paso de fluidos.

Los parámetros físicos estimados indican que las anomalías estarían relacionadas a presencia de cuerpos de lava en la superficie del cráter para los periodos eruptivos 2006– 2009 y en algunos registros del periodo 2013–2017, sin embargo, para el proceso eruptivo 2019 las anomalías estarían relacionado a procesos de desgasificación principalmente.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

2.- CONTEXTO GEOLÓGICO

3.- ACTIVIDAD HISTÓRICA

3.1.- Evolución del proceso eruptivo 2006 – 2009

3.2.- Evolución del proceso eruptivo 2013 –2017

3.3.- Evolución del proceso eruptivo 2019

4.- METODOLOGÍA

4.1.- Recopilación de datos

4.2. Procesamiento

5.- RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

DISCUSIÓN

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCIÓN

El volcán Ubinas es considerado el volcán más activo y uno de los de muy alto peligro del Perú (Del Carpio et al., 2022), y forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes de Sudamérica (De Silva y Francis, 1991). Se encuentra ubicado en la Región Moquegua, y geopolíticamente pertenece a la provincia de General Sánchez Cerro; a ~70 km al este de la ciudad de Arequipa. Este volcán ha presentado hasta cuatro procesos eruptivos en el último siglo (2006–2009, 2013–2017, 2019 y 2023). En un radio de 40km alrededor del volcán, se encuentran emplazados importantes centros poblados, tales como el distrito de Ubinas, Tonohaya, San Miguel, Escacha, Sacohaya, Querapi, Santa Lucía de Salinas, Santa Rosa de Phara, Quinsachata y Carmen de Chaclaya, entre otros, donde habitan cerca de 3,800 personas (INEI, censo 2017). Estos habitantes podrían verse eventualmente afectados en caso de una nueva reactivación del volcán Ubinas, debido principalmente a la caída de ceniza y la ocurrencia de lahares, que son los peligros más recurrentes.

Actualmente, una de las herramientas de bajo costo para el monitoreo volcánico es la utilización de imágenes satelitales disponibles gratuitamente en la web, donde existe una gran variedad de imágenes para el estudio y monitoreo de los volcanes. En los últimos años, se han desarrollado diferentes sistemas automáticos y semiautomáticos para el

tratamiento de imágenes satelitales con la finalidad de detectar anomalías térmicas y monitorear cambios asociados con la actividad volcánica (Coppola et al., 2015; Layana et al., 2020). Sin embargo, estos sistemas solo vienen siendo utilizados en un número limitado de volcanes, por lo tanto, el desarrollo, uso y configuración de estos sistemas de monitoreo satelital en los volcanes activos del sur del Perú resulta de gran utilidad, ya que permite obtener nuevos parámetros de monitoreo que contribuyen a mejorar los sistemas de vigilancia volcánica.

Durante un proceso eruptivo, los ascensos de magma generan calor al perder una porción de masa en forma de flujo termal o flujo de calor, de forma similar en que el magma pierde volátiles de forma constante. El flujo termal total comprende la pérdida total de calor originado por flujos radiativo (como fumarolas o lagos crátericos), flujos convectivos (magma en lagos de lava, flujos o domos), flujos conductivos (perdida de calor de la cámara magmática hacia la roca de caja) y el flujo térmico (fumarolas) (Layana et al, 2022).

Las imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI (bandas 4,5,6 y 7 y 5,6,7 y 10) resultan de gran utilidad para determinar los flujos radiativos y convectivos mediante el método conocido como Tres Bandas y tres Componentes (MTBTC; Oppenheimer et al., 1993). Según Harris y Stevenson (1997), es posible obtener el flujo de gas a partir de técnicas remotas de medición in situ. Por lo tanto, el flujo calórico total considera

tanto el flujo de calor eruptivo como el flujo no eruptivo. En el caso de anomalías térmicas sin actividad eruptiva, se puede tomar como la medida de la temperatura de desgasificación generado por los gases emitidos. En los últimos años, diferentes procesos eruptivos en varios volcanes fueron acompañados de anomalías térmicas (Harris et al., 1998; Wright et al., 2001; Harris et al., 2003; Urai 2010; Gonzáles et al., 2015). La actividad eruptiva 2013–2017 de volcán Ubinas también presento anomalías térmicas, ligadas a la presencia de lava en la base de la superficie del cráter (Coppola et al., 2015). El sistema Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS; Layana et al., 2020), es una plataforma satelital colaborativa que sirve como una herramienta para el monitoreo de anomalías térmicas. Esta plataforma de acceso gratuito cuenta con distintos niveles de usuarios para el procesamiento de imágenes de la serie de satélites Landsat. A diferencia de otras plataformas, presenta una interfaz web muy amigable que enmascara todo el cálculo matemático que conlleva la obtención de distintos parámetros de anomalías termicas inferidas de imágenes satelitales.

El objetivo del presente proyecto es detectar anomalías térmicas en el volcán Ubinas de los periodos 2006–2009, 2013–2017 2019, mediante la combinación de bandas de imágenes satelitales Landsat y realizar el cálculo de parámetros térmicos en la plataforma VOLCANOMS, al cual se tuvo acceso como parte del convenio marco de cooperación interinstitucional entre el Instituto Geofísico del Perú y la Universidad del

Norte de Chile. Este estudio nos permitirá caracterizar la actividad térmica durante este periodo eruptivo y encontrar posibles relaciones con otros parámetros de monitoreo e identificar posibles cambios en la dinámica eruptiva del 2019.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

El volcán Ubinas se encuentra localizado a 90 km al Norte de la ciudad de Moquegua y a 70 km al Este de la ciudad de Arequipa ($16^{\circ} 22'$ S, $70^{\circ} 54'$ O; 5,672 msnm.), ver Figura 1. El volcán Ubinas tiene forma cónica, posee una altura de 1,400 m, y cubre un área de 65 km^2 y posee un volumen de 54 km^3 (Rivera et al., 2011). En la parte superior se distingue la caldera de 900 m de diámetro y dentro de la caldera un cráter de 300 m de diámetro (Mariño et al., 2014).

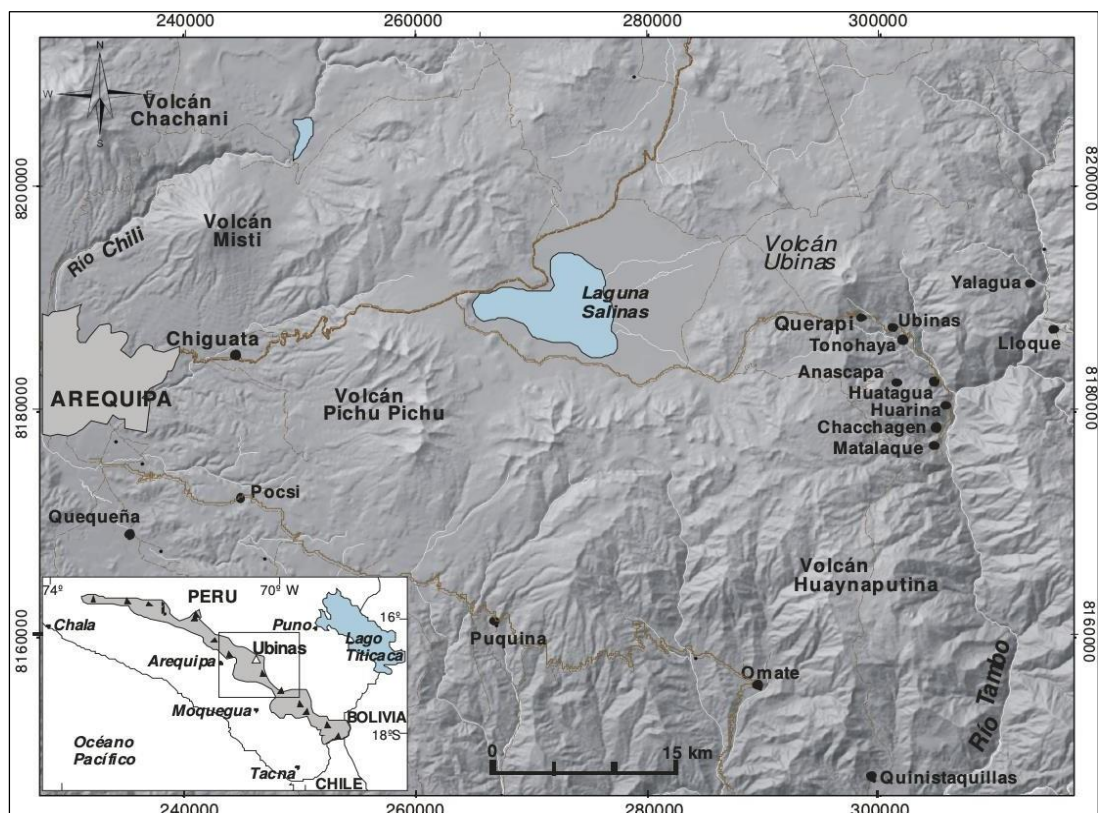


Figura 1. Mapa de ubicación del volcán Ubinas, poblados aledaños y la ciudad de Arequipa. En el cuadro inferior, se presenta la cadena volcánica Plio-cuaternaria del sur peruano.

Los estudios estratigráficos, cartografiado geológico y dataciones radiométricas Ar/Ar, C14, efectuados por Rivera (1998), Rivera et al. (1998) y Thouret et al. (2005), muestran que el volcán Ubinas se construyó en dos períodos: el primer período entre ~800,000y 370,000 años, donde se formó el cono inferior denominado “UBINAS I”, y el segundo período ocurrido desde 370,000 años hasta la actualidad, donde se formó el cono superior llamado “UBINAS II” (Mariño et al., 2014).

3. ACTIVIDAD HISTORICA

El volcán Ubinas es considerado el volcán más activo del Perú debido a que desde el año 1550 hasta la actualidad ha presentado 27 erupciones explosivas de magnitudes leves a moderadas con un IEV de 1–3 (Thouret et al., 2005). Se caracteriza por presentar una actividad esporádica y explosiva ocurrida desde el Pleistoceno superior extendiéndose hasta el Holoceno, continuando durante el siglo XX con erupciones esporádicas moderadas caracterizadas por la ocurrencia de explosiones seguidas de emisiones de ceniza (Rivera et al, 2011).

3.1.– Evolución del proceso eruptivo 2006–2009

La actividad eruptiva del presente siglo se inició el 27 de marzo de 2006, luego de un periodo largo de calma (10 años), dicha actividad se intensificó entre los meses de abril y octubre del mismo año (Rivera et al., 2014). Esta actividad eruptiva presentó dos etapas: La primera comprende del 27 de marzo al 18 de abril del 2006, que se caracterizó por presentar emisiones de vapor de agua y ceniza y balísticos, que probablemente comprenda la fase freática y freato–magmática. La segunda etapa eruptiva fue de tipo Vulcaniana, se inició el 19 de abril del 2006, fecha en la cual se detectó en el fondo del cráter un cuerpo de lava; esta etapa se caracterizó por la ocurrencia de explosiones, muchas de ellas

acompañadas de proyectiles balísticos, que generaron columnas de ceniza que llegaron a superar los 2 km de altura (Rivera et al., 2014). Dicha actividad eruptiva duro desde marzo 2006 al diciembre de 2009 (Machacca, 2012).

3.2.- Evolución del proceso eruptivo 2013–2017

La actividad eruptiva del 2013 dio inició a un nuevo periodo eruptivo que inició con la ocurrencia de explosiones freáticas y actividad tipo tremor entre el 2 y el 7 de septiembre. Los siguientes meses la actividad volvió a su actividad fondo normal, con registro de sismicidad menor a 10 eventos por día (Machacca et al., 2019). En enero del 2014, se registró un incremento en la actividad sísmica, lo que marcó el inicio de la extrusión y desgasificación del magma (Machacca et al., 2019). El 1 de febrero de 2014 la actividad fumarólica y tremorica incrementó, luego de unas semanas el 20 de febrero de 2014 se registra el primer tremor armónico que está directamente relacionado a la presencia de lava en el cráter (Machacca et al., 2014). Además, el sistema de detección de puntos calientes MIROVA también detectó anomalías térmicas (Coppola et al., 2015).

El 13 de abril del 2014, la actividad aumentó considerablemente produciéndose explosiones seguidas de columnas de ceniza que superaron los 5 km y que expulsaron bloques de magma hasta 2.6 km de

cráter activo, dando así inicio a las fases magmático que duro hasta febrero de 2017 (Machacca et al., 2019).

Desde finalizado el proceso anterior (2013–2017) la actividad del volcán Ubinas se mantuvo en niveles muy bajos (nivel de alerta: verde) con una tasa de 2 sismos por día, sin presencia de anomalías térmicas y se registraban en algunas ocasiones emisiones leves de vapor de agua (Del Carpio et al, 2019).

