Escuela Politécnica Superior de Jaén

Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica

UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS SUPERFICIALES Y LAS DEFORMACIONES DEL TERRENO EN LA ISLA DE LA PALMA MEDIANTE TELEDETECCIÓN ÓPTICA Y RADAR TRAS LA ERUPCIÓN VOLCÁNICA DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2021

Alumno: Ruth Córdoba Ortega

Tutor: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros
Prof. D. Juan Manuel Jurado Rodríguez

Dpto: Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Mayo, 2023

Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Don Antonio Miguel Ruiz Armenteros y Don Juan Manuel Jurado Rodríguez, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: “Análisis de los cambios superficiales y las deformaciones del terreno en la isla de La Palma mediante teledetección óptica y radar tras la erupción volcánica del 19 de septiembre de 2021”, que presenta Ruth Córdoba Ortega, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, mayo de 2023

La alumna:

Ruth Córdoba Ortega

Los tutores:

Firmado digitalmente por RUIZ ARMENTEROS ANTONIO MIGUEL - 26016256J
Fecha: 2023.05.16 11:52:17 +02'00'

Antonio Miguel Ruiz Armenteros

JURADO RODRIGUEZ JUAN MANUEL - 53598045H

Firmado digitalmente por JURADO RODRIGUEZ JUAN MANUEL - 53598045H
Fecha: 2023.05.11 21:34:26 +02'00'

Juan Manuel Jurado Rodríguez

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Descripción general del entorno geológico 14

Figura 2: Localización de la erupción de La Palma 15

Figura 3: Espectro electromagnético 18

Figura 4: Longitud de onda y frecuencia 18

Figura 5: Ángulo de incidencia (θ) entre señal radar y la vertical de la superficie terreno. 20

Figura 6: Mecanismo de dispersión 22

Figura 7: Operaciones del sistema radar aerotransportado (Paula Messina) 23

Figura 8: Sistema de captura radar 25

Figura 9: Geometría de un radar de apertura lateral 26

Figura 10: Efectos geométricos en una imagen SAR [17] 28

Figura 11: Huella (footprint) ascendente y descendente del satélite Sentinel-1A. 30

Figura 12: Polarización de las microondas [20] 32

Figura 13: Geometría InSAR 35

Figura 14: Parámetros de geometría de un sistema interferométrico satelital [24] 36

Figura 15: Diferencia entre la fase sin desarrollar y desarrollada 38

Figura 16: imagen de coherencia en la isla de la Palma 40

Figura 17: Representación del desenrollado de fase [31] 44

Figura 18: Antes y después de desenrollar la fase en la zona de estudio 45

Figura 19: Concepto básico de la técnica DInSAR [35] 48

Figura 20: Representación cobertura imágenes radar ascendente y descendente 62

Figura 21: Flujo de trabajo completo InSAR 64

Figura 22: Primer flujo trabajo SLC 65

Figura 23: Segundo flujo de trabajo 65

Figura 24: Tercer flujo de trabajo 66

Figura 25: Cuarto flujo de trabajo 66

Figura 26: Visualización de las franjas IW1, IW2, IW3 67

Figura 27: Imagen ascendente de intensidad IW2_VH (07-04-2021). 68

Figura 28: Selección de la franja IW y ráfagas correspondientes al área de trabajo 68

Figura 29: Banda coherencia tras el primer flujo de trabajo (04-07-2021) 70

Figura 30: Producto tras el segundo flujo de trabajo. Banda de fase (04-07-2021) 74

Figura 31: Banda fase tras aplicar el tercer flujo de trabajo (04-07-2021) 76

Figura 32: Exportación de datos a SNAPHU 77

Figura 33: Producto final tras aplicar todos los flujos de trabajo 80

Figura 34: Flujo de trabajo completo para imágenes GRD 84

Figura 35: Primer flujo de trabajo GRD 85

Figura 36: Segundo flujo de trabajo GRD. 85

Figura 37: Imagen tras el primer flujo de trabajo del 10-10-2021(descendente) 87

Figura 38: Imagen de la banda Sigma0_VV del 10-10-2021 88

Figura 39: Mapa de velocidad del 10-10-2021 89

Figura 40: Flujo de trabajo de las imágenes Sentinel-2 91

Figura 41: Cobertura imágenes Sentinel-2 92

Figura 42: Imagen RGB de la fecha 10-10-2021 93

Figura 43: Flujo de trabajo 93

Figura 44: Resultado tras el procesado en RGB 94

Figura 45: Resolución espacial MSI con longitudes de onda 94

Figura 46: Resultado tras el proceso en RGB-False Color 95

Figura 47: Imagen RGB del 03-01-2021 96

Figura 48: Flujo de trabajo para calcular el parámetro NBR 97

Figura 49: Disposición espacial de los rangos espectrales electromagnéticos 97

Figura 50: Curvas de respuesta espectral según su reflectancia 98

Figura 51: Cálculo de NBR 99

Figura 52: Banda 3 100

Figura 53: Banda 12 100

Figura 54: Banda 8 100

Figura 55: Propiedades de la banda 8 101

Figura 56: Selección según banda 8 102

Figura 57: Visualización de la calcificación sobre la zona de interés 103

Figura 58: Disposición de los perfiles en el área de estudio 105

Figura 59: Paleta colores SNAP 106

Figura 60: Gráfico evolución en la deformación del terreno con imágenes ascendentes 115

Figura 61: Observación ascendente y descendente LOS 127

Figura 62: Gráfico de evolución en deformaciones del terreno con imágenes descendentes 128

Figura 63: Paleta de colores de la velocidad de la lava 136

Figura 64: imagen banda 8 RGB 152

Figura 65: Selección zona de interés por SNAP 153

Figura 66: Vectorización y simplificación de la zona seleccionada 154

Figura 67: Unificación de la capa vectorial y posición sobre la zona de interés 154

Figura 68: Visualización de las coladas de lava del IGN y la calculada 155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Imágenes radar SLC ascendentes, Track 60, modo IW y polarización VV VH 55

Tabla 2: Imágenes radar SLC descendentes, Track 169, modo IW y polarización VV VH. 56

Tabla 3: Imágenes radar GRD ascendentes, Track 60, modo IW y polarización VV VH. 57

Tabla 4: Imágenes radar GRD descendentes, Track 169, modo IW y polarización VV VH. 57

Tabla 5: Imágenes multiespectrales tipo S2MSI2A. 58

Tabla 6: Selección imágenes ascendentes. 81

Tabla 7: Selección imágenes descendentes. 81

Tabla 8: Selección de fechas de productos GRD 83

Tabla 9: Disposición de las bandas multiespectrales 95

Tabla 10: Características de longitud de onda y resolución de las bandas 101

Tabla 11: Imágenes ascendentes representativas 107

Tabla 12: Variación en metros en la deformación de la isla dependiendo de la fecha 114

Tabla 13: Imágenes ascendentes procesadas con diferentes imágenes master 116

Tabla 14: Cuantificación de la progresión en la deformación 1 120

Tabla 15: Cuantificación de la progresión en la deformación 2 120

Tabla 16: Disposición de imágenes ascendentes previas a la erupción procesadas 121

Tabla 17: Variación en metros de la deformación del terreno 128

Tabla 18: Imágenes descendentes procesadas con diferentes imágenes master 129

Tabla 19: Cuantificación de la progresión en la deformación de la isla 134

Tabla 20: Selección de fechas de productos GRD 136

Tabla 21: Imágenes Sentinel-2 146

Tabla 22: Área en hectáreas arrasada por las coladas de lava 156

RESUMEN

Las Islas Canarias, situadas al noreste de la costa africana, están constituidas por siete islas de origen volcánico: El Hierro, La Palma, La Gomera, Tenerife, Gran Canaria, Lanzarote y Fuerteventura, algunas de las cuales se siguen volcánicamente activas[1]. Este trabajo se centra en el análisis de la isla de La Palma, una de las más jóvenes del archipiélago canario, por lo que sigue en fase de desarrollo y por ende volcánicamente activa. En concreto, se estudia la evolución en la deformación del terreno tras la reciente erupción ocurrida el 19 de septiembre de 2021 en Cumbre Vieja. El último registro de erupción ocurrido en La Palma data en 1971, producido en el Volcán de Teneguía, situado al sur de la isla [2]. Por lo tanto, tras el avance de la tecnología y la adquisición de nuevos recursos, ha sido posible monitorizar la erupción de Cumbre Vieja de manera más exhaustiva y precisa que en los fenómenos anteriores producidos en la zona. Es de gran interés monitorizar de forma rápida, continua e instantánea, para de esta forma tener un mejor control sobre las deformaciones. Con la evolución tecnológica en ámbitos espaciales es posible llevar a cabo esta monitorización a partir de imágenes satelitales con una precisión y con un volumen de información destacado. En el trabajo se estudia la deformación que sufre el terreno los meses previos a la erupción, analizando para ello imágenes satelitales Radar de Apertura Sintética (SAR) mediante el método de interferometría radar. En concreto, usando la técnica InSAR (Satellite Radar Interferometry), la cual realiza técnicas multi-temporales monitoreando y midiendo los cambios producidos en la superficie terrestre, ya sean por terremotos, deslizamientos de tierra, variaciones en los niveles de agua subterránea, o como es este caso, actividad volcánica [3]. También se llevará a cabo un análisis de los cambios superficiales sufridos por las coladas de lava provocados por este mismo volcán, siendo analizados tanto por imágenes satelitales radar como por imágenes multiespectrales. De esta forma, el estudio de estas deformaciones es de utilidad para observar el proceso geológico de fenómeno volcánico tanto previo como posterior a la salida magmática, así cómo en la prevención de futuras erupciones, ya que se puede realizar un análisis constante con las imágenes satelitales disponibles, ahorrando así costes en instrumental de otra clase, como podrían ser estaciones GNSS.

ÍNDICE

1 Introducción **13**
1.1 Justificación. 13
1.1.1 Justificación de la zona. 13
1.1.2 Justificación del método aplicado. 15
1.2 Objetivos. 17
2. Marco teórico **18**
2.1 Teledetección Radar de Apertura Sintética (SAR). 18
2.2 Sistema de captura de imagen Radar. 25
2.3 Distorsiones geométricas en las imágenes Radar. 28
2.4 Órbitas y direcciones de observación. 30
2.5 Speckle. 31
2.6 Polarización. 32
2.8 Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). 33
2.8.1 Principios de la Interferometría SAR. 33
2.8.2 Geometría de InSAR. 35
2.8.3 Medición de la altitud del terreno a través de la fase interferométrica. 37
2.8.4 Mapas de coherencia interferométricos. 39
2.8.5 Tipos de ruido en la fase interferométrica. Decorrelación. 41
2.8.6 Filtrado en interferogramas. 43
2.8.7 Desenrollado de fase (Phase Unwrapping). 43
2.9 Interferometría diferencial con radar de apertura sintética (DInSAR). 47
2.10 Series temporales. 51
3. Materiales. **52**
3.1 Imágenes satelitales y su adquisición. 52
3.1.1 Características de las imágenes utilizadas para el estudio. 52
3.1.2 Productos adquiridos. 54
3.2 Órbitas precisas. 59
3.3 Datos IGN. 59
3.4 Software empleado. 60
4. Metodología de procesamiento. **61**
4.1 Procesamiento de imágenes Sentinel-1 SLC. 61
4.1.1 Selección y descarga de imágenes. 61
4.1.1.1 Selección imagen master. 63
4.1.2 Procesado en SNAP 63
4.1.2.1 TOPSAR- Split. 67
4.1.2.2 Orbitas Satelitales. 69
4.1.2.3 Back- geocoding. Coregistro. 71
4.1.2.4 Enhanced Spectral Diversity (ESD) 72
4.1.2.5 Interferograma. 72

4.1.2.6 TOPSAR-Deburst. 74
4.1.2.7 Topographic phase removal. 75
4.1.2.8 Multilook. 75
4.1.2.9 Goldstein Phase Filtering. 76
4.1.2.10 SNAPHU. 77
4.1.2.11 Phase to displacement. 78
4.1.2.12 Terrain Correction. 79
4.2 Procesamiento de imágenes Sentinel-1 GRD 81
4.2.1 Selección y descarga de imágenes. 81
4.2.2 Procesado en SNAP. 82
4.2.2.1 Thermal Noise Removal. 85
4.2.2.2 Calibration. 85
4.2.2.3 DEM Assisted Coregistration. 86
4.2.2.4 Subset. 87
4.2.2.4 Offset tracking. 88
4.3 Procesamiento de imágenes Sentinel-2. 89
4.3.1 Selección y descarga de imágenes. 89
4.3.2 Procesado en SNAP. 90
4.3.2.1 Avance de las coladas de lava. 91
4.3.2.2 Área afectada por las coladas volcánicas. 95
5. Resultados y discusión 103
5.1 Resultados InSAR. 103
5.1.1 Resultados ascendentes. 105
5.1.2 Resultados descendentes. 119
5.1.2 Discusión. 133
5.2 Resultados GRD. 134
5.2.1 Resultados ascendentes. 135
5.2.2 Resultados descendentes. 139
5.2.3 Discusión. 143
5.3 Visualización coladas de lava con Sentinel-2. 144
5.4 Cálculo del área arrasada por las coladas. 150
6. Conclusiones 155
Referencias 158
ANEXO 1. Producto ascendente. 161
ANEXO 2. Producto descendente. 191

1. Introducción

1.1 Justificación.

1.1.1 Justificación de la zona.

Este trabajo se sitúa en la Palma, la cual forma parte del archipiélago volcánico de las Islas Canarias que se integra en los archipiélagos meridionales del borde atlántico africano junto a Madeira, las Islas Salvajes y Cabo Verde. La Palma, presentando una forma alargada N/S, presenta una clara migración de la actividad eruptiva a lo largo de su evolución, pasando ésta de situarse al norte de la isla al sur.