3.3.– Evolución del proceso eruptivo 2019

Durante los primeros cinco meses del año 2019, la actividad del volcán Ubinas se mantenía en niveles muy bajos (nivel de alerta: verde), con una tasa de 2 sismos por día. Esta actividad se mantuvo así desde finalizado el anterior proceso eruptivo (2013–2017), sin anomalías térmicas y emisión leve de vapor de agua de forma muy esporádica (Del Carpio et al, 2019).

Los primeros indicios de una nueva reactivación del volcán Ubinas se presentaron el 18 de junio de 2019, con el registro de un enjambre de 33 sismos de tipo Volcano–tectónico (VT) (procesos de ruptura de roca al interior del volcán) en un lapso de 75 minutos, localizados a una profundidad de ~7.5 km debajo del edificio volcánico con magnitudes menores a M2.7 (Del Carpio et al, 2019).

Entre el 21 al 23 de junio de 2019, la actividad sísmica presento un considerable aumento, registrándose hasta 154 eventos sísmicos por día de tipo LP, asociados a movimiento de fluidos volcánicos. El 24 de junio de 2019, se inició una nueva fase eruptiva con emisiones menores de tefra, y presencia de tremor bandeados, propias de una fase freática, que alcanzaron a formar columnas eruptivas de 1000 m de altura sobre la base del cráter, estas cenizas fueron dispersadas en dirección norte y noreste del volcán. La actividad se intensifico el 19 de julio con la ocurrencia de una explosión que comenzó a las 2:30 AM (hora local) y tuvo una duración de cerca de 24 horas. Durante este periodo, la actividad sísmica aumentó con predominio de señales de tipo LP y tremor (Del Carpio et al., 2019), presentando explosiones continuas y claramente diferenciados, los cuales generaron diferentes columnas eruptivas controlados por el viento. La primera de estas explosiones, genero una pluma que alcanzó los 6.5 km de altura sobre la cumbre del volcán y fue dispersada hacia el ESE, llegando hasta 300 km de distancia afectando a los pueblos de Jesús de Machaca y Catacora en Bolivia (Aguilar et al.,2019).

4. METODOLOGIA

Para el análisis de las anomalías termales presentadas en el volcán Ubinas, se han empleado imágenes Landsat, específicamente de los sensores ETM+ y OLI, los cuales fueron procesadas a través de la plataforma VOLCANOMS; método planteado por Harris et al, (1999) conocido como Tres Bandas Tres Componentes (MTBTC), en donde es posible obtener parámetros termales como: Área de la anomalía, temperatura efectiva, flujo de calor , flujo de masa, radiancia termal, temperatura de brillo, flujo radiativo y flujo convectivo. La metodología seguida en este estudio consto de dos etapas:

- Recopilación de datos correspondiente a imágenes satelitales Landsat OLI y ETM+ obtenidas a través de plataformas web gratuitas.
- Tratamiento de imágenes Landsat (OLI y ETM+) de los PATH y ROW: 03-71, 04-71, 116-173 en la plataforma VOLCANOMS para la identificación y cálculo de parámetros térmicos como: la radiancia térmica, temperatura efectiva, área de la anomalía, flujo radiativo, flujo convectivo, flujo de gas, flujo total, y flujo de masa.

4.1.- Recopilación de datos

La base de datos basada en imágenes Landsat ETM+ y OLI de la zona del volcán Ubinas, se construyó a través de la descarga gratuita de estas

imágenes desde la plataforma web <https://earthexplorer.usgs.gov/>, del Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS), plataforma científica muy valiosa para el estudio de erupciones volcánicas. Para acceder a la descarga de datos, Landsat genera tiles territoriales periódicos de una misma zona de interés, en este caso, la zona del volcán Ubinas. Cada uno de estos tiles está identificado por una cuadrícula codificada a través de un valor de Path y Row similar a coordenadas de longitud/latitud. Para el caso del volcán Ubinas se descargaron escenas de las series Landsat 7 y Landsat 8 con los valores de Path 3 y Row 71, para imágenes diurnas (Figura 2).

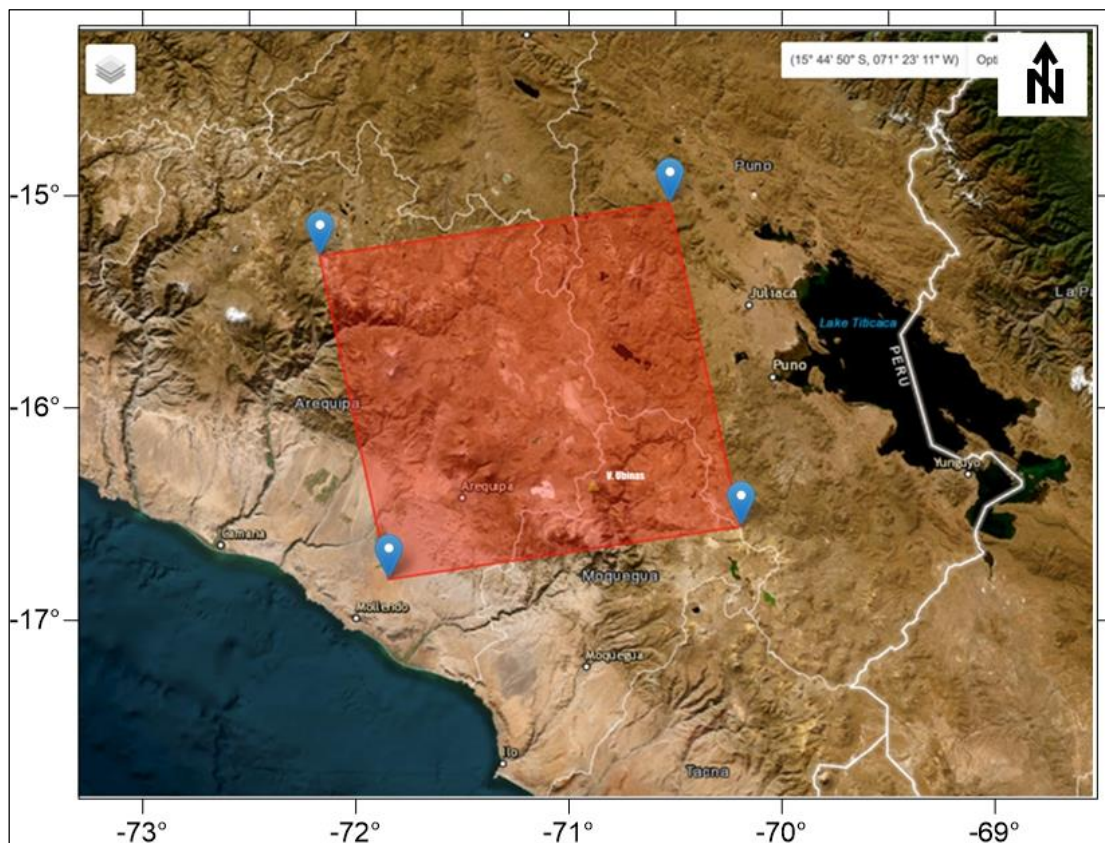


Figura 2. Cuadrículas de la zona del volcán Ubinas con los valores de Path 3 y Row 71 de la plataforma web <https://earthexplorer.usgs.gov/>, del programa de imágenes satelitales Landsat administrado por la NASA y el Servicio Geológico de los EE.UU. (USGS).

4.2.– Procesamiento

El procesamiento se realizó ingresando a la página web <http://volcanoms.ckelar.org>. Este comienza cargando la imagen Landsat en los servidores de VOLCANOMS, correspondiente a un archivo en formato *.tar.gz, el que se obtiene de manera gratuita de las páginas <https://earthexplorer.usgs.gov> o en <https://www.landsatlook.usgs.gov>. El sistema automáticamente descomprime el archivo, apila las bandas y lee el archivo *.met, para obtener los parámetros de la metadata del sensor satelital.

Una vez cargada y abierta la imagen en el sistema VOLCANOMS, se muestra la totalidad de la escena Landsat que será trabajada, además esta permite al usuario establecer una combinación RGB para identificar la anomalía termal dentro de la escena. Según Layana et al (2020), es recomendable utilizar las combinaciones 7-4-2, 5-4-2 y 7-5-4 para sensores TM y ETM+; mientras que, para el sensor OLI, las combinaciones adecuadas serían 7-5-3, 6-5-3 y 7-6-5. Estas combinaciones abarcan un amplio rango infrarrojo que permite visualizar las anomalías termales, desde aquellas de baja temperatura y tamaño pequeño en términos relativos hasta aquellas de mayor temperatura y mayor tamaño (Layana et al., 2020).

Una vez identificado la anomalía, se procede a seleccionar de forma

manual una región de interés (ROI) que abarque tanto la anomalía térmica como parte del background, el sistema automáticamente genera recortes de esta ROI en escala de grises para las bandas NIR, SWIR1, SWIR2 y TIR, además de imágenes en combinación RGB de SWIR2–NIR–Verde, SWIR1–NIR–Verde, y SWIR2 SWIR1 –NIR.

Tabla 1. Valores utilizados para el cálculo de anomalías termales en bandas NIR, Parámetros ingresados para el procesamiento del método tres bandas y tres componentes.

Parámetros flujo de gas	Periodo eruptivo			Periodo no eruptivo		
	Valor calculado	Fecha del dato	Referencia	Valor calculado	Fecha del dato	Referencia
F gas (flujo gas total) (DOAS) kg/s	276,54	22-23 nov 2015 (Ubinas)	Moussallam et al., (2017a)	63,260	26 nov 2015 (Sabancaya)	calculo propio, usando proporciones de Moussallam et al 2017
F SO2 (Kg/s)	11,4	22-23 nov 2015(Ubinas)	Moussallam et al., (2017a)	2,569	26 nov 2015 (Sabancaya)	Carr et al., (2017)
cg (capacidad calor específico) J/Kg K	1150		Harris et al., (1999)	1150		Harris et al., (1999)
T magma (*K)	1271,15	2006-2009	Rivera et al., (2014)	1271,15	2006-2009	Rivera et al., (2014)
	1273,15	2006	Rivera et al., (2008)	1273,15	2006	Rivera et al., (2008)
T aire k	278,15			278,15		
F H2O (flujo de agua) kg/s	250,8	22-23 nov 2015	Moussallam et al., (2017)	56,8		calculo propio, usando proporciones de Moussallam et al 2017
Lv (calor latente de condensación de agua) J/Kg	2260000		Harris et al., (1999)	2260000		Harris et al., (1999)
Parámetros flujo de masa M						
CL (calor latente de cristalización) (J/ Kg)	Periodo Eruptivo			Periodo no eruptivo		
	Valor calculado	Fecha del dato	Referencia	Valor calculado	Fecha del dato	Referencia
Δf (fraccion de masa cristalizada)	350000		Harris et al., (2005)	350000		Harris et al., (2005)
	0,45	27/04; 7/05; 25/05; 28/08 - 2006	Rivera et al., (2008)	0,45	27/04; 7/05; 25/05; 28/08 - 2006	Rivera et al., (2008)
	0,75	19-22 jun 2019	A7000 informe técnico anual UBINAS 2019	0,75	19-22 jun 2019	Ramos et al; 2019 informe técnico anual UBINAS 2019
	0.5 - 0.65	2006	Rivera et al., (2014)	0.5 - 0.65	2006	Rivera et al., (2014)
C magma (capacidad calor específico) (J/Kg)	1000		Francis et al., (1993)	1000		Francis et al., (1993)
ΔT° magma	440	1998 (fumarola)	Thouret et al., (2005)			
(variación de la T° del magma) se refiere a la diferencia entre las temperaturas de los productos emitidos de Iso volcanes (fumarolas) y la temperatura al interior del volcán	454	22-12-2015 (fondo del cráter)	GVP-october 2016			
	444	1998 (fumarola)	Macedo et al., (2002)			

Finalmente, el resultado del procesamiento se entrega en formato de un reporte (.pdf) en donde aparece la metadata de la escena que se procesó, los parámetros que se ingresaron manualmente (ver Tabla 1), y las imágenes de la ROI en colores naturales, en escala de grises para cada una de las bandas y en las tres combinaciones RGB (Figura 3).

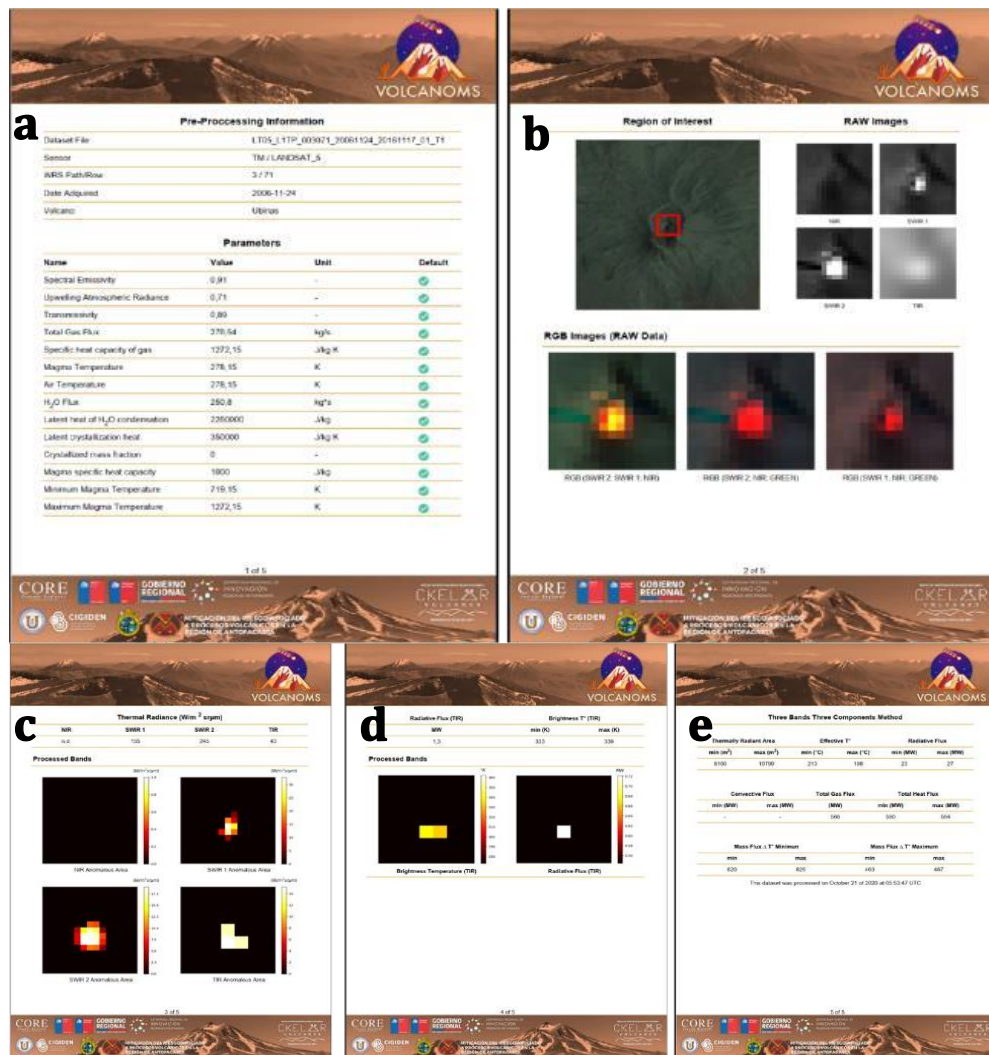


Figura 3. Ejemplo de un reporte generado por VOLCANOMS. a) Parámetros relacionados a anomalías térmicas; b) representa la Región de Interés (ROI); además de las imágenes en escaladas de grises de cada banda individual y la combinación en falso color RGB de las diferentes bandas; c) muestra la radiancia termal calculada para cada banda; d) imagen de izquierda muestra el flujo radiativo, mientras la de la derecha muestra valores de brillo; e) reporte de los datos del TBTCM.

5.- RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

El sistema VOLCANOMS permitió identificar 53 escenas de imágenes Landsat 8 y 7, para los periodos eruptivos 2006–2009, 2013–2017 y 2019 del volcán Ubinas. De las 53 escenas identificadas, solo en 23 se identificaron anomalías térmicas. Los resultados de estas anomalías son presentados en la Tabla 2.

5.1 Anomalías térmicas del periodo eruptivo 2006 –2009

En la Figura 4, se presentan los valores de radiancia de las bandas SWIR1, SWIR2 y TIR, de las anomalías encontradas en el volcán Ubinas, correspondientes al proceso eruptivo 2006–2009. El valor más alto de radiancia se registró el 11 de mayo del 2007, con un valor de 277 W/ m²srμm para la banda SWIR1, un valor de 125 W/ m²srμm para la banda SWIR2 y un valor de 23 W/ m²srμm para la banda TIR (Figura 4).

Tabla 2. Valores de los parámetros calculados en la plataforma VOLCANOMS, basados en el método Tres Bandas Tres Componentes (MTBTC) para el volcán Ubinas.

Fecha de la escena	Volcán	PARÁMETROS TERMALES CALCULADOS MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA VOLCANOMS PARA EL VOLCÁN UBINAS																					
		Radiance (W/m ² srμm)			Brightness T ^o (TIR)		Radiative Flux (TIR)	Thermally Radiant Area		Effective T ^o		Radiative Flux		Convective Flux		Gas Flux		Total Heat Flux		Mass Flux ΔT ^o Minimum		Mass Flux ΔT ^o Maximum	
		NIR	SWIR 1	SWIR 2	TIR	Min (K)	Max (K)	(MW)	Min (m ²)	Max (m ²)	Min (°C)	Max (°C)	Min (MW)	Max (MW)	Min (MW)	Max (MW)	Min (MW)	Max (MW)	Min (kg/s)	Max (kg/s)	Min (kg/s)	Max (kg/s)	
2006/04/30	UBI	n.d.	121	191	131	317	338	5.5	7199	36000	209	138	20	53	32.85	92.87	1196.28	1249.14	1342.16	0.92819	0.86386	0.67141	0.62488
2006/05/16	UBI	n.d.	152	157	48	318	323	1.6	9900	14399	181	165	21	27	37.11	47.53	1196.28	1254.39	1270.81	0.87885	0.86749	0.63572	0.62751
2006/05/24	UBI	n.d.	6.4	82	118	290	332	5.1	5399	39597	242	113	19	45	30.09	77.39	1196.28	1245.38	1318.67	0.91195	0.86126	0.65967	0.62300
2006/07/11	UBI	n.d.	158	141	58	303	326	2.5	8999	17999	184	154	20	31	34.50	54.03	1196.28	1250.78	1281.31	0.88611	0.86499	0.64098	0.62570
2006/09/05	UBI	n.d.	75	144	74	315	328	3.2	8100	21599	190	148	19	35	32.45	61.38	1196.28	1247.73	1292.66	0.89396	0.86288	0.64665	0.62418
2006/11/24	UBI	n.d.	155	245	43	333	339	1.3	8100	10799	213	198	23	27	37.93	45.77	1196.28	1257.22	1269.05	0.87763	0.86945	0.63484	0.62892
2006/12/26	UBI	n.d.	38	84	70	301	312	2.1	2699	25199	221	126	8.4	33	13.29	57.31	1196.28	1217.98	1286.59	0.88976	0.84231	0.64362	0.60929
2007/01/03	UBI	n.d.	86	93	66	289	315	2.3	3599	25199	206	125	9.8	32	16.10	56.68	1196.28	1222.19	1284.96	0.88863	0.84522	0.64280	0.61140
2007/02/04	UBI	n.d.	13	94	25	320	327	1	4499	7200	233	211	15	20	23.81	33.29	1196.28	1235.10	1249.57	0.86416	0.85415	0.62510	0.61786
2007/05/11	UBI	n.d.	277	125	23	310	323	0.9	9900	7200	207	225	27	22	44.59	36.34	1196.28	1267.87	1254.62	0.86765	0.87681	0.62762	0.63425
2007/06/20	UBI	n.d.	91	119	33	312	314	0.9	8999	10800	171	164	18	20	31.20	35.35	1196.28	1245.48	1251.64	0.86559	0.86133	0.62613	0.62305
2007/08/15	UBI	n.d.	74	86	11	317	317	0.5	4499	3600	188	199	10	9.3	17.76	15.36	1196.28	1224.05	1220.95	0.84436	0.84651	0.61078	0.61233
2014/03/11	UBI	n.d.	8.9	56	53	291	302	1.9	1799	21601	265	117	7.8	25	11.34	44.31	1196.28	1215.43	1265.60	0.87524	0.84055	0.63312	0.60802
2015/06/18	UBI	n.d.	59	102	10	305	305	0.2	540	3600	205	210	14	10	0	0	1196.28	1210.28	1206.28	0.00343	0.00344	0.00343	0.00344
2015/07/12	UBI	n.d.	17	76	33	309	314	0.8	8101	10799	158	168	14	21	0	0	1196.28	1210.28	1217.28	0.00346	0.00344	0.00346	0.00344
2015/11/17	UBI	n.d.	21	139	129	311	346	7.4	8999	32399	219	159	27	58	0	0	1196.28	1223.28	1254.28	0.00357	0.00348	0.00356	0.00348
2015/12/03	UBI	n.d.	42	120	44	332	334	1	8100	10799	187	174	18	22	0	0	1196.28	1214.28	1218.28	0.00347	0.00346	0.00346	0.00345
2019/09/01	UBI	n.d.	14	83	84	310	327	3.1	2700	25209	263	122	11	31	0	0	1196.28	1207.28	1227.28	0.00349	0.00344	0.00349	0.00343
2019/09/09	UBI	n.d.	12	64	183	313	334	11	8099	50400	176	113	17	57	0	0	1196.28	1213.28	1253.28	0.00357	0.00345	0.00356	0.00345
2019/09/17	UBI	n.d.	88	96	76	316	332	3.1	6300	21600	181	132	13	30	0	0	1196.28	1209.28	1226.28	0.00349	0.00344	0.00348	0.00344
2019/09/25	UBI	n.d.	8.1	63	122	330	342	4.3	9000	28800	186	139	20	43	0	0	1196.28	1216.28	1239.28	0.00353	0.00346	0.00352	0.00346
2019/11/04	UBI	n.d.	10	44	25	318	326	0.9	2700	7200	209	151	7.6	12	0	0	1196.28	1203.88	1208.28	0.00344	0.00344	0.00343	0.00342
2019/12/06	UBI	n.d.	3.6	23	12	318	318	0.3	1800	3599	215	183	5.3	8	0	0	1196.28	1201.58	1204.28	0.00343	0.00342	0.00342	0.00341

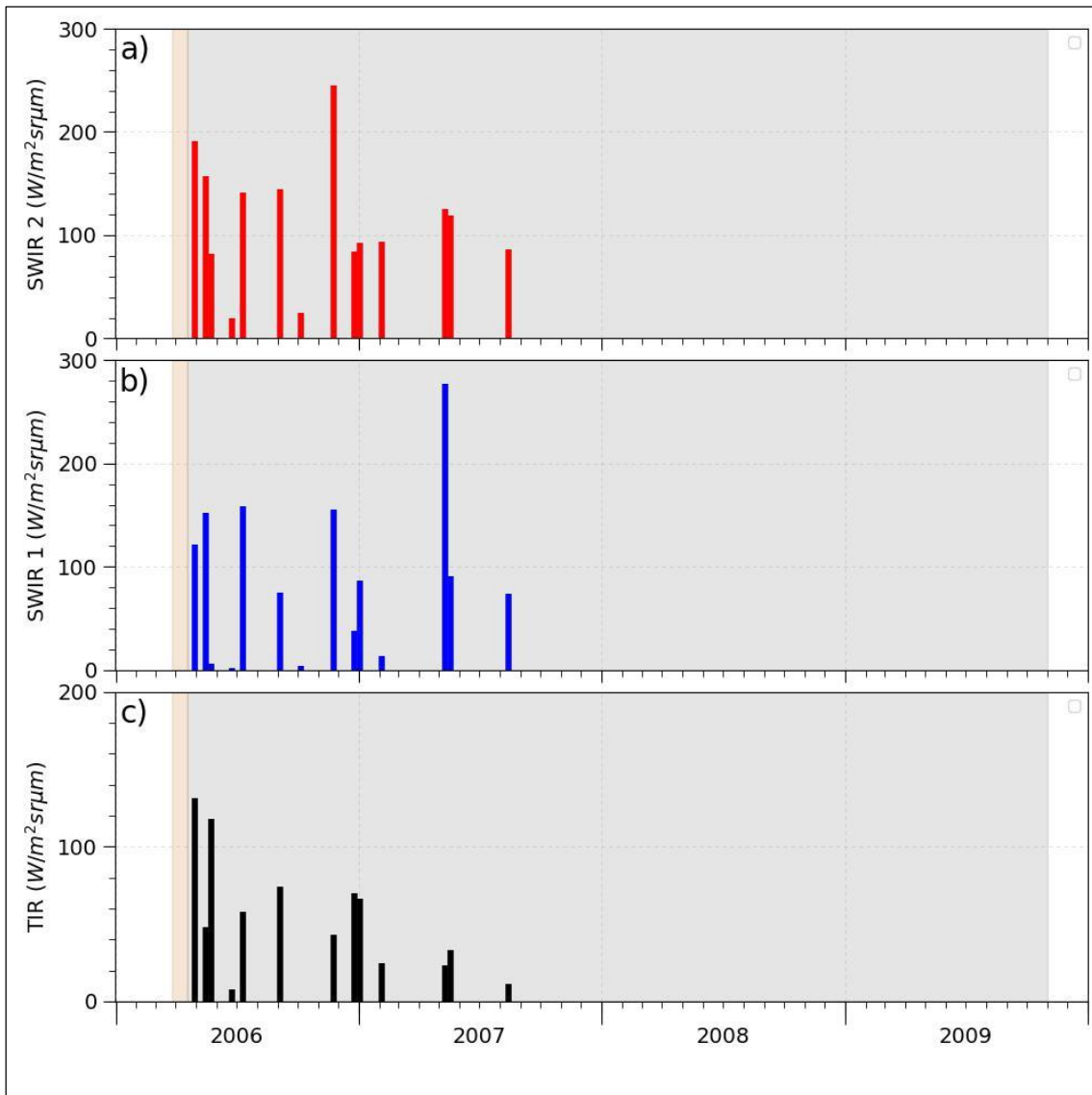


Figura 4. Gráficos de radiancia para las bandas a) SWIR1, b) SWIR2 y c) TIR de las anomalías térmicas detectadas en el periodo eruptivo 2006–2009, mediante el procesamiento del sistema VOLCANONS para el volcán Ubinas.