La Palma y El Hierro son las islas más occidentales de Canarias y las que presentan mayor actividad volcánica. La Palma se eleva desde el fondo del océano a unos 4000 m de profundidad y alcanza una altura de 2500 m sobre el nivel del mar. Ha estado volcánicamente activa durante al menos cuatro millones de años y ha tenido 7 erupciones en los últimos 500 años, incluyendo la de 2021, causa de este estudio.

La isla está formada por dos grandes cuerpos volcánicos, el más antiguo situado al norte está formado por un gran complejo volcánico con una disposición circular y una depresión central (Complejo Volcánico del Norte, NVC), mientras que en el sur de la isla se presenta un volcán alargado más joven, dónde se produce la erupción objeto de estudio. Esta región ha sido modificada a lo largo de la historia geológica por grandes deslizamientos e intensos procesos erosivos, además de ser la zona con mayor actividad volcánica de la isla [4].

El ámbito de estudio se encuentra encima de Montaña Rajada, en la zona conocida como Cabeza de Vaca en el municipio de El Paso, afectando principalmente a las localidades de Todoque, La Laguna, y el Paraíso, al oeste de la isla de La Palma [5]. Concretamente, la erupción se da en la ladera occidental de Cumbre Vieja, la cual se levanta sobre el rift meridional y constituye el espacio volcánico más joven de la isla, dónde se concentran las erupciones históricas más importantes [6].

En la Figura 1 se aprecia la situación de dicho volcán dentro de la isla y sus respectivas coladas una vez finalizado el fenómeno. Utiliza datos del modelo de elevación digital Copernicus GLO-30 [7].

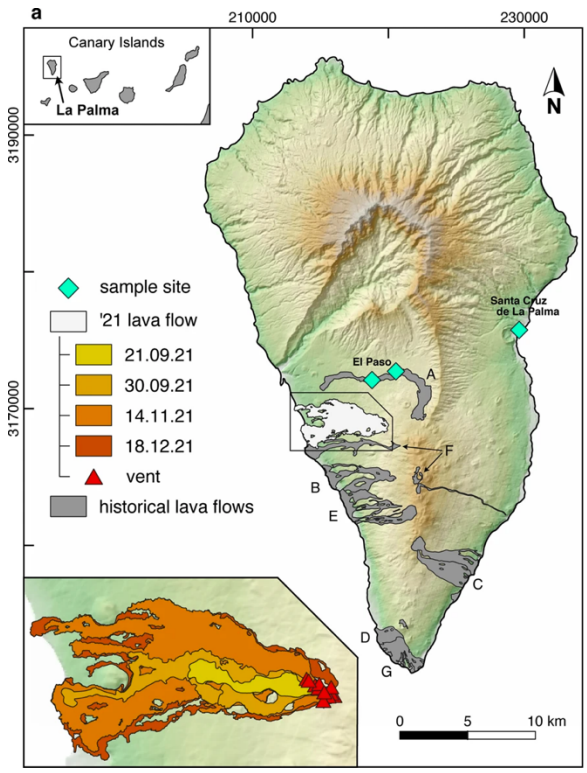


Figura 1: Descripción general del entorno geológico [7].

La apertura de la primera boca eruptiva se sitúa en el paraje de Las Plantas situado a 1.027 metros (Longitud: -17,846899 O; Latitud:28,126817 N), en la falda noroeste del volcán de San Juan (Base cartográfica del MTN 1:25.000, IGN). Esta provoca una deformación previa a la erupción en torno a este punto, por lo que será la zona central del estudio [8].

En la Figura 2, se aprecia la localización de la erupción de La Palma en el cerro de Las Plantas (1.027 m) en Cumbre Vieja, además de los transectos y puntos de observación. (Fte: Mapa Topográfico Nacional, IGN [5]).

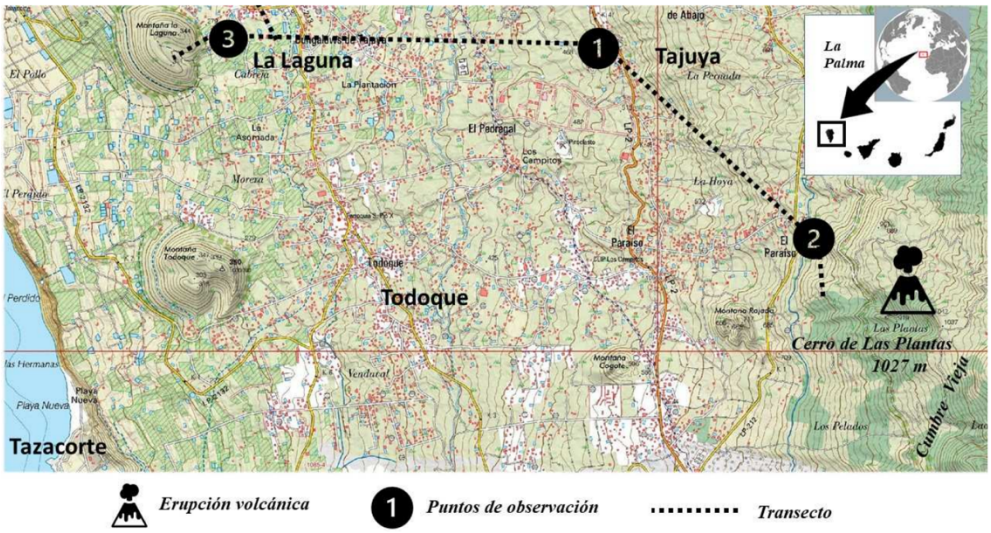


Figura 2: Localización de la erupción de La Palma [5].

La Isla de la Palma presenta uno de los riesgos volcánicos potenciales más elevados de Canarias como demuestran sus disturbios históricos, denotando así la erupción que comenzó el 19 de septiembre de 2021.

Por lo tanto, se considera crucial monitorizar la deformación que sufre la zona descrita con técnicas multitemporales, ya que dan un indicador del momento en el que se puede producir dicha erupción, y las zonas que puede afectar, teniendo en cuenta que en muchas de estas se encuentran poblaciones que deben ser evacuadas.

1.1.2 Justificación del método aplicado.

El principal método aplicado para este caso se basa en técnicas de interferometría, que utiliza las propiedades coherentes y geométricas de la radiación electromagnética para comparar dos o más ondas.

La técnica InSAR (Interferometría radar de satélite) se define mediante el cálculo de la diferencia de fase de ecos de radar complejos en cada elemento de resolución en

una imagen de radar, lo que da como resultado imágenes de desplazamiento a escala milimétrica en posiciones de nivel de metro en áreas amplias [9]. Se considera un método eficaz para medir los cambios en la altitud de la superficie terrestre, realizando mediciones de alta densidad y en grandes áreas a partir del uso de las señales de radar provenientes de diferentes satélites en órbita. Los continuos avances en la precisión de la determinación de la órbita ahora producen estimaciones de la posición de dichos satélites con incertidumbres submétricas.

La utilización de este método suple a la necesidad de monitorizar lo más rápido, continuo y preciso posible, crucial para el control de deformaciones cuando se encuentra en una zona en la que pueden llegar a producir un riesgo inminente. De igual forma, este método de monitorización presenta la ventaja de que dispone de un coste reducido en comparación con otras técnicas geodésicas o fotogramétricas y está a disposición de cualquier usuario interesado.

Trabaja con un sensor activo, es decir, que posee una fuente interna que genera artificialmente energía o radiación. Los sensores activos no requieren de la energía de factores externos como el sol o las propiedades térmicas de la tierra, por el contrario, generan su fuente de energía la cual es transmitida por el sensor hacia la superficie terrestre, independientemente de la presencia de condiciones atmosféricas como la nubosidad y a su vez, captura información tanto en el día como la noche [10].

Por lo tanto, los sensores activos son de gran interés en este caso al no verse afectados por la atmósfera y la nubosidad de esta, pudiendo así obtener información constante independientemente del estado meteorológico de la zona. Hay que tener en cuenta que una vez el volcán entra en erupción, los gases y las cenizas provenientes de esta podrían ser un inconveniente si no se trabaja con un sensor activo.

Así, combinando las posibilidades de detección precisas de la técnica de interferometría radar con la disponibilidad de datos, esta se torna en una herramienta ideal para el caso de estudio.

1.2 Objetivos.

El objetivo principal de este estudio es cuantificar y analizar temporalmente la elevación de la isla tras la afloración de material magmático precedente al fenómeno volcánico en la reciente erupción producida en la Isla de la Palma, aplicando para ello técnicas multitemporales e interferometría radar de satélite MT-InSAR. Concretamente, se han procesado imágenes desde el 4 de julio de 2021 hasta el 31 de diciembre de ese mismo año, observando así las deformaciones pre y post eruptivas.

Esta técnica realiza una identificación de píxeles en las imágenes radar gracias a la alta intensidad de la señal reflejada, pequeño ruido de fase y la respuesta constante a lo largo del tiempo. De esta forma, se consigue el mapa de velocidad media de dicha deformación, además de un análisis de series temporales con la evolución espacio-temporal en dicha zona de estudio.

Por otra parte, se procesan imágenes multiespectrales para la visualización de las coladas de lava y cómo avanzan a lo largo del tiempo, aparte de un estudio de la velocidad de las mismas, realizado también con imágenes radar. Además, se estima el área arrasada por las coladas magmáticas a partir de una imagen multiespectral una vez cesa la actividad volcánica en el área de estudio.

El producto generado de este estudio, por tanto, son mapas y perfiles longitudinales y transversales para observar y cuantificar la deformación de la isla por estos sucesos geológicos, además de los mapas que se generan también para observar la velocidad de las coladas de lava y la zona arrasada por estas mismas.

2. Marco teórico

2.1 Teledetección Radar de Apertura Sintética (SAR).

El Radar (Radio Detection And Ranging) es un sistema de percepción remota activa que consiste en iluminar el objetivo de interés con pulsos electromagnéticos en intervalos de frecuencias de microondas conocidas y registrar el tiempo que tarda en viajar de ida y vuelta la señal, es decir, la distancia, teniendo en cuenta que el pulso viaja con una velocidad similar o igual a la de la luz, así como la amplitud y la fase de la onda de la señal reflejada [11].

Generalmente, trabaja en bandas de frecuencias clasificadas que tienen como valor entre 0.3 GHz y 300 GHz, y una longitud de onda entre 1 mm y 1 m. En las Figuras 3 y 4 se muestra la posición del radar dentro del espectro electromagnético, además del rango de trabajo de las ondas radar dentro de este.

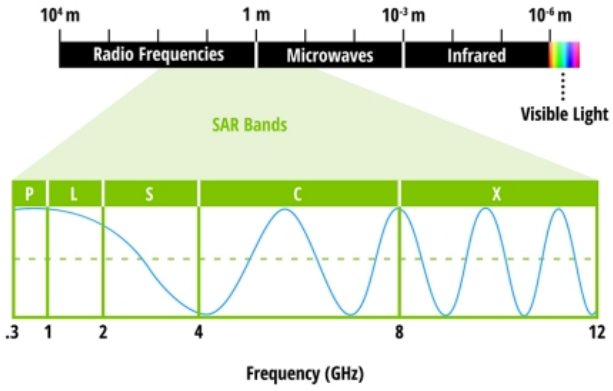


Figura 3: Espectro electromagnético

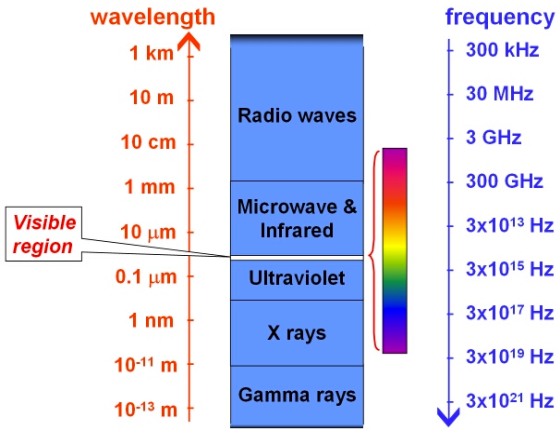


Figura 4: Longitud de onda y frecuencia

Para aplicar los principios del radar a la creación de imágenes, se desarrolló una forma de generar un haz electromagnético lo más estrecho posible, gracias al "principio de superposición de las ondas", la cual indica que cada onda recorre el medio como si las otras no estuvieran presentes. Este haz electromagnético es llamado pulso.

En el caso de este estudio, se utilizan imágenes satelitales radar, las cuales cuentan con sensores activos, es decir, proporcionan de forma artificial su propia energía radiante como fuente de iluminación, como se da en el caso del SAR o LIDAR. Por tanto, son contrarios a los sensores pasivos, cuya fuente de energía radiante surge de fuentes naturales como puede ser el Sol, la Tierra u otros cuerpos calientes.

El uso de estos sensores activos presenta ventajas respecto a los pasivos, ya que funcionan bajo condiciones meteorológicas diversas, observan la superficie terrestre tanto de día como de noche y pueden llegar a penetrar la vegetación o suelos. Además de no verse afectados por los efectos atmosféricos. Son sensitivos frente a propiedades dieléctricas de la superficie, es decir, son sensitivos frente a las variadas cargas eléctricas presentes en diferentes materiales observables sobre la superficie terrestre. Aún así, el procesado de los productos generados por este tipo de sensor son difíciles de interpretar, tanto ópticamente cómo técnicamente y pueden llegar a presentar distorsiones en áreas donde hay topografía variada [12].

Los sensores radar transmiten un pulso y mide el eco retornado en dirección de la antena (retrodispersión). De este eco se mide la amplitud, con la que se averigua la magnitud del eco reflejado, y la fase, con la que se obtiene la posición en la que se encuentra un punto en un momento determinado en el ciclo de onda. Por tanto, los parámetros principales del radar son la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia respecto a la superficie terrestre:

- Longitud de onda (λ): esta longitud se refiere a la distancia entre dos puntos correspondientes en una onda, que se repiten en el tiempo y en el espacio. Cuanto más larga sea la longitud de onda mayor será la penetración que tenga el pulso a través de la vegetación o del suelo, siempre que sea en condiciones secas.

- Polarización: dependiendo de la orientación del campo eléctrico, los pulsos radar se pueden transmitir horizontal o verticalmente, y ser recibidos igualmente horizontal o verticalmente. Por tanto, las mediciones suelen estar polarizadas en horizontal y vertical.

    - HH: Transmitida horizontalmente, recibida horizontalmente
    - HV: Transmitida horizontalmente, recibida verticalmente
    - VH: Transmitida verticalmente, recibida horizontalmente
    - VV: Transmitida verticalmente, recibida verticalmente

    Según las propiedades físicas del objeto observado, puede ser más conveniente usar una u otra polarización, o una combinación de ambas.

Ángulo de incidencia: se trata del ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la vertical de la superficie del terreno. Varía dependiendo de la altura del sensor, por lo que la geometría de la imagen se ve afectada de punto a punto en la dirección del rango. En la Figura 5 se aprecia el ángulo de incidencia (θ) entre señal radar y la vertical de la superficie terreno.

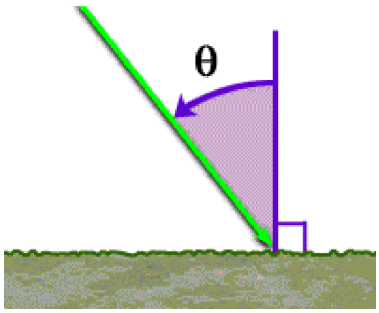


Figura 5: Ángulo de incidencia (θ) entre señal radar y la vertical de la superficie terreno.

Además de estos parámetros, se debe tener en cuenta la retrodispersión del radar, la cual es la fracción de energía transmitida que es reflejada nuevamente al sensor. La brillantez de la superficie, que se verá reflejada en la imagen creada por el radar, depende de la fracción de energía que regresa al sensor después de interactuar con objetos en la superficie.

En la retrodispersión afectan aspectos tanto del propio aparato radar como las características de la superficie de interés. Tanto el ángulo de la onda incidente, la frecuencia de la onda y la polarización de esta misma dependen del radar, mientras que la constante dieléctrica de los materiales, la aspereza de la superficie en relación a la longitud de onda y la estructura y orientación de los objetos son características intrínsecas de la superficie que está siendo observada.

La escala de los objetos en la superficie frente a la longitud de onda usada determina cómo de áspero o liso aparecen al radar y de cómo de brillantes u oscuros aparecen en la imagen dichos elementos. Por lo tanto, según contra que impacte el pulso, se producirá una dispersión diferente.

Mientras que en teledetección óptica las longitudes de onda son tan cortas que prácticamente toda la energía recibida por la superficie terrestre se refleja, en el caso de teledetección radar las longitudes de onda empleadas son lo suficientemente grandes como para poder penetrar cierto tipo de superficies, de forma que la dispersión será el resultado de la combinación de la dispersión producida por la superficie e incluso por capas de material más profundo.

La dispersión a una determinada longitud de onda variará por una serie de condiciones, como el tamaño físico de los dispersores, las propiedades eléctricas de estos y su contenido en humedad. La propia longitud de onda de los pulsos SAR y la polarización de estos también afectarán a la retrodispersión de la señal.

Se producen fenómenos de dispersión por superficie cuando la radiación incide sobre una zona determinada. Este fenómeno depende de la rugosidad o textura de dicha superficie y de su constante dieléctrica.

En la Figura 6 se pueden observar los distintos mecanismos de dispersión dependiendo del tipo de superficie que encuentre el pulso [13].

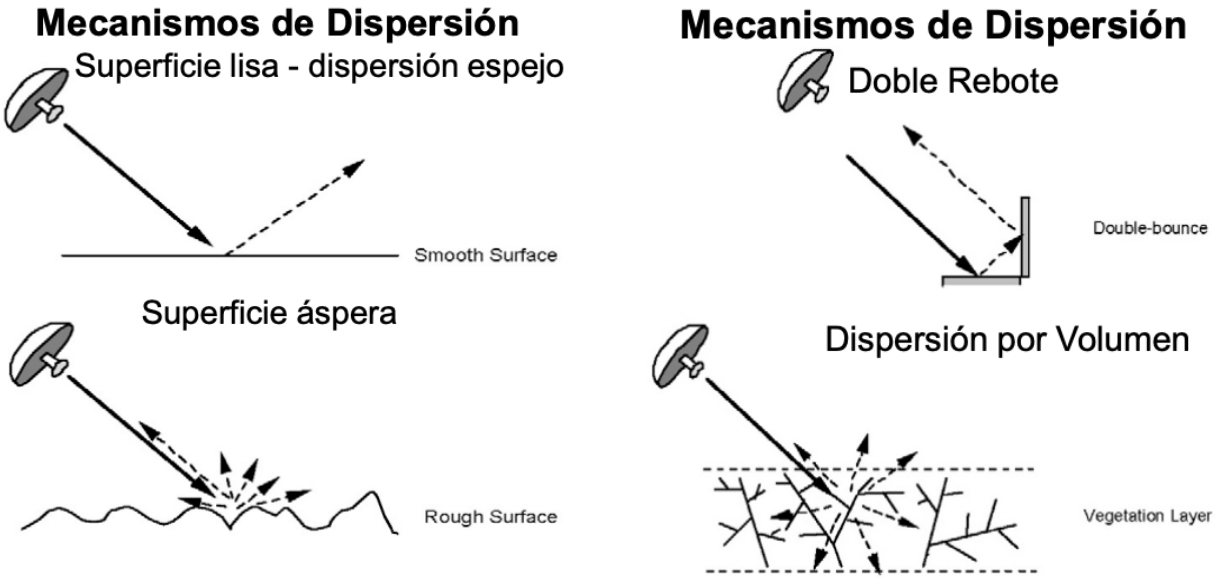


Figura 6: Mecanismo de dispersión [13]

Se pueden dar zonas donde no haya ningún retorno de eco del pulso transmitido, por lo que no habrá información en dicha zona. A mayor rugosidad en superficie mayor será la retrodispersión y más brillante se observará en la imagen radar. Las superficies lisas reflejan poca o ninguna de la energía emitida de vuelta al sensor radar, y por eso saldrán oscuras en la imagen. La vegetación tiene una rugosidad moderada comparada con la escala de las longitudes de onda radar y por eso aparecerán representadas en grises o grises claros.

Es por esta característica en la dispersión del pulso, que aquellas zonas planas, como puede ser el agua o carreteras, en las cuales casi siempre refleja especularmente el pulso recibido, tienen un retorno bastante bajo de la señal. En el caso de existir una cierta rugosidad superficial, por ejemplo, oleaje, puede manifestarse en la imagen de radar, siempre que el ángulo de incidencia sea adecuado. Esta explicación resulta muy útil para detectar anomalías en la superficie, por ejemplo, manchas de petróleo.

Por otra parte, a mayor constante dieléctrica de una superficie o material, mayor será la retrodispersión y por lo tanto más brillante se observará un píxel en la imagen radar. Los objetos metálicos y el agua tienen una constante dieléctrica alta mientras que el resto de materiales tienen una menor. En condiciones secas la constante también es baja, lo que implica que la humedad en suelos o en cubiertas vegetales puede producir un aumento significativo de reflectividad de la señal radar. Por lo tanto, este tipo de teledetección puede usarse para obtener el contenido en humedad de los suelos, si fuese el caso de estudio.

Por lo tanto, el fundamento del funcionamiento de este sensor se aprecia en la Figura 7 [14], donde se puede observar cómo opera un sistema radar aerotransportado.

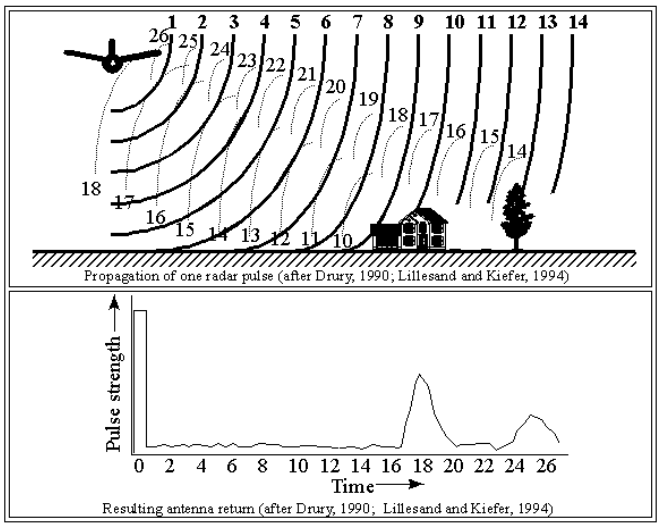


Figura 7: Operaciones del sistema radar aerotransportado [14].

Se puede comprobar en la gráfica como la intensidad del pulso depende del objeto con el que se encuentre, y la dispersión que este tenga. En el caso de la edificación, se produce un rebote concreto de la energía recibida, al ser un objeto sólido y compacto, sin considerarse esto una superficie áspera como tal. Así se obtiene un eco con mayor intensidad, mientras que en el caso de la vegetación se observa un eco disminuido en comparación, ya que se produce una dispersión por volumen y no devuelve al sensor la misma cantidad de energía.

Por lo tanto, Synthetic Aperture Radar (SAR) cuyo significado es Radar de Apertura Sintética, se denomina como el método que consiste en generar imágenes procesando los reflejos de ondas de radio sobre la superficie terrestre. Es una herramienta potente para mapear la topografía global y la deformación de la superficie de la Tierra. Las imágenes de radar tomadas desde direcciones de visualización ligeramente diferentes permiten la construcción de modelos digitales de elevación con una precisión de escala de un metro, por lo que estos conjuntos de datos ayudan en el análisis e interpretación de paisajes tectónicos y volcánicos. Si la superficie de la Tierra se deforma entre dos adquisiciones de imágenes de radar, se puede construir un mapa del desplazamiento de la superficie con una resolución de decenas de metros y una precisión subcentimétrica [15].

2.2 Sistema de captura de imagen Radar.

Las medidas radar pueden describirse mediante una ecuación básica que relaciona la potencia, la distancia, la reflectividad y las características de la antena (1):

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R_t^2} G \frac{\sigma}{4\pi R_r^2} A \quad (1)$$

Donde:

P_r es la potencia del pulso recibida.
P_t es la potencia del pulso emitida.
R_t es la distancia entre la antena emisora y el objeto en el terreno.
R_r es la distancia entre el objeto en el terreno y la antena emisora.
G es la ganancia de la antena.
A es el área de la antena.
es la retro-dispersión del objeto en el terreno.

Los sistemas radar capturan las imágenes lateralmente, como se muestra en la Figura 8, ya que en el caso de una disposición vertical implicaría una ambigüedad a la hora de determinar qué objeto se está observando realmente.

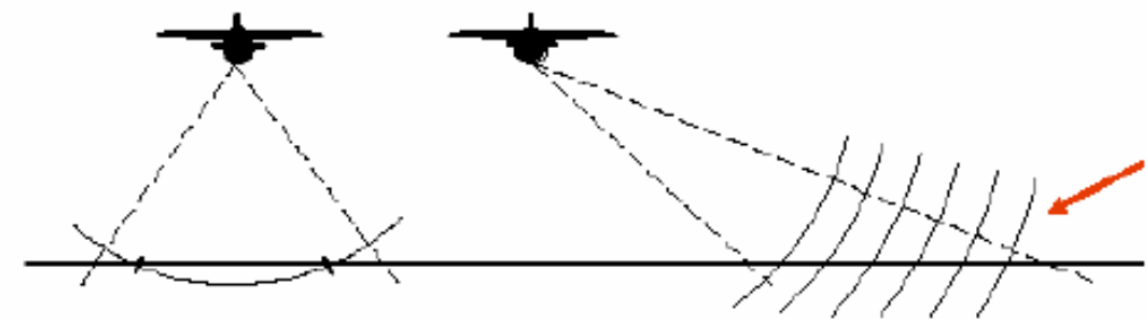


Figura 8: Sistema de captura radar.

En un sistema radar de iluminación lateral se produce una imagen de alta resolución de la superficie bajo observación. Al moverse a lo largo de su trayectoria, el radar ilumina hacia un lado de la dirección de vuelo franjas continuas y paralelas entre sí de la superficie en estudio, acumulando la información de las microondas que se reflejan. La señal que se graba a bordo, se procesa apropiadamente para formar una imagen digital.

La distancia entre el radar y el objetivo en la superficie en la dirección perpendicular al vuelo se llama alcance, mientras que se conoce como acimut la distancia a lo largo de la trayectoria. Por lo tanto, en un sistema radar la resolución tiene dos dimensiones, una en la dirección del alcance y otra en la dirección del acimut. Mediante procesamiento digital de la señal, la imagen puede enfocarse y obtener así una resolución más óptima que la de un radar convencional.

Según Woodhouse, la observación lateral se utiliza para evitar la ambigüedad de la señal de retrodispersión de objetos equidistantes a la fuente de emisión [16]. En la Figura 9 se observa la geometría de un radar de apertura lateral de este tipo [17].