En la Figura 5, se presenta los valores calculados de temperatura efectiva, estos valores se asemejan las temperaturas que se miden insitu a través de un instrumento como una cámara térmica o infrarroja. Este parámetro permite calcular dos rangos de medida, uno máximo y uno mínimo. Durante el periodo eruptivo 2006 – 2009 sus valores variaron entre 171 °C hasta 242°C para el rango máximo, mientras que para el

rango mínimo los valores alternan entre 113°C hasta 225°C. En el caso del área de la anomalía, se obtuvieron valores muy relativos, sus valores variaron entre 3600 m² hasta 39597 m² para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 2699 m² hasta 9900 m² (Figura 5).

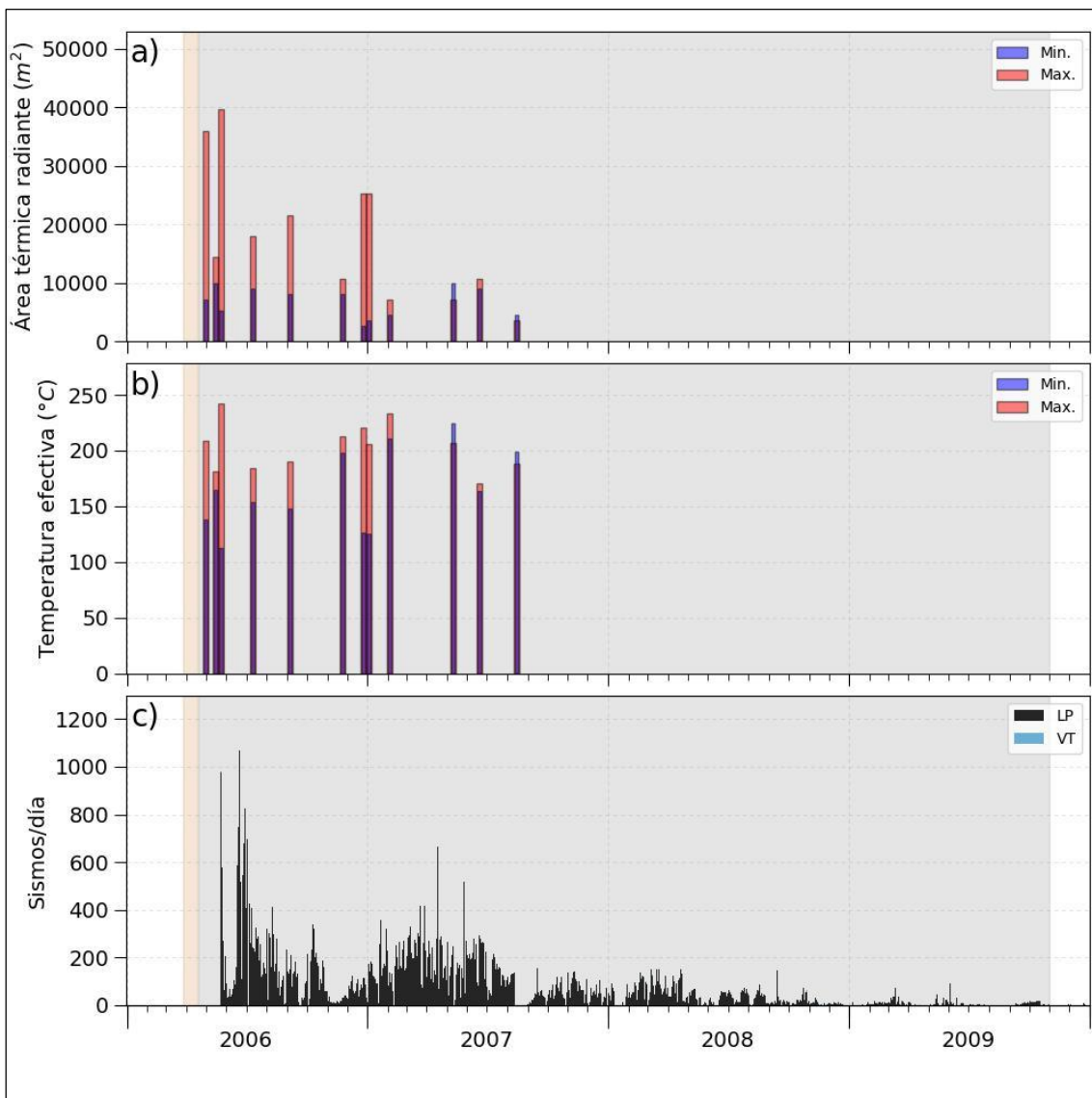


Figura 5. Resultados de los parámetros TBTVCM calculados para el proceso eruptivo 2006– 2009 del volcán Ubinas. (a) Gráfico área de la anomalía, (b) Gráfico de la temperatura efectiva (c) Gráfico de la actividad sísmica.

Cuando el enfriamiento del gas ocurre posterior a la separación del magma (el cual está a nivel de la superficie), siendo la pérdida efectiva del calor del sistema conducida por el flujo radiativo y convectivo (Figura 6). El flujo radiativo también se calcula en dos rangos de medida, uno máximo y uno mínimo. Durante el periodo eruptivo 2006–2009 sus valores de flujo Radiativo variaron entre 9,3 MW hasta 53 MW para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 8.4 MW y 27 MW (Figura 6).

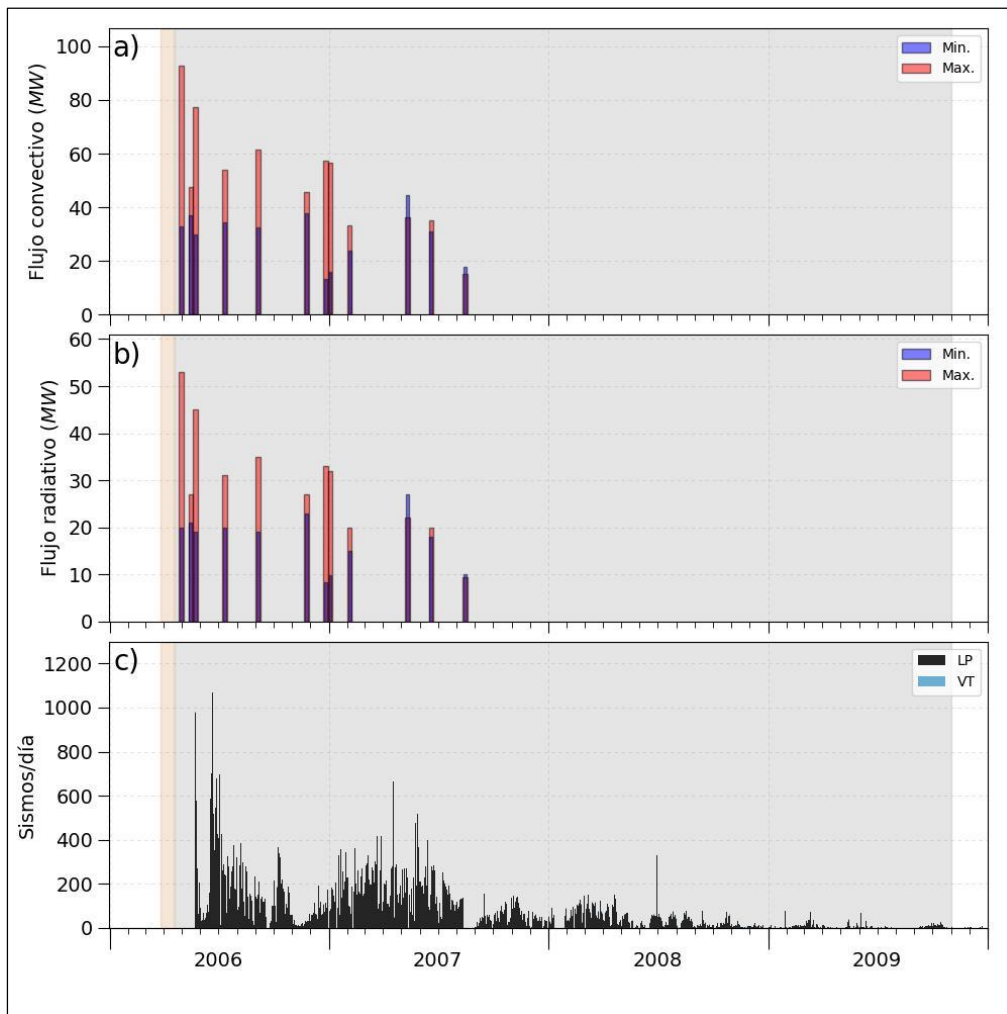


Figura 6. Resultados de los parámetros TBTVCM calculados para el proceso eruptivo 2006–2009 del volcán Ubinas. a) Gráfica del flujo convectivo (b) Gráfico flujo radiativo (c) Gráfico de la actividad sísmica.

Para el caso de flujo convectivo, este parámetro está relacionado directamente a la presencia de flujo de lava, crecimiento de domos y la exposición de material que involucre el movimiento de magma, por tanto, los valores máximos y mínimos para el proceso eruptivo 2006 - 2009 sus valores de flujo Convectivo variaron entre 15.36 MW hasta 92.87 MW (anomalía del 30 de abril de 2006) para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 13.29 MW y 44.59 MW (Figura 7).

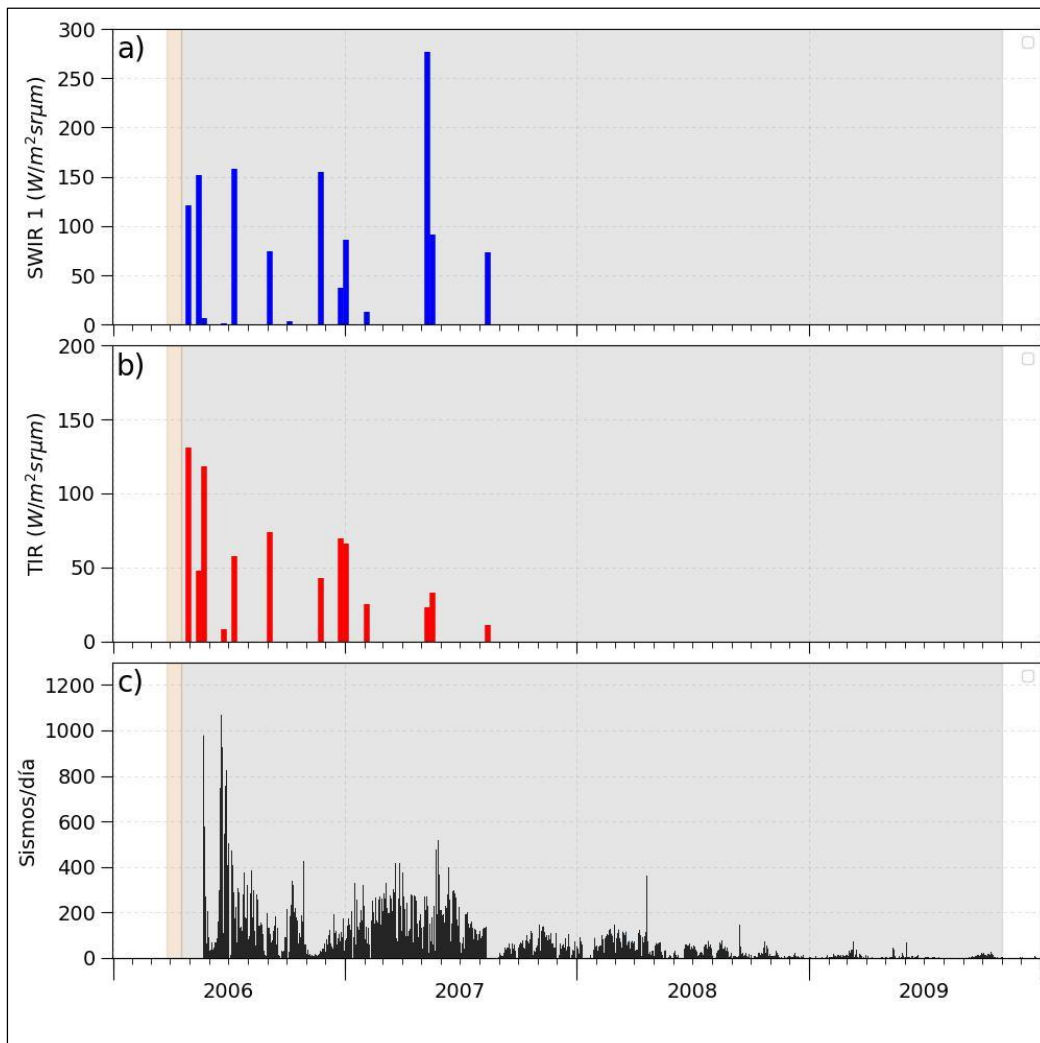


Figura 7. Resultados de la correlación de Radiancia térmica de las bandas a) SWIR 1 y b) TIR 2 frente al número de sismos y la altura de las plumas eruptivas, para el periodo entre 2006-2009, para el volcán Ubinas.