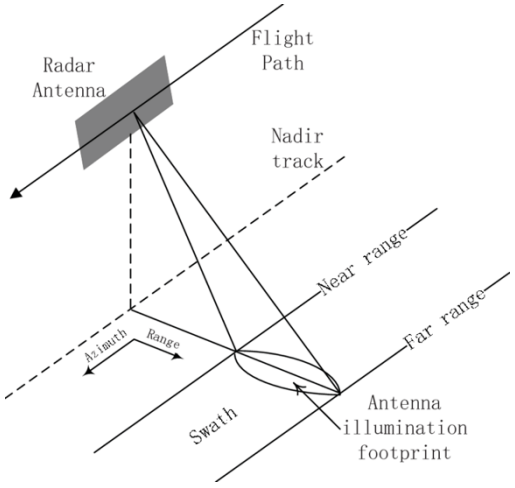


Figura 9: Geometría de un radar de apertura lateral [17].

Esta geometría de adquisición causa que el píxel no sea cuadrado como tal, por la existencia de resoluciones diferentes en la dirección del acimut y en la del alcance. Además, la topografía de la superficie provoca efectos de importancia sobre la imagen, ya que se provocarán distorsiones geométricas en esta.

Los sistemas radar de apertura sintética o SAR pueden aumentar considerablemente la resolución en acimut simulando una antena de dimensiones mayores a la que realmente se emplea. Un array de antenas es equivalente a una antena que se mueve a lo largo de una línea si las señales se miden de manera coherente (amplitud y fase como una función del tiempo) y se añaden las unas a las otras, asumiendo que el objeto está estático durante el momento de la captura. De esta manera, mediante un procesamiento digital de la señal, se obtienen imágenes de mayor resolución que aquellas obtenidas de un radar convencional.

2.3 Distorsiones geométricas en las imágenes Radar.

Como se ha mencionado anteriormente, a consecuencia de la geometría de observación lateral, no se puede considerar ni tratar las características geométricas de las imágenes generadas mediante el sistema radar como imágenes ópticas, ya que se producen una serie de efectos geométricos que se van a traducir en un desplazamiento por el relieve.

En la Figura 10 se aprecia cómo pueden afectar los efectos geométricos de la superficie terrestre a la captura de datos radar, observando cómo dependiendo de la topografía se llegan a crear zonas de sombra de las cuales no se dispone información, o zonas en las que se produce un solape como se puede apreciar en la figura entre los números 4 y 3.

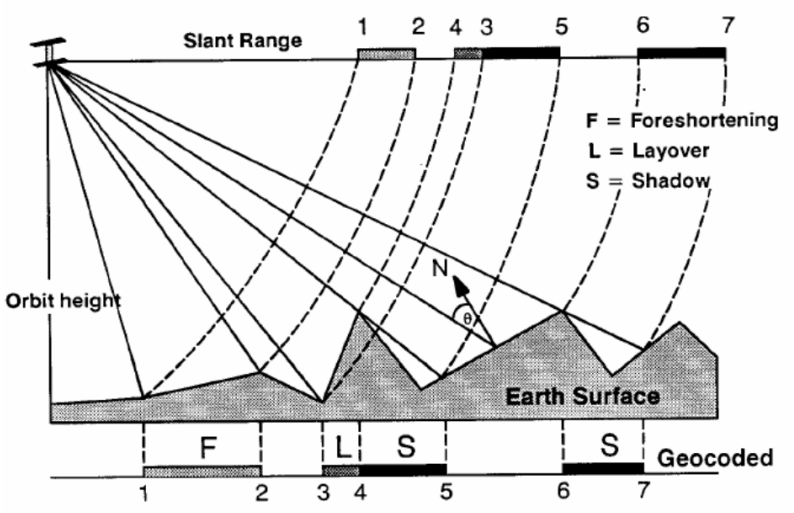


Figura 10: Efectos geométricos en una imagen SAR [18].

Como se muestra en la figura, hay tres tipos de efectos geométricos que se producen en una imagen radar, los cuales dependen del ángulo de inclinación del pulso al llegar a la superficie:

- Escorzo (foreshortening): Consiste en la apariencia de compresión de partes de la superficie que están inclinadas hacia el sensor. En el caso de pendientes orientadas de manera opuesta al sensor, estas superficies se alargan. Implica que la pendiente afectada en una imagen tenga una apariencia más brillante.

- Inversión por relieve (layover): Ocurre cuando la energía reflejada en la parte superior de un objeto se recibe antes que la que proviene de la parte inferior. En este caso, al procesar la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada y puesta encima de su base.

- Sombras (shadow): Son zonas no iluminadas por el sensor en las que por lo tanto no existen valores registrados ya que no hay retorno en la antena de ninguna señal reflejada en el terreno. Se produce en zonas donde un objeto de mayor altitud opaca una fracción de superficie.

2.4 Órbitas y direcciones de observación.

Los satélites SAR orbitan alrededor de la Tierra, por lo que observan la misma zona según recorre la órbita en sentido ascendente o descendente con respecto al planeta con una periodicidad determinada. Este doble sentido es posible realizarlo ya que el sensor es capaz de capturar datos independientemente de que la superficie esté iluminada o no por el Sol, al ser un sensor activo. De esta forma, tendremos diferentes direcciones de observación sobre la misma zona, pudiendo usar esta información para obtener una mejor caracterización de la superficie.

En el caso de este estudio, se toman imágenes tanto ascendentes como descendentes de la zona de interés, y estas serán procesadas independientemente. En la Figura 11 se observa tanto la zona de interés como las imágenes ascendentes y descendentes tomadas por el satélite Sentinel-1A su paso por la isla de La Palma, a través de la plataforma Copernicus.

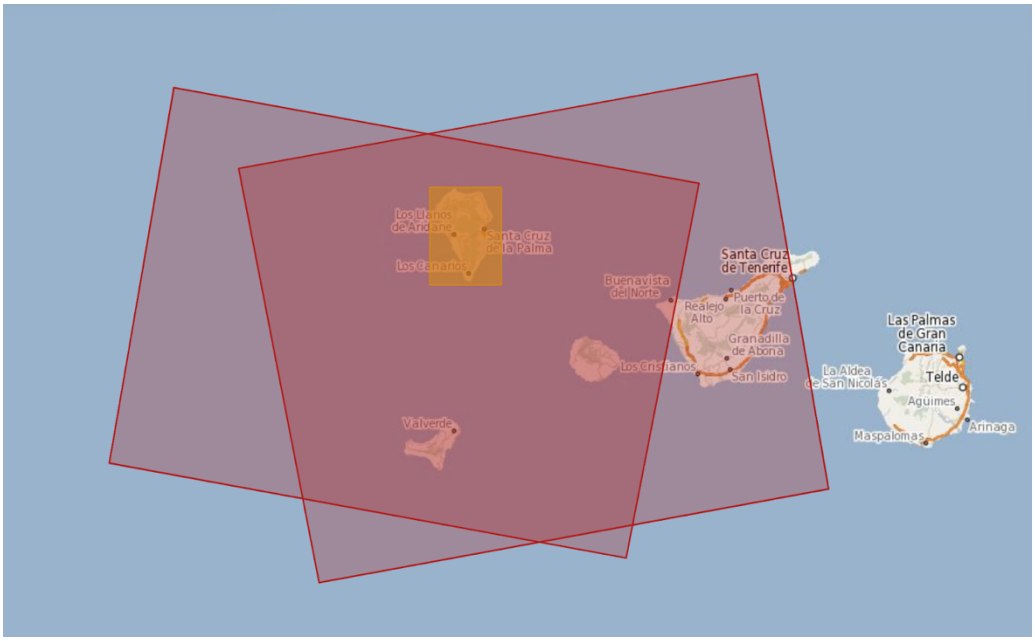


Figura 11: Huella (footprint) ascendente y descendente del satélite Sentinel-1A.

2.5 Speckle.

El moteado, o speckle, es un fenómeno de ruido inherente al sistema, que siempre está presente en las imágenes registradas por los sensores SAR. Está causado por el patrón de interferencia de la señal de microondas regresada, la cual consiste en contribuciones de muchos centros de dispersión independientes dentro de una celda de resolución.

Según su fase, las señales de retorno individuales interfieren entre sí de forma constructiva o destructiva, lo que da como resultado un patrón aparentemente aleatorio de píxeles más brillantes y más oscuros, creando el llamado efecto ‘sal y pimienta’.

Como esta apariencia granulada siempre está presente además de la información textural real, se pueden distinguir dos tipos diferentes de áreas en las imágenes de radar. En áreas homogéneas, la única textura de la imagen que se puede observar está asociada con el moteado. Las regiones heterogéneas, por el contrario, presentan información radiométrica y de textura real que resulta de las propiedades de retrodispersión de los objetos individuales en el suelo, que sin embargo se superpone con motas.

El moteado se puede reducir mediante la aplicación de filtros o mediante el procesamiento de aspecto múltiple, en el que se utilizan varias imágenes independientes de la misma área para promediar los valores de píxeles vecinos, lo que produce una imagen más suave. Estas imágenes se producen utilizando diferentes porciones de la apertura sintética de los satélites, que, como principal inconveniente, tiene efectos negativos en la resolución espacial [19].

2.6 Polarización.

Como se destacó anteriormente, las señales radar pueden transmitirse como campos electromagnéticos vectoriales horizontales o verticales, y ser recibidos de vuelta como señales horizontales o verticales igualmente, dependiendo de la orientación del campo eléctrico:

- HH: Transmitida horizontalmente, recibida horizontalmente
- HV: Transmitida horizontalmente, recibida verticalmente
- VH: Transmitida verticalmente, recibida horizontalmente
- VV: Transmitida verticalmente, recibida verticalmente

Las combinaciones HH y VV se consideran polarizadas porque transmiten y reciben lo mismo, mientras que el resto de combinaciones son consideradas polarizaciones cruzadas.

La longitud de onda y la polarización afectan a un radar en cómo observa la superficie terrestre. Por lo tanto, imágenes de radar de diferente polarizaciones y longitudes de onda pueden proveer información complementaria de la región de estudio [20]. Este control se realiza mediante un filtro presente en el sensor que puede ser tanto vertical cómo horizontal, tal como se puede observar en la Figura 12, dónde se esquematiza el funcionamiento de las polarizaciones de forma geométrica.

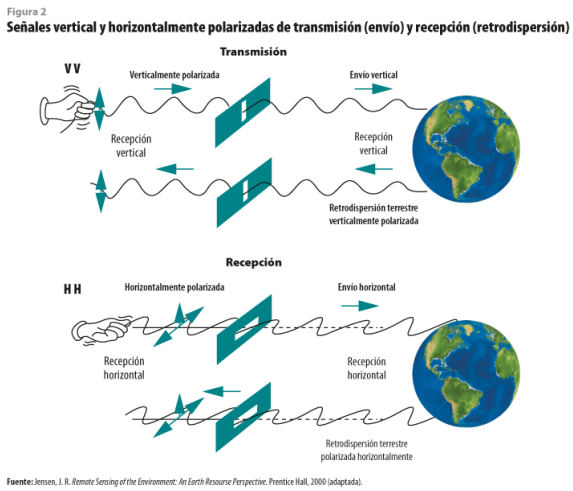


Figura 12: Polarización de las microondas [21].

2.8 Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR).

En este apartado se pretende informar sobre el funcionamiento básico llevado a cabo en interferometría radar, una vez dada la información suficiente sobre las imágenes SAR en apartados anteriores. La metodología InSAR es compleja y en cierto modo abstracta, así que en esta sección se explican los conceptos principales para comprender los procesos aplicados posteriormente a las imágenes para conseguir los productos deseados.

2.8.1 Principios de la Interferometría SAR.

InSAR ofrece la posibilidad de mapear la topografía terrestre del planeta y medir pequeños desplazamientos en grandes escalas temporales y espaciales con precisión subcentimétrica, independientemente de la iluminación del Sol y la cobertura de nubes. Estas propiedades hacen de InSAR una técnica única que combina la alta precisión de las técnicas geodésicas clásicas como el GPS y la nivelación con la propiedad de imágenes de las técnicas de teledetección.

El método de trabajo de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética se basa en la determinación de la diferencia de fase entre píxeles homólogos en dos imágenes complejas de una misma zona [22]. Dicha diferencia de fase consta con términos concretos, los cuales influyen en el resultado de este proceso (2):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi \text{ flattering} + \Delta\varphi \text{ desplazamiento} + \Delta\varphi \text{ elevación} + \Delta\varphi \text{ atmosférico} + \Delta\varphi \text{ ruido} \quad (2)$$

Dichos términos se pueden definir de la siguiente manera:

- Δφ flattering está provocado por el desplazamiento propio de la curvatura terrestre. Su valor es el siguiente (3):

$$\Delta\varphi \text{ flattering} = \frac{-4\pi}{\lambda}\frac{Bn\ s}{R\ tan\theta} \quad (3)$$

- Δφ elevación está provocada por la topografía de la superficie la cual contribuye al valor final de la diferencia de fase (4):

$$\Delta\varphi \text{ elevación} = \frac{-4\pi}{\lambda}\frac{Bn\ h}{R\ sen\theta} \quad (4)$$

- Δφ desplazamiento está provocada por el desplazamiento en dirección del rango (d) (5):

$$\Delta\varphi \text{ desplazamiento} = \frac{-4\pi}{\lambda}\ d \quad (5)$$

- Δφ atmosférica está provocada por las distintas condiciones atmosféricas entre la captura de imágenes, que pueden llegar a desajustar la señal y así mismo a la fase de esta.

- Δφ ruido está provocado por la diferencia en la fase causada por diferentes factores, ya sean diferentes ángulos de incidencia entre imágenes o cambios volumétricos de la superficie. Este factor depende de las condiciones de toma de la imagen y del conocimiento de las mismas.