Flujo de gas corresponde a un valor estándar, equivalente a los parámetros estándar que se ocuparon para realizar el cálculo de TBTCM. Por otro lado, desde abril de 2006 se observó un incremento en el valor de radiancia de las anomalías termales para la banda SWIR1 y TIR. (Figura 7).

5.2 Anomalías térmicas del periodo eruptivo 2013 –2017

En la Figura 8, se presentan los valores de radiancia de las bandas SWIR1, SWIR2 y TIR, de las anomalías encontradas en el volcán Ubinas, correspondientes al proceso eruptivo 2013–2017. El valor más alto de radiancia se registró el 03 de diciembre del 2007, con un valor de 42 W/ m²srµm para la banda SWIR1, un valor de 120 W/ m²srµm para la banda SWIR2 y un valor de 44 W/ m²srµm para la banda TIR (Figura 8).

En la Figura 9, se presenta los valores calculados de temperatura efectiva, durante el periodo eruptivo 2013– 2017 sus valores variaron entre 158 °C hasta 265°C para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 117°C hasta 210°C. En el caso del área de la anomalía, se obtuvieron valores muy relativos, sus valores variaron entre 3600 m² hasta 32399 m² para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 540 m² hasta 8999 m² (Figura 9).

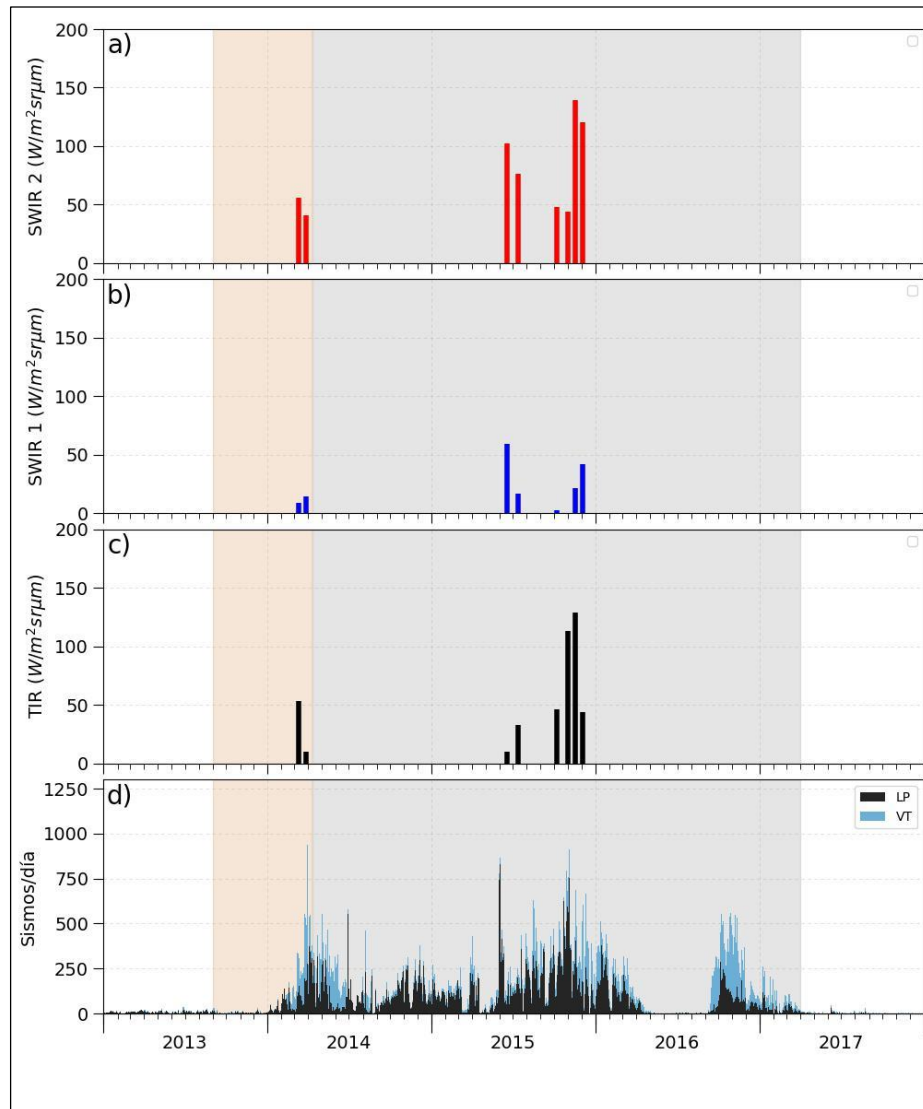


Figura 8. Gráficos de radiancia para las bandas: a)SWIR1, b)SWIR2 y c)TIR de las anomalías térmicas detectadas en el periodo eruptivo 2013–2017, mediante el procesamiento del sistema VOLCANONS para el volcán Ubinas d) Gráfico de la actividad sísmica.

Durante el periodo eruptivo 2013–2027 sus valores de flujo Radiativo variaron entre 8 MW hasta 57 MW para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 10 MW y 58 MW (Figura 10).

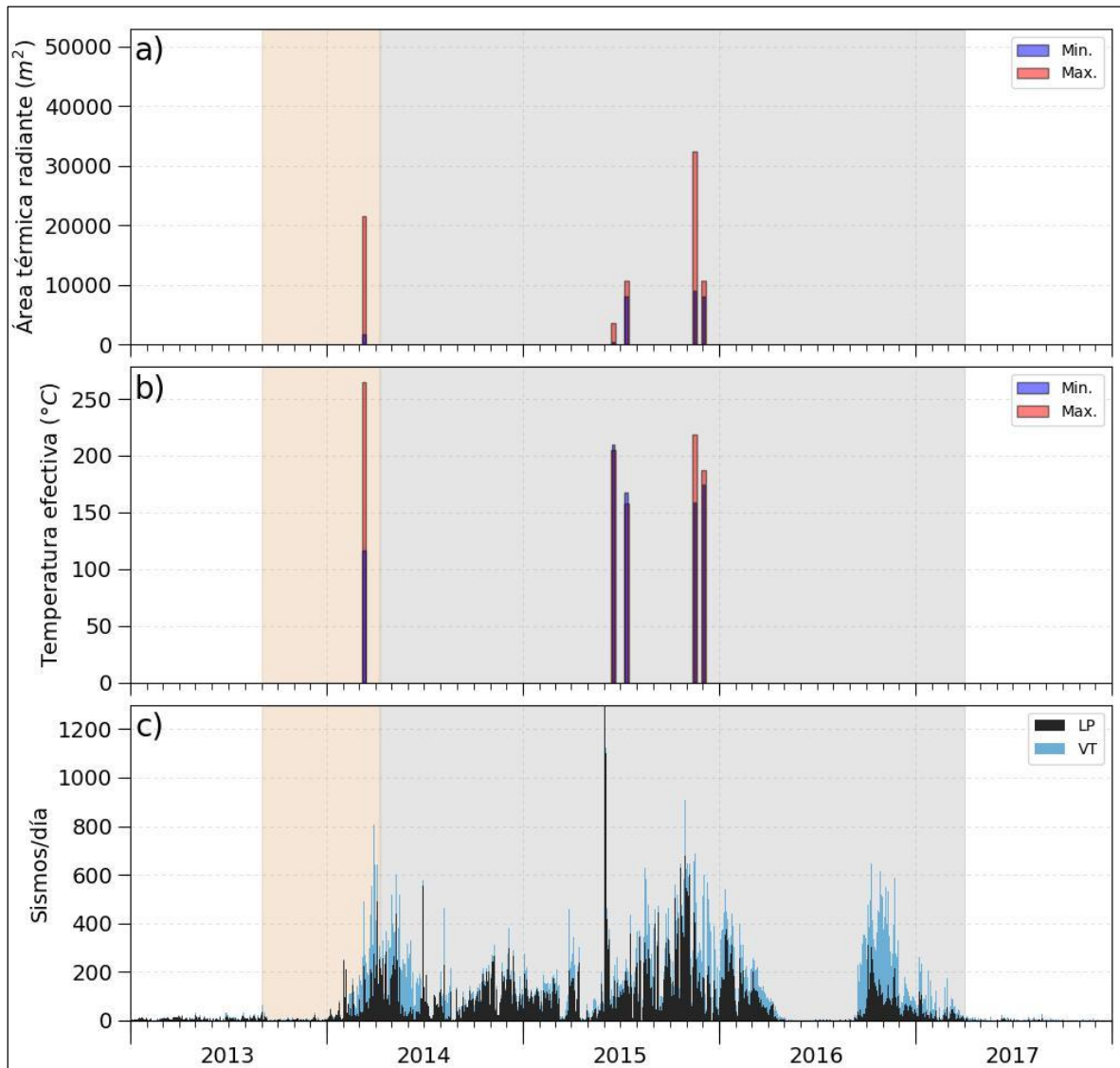


Figura 9. Resultados de los parámetros TBTVCM calculados para el proceso eruptivo 2013–2017 del volcán Ubinas. (a) Gráfico área de la anomalía, (b) Gráfico de la temperatura efectiva (c) Gráfico de la actividad sísmica.

Para el caso de flujo convectivo, los valores máximos y mínimos para el proceso eruptivo 2013– 2017 solo se registró un único valor correspondiente a la anomalía del 11 de marzo de 2014 presentando un valor de 44.31 MW para el valor máximo, mientras que para el valor mínimo se registró el valor de 11.34 MW (Figura 10).