Se obtendrá mayor precisión a la hora de realizar la diferencia de fase si se eliminan o corrigen los factores mencionados. De esta forma, se obtendrá una mayor fiabilidad en el desplazamiento final del producto una vez realizado el proceso correspondiente.

2.8.2 Geometría de InSAR.

En principio, un satélite SAR observa la misma área desde ángulos ligeramente distintos. Dicha observación puede realizarse con dos radares montados sobre el mismo satélite o en diferentes momentos utilizando órbitas repetidas por dónde navega dicho satélite. Para el caso de la observación con dos satélites, la distancia entre estos en el plano perpendicular a la órbita se denomina línea base y su proyección perpendicular al rango oblicuo es la línea base perpendicular [23].

Para una mejor visualización, se observa la Figura 13, dónde la distancia B en el esquema en la imagen ‘a’ define la distancia de la línea base en un sistema con dos sensores. La separación entre órbitas de los dos satélites en el esquema de la imagen ‘b’ se denomina línea base, y su proyección perpendicular a la dirección del rango de inclinación es uno de los parámetros clave de la interferometría SAR [24].

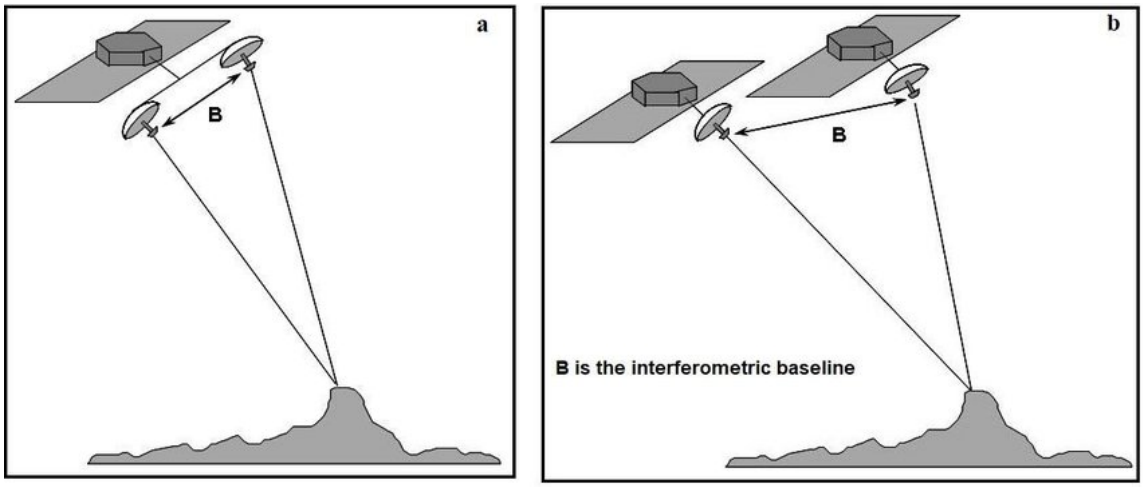


Figura 13: Geometría InSAR [24].

La técnica InSAR detecta cambios de fase entre dos adquisiciones SAR, que son generalmente referidas en la literatura como “imagen maestra” e “imagen esclava”. La proyección perpendicular a la dirección del rango de inclinación es el factor clave en la técnica de interferometría SAR, debido a que rige la sensibilidad de la fase del interferograma a la topografía.

Los parámetros que forman parte de la geometría SAR en sus dos variantes para obtener la diferencia de fase y estimar la topografía son:

1. La línea base perpendicular Bn
2. La distancia radar al objetivo en tierra R
3. El desplazamiento entre las celdas de resolución a lo largo de la perpendicular al rango inclinado, q_s.

En la Figura 14 se aprecian los parámetros de geometría de un sistema interferométrico satelital, como la base entre sensores, que se diferencia de la base perpendicular entre los mismos.

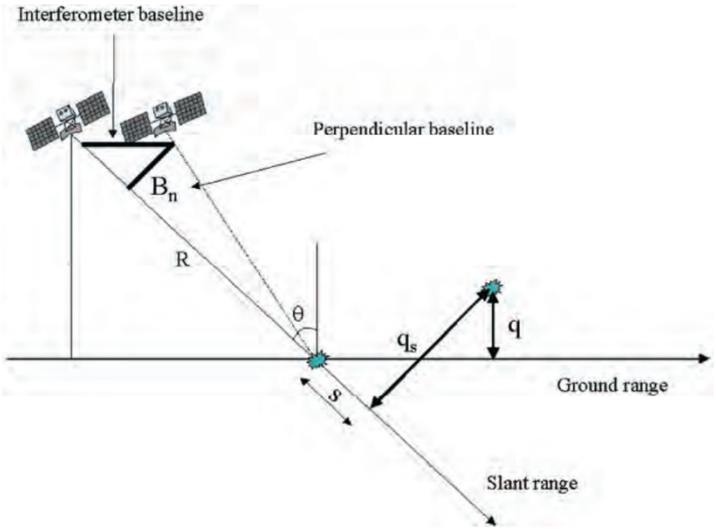


Figura 14: Parámetros de geometría de un sistema interferométrico satelital [25].

Otro parámetro a tener en cuenta al analizar la geometría de un par o más de unidad de par de imágenes adquiridas, aunque no sea visible, es la resolución temporal que estas tengan entre ellas, llamada línea de base temporal, es decir, el tiempo de revisita entre ambas imágenes. Si la línea de base temporal entre la imagen maestra y esclava es demasiado grande, puede afectar negativamente en los resultados de los interferogramas, llegando a ser inservibles.

2.8.3 Medición de la altitud del terreno a través de la fase interferométrica.

El interferograma SAR se genera por multiplicación cruzada, píxel por píxel, de la primera imagen por el conjugado complejo de la segunda, obteniendo como resultado una tercera imagen que también es compleja. Por lo tanto, la amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen multiplicada por la segunda, mientras que su fase, es decir, la fase interferométrica, es la diferencia de fase entre las dos imágenes.

Así mismo, la fase interferométrica se relaciona con dos variables, la elevación propia del terreno y la imagen compleja, realizada entre la diferencia de fase entre dos imágenes SAR. La fase depende de la distancia que haya entre el sensor y la superficie.

Un punto estable que se encuentre en el terreno y no cambie en el tiempo, no afectará a la fase interferométrica, ya que al hacer la diferencia entre ambas imágenes SAR este punto invariable no es representado. Esto quiere decir que cualquier posible contribución de fase introducida por dispersores puntuales no afecta a la fase interferométrica ya que es anulada por la diferencia.

Al crearse el interferograma de esta nueva imagen, la diferencia de fase puede poseer contribuciones distintas, por ejemplo, el ”flat” que es la contribución de la curvatura terrestre, la contribución del desplazamiento propio de la deformación en la superficie terrestre, la contribución de elevación topográfica o la contribución atmosférica en la que viajan las señales. Si las imágenes SAR son capturadas en momentos diferentes, se debe tener en cuenta la diferencia entre la composición atmosférica de ambas, lo que puede afectar en las fases resultantes, tanto en desplazamiento como en elevación. Se usa un modelo digital de elevación (DEM) del terreno para corregir la fase correspondiente con este ámbito.

Además, hay que tener en cuenta las posibles fuentes de ruidos que interfieren con la señal, ya sean debidos a la separación de la línea base, la correlación temporal, el ruido térmico o errores de enfoque en los datos brutos.

Esta nueva imagen creada posee un interferograma con la fase asociada a la topografía superficial, representando con ciclos de color que equivalen al radio de la longitud de onda correspondiente al sensor que se está utilizando. Estos ciclos de color se corresponden a los ciclos de fase con los valores en el intervalo de [–π a π] radianes. A esta etapa de generación del interferograma se le llama interferograma envuelto (wrapped phase).

En la Figura 15 se aprecia el aspecto de la fase enrollada y sin desenrollar. Para obtener el producto que se espera, la fase debe encontrarse desenrollada para poder apreciar las distancias creadas por una posible deformación en el terreno.

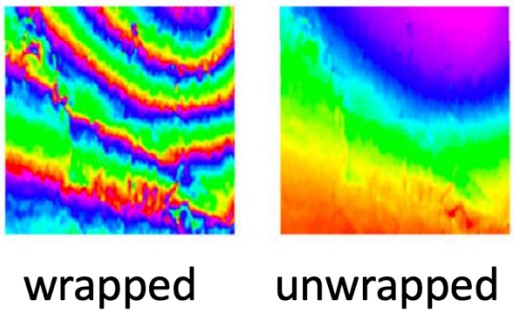


Figura 15: Diferencia entre la fase sin desarrollar y desarrollada.

La deformación sobre la superficie se interpreta con la orientación del color de los ciclos. Un ciclo que va del azul a rojo, es indicativo de que la distancia entre el terreno y el sensor ha disminuido, es decir, el terreno se acercó al sensor. Si el ciclo va del color rojo al azul, es indicativo de que aumentó la distancia entre el terreno y el sensor, es decir, el terreno se alejó, lo que puede indicar una subsidencia o deformación asociada a algún fenómeno parecido.

2.8.4 Mapas de coherencia interferométricos.

Es posible estimar el ruido de fase a partir de los interferogramas de las imágenes SAR gracias a la coherencia local o coeficiente de correlación compleja [γ]. Esta coherencia se calcula mediante el coeficiente de correlación de la fase interferométrica [25].

La coherencia local es el coeficiente de correlación cruzada del par de imágenes SAR estimada sobre una pequeña ventana de pocos píxeles en rango y azimut de la imagen maestra con una o más imágenes esclavas dentro del procesamiento interferométrico [26].

Cuando un DEM está disponible, es posible llegar a una descripción precisa del factor de corrección de la pendiente, mejorando así la precisión de la estimación de coherencia. Si el DEM no está disponible, es posible derivar el factor de corrección del propio interferograma o utilizar una aproximación en la que la fase se describa mediante una función constante, lineal, cuadrática o de orden superior sobre la ventana de estimación.

El valor de coherencia varía de 0, donde la fase interferométrica sería únicamente ruido, a 1, dónde habría ausencia total de ruido. Normalmente, las zonas con mayor vegetación o zonas acuáticas con oleaje muestran valores de coherencia menores a zonas llanas o inamovibles a lo largo del tiempo.

En la Figura 16 se aprecia la coherencia de una imagen procesada en la zona de estudio, correspondiente al día 4 de Julio de 2021, antes de la erupción volcánica, teniendo en cuenta que la imagen master con la que se ha comparado corresponde al 20 de septiembre de ese mismo año.

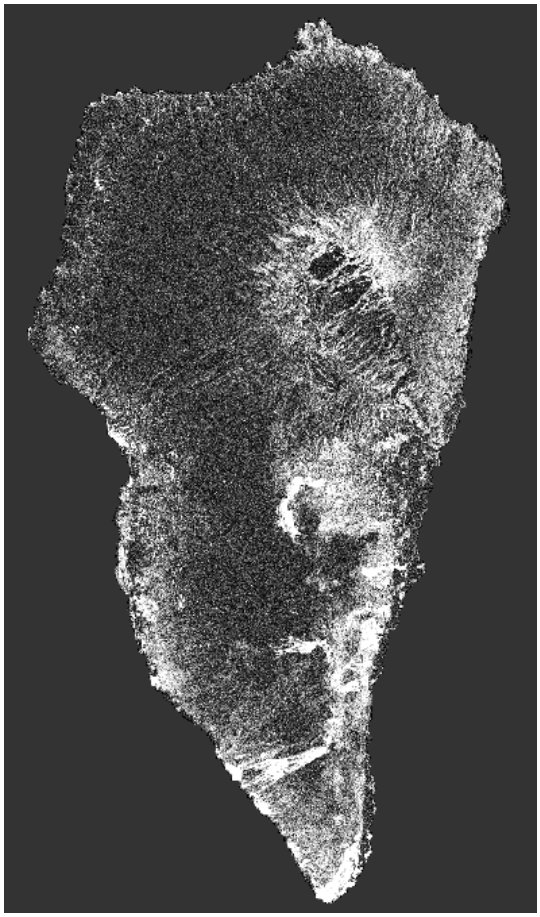


Figura 16: Imagen de coherencia en la isla de la Palma.

Se observa que estos mapas de coherencia son fácilmente interpretables, representados en una escala de gris dónde los valores más claros corresponden a zonas con menor ruido, a valores más oscuros, dónde hay poca correlación en la coherencia, y por tanto mayor ruido. Las zonas en las que no existe correlación entre imágenes saldrán totalmente oscuras, y no serán utilizables para un procesamiento interferométrico.

De este modo, la coherencia es útil para estimar la precisión de fase interferométrica, además de ser una posible herramienta de clasificación en la zona de estudio capturada por las imágenes SAR [26].

2.8.5 Tipos de ruido en la fase interferométrica. Decorrelación.

Cuando el sensor SAR recibe la señal mandada, se producen una serie de ruidos además del atmosférico, llamadas fases de decorrelación. La diversidad de adquisición implica intrínsecamente un nivel de desajuste entre las dos imágenes, lo que normalmente se denomina descorrelación. Además de las contribuciones de descorrelación que dependen de la geometría de adquisición y los parámetros del sistema (como la sensibilidad limitada, las ambigüedades de SAR, el cambio mutuo de los espectros Doppler y el ancho de banda), la contribución de descorrelación dominante en la interferometría está relacionada con la capacidad de ondas de radar para penetrar en objetivos volumétricos, como vegetación y áreas cubiertas de nieve o hielo.

En estos casos, la señal retrodispersada registrada se compone de la suma coherente de múltiples reflejos del volumen considerado que, si se ilumina desde posiciones de satélite ligeramente diferentes, puede conducir a una cierta cantidad de descorrelación de volumen. De manera análoga, la interferometría a lo largo de la pista sufre una descorrelación temporal causada por pequeños cambios que ocurren durante el intervalo de tiempo entre las dos adquisiciones [27].