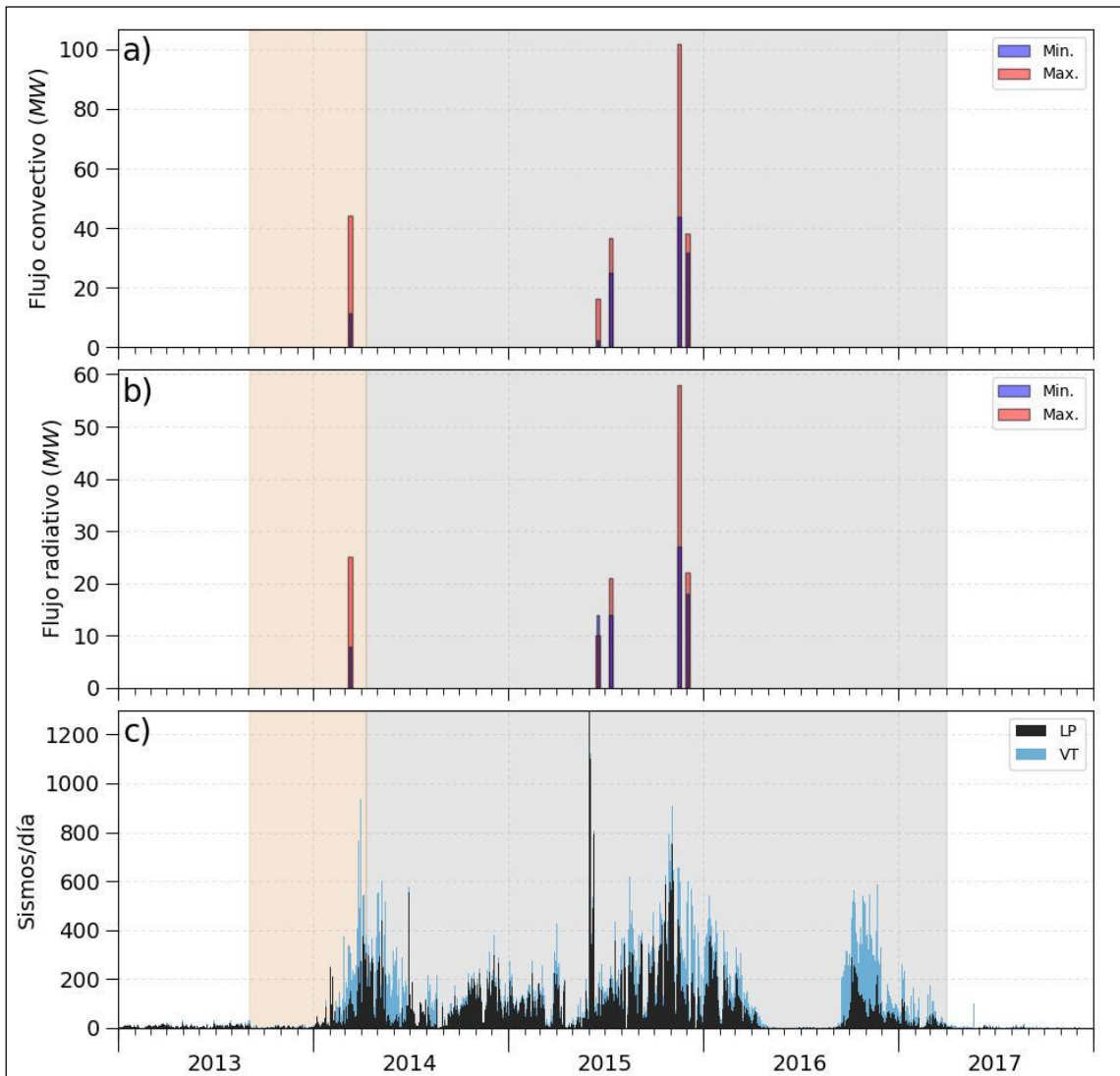


Figura 10. Resultados de los parámetros TBTVM calculados para el proceso eruptivo 2013–2017 del volcán Ubinas. (b)Gráfico flujo radiativo (c)Gráfico de la actividad sísmica.

Flujo de gas corresponde a un valor estándar, equivalente a los parámetros estándar que se ocuparon para realizar el cálculo de TBTVM. Por otro lado, desde setiembre 2013 se observó un incremento en el valor de radiancia de las anomalías termales para la banda SWIR1, SWIR 2 y TIR. Así mismo, se observó el incremento de actividad sísmica relacionada con el número de explosiones por día (Figura 11).

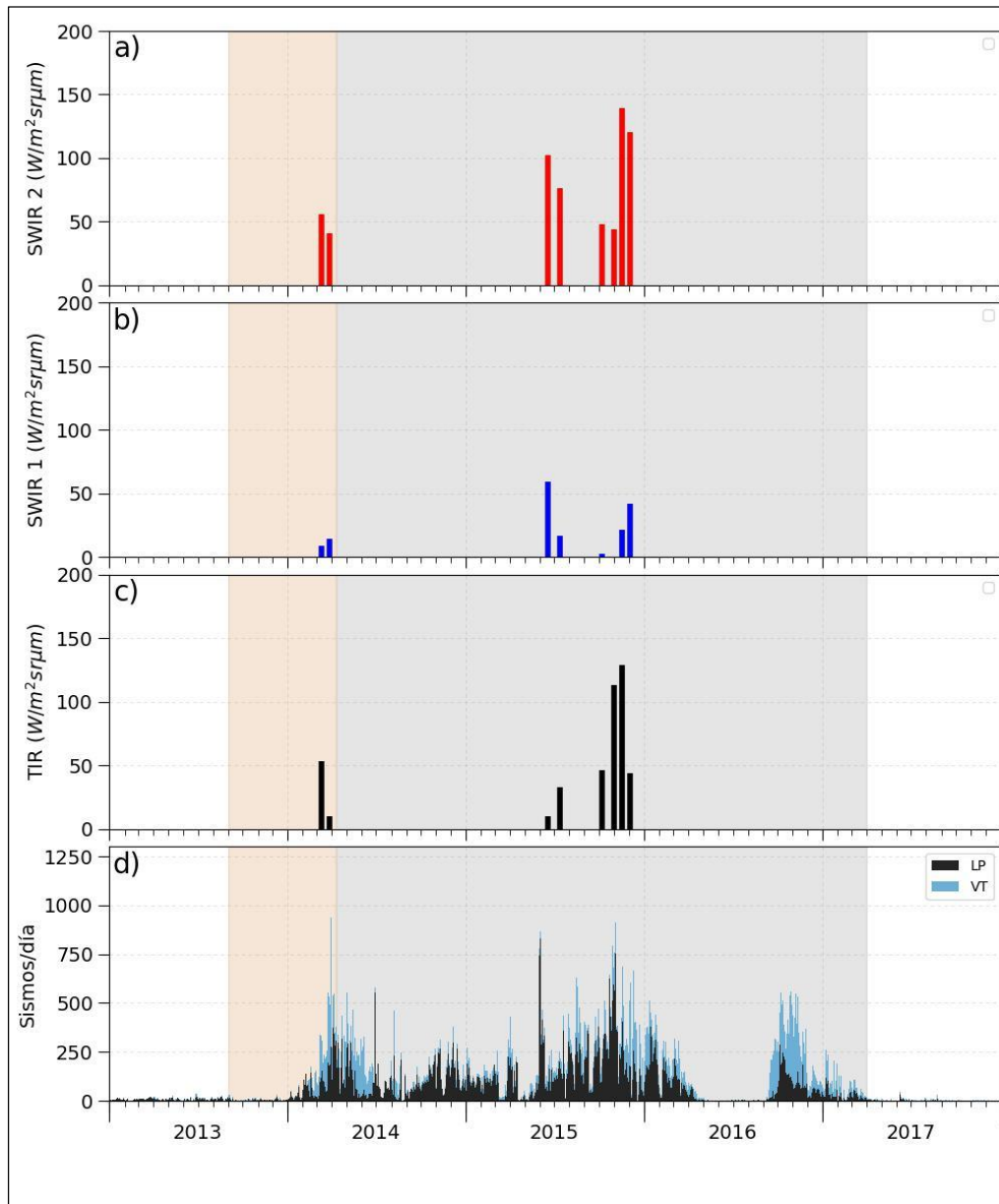


Figura 11. Resultados de la correlación de Radiancia térmica de las bandas SWIR 1 y SWIR 2 frente al número de sismos y la altura de las plumas eruptivas, para el periodo 2013–2017 del volcán Ubinas.

5.3 Anomalías térmicas del periodo eruptivo 2019

En la Figura 12, se presentan los valores de radiancia de las bandas SWIR1, SWIR2 y TIR, de las anomalías encontradas en el volcán Ubinas, correspondientes a la erupción del 2019. El valor más alto de radiancia se

registró el 17 de septiembre del 2019, de $88 \text{ W/ m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda SWIR1, un valor de $96 \text{ W/ m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda SWIR2 y un valor de $76 \text{ W/ m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ para la banda TIR (Figura 12).

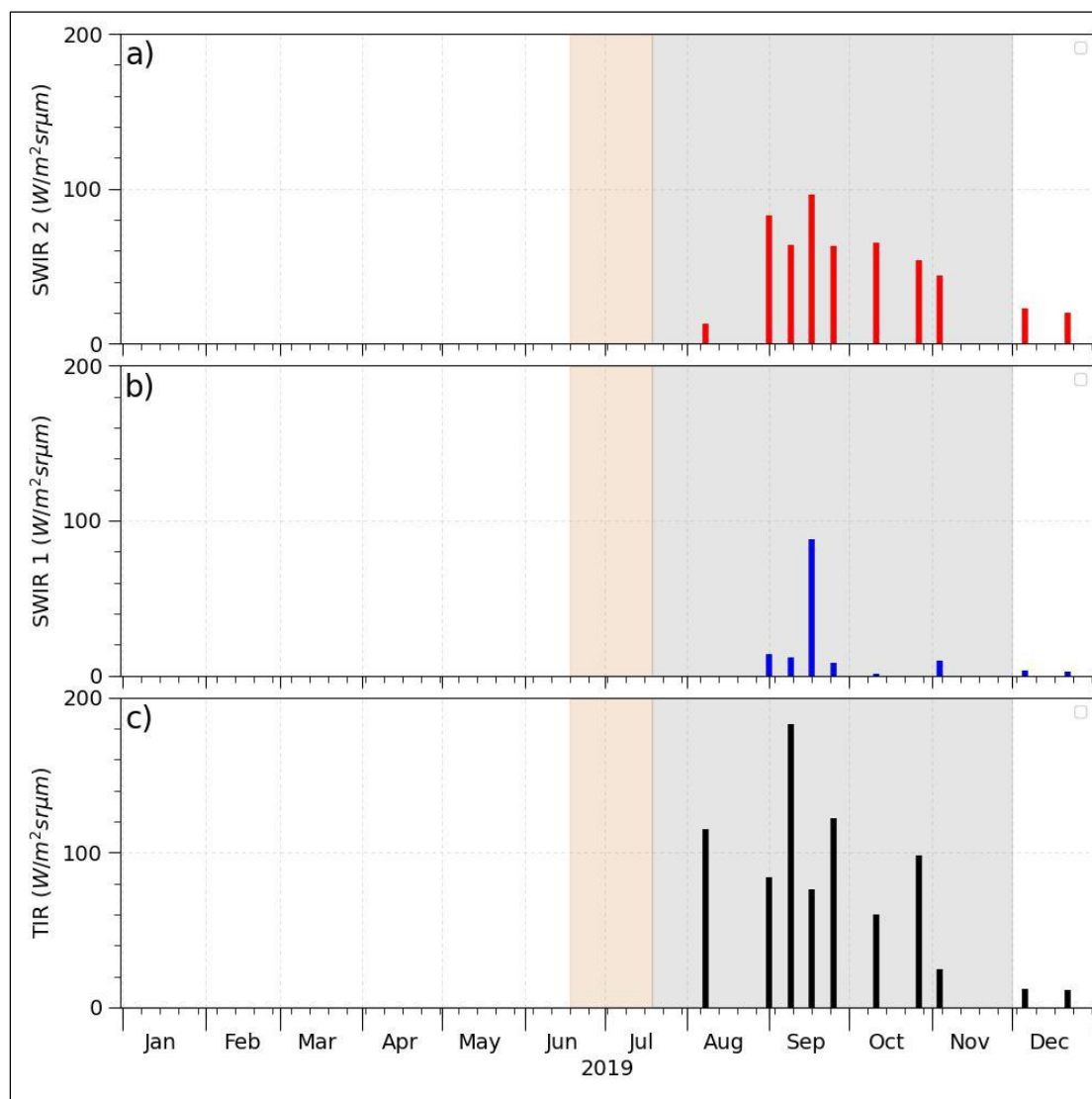


Figura 12. Gráficos de radiancia para las bandas SWIR1, SWIR2 y TIR de las anomalías térmicas detectadas en el año 2019, mediante el procesamiento del sistema VOLCANONS para el volcán Ubinas.

Durante el periodo eruptivo 2019 sus valores de temperatura efectiva variaron entre $215 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta 263°C para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 113°C hasta

183°C. En el caso del área de la anomalía, se obtuvieron valores muy relativos, por lo tanto, no se recomienda hacer conclusiones con estos datos. Sin embargo, estos valores están disponibles en dos rangos de medida, uno máximo y uno mínimo. Durante el periodo eruptivo 2019 sus valores variaron entre 3549 m² hasta 50400 m² para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 1800 m² hasta 9000 m² (Figura 13).