De manera que, las contribuciones más importantes de ruido a esta fase que tienen influencia en el procesado interferométrico son las siguientes:

- Decorrelación volumétrica: sucede cuando la onda radar incide o penetra en el medio de dispersión, creando así una dependencia directa sobre la superficie del objeto y de la longitud de onda de la señal. Está causada por la presencia de múltiples dispersores dentro de una sola celda de resolución, generando así un aumento de la incertidumbre de fase interferométrica, ya que según la resolución del sensor, cada celda suele contener más de un tipo de superficie [28].

- Decorrelación térmica: está determinada según el ruido térmico presente en el instrumento interferométrico. Normalmente se supone que el ruido térmico tiene estadísticas gaussianas circulares. La descorrelación térmica está relacionada con la relación señal-ruido (SNR) de los dispersores iluminados por la señal del radar, dependiendo la varianza de la fase interferométrica de la SNR. Por lo tanto, los píxeles con alta SNR generalmente muestran una alta coherencia. Debido a que la magnitud de la señal SAR de vuelta varía según la respuesta de los dispersores, la descorrelación térmica también varía píxel por píxel [29].

- Decorrelación temporal: su principal causa son cambios en la superficie terrestre observada, normalmente mínimos y en un corto período de tiempo, como puede ser el movimiento de la vegetación u oleaje [30].

- Decorrelación geométrica: se trata de la desalineación espectral de los ecos recibidos a los diferentes ángulos de imagen y al propio ruido del receptor. Principalmente, es el resultado de una diferencia en el ángulo de incidencia entre dos imágenes en relación a la superficie terrestre [31].

2.8.6 Filtrado en interferogramas.

Filtrar un interferograma tiene como principal objetivo reducir el ruido de fase, reduciendo por tanto el número de residuos de este. Un residuo en el interferograma es un punto en el cual la suma de las diferencias de fase entre píxeles alrededor de un camino cerrado no es 0.

Los residuos se generan como pares, por ejemplo, el ruido térmico hace que se generen pares de residuos muy cercanos entre ellos. El fin del filtrado es reducir el ruido de fase, haciendo que el proceso de desenvolvimiento de fase (unwrapping), que se explicará más adelante, sea más simple y eficiente.

Una de las formas más comunes de filtrado, es el uso del “multi-look”, consistiendo en el análisis de varias imágenes complejas y hacer un promedio de estas. Esta visualización múltiple del interferograma reduce la desviación estándar de la fase interferométrica. Otras posibles formas de filtrar la fase interferométrica pueden ser el filtrado de paso de banda 2D o un filtro adaptado con función de filtrado basado en el espectro de las franjas locales [26].

2.8.7 Desenrollado de fase (Phase Unwrapping).

El desenrollado de fase, o phase unwrapping, trata de reconstruir la fase interferométrica original cuando se ha conseguido que el interferograma complejo contenga la información necesaria en valores proporcionales a 2π.

En procesos anteriores, se llevó a cabo el “flattening” o aplanamiento del interferograma, el cual proporciona una medida ambigua de la altitud relativa del terreno debido a la naturaleza cíclica 2π de la fase interferométrica. Dado que la fase interferométrica está envuelta en módulo 2π, se debe agregar un número entero de 2π para recuperar la diferencia de fase absoluta.

La variación de fase entre dos puntos en el interferograma aplanado proporciona una medida de la variación de altitud real, una vez eliminado cualquier número entero de altitudes de ambigüedad. Desenvolver la fase significa agregar un múltiplo correcto de 2π a la fase interferométrica de cada píxel para obtener valores de fase secuenciales en toda la imagen [25].

El proceso de sumar el múltiplo entero correcto de 2π a las franjas interferométricas se denomina desenvolvimiento de fase, llamado “unwrapping” [25].

En la Figura 17 se observa la diferencia entre la fase enrollada y desenrollada, dónde es apreciable cómo la fase enrollada queda entre valores de -π a π, es decir, 2π. Como las mediciones InSAR son relativas, el offset ($\Delta\varphi$) entre la fase desarrollada absoluta y relativa solo se puede resolver utilizando información adicional, normalmente mediciones GNSS [32].

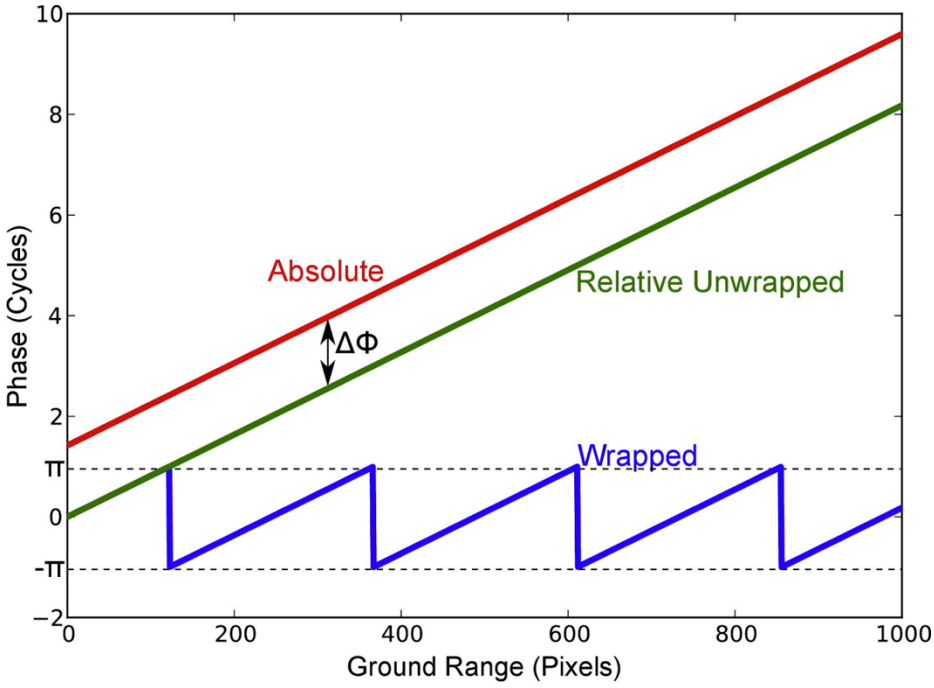


Figura 17: Representación del desenrollado de fase [32]

En la Figura 18 se observa la zona de trabajo de este proyecto antes y después de realizar el desenrollado de fase, aunque la explicación del proceso se realizará en

siguientes apartados. Como se observa, aún con la fase sin desarrollar se puede intuir dónde puede haber deformación, una vez desenrollada la fase se obtienen datos de desplazamientos reales.

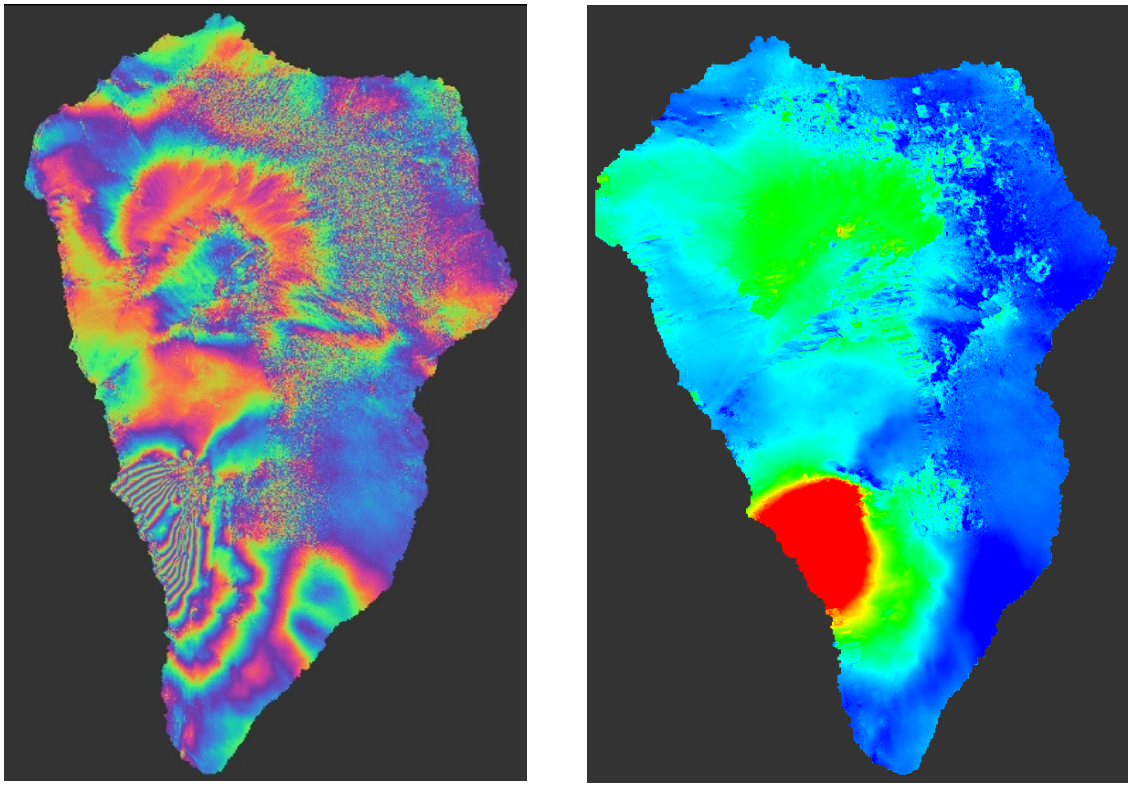


Figura 18: Antes (der.) y después (izq.) de desenrollar la fase en la zona de estudio.

Para que este proceso progrese correctamente, se asume que la superficie terrestre sobre la que se está trabajando tiene relativamente una morfología suavizada, sin saltos bruscos en altura, por lo que no deberían producirse saltos en el desenvolvimiento de la fase.

El desenvolvimiento de fase se basa, por tanto, en la suposición de una fase interferométrica suave entre muestras adyacentes. Aun así, hay saltos de fase que el algoritmo de cómputo tiene en cuenta, ya que pueden ocurrir por diferentes causas:

- Ruido de fase: puede ser causado por descorrelación temporal, desfase de correlación en la línea base o diferentes sombras de la imagen.
- Submuestreo de fase: en pendientes pronunciadas algunos gradientes de fase pueden llegar a exceder π.

- Discontinuidades de fase: la superposición y la deformación superficial discontinua, es decir, accidentes geográficos como pueden ser acantilados, fallas o glaciares, producen saltos de fase de múltiplos de 2π.

El método de unwrapping aplica varios algoritmos diferentes [33]:

- Recorte de residuos (Branch-cut) (tree) Goldstein. Basado en localizar circulaciones entre las fases de los píxeles vecinos para determinar si hay saltos de fase, y en el caso de haberlos, marcarlos generando árboles, los cuales pueden crecer y dejar aisladas zonas dónde sea imposible recuperar la fase.
- Mínimos cuadrados.
- Mínimos cuadrados ponderados.
- Síntesis de recorte de residuos, mínimos cuadrados y mínimos cuadrados ponderados, para obtener el interferograma en fase completa.
- Estimación de pendientes locales del suelo. Se preprocesa el interferograma para mejorar la estimación.
- Suavizados adaptativos recursivos. Se basan en suavizar el interferograma hasta convertirlo en un plano ausente de ruido o residuos, garantizando la existencia de un interferograma suavizado cuya diferencia con el original no consta de residuos.
- Filtro de Kalman.
- Minimización de diferencias ponderadas. Propuesto por Constantini, trata de minimizar diferencias entre vecinos de forma ponderada, aprovechando técnicas de búsqueda del camino más corto en una red [33].

La calidad de este proceso depende directamente con la calidad de la coherencia del mismo, ya que en las áreas que presenten mayor coherencia se obtienen mejores resultados. Los principales posibles problemas en el desenrollo de fase se producen si el interferograma con el que se trabaja presenta discontinuidades o decorrelaciones.

El procesado de “unwrapping” es el más complejo en el procesado de InSAR.

2.9 Interferometría diferencial con radar de apertura sintética (DInSAR).

La técnica DInSAR se basa en el tratamiento y análisis de la información obtenida mediante imágenes SAR. Consideramos diferentes etapas en el desarrollo de la técnica DInSAR: la adquisición de los datos, la elaboración interferométrica y la generación de mapas de subsidencias [34].

Al igual que la técnica InSAR, con este método también se trabaja procesando y analizando imágenes de Radar de Apertura Sinestésica (SAR). Se fundamenta en la detección de pequeñas variaciones de altitud a partir del cálculo de la diferencia de fase de pares de imágenes radar sobre una misma área de estudio [35].

Hacer distinción entre interferometría diferencial y convencional no es lo más preciso, ya que ambas son técnicas intrínsecamente diferenciales. Como se ha comentado anteriormente, las imágenes SAR son complejas ya que contienen dos componentes por píxel, a partir de las cuales se puede derivar la señal de amplitud y fase. Las técnicas interferométricas para la detección y el seguimiento de la deformación del suelo explotan la información contenida en la fase de radar de al menos dos imágenes SAR complejas adquiridas en diferentes épocas sobre la misma zona, formando un interferograma. Este es el concepto básico de la Interferometría Diferencial (DInSAR). Por este motivo, la adquisición repetida de imágenes sobre un área determinada generalmente se realiza utilizando el mismo sensor [36].

En la Figura 19 se observa el principio básico de esta técnica, en la que se observa una misma área tras un periodo de tiempo para estudiar la posible deformación R .