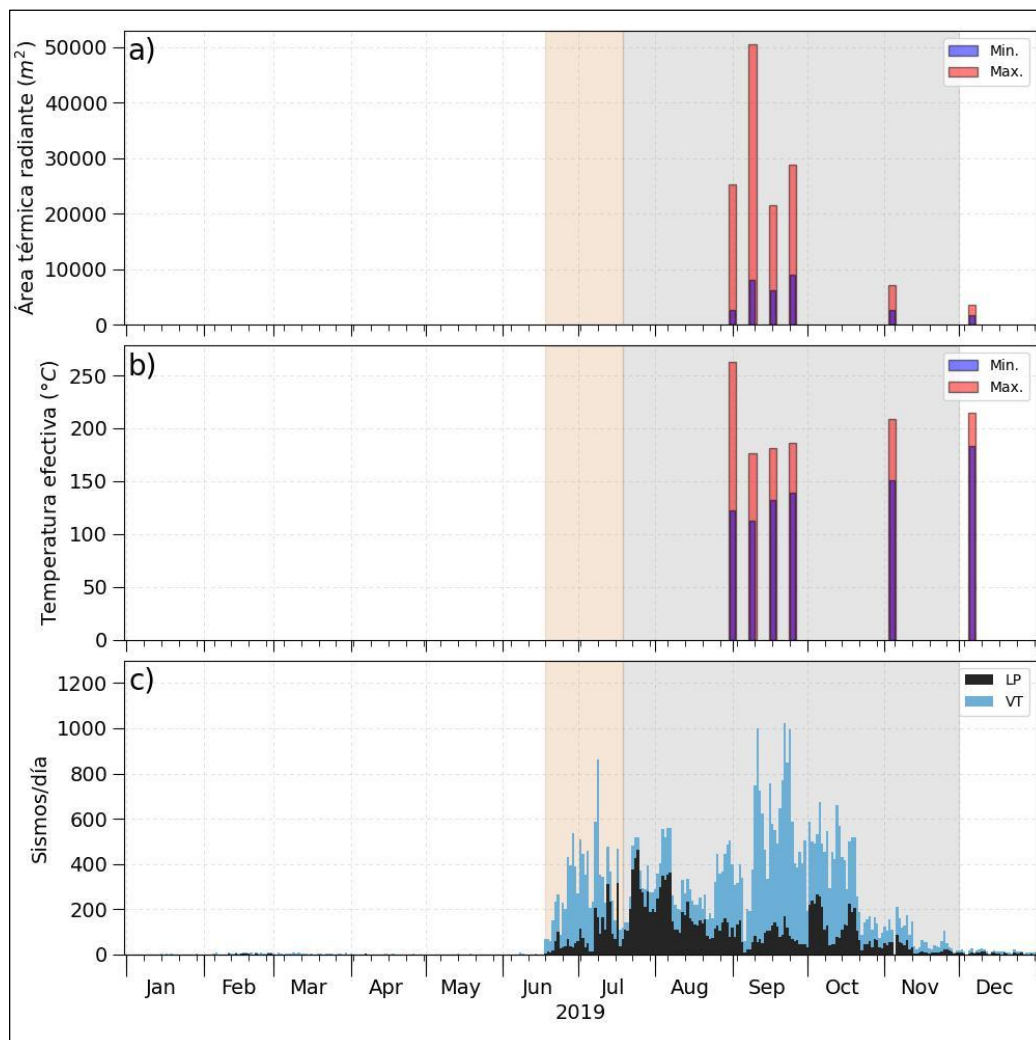


Figura 13. Resultados de los parámetros TBTVCM calculados para el proceso eruptivo 2019 del volcán Ubinas. (a) Gráfico área de la anomalía, (b) Gráfico de la temperatura efectiva (c) Gráfico de la actividad sísmica.

El flujo radiativo también se calcula en dos rangos de medida, uno máximo y uno mínimo. Durante el periodo eruptivo 2019 sus valores de flujo Radiativo variaron entre 8 MW hasta 57 MW para el rango máximo, mientras que para el rango mínimo los valores alternan entre 5.3 MW y 20 MW estos valores corresponden a las anomalías en fechas 06 diciembre y 25 de setiembre de 2019 respectivamente (Figura 14).

Para el caso de flujo convectivo, este parámetro está relacionado directamente a la presencia de flujo de lava, crecimiento de domos y la exposición de material que involucre el movimiento de magma, por tanto, los valores máximos y mínimos para el proceso eruptivo 2019 es de 0 MW.

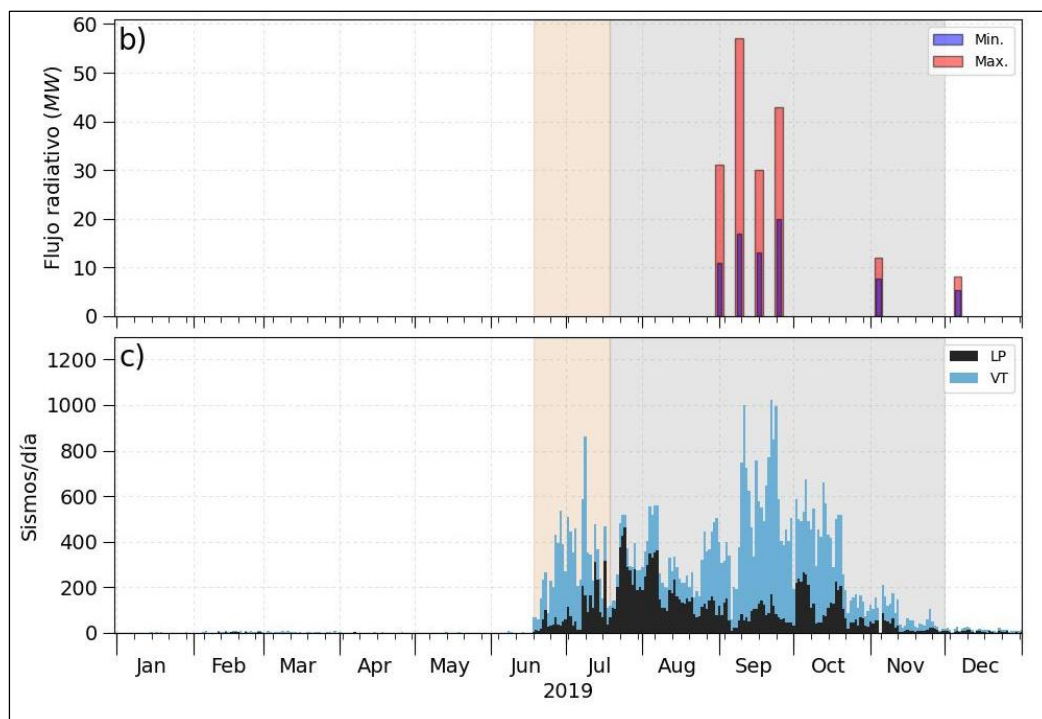


Figura 14. Resultados de los parámetros TBTVM calculados para el proceso eruptivo 2019 del volcán Ubinas. (b)Gráfico flujo radiativo (c)Gráfico de la actividad sísmica.

Flujo de gas corresponde a un valor estándar, equivalente a los parámetros estándar que se ocuparon para realizar el cálculo de TBTCM. Por otro lado, desde julio de 2019 se observó un incremento en el valor de radiancia de las anomalías termales para la banda SWIR1 y SWIR 2. Así mismo, se observó el incremento de actividad sísmica relacionada con el número de explosiones por día y la altura de las plumas eruptivas (Figura 15).

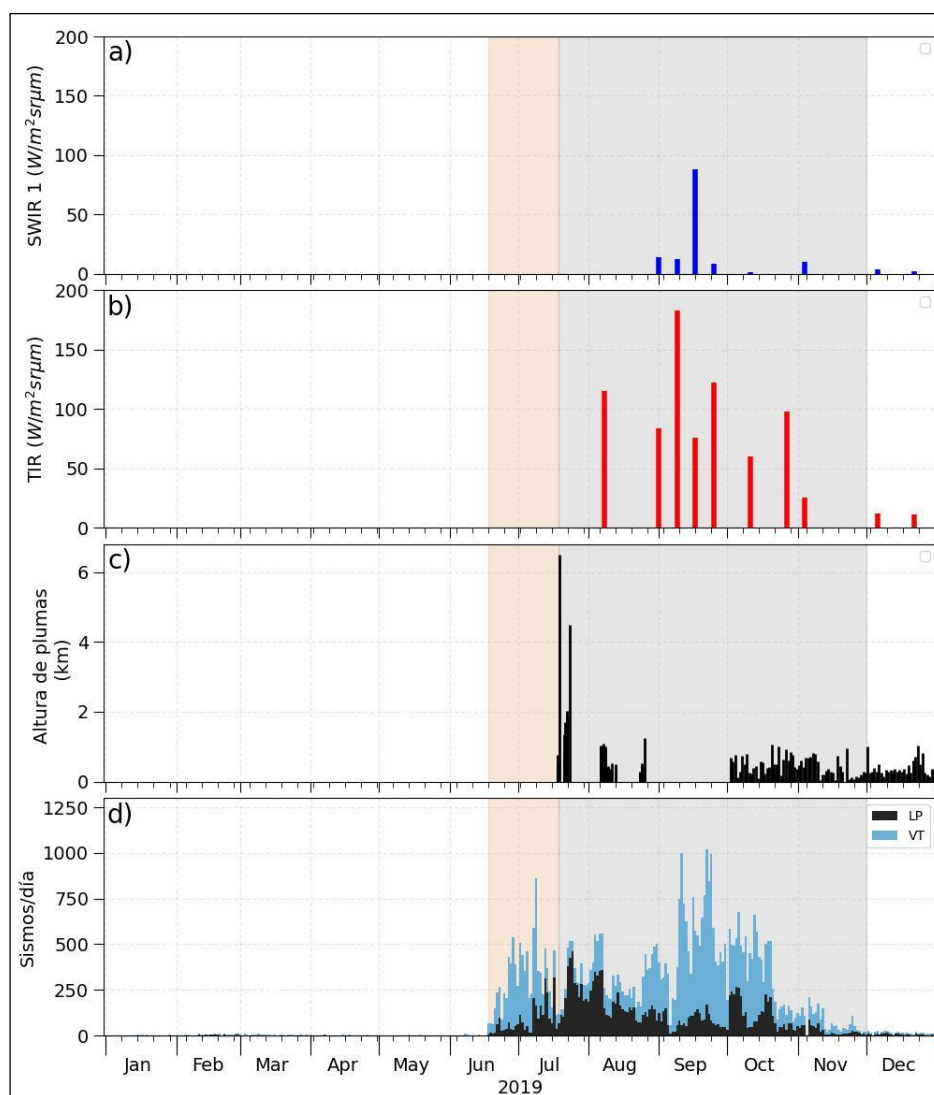


Figura 15. Resultados de la correlación de Radiancia térmica de las bandas SWIR 1 y SWIR 2 frente al número de sismos y la altura de las plumas eruptivas, para el periodo entre 2019, para el volcán Ubinas.

DISCUSIONES

Los resultados presentados en este informe sobre la detección de anomalías térmicas con el sistema VOLCANOMS, permitieron obtener 23 anomalías en el volcán Ubinas registradas en el periodo entre el 2006 y 2019. Estas anomalías se presentan principalmente durante las fases magmáticas explosivas de los periodos: 2006 –2009 que presento un total de 12 anomalías, el periodo 2013–2017presentó 5 anomalías y el periodo 2019 presento 6 anomalía. Estas anomalías probablemente estén asociadas a la presencia de magma en la base del cráter o muy próxima a ella.

Para el proceso eruptivo 2006–2009, las anomalías térmicas aparecen antes de fase eruptiva, la primera anomalía detectada el 30 de abril del 2006, estaría asociada a la presencia de lava en la base del cráter, la cual se caracterizó por poseer uno de los valores de radiancia medida más altos de este periodo eruptivo, con valores de 191 y 131 W/m²srµm para las bandas SWIR2 y TIR. Esta interpretación sobre las fuentes de anomalías térmicas en el volcán Ubinas son coherentes, ya que observaciones in situ efectuados durante esta fase, reportan la presencia de un cuerpo de lava incandescente que poseía 60 metros de diámetro y 4 metros de altura, observado el día 19 de abril de 2006. Este cuerpo de lava probablemente generó la erupción del 21 de abril de 2006,

provocando la evacuación de los poblados más cercanos (Querapi, Ubinas) el día 21 de abril de 2006 (Rivera et al 2014). Además, esto está directamente relacionado al parámetro de flujo convectivo que registro un valor máximo de 92.87 MW correspondiente a la anomalía del 30 de abril de 2006, ya que este parámetro está relacionado directamente a la presencia de cuerpos de lava en cráter.

Posteriormente se detectaron dos anomalías importantes los días 16 y 24 de mayo del 2006, con valores de 157 y 82 $W/m^2sr\mu m$ respectivamente, días antes a las explosiones del 29 de mayo y 2 de junio de 2006. En los meses posteriores se identificaron más anomalías, como los ocurridos los días 05 de setiembre, 07 de octubre y 24 de noviembre de 2006. Estas anomalías registraron valores de alta radiancia en la banda SWIR2, con un valor de 245 $W/m^2sr\mu m$.

En el año 2007 se registraron dos anomalías térmicas, los días 03 de enero y 04 de febrero, asociados a la explosión del 30 de marzo de 2007, la que generó una enorme columna de ceniza, cubriendo con nubes de ceniza varios poblados ubicados a una distancia de 6 km del volcán. El día 11 de abril del 2007 se detectó otra anomalía térmica, la cual registró el mayor valor de radiancia en la banda SWIR1 con un valor de 277 $W/m^2sr\mu m$. Las dos últimas anomalías detectadas para este periodo ocurrieron los días 20 de junio de 2007 y el 18 de agosto de 2007.