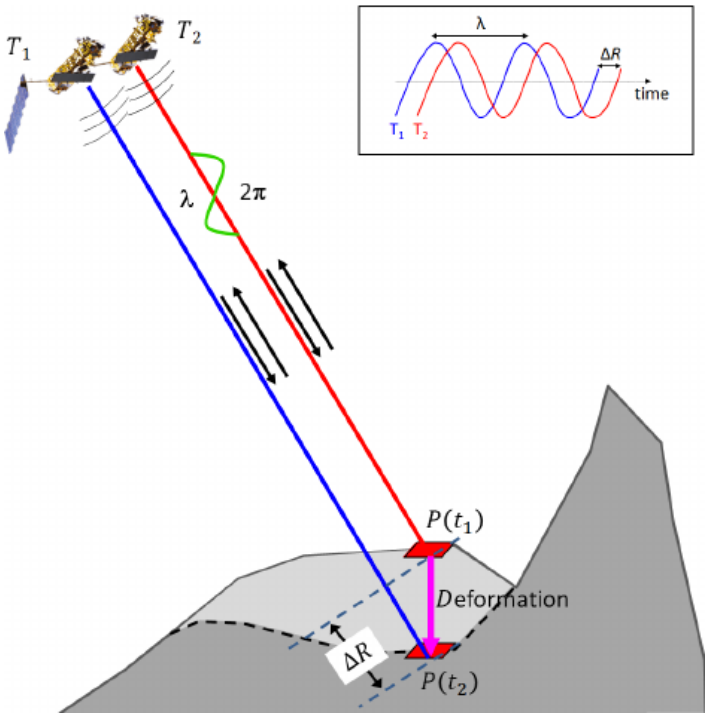


Figura 19: Concepto básico de la técnica DInSAR [36]

El sensor adquiere una primera imagen SAR en el tiempo [t0], midiendo la fase [ΦM] de las microondas. El primer satélite y la imagen correspondiente generalmente se denominan maestro, indicado por M. Si la tierra está sujeta a un desplazamiento D(t), el punto P se mueve a P′. Los sensores adquieren una segunda imagen SAR en el tiempo [t], midiendo la fase [ΦS]. El segundo satélite generalmente se conoce como el esclavo, indicado por S. Las técnicas DInSAR explotan la diferencia de fase Φint = ΦM− ΦS, llamada fase interferométrica, que contiene información del desplazamiento terrestre, recuperando así finalmente el desplazamiento terrestre D(t) [37].

El desplazamiento se calcula diferenciando la componente de fase de las dos imágenes SAR corregistradas, una vez se haya eliminado el efecto topográfico, el cual se puede descartar si son conocidas las órbitas y hay a disposición un modelo digital de elevaciones (MDE).

La mayor diferencia entre usar la técnica InSAR o DInSAR consta en que con el método InSAR se usa principalmente para la generación de MDE, es decir, para

convertir las diferencias de fase entre dos imágenes en alturas relativas. Para obtener alturas absolutas se requiere un MDE de referencia.

La “D” en DInSAR significa "Diferencial", lo que indica que se utiliza para observar los cambios de fase entre dos imágenes en un tiempo determinado. Se utiliza para monitorear el hundimientos y elevaciones o deformaciones laterales. Para ser independiente de la topografía, la fase topográfica se simula utilizando un DEM de referencia y posteriormente se elimina del interferograma.

Las principales ventajas de este método son las siguientes [38]:

- Datos disponibles desde 1992.
- Monitoreo rentable de una gran cantidad de permafrost de movimiento lento en un área amplia.
- El área monitoreada puede ser inaccesible.
- Posibilidad de monitoreo en todo momento/clima.
- Fácil comparación de movimientos de masas de taludes con áreas estables.
- A parte del caso en el que se utilizan reflectores de esquina no se necesita ningún dispositivo de campo.
- Desplazamientos medidos de alta densidad.
- Dado que los satélites de radar pasan sobre la misma área una vez cada 11 días (promedio); pero con CSK (4 días) no estamos muy lejos del tiempo real.
- El software de interferometría diferencial está disponible de forma gratuita.

Las desventajas de esta técnica, por lo contrario, se pueden resumir en las siguientes [38]:

- Solo se pueden medir los desplazamientos a lo largo de la línea de visión (LOS) en 2D entre el satélite y el campo. Para mejorar el resultado se deben procesar datos en ambos sentidos de adquisición satelital, tanto ascendente como descendente, de esta forma descomponer los vectores en ambas imágenes y encontrar el desplazamiento en la dirección vertical real.
- La técnica no es aplicable en áreas cubiertas de vegetación, ya que son zonas con una coherencia no apta para el procesamiento.

- Los cambios temporales en la naturaleza física o geométrica del suelo conducen a una descorrelación en los ecos de radar.
- La variación de las condiciones atmosféricas en la parte baja de la atmósfera (troposfera) entre distintas adquisiciones modifica el tiempo de retardo de la señal del radar, provocando una rotación de la fase de la señal del radar.
- La monitorización en tiempo real no es posible.
- El paso de filtrado y el paso de desenvolvimiento de fase son sensibles y pueden inducir a incongruencias con la realidad del fenómeno monitorizado.
- El procesamiento de datos es bastante largo y complejo.
- Es necesario un software altamente específico.

2.10 Series temporales.

A partir de datos InSAR se pueden analizar series temporales, en las cuales se observan los diferentes desplazamientos de la superficie terrestre en un periodo determinado de tiempo. Como es el caso de este estudio, es una herramienta útil para los campos en las ciencias de la tierra [39].

Existen diferentes algoritmos para analizar dichas series temporales, siendo los más conocidos y utilizados el llamado PS (Persisten Scattering) y SBAS (Small Baseline Subset). Estos algoritmos detectan los desplazamientos y deformaciones en la superficie terrestre utilizando imágenes del misma área. Son de gran utilidad a la hora de eliminar efectos atmosféricos, problemas de decorrelación o en la línea de base, además de aumentar la coherencia de los datos. Tanto PS como SBAS necesitan como datos una serie de imágenes SAR, adquiridas con geometrías compatibles.

La técnica PS (Persistent Scatterers) procede a identificar reflectores puntuales persistentes, es decir, objetos o estructuras inamovibles en el tiempo las cuales presentan un alto nivel de coherencia entre imágenes, de esta forma se obtiene una estimación de desplazamiento puntual estable. La mayor limitación de este algoritmo se da al estar todos los interferogramas relacionados con la imagen maestra, ya que todos se generan a partir de esta, por lo que se produce heterogeneidad en la técnica a la hora de identificar objetos sobre zonas con diferentes coberturas de suelo [40].

La técnica SBAS (Small Baseline Subset) combina imágenes para disminuir así los efectos provocados por la decorrelación espacial y temporal. Permite observar la evolución del desplazamiento en el tiempo, por lo que los diferentes interferogramas deben estar conectados temporalmente [41].

3. Materiales.

3.1 Imágenes satelitales y su adquisición.

3.1.1 Características de las imágenes utilizadas para el estudio.

Para este estudio se utilizan imágenes satelitales, concretamente Sentinel-1A con tipos de productos SLC (Single Look Complex) y GRD (Ground Range Detected), dependiendo del producto a estudiar, además de imágenes Sentinel-2A, siendo el tipo de producto MSI (Multi Spectral Instrument).

Las imágenes correspondientes a Sentinel-1 son imágenes radar o SAR, con las que se llevarán a cabo los estudios interferométricos correspondientes y un estudio de la velocidad de las coladas de lava a lo largo de la evolución temporal de la actividad volcánica.

Las imágenes obtenidas a partir de Sentinel-2 se utilizan para monitorizar el avance de las coladas de lava una vez el volcán entra en erupción. Estas imágenes Sentinel-2 son multiespectrales, las cuales capturan información dentro de rangos de longitud de onda específicos a través del espectro electromagnético. Poseen una serie de bandas espectrales con datos diferentes que permite obtener información adicional que el ojo humano no captura con sus receptores rojo, verde y azul (RGB).

Sentinel-2 lleva una carga útil de instrumento óptico que muestra 13 bandas espectrales: cuatro bandas a 10 m, seis bandas a 20 m y tres bandas a 60 m de resolución espacial.

En total, para este trabajo se cuenta con 60 imágenes Sentinel-1A SLC; 30 ascendentes y otras 30 descendentes; 18 imágenes Sentinel-2A y por último 8 imágenes Sentinel-1A GRD; 4 en órbita ascendente y otras 4 en descendente. La trayectoria de órbita para las imágenes radar ascendentes es 60, mientras que para el descendente es 169.

El periodo temporal que cubren las imágenes radar consta desde principios de julio de 2021 hasta principios de enero de 2022 para las imágenes radar, mientras que para las imágenes multiespectrales se obtienen los datos desde el 19 de septiembre de 2021, cuando entra en erupción el volcán de Cumbre Vieja, hasta diciembre de ese mismo año cuando cesa la actividad volcánica.

El nivel A en el satélite Sentinel-2 indica que el producto tiene una reflectancia multiespectral referido al fondo de la atmósfera, está orto rectificada y geocodificada a UTM, además de contar con mapas de espesor óptico de aerosoles (AOT), mapas de vapor de agua (WV), mapas de clasificación de escena y los propios datos indicadores de la calidad [42].

Los productos radar SLC son imágenes en el rango inclinado por plano de imágenes de azimut, en el plano de imagen de adquisición de datos satelitales. Cada píxel de la imagen está representado por un valor de magnitud complejo (I y Q) y, por lo tanto, contiene información tanto de amplitud como de fase. Cada valor de I y Q es de 16 bits por píxel. El procesamiento de todos los productos SLC da como resultado una vista única en cada dimensión utilizando todo el ancho de banda de señal disponible. Las imágenes se georeferencian utilizando datos de órbita y actitud del satélite. Las imágenes SLC se producen en una geometría Doppler cero. Esta convención es común con los productos estándar de rango inclinado disponibles de otros sensores SAR [43].

El modo IW (Interferometric Wide swath) es el principal modo de obtención de imágenes sobre tierra. Para incrementar el ancho de la escena observada el barrido utiliza 3 franjas paralelas que se van consiguiendo al dirigir la antena a tres posiciones across-track; a esto se llama Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR), esta característica está implementada para que se pueda procesar interferométricamente. El resultado es un ancho de escena de 250 km con una resolución (en SLC) de 5 m x 20 m [44].

El producto IW SLC por lo tanto contiene una imagen por subfranja, por canal de polarización, para un total de tres o seis imágenes. Cada imagen de subfranja consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se procesa como una imagen SLC separada. Las imágenes de ráfaga complejas enfocadas individualmente se incluyen, en orden de azimut y tiempo, en una sola imagen de subfranja, con una demarcación de relleno negro en el medio. Debido a la apariencia de azimut natural inherente a los datos, el área de suelo de la imagen de las ráfagas adyacentes sólo se superpondrá marginalmente en azimut, lo suficiente como para proporcionar una cobertura continua del suelo. Las imágenes de todas las ráfagas en todas las subfranjas de un producto IW SLC se vuelven a muestrear en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en rango y azimut. El remuestreo a una cuadrícula común elimina la necesidad de interpolación adicional en caso de que, en etapas de procesamiento posteriores, las ráfagas se fusionen para crear una imagen detectada de rango de tierra contigua [43].

3.1.2 Productos adquiridos.

Las imágenes mencionadas anteriormente están proporcionadas por la ESA (European Space Agency), la cual está desarrollando una familia de satélites, en concreto satélites Sentinel. El programa Copernicus trabaja con dichos productos para la monitorización de la superficie terrestre. Ahora mismo, hay dos constelaciones completas de satélites en órbita.

Por medio del portal Copernicus Open Access Hub, se puede filtrar y seleccionar las imágenes satelitales necesarias, tanto temporal como espacialmente, además del tipo de producto de cada una.

En las Tablas 1 a 5 se observan todas las imágenes adquiridas y sus respectivas características:

- Productos Sentinel-1A SLC ascendente:

FECHA	NOMBRE
2021-07-04	S1A_IW_SLC__1SDV_20210704T191346_20210704T191416_038632_048EFD_C338
2021-07-10	S1B_IW_SLC__1SDV_20210710T191304_20210710T191334_027736_034F61_7237
2021-07-16	S1A_IW_SLC__1SDV_20210716T191347_20210716T191417_038807_04943B_E132
2021-07-22	S1B_IW_SLC__1SDV_20210722T191305_20210722T191335_027911_03549B_5144
2021-07-28	S1A_IW_SLC__1SDV_20210728T191347_20210728T191417_038982_049973_D9DF
2021-08-03	S1B_IW_SLC__1SDV_20210803T191306_20210803T191336_028086_0359B7_D4F8
2021-08-09	S1A_IW_SLC__1SDV_20210809T191348_20210809T191418_039157_049F1F_4B6F
2021-08-15	S1B_IW_SLC__1SDV_20210815T191307_20210815T191336_028261_035F26_6877
2021-08-21	S1A_IW_SLC__1SDV_20210821T191349_20210821T191419_039332_04A529_6EC7
2021-08-27	S1B_IW_SLC__1SDV_20210827T191307_20210827T191337_028436_03649A_C341
2021-09-02	S1A_IW_SLC__1SDV_20210902T191349_20210902T191419_039507_04AB1F_A0E1
2021-09-08	S1B_IW_SLC__1SDV_20210908T191308_20210908T191338_028611_036A16_4F4E
2021-09-14	S1A_IW_SLC__1SDV_20210914T191350_20210914T191420_039682_04B134_7407
2021-09-20	S1B_IW_SLC__1SDV_20210920T191308_20210920T191338_028786_036F7A_A52D
2021-09-26	S1A_IW_SLC__1SDV_20210926T191350_20210926T191420_039857_04B716_885D
2021-10-02	S1B_IW_SLC__1SDV_20211002T191309_20211002T191339_028961_0374BA_9B95
2021-10-08	S1A_IW_SLC__1SDV_20211008T191350_20211008T191420_040032_04BD28_CAE8
2021-10-14	S1B_IW_SLC__1SDV_20211014T191309_20211014T191338_029136_037A16_C822
2021-10-20	S1A_IW_SLC__1SDV_20211020T191351_20211020T191420_040207_04C343_1935
2021-10-26	S1B_IW_SLC__1SDV_20211026T191309_20211026T191338_029311_037F86_3548
2021-11-01	S1A_IW_SLC__1SDV_20211101T191350_20211101T191420_040382_04C94F_0F93
2021-11-07	S1B_IW_SLC__1SDV_20211107T191308_20211107T191338_029486_0384DB_3E80
2021-11-13	S1A_IW_SLC__1SDV_20211113T191350_20211113T191420_040557_04CF6C_1DB8
2021-11-19	S1B_IW_SLC__1SDV_20211119T191308_20211119T191338_029661_038A42_E44B
2021-11-25	S1A_IW_SLC__1SDV_20211125T191350_20211125T191420_040732_04D575_5AAE
2021-12-01	S1B_IW_SLC__1SDV_20211201T191308_20211201T191337_029836_038FCC_EB12
2021-12-07	S1A_IW_SLC__1SDV_20211207T191349_20211207T191419_040907_04DB90_8A17
2021-12-13	S1B_IW_SLC__1SDV_20211213T191307_20211213T191337_030011_039546_573B
2021-12-19	S1A_IW_SLC__1SDV_20211219T191349_20211219T191419_041082_04E179_123E
2021-12-31	S1A_IW_SLC__1SDV_20211231T191348_20211231T191418_041257_04E743_2B9F