Para el proceso eruptivo 2013–2017, las anomalías térmicas aparecen vinculados a la fase explosiva, algunos días después de los primeros signos de reactivación observados en datos sísmicos y de la fenomenología. se detectaron 8 anomalías térmicas entre el 2014 y 2015. Las primeras anomalías se presentaron el 11 y 27 de marzo del 2014, con valores de radiancia de 56 y 41 $W/m^2sr\mu m$ en la banda SWIR2, las cuales estarían relacionadas directamente a la presencia de un cuerpo de lava incandescente en el fondo del cráter del volcán Ubinas, confirmado durante un estudio de campo efectuado el 1 de marzo del 2014 por el Instituto Geofísico del Perú (Machacca et al., 2019). En noviembre del 2015 fue posible detectar otras dos anomalías, los días 11 y 17, que corresponden a los valores más elevados de radiancia para la banda SWIR2 y TIR del periodo eruptivo 2013– 2017, con valores de 139 y 126 $W/m^2sr\mu m$ respectivamente. En relación al parámetro de flujo convectivo, el análisis de TBTCM dan un único valor correspondiente a la anomalía del 11 de marzo de 2014 con un valor de 44.31 MW para el valor máximo, esto estaría relacionado a la presencia de lava en el cráter, tal como se reportó el 20 de febrero de 2014, con la ocurrencia tremor armónico (Machacca et al., 2014)

Para el proceso eruptivo 2019 las anomalías térmicas aparecen vinculados a la fase explosiva, algunas semanas después de la primera explosión magmática del 19 de julio de 2019 (Figura 7). Esto puede deberse a que estas anomalías, detectadas por el sistema VOLCANOMS,

estos asociados a la presencia de cuerpos de lava próximos a la superficie que generan alta temperatura, ya sea por desgasificación o flujo radiactivo. La primera anomalía detectada durante el periodo eruptivo 2019 fue el 08 de agosto, con valores de 13 y 115 W/m²srμm, en las bandas SWIR2 y TIR, respectivamente. En el mes de setiembre del 2019 se detectaron 4 anomalías, los días 01, 09, 17 y 25, siendo la anomalía del día 09 de setiembre el valor más alto de radiancia registrada durante este periodo eruptivo, con un valor de 183 W/ m²srμm en la banda TIR. Mientras que para las bandas SWIR1 y SWIR2, las anomalías más altas se registran el día 17 de setiembre, con valores de 88 y 96 W/m²srμm, respectivamente (Figura 4). En resumen, durante el mes de setiembre de 2019 se registran valores altos de radiancia. En relación al parámetro de flujo convectivo, el análisis de TBTCM dan valores de 0 MW para las 10 anomalías procesadas durante el periodo eruptivo 2019, lo cual es coherente, ya que no sean reportado episodios de crecimiento de domo en este periodo. Por otro lado, el cálculo de la temperatura efectiva dio valores máximos de 263 °C, el cual es un valor bajo, que posiblemente este asociado a procesos de desgasificación.

La frecuencia de adquisición de datos, una toma cada 16 días por el satélite Landsat, limita la resolución con la que estas anomalías son detectadas. No obstante, la información obtenida con estas imágenes, no pueden ser obtenidas con otras imágenes de mayor frecuencia de muestreo como el Sentinel-2. Por tanto, las anomalías presentadas en

este estudio representan una valiosa información para comprender la dinámica de ascenso de magma involucrados en el volcán Ubinas, durante los procesos eruptivos 2006–2009, 2013–2017 y 2019.

Por otro lado, la alta tasa de muestreo de la información sísmica y la bajas frecuencia de información de anomalías térmicas, limitan la correlación de estas dos variables, aunque se pudo inferir que las anomalías térmicas se presentaron durante episodios de alta actividad sísmica, con tasas mayores a 500 sismos por día.

CONCLUSIONES

- Se detectaron 23 anomalías térmicas durante los periodos eruptivos 2006–2009, 2013–2017 y 2019 del volcán Ubinas, mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat a través de la plataforma VOLCANOMS.
- El valor más alto de radiancia durante todo el periodo de estudio que incluye los tres periodos eruptivos se registró el 11 de mayo del 2007, de 277 W/m²srµm para la banda SWIR1; un valor de 125 W/m²srµm para la banda SWIR2 y un valor de 23 W/m²srµm para la banda TIR, siendo este el registro más importante durante los tres periodos analizados.
- Se ha presentado la correlación de los valores de radiancia térmica con los datos de sismicidad y actividad superficial del volcán. Sin embargo, debido a las diferencias en la frecuencia de toma de datos de estas observables y número limitado de anomalías detectadas, no se han establecido una relación clara entre ambas variables.
- De acuerdo con los parámetros estimados de las anomalías detectadas, se establece que dichas anomalías estarían

relacionadas a presencia de cuerpo de lava en la superficie del cráter para los periodos eruptivos 2006– 2009 y 2013–2017 en algunos registros; sin embargo, para el proceso eruptivo 20019 estaría relacionado a procesos de desgasificación principalmente.

BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, R., Ortega, M., Manrique, N., Apaza, F., Rivera, M., Harpel, C., 2019. Characteristics of the beginning of the 2019 eruptive crisis at Ubinas volcano (Peru) [póster]. AGU 2019 Fall Meeting, 09–13 December 2019, San Francisco, CA, USA.
- Coppola, D., Macedo, O., Ramos, D., Finizola, A., Delle Donne, D., Del Carpio, J., White, R.A., McCausland, W., Centeno, R., Rivera, M., Apaza, F., Ccallata, B., Chilo, W., Cigolini, C., Laiolo, M., Lazarte, I., Machacca, R., Masias, P., Ortega, M., Puma, N., Taipe, E., 2015. Magma extrusion during the Ubinas 2013–2014 eruptive crisis based on satellite thermal imaging (MIROVA) and ground-based monitoring. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 302, 199–210.
- Del Carpio, J.A., Rivera, M., Torres, J., Tavera, H., Puma, N., 2022. Evaluación del peligro volcánico en Perú: una herramienta para la gestión del riesgo de desastres.
- Del Carpio, J.A., Tavera, H., 2019. Evaluación del proceso eruptivo del volcán Ubinas de julio de 2019. Informe técnico (228). Informes Técnicos Instituto Geofísico del Perú.
- De Silva, S. L., Francis, P., 1991. *Volcanoes of the central Andes*. Vol. 219. Springer-Verlag Berlin.
- De Silva, SL, Francis, P.W. (1990). Potentially active volcanoes of Peru: observations using Landsat Thematic Mapper and Space Shuttle imagery. *Bull. Volcanol.* 52, 4, 286–301.
- González, C., Inostroza, M., Aguilera, F., González, R., Viramonte, J., Menzies, A., 2015. Heat and mass flux measurements using Landsat images from the 2000–2004 period, Lascar volcano, northern Chile. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 301, 277–292.

- Harris, A., Flynn, L., Keszthelyi, L., Mouginis–Mark, P., Rowland, S., Resing, J., 1998. Calculation of lava effusion rates from Landsat TM data. *Bull. Volcanol.*, 60, 52–71.
- Harris, A., Bailey, J., Calvari, S., Dehn, J., 2005. Heat loss measured at a lava channel and its implications for down–channel cooling and rheology. *Special Paper 396: Kinematics and Dynamics of Lava Flows*, 125–146. doi:10.1130/0–8137–2396–5.125.
- Harris, A., Rose, W., Flynn, L., 2003. Temporal trends in lava dome extrusion at Santiaguito 1922–2000. *Bull. Volcanol.*, 65, 77–89.
- Harris, A., Stevenson, D., 1997. Magma budgets and steady–state activity of Vulcano and Stromboli. *Geophysical Research Letters*, 24: 1043–1046
- Harris, A., Flynn, L., Rothery, D., Oppenheimer, C., Sherman, S., 1999a. Mass flux measurements at active lava lakes: Implications for magma recycling. *J. Geophys. Res.* 104, 7117–7136. 39.
- INEI. Censos Nacionales XII de Población y VII de Vivienda, 22 de octubre del 2017, Perú: Resultados Definitivos. Lima, October de 2018.
- Layana, S., Aguilera, F., Rojo, G., Vergara, Á., Salazar, P., Quispe, J., Urra, P., Urrutia, D., 2020. Volcanic Anomalies Monitoring System (VOLCANOMS), a Low–Cost Volcanic Monitoring System Based on Landsat Images. *Remote Sens.*, 12, 1589.
- Layana S., 2022. Procesos que controlan el balance térmico– magmatco en sistemas volcánicos activos de la zona volcánica central (ZVC). Tesis de doctorado. Univeridad Católica del Norte.
- Lavallée, Y., Silva, S. L., Salas, G., & Byrnes, J. M. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), Southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186(3–4), 253–264.

Machacca, R., 2012. Evaluación de eventos sísmicos de largo periodo (LP) como precursores en las explosiones del volcán Ubinas, 2006–2009. Bach. Tesis. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

Machacca, R., Lesage, P., Paxi, R., Ortega, M., Rivera, M., Ccallata, B., Taípe, E., Ramos, D., 2014. Detección de ascenso de magma y evolución del proceso eruptivo del volcán Ubinas de 2014, observadas con datos sísmicos. vol. 109. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, pp. 29–33.

Machacca–Puma, R., Lesage, P., Larose, E., Lacroix, P., Ancasi–Figuerola, R. M., 2019. Detection of pre–eruptive seismic velocity variations at an andesitic volcano using ambient noise correlation on 3–component stations: Ubinas volcano, Peru, 2014. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 381, 83–100.

Macedo, O., Taípe, E., Del Carpio, J., Ticona, J., Ramos, D., Puma, N., Aguilar, V., Machacca, R., Torres, J., Cueva, K., Cruz, J., Lazarte, I., Centeno, R., Miranda, R., Álvarez, Y., Masías, P., Vilca, J., Apaza, F., Chijcheapaza, R., Calderón, J., Cáceres, J., Vela, J., 2016. Evaluación del riesgo volcánico en el sur del Perú, situación de la vigilancia actual y requerimientos de monitoreo en el futuro. Informe técnico. Informes Técnicos Instituto Geofísico del Perú (IGP), 105, pp.

Mariño, J., Rivera, M., Nuñez, S., Luque, G., 2014. Evaluación de Peligros en el Valle de Ubinas – Moquegua. Informe Técnico N^oA6641, INGEMMET.

Mering, C., Huaman, D., Chorowicz., J., Deffontaines, B., Guillande, R., 1996. New data on the geodynamics of Southern Peru from computerized analysis of SPOT and SAR ERS–1 images. Tectonophysics 259, 153–169.

Oppenheimer, C. 1993. Infrared surveillance of crater lakes using satellite

- data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 55: 117–128.
- Ramos, D. A., Ortega, M.A., Antayhua, Y., Anccasi, R.M., Ccallata, B., Miranda, R., Taipe, E.L., Cruz, L. F., Apaza, F. E., Masías, P. J., Valdivia, D., & Luza, C. A., 2019. Informe técnico anual: vigilancia del volcán Ubinas, periodo 2019.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Mariño, J., Berolatti, R., Fuentes, J., 2010. Characteristics and management of the 2006–2008 volcanic crisis at the Ubinas volcano (Peru). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 198, 19–34.
- Rivera, M., Mariño, J., Thouret, J.-C., 2011. Geología y evaluación de peligros del volcán Ubinas. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 46, 88 p.
- Rivera, M., Mariño, J., Cacya, L., Cruz, V., 2008. Erupción del volcán Ubinas en el año 2006 y gestión de la crisis volcánica, Perú. En: *Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Experiencias andinas en mitigación de riesgos geológicos. Publicación Geológica Multinacional, n.6. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería*, pp. 77–81.
- Rivera, M., 1998. El volcán Ubinas (sur del Perú): geología, historia eruptiva y evaluación de las amenazas volcánicas actuales. Tesis Geólogo, UNMSM. 132 p.
- Rivera, M., Thouret, J.C., Gourgaud, A., 1998. Ubinas, el volcán más activo del sur del Perú desde 1550: Geología y evaluación de las amenazas volcánicas. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v.88, 53–71.
- Rivera, M.; Thouret, J. C.; Samaniego, P.; & Le Pennec, J. L. (2014) – The 2006 – 2009 activity of the Ubinas volcano (Peru): Petrology of the 2006 eruptive products and insights into genesis of andesite magmas, magma recharge and plumbing system. *Journal of*

Volcanology and Geothermal Research, 270, 122–141.

Thouret, J., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M., Finizola, A., Fornari, M., Gonzales, K., 2005. Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Perú. *Bulletin of Volcanology*, 67, 557–589.

Urai, M., 2010. Volcano monitoring with Landsat TM short-wave infrared bands: The 1990–1994 eruption of Unzen Volcano, Japan. *Int. J. Remote Sens.*, 21, 861–872.

Wright, R., Flynn, L., Harris, A., 2001. Evolution of lava flow-fields at Mount Etna, 27–28 October 1999, observed by Landsat 7 ETM+. *Bull. Volcanol.*, 63, 1–7.