Tabla 1: Img. radar SLC ascendentes, Track 60, modo IW y polarización VV VH

- Productos Sentinel-1A SLC descendente:

FECHA	NOMBRE
2021-07-06	S1B_IW_SLC__1SDV_20210706T071016_20210706T071043_027670_034D67_1425
2021-07-12	S1A_IW_SLC__1SDV_20210712T071058_20210712T071125_038741_04924E_C5D9
2021-07-18	S1B_IW_SLC__1SDV_20210718T071017_20210718T071044_027845_03529A_F193
2021-07-24	S1A_IW_SLC__1SDV_20210724T071059_20210724T071126_038916_049789_A645
2021-07-30	S1B_IW_SLC__1SDV_20210730T071018_20210730T071045_028020_0357B9_6514
2021-08-05	S1A_IW_SLC__1SDV_20210805T071100_20210805T071127_039091_049CD6_075F
2021-08-11	S1B_IW_SLC__1SDV_20210811T071018_20210811T071045_028195_035D1B_10B9
2021-08-17	S1A_IW_SLC__1SDV_20210817T071100_20210817T071127_039266_04A2E6_D0FA
2021-08-23	S1B_IW_SLC__1SDV_20210823T071019_20210823T071046_028370_036294_07EE
2021-08-29	S1A_IW_SLC__1SDV_20210829T071101_20210829T071128_039441_04A8D9_46C5
2021-09-04	S1B_IW_SLC__1SDV_20210904T071019_20210904T071046_028545_03680D_CB52
2021-09-10	S1A_IW_SLC__1SDV_20210910T071102_20210910T071129_039616_04AEEC_3EAF
2021-09-16	S1B_IW_SLC__1SDV_20210916T071020_20210916T071047_028720_036D6C_433C
2021-09-22	S1A_IW_SLC__1SDV_20210922T071102_20210922T071129_039791_04B4D6_984F
2021-09-28	S1B_IW_SLC__1SDV_20210928T071020_20210928T071047_028895_0372CA_0EAF
2021-10-04	S1A_IW_SLC__1SDV_20211004T071102_20211004T071129_039966_04BAEE_F7D7
2021-10-10	S1B_IW_SLC__1SDV_20211010T071020_20211010T071047_029070_037809_D08A
2021-10-16	S1A_IW_SLC__1SDV_20211016T071102_20211016T071129_040141_04C0FA_513F
2021-10-22	S1B_IW_SLC__1SDV_20211022T071021_20211022T071048_029245_037D79_AB4B
2021-10-28	S1A_IW_SLC__1SDV_20211028T071102_20211028T071129_040316_04C70E_97A9
2021-11-03	S1B_IW_SLC__1SDV_20211103T071020_20211103T071047_029420_0382DC_9E2F
2021-11-09	S1A_IW_SLC__1SDV_20211109T071102_20211109T071129_040491_04CD33_79B6
2021-11-15	S1B_IW_SLC__1SDV_20211115T071020_20211115T071047_029595_03882D_D050
2021-11-21	S1A_IW_SLC__1SDV_20211121T071102_20211121T071129_040666_04D335_9816
2021-11-27	S1B_IW_SLC__1SDV_20211127T071020_20211127T071047_029770_038DA5_6DD3
2021-12-03	S1A_IW_SLC__1SDV_20211203T071101_20211203T071128_040841_04D94F_EBB1
2021-12-09	S1B_IW_SLC__1SDV_20211209T071019_20211209T071046_029945_03932E_1BF4
2021-12-15	S1A_IW_SLC__1SDV_20211215T071101_20211215T071128_041016_04DF4E_8E4B
2021-12-21	S1B_IW_SLC__1SDV_20211221T071019_20211221T071046_030120_0398B7_EDAB
2021-12-27	S1A_IW_SLC__1SDV_20211227T071100_20211227T071127_041191_04E50D_3A24

Tabla 2: Img. radar SLC descendentes, Track 169, modo IW y polarización VV VH.

- Productos Sentinel-1A GRD ascendente:

FECHA	NOMBRE
2021-09-02	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210902T191349_20210902T191419_039507_04AB1F_4550
2021-10-08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211008T191350_20211008T191420_040032_04BD28_25D2
2021-11-07	S1B_IW_GRDH_1SDV_20211107T191308_20211107T191338_029486_0384DB_2B55
2021-12-01	S1B_IW_GRDH_1SDV_20211201T191308_20211201T191337_029836_038FCC_2CFB
2022-01-12	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220112T191348_20220112T191415_041432_04ED32_3CF1

Table 3: Img. radar GRD ascendentes, Track 60, modo IW y polarización VV VH.

- Productos Sentinel-1A GRD descendente:

FECHA	NOMBRE
2021-09-04	S1B_IW_GRDH_1SDV_20210904T071021_20210904T071046_028545_03680D_1DC6
2021-10-10	S1B_IW_GRDH_1SDV_20211010T071022_20211010T071047_029070_037809_14AC
2021-11-09	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211109T071103_20211109T071128_040491_04CD33_39E3
2021-12-03	S1A_IW_GRDH_1SDV_20211203T071103_20211203T071128_040841_04D94F_09DC
2022-01-08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20220108T071101_20220108T071126_041366_04EB0A_2AFA

Table 4: Img. radar GRD descendentes, Track 169, modo IW y polarización VV VH.

- Productos Sentinel-2A:

FECHA	NOMBRE
2021-09-15	S2B_MSIL2A_20210915T120319_N0301_R023_T28RBS_20210915T144343
2021-09-20	S2A_MSIL2A_20210920T120331_N0301_R023_T28RBS_20210920T173649
2021-09-25	S2B_MSIL2A_20210925T120319_N0301_R023_T28RBS_20210925T160654
2021-09-30	S2A_MSIL2A_20210930T120331_N0301_R023_T28RBS_20210930T142131
2021-10-05	S2B_MSIL2A_20211005T120329_N0301_R023_T28RBS_20211005T175108
2021-10-10	S2A_MSIL2A_20211010T120331_N0301_R023_T28RBS_20211010T143405
2021-10-15	S2B_MSIL2A_20211015T120329_N0301_R023_T28RBS_20211015T144238
2021-10-20	S2A_MSIL2A_20211020T120331_N0301_R023_T28RBS_20211020T141443
2021-10-25	S2B_MSIL2A_20211025T120329_N0301_R023_T28RBS_20211025T143724
2021-10-30	S2A_MSIL2A_20211030T120331_N0301_R023_T28RBS_20211030T140901
2021-11-09	S2A_MSIL2A_20211109T120331_N0301_R023_T28RBS_20211109T140523
2021-11-14	S2B_MSIL2A_20211114T120319_N0301_R023_T28RBS_20211114T124834
2021-11-19	S2A_MSIL2A_20211119T120321_N0301_R023_T28RBS_20211119T135634
2021-11-29	S2A_MSIL2A_20211129T120321_N0301_R023_T28RBS_20211129T135849
2021-12-04	S2B_MSIL2A_20211204T120319_N0301_R023_T28RBS_20211204T143552
2021-12-09	S2A_MSIL2A_20211209T120321_N0301_R023_T28RBS_20211209T135953
2021-12-14	S2B_MSIL2A_20211214T120319_N0301_R023_T28RBS_20211214T140950
2022-01-03	S2B_MSIL2A_20220103T120319_N0301_R023_T28RBS_20220103T143548

Tabla 5: Imágenes multiespectrales tipo S2MSI2A.

3.2 Órbitas precisas.

La información de precisión sobre la posición satelital en su correspondiente órbita en el momento de captura de la imagen forma parte de los metadatos de dichas imágenes satélite, por lo que es información que se descarga al mismo tiempo que la imagen como tal, y que posteriormente el software encargado del procesamiento puede extraer automáticamente.

Estos archivos con la información de órbita precisa contienen vectores de posición cada 10 segundos durante las 24 horas del día. La principal desventaja es que este tipo de información debe procesarse y no está disponible durante 20 días después de la toma de la imagen. En el caso de este estudio no afecta este inconveniente, ya que los datos requeridos corresponden a años anteriores.

3.3 Datos IGN.

El IGN (Instituto Geográfico Nacional) cuenta con una base de datos importante sobre la topografía del país que puede ser de utilidad. En este caso se ha utilizado tan solo para obtener información sobre la extensión ocupada por las coladas de lava una vez terminó la erupción, usada para contrastar los cálculos llevados a cabo en este estudio.

Del IGN, por tanto, se obtiene una capa vectorial georreferenciada del área ocupada por las coladas de lava, ya que esta organización cuenta con un abanico de datos de gran utilidad para sucesos geológicos de importancia, como es el caso de erupciones volcánicas o terremotos.

3.4 Software empleado.

En este estudio se utilizan principalmente dos softwares libres para el procesamiento de las imágenes adquiridas:

- SNAP: es el principal software utilizado para el estudio, tanto para procesar tanto las imágenes radar como multiespectrales. SNAP (Sentinel Application Platform) está diseñado para procesar y analizar imágenes satelitales, será dónde se lleve a cabo los cálculos más pesados interferométricos.

- SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping): es un software específico para desenrollar imágenes interferométricas SAR a través de Linux.

- QGIS: software libre que permite al usuario crear, editar, visualizar o analizar datos geográficos. QGIS (Quantum Geographic Information System) será utilizado para la visualización de los productos finales en forma de mapas. La presentación final de los productos se genera con este software, el cual permite utilizar diferentes paletas de colores, puede vectorizar datos ráster y realizar cálculos con los mismos.

4. Metodología de procesamiento.

En esta sección se procede a desarrollar la metodología utilizada para el procesamiento de cada producto que ha sido descargado, imágenes tanto radar como multiespectrales, teniendo en cuenta que muchos de los procesos de cálculo son internalizados por los softwares empleados, principalmente por SNAP.

4.1 Procesamiento de imágenes Sentinel-1 SLC.

En este apartado se llevará a cabo la explicación del procesamiento de las imágenes radar SLC con las que se estudiará la deformación en la isla de la Palma antes y después de la erupción volcánica. En este proceso se utilizará el método InSAR para crear interferogramas entre la imagen maestra y las correspondientes esclavas.

4.1.1 Selección y descarga de imágenes.

Como se ha mencionado anteriormente, se cuenta con 60 imágenes en total, 30 en ascendente y otras 30 en descendente. A la hora de procesar esta información, no hay cambios en el procedimiento entre estas dos geometrías de imagen.

Al ser imágenes radar, no hay problema en la selección de estas, ya que el estado atmosférico no afecta al resultado, por lo que se seleccionan todas las imágenes disponibles independientemente de las nubosidades, tanto en ascendente como descendente desde el 1 de julio hasta el 31 de diciembre de 2021.

La zona de interés está completamente cubierta por las imágenes, apareciendo la isla en su totalidad sin necesidad de hacer un mosaico de dos imágenes radar independientes, lo que facilita tanto la descarga como el procesamiento de dichas

imágenes. En la Figura 20, correspondiente a la plataforma Open Access Hub de Copernicus, se observa la isla de la Palma, y como está totalmente abarcada por las dos coberturas de imágenes radar.



Figura 20: Representación cobertura imágenes radar ascendente y descendente.

El principal inconveniente del portal Open Access Hub es la imposibilidad de descargar más de 4 imágenes simultáneamente. A la hora de descargar las imágenes, teniendo en cuenta que el total de este procesado son 60, se instaló “Aria2”, una herramienta que podemos usar desde la línea de comandos de Linux, en concreto con una disposición Ubuntu. De esta manera, será posible descargar vía HTTP, FTP y BitTorrent desde la terminal de Linux de una manera automatizada.

Con esta herramienta, una vez se termina una descarga inicia la siguiente, sin necesidad de que el usuario esté presente para hacerlo manualmente. La página permite descargar un archivo con extensión “.meta”, que contiene todos los productos a descargar.

4.1.1.1 Selección imagen master.

Para realizar este estudio con la técnica InSAR, se debe seleccionar de las imágenes descargadas aquella que sirva de referencia, con la se compararán y se crearán los interferogramas correspondientes. Esta debe ser representativa a nivel del caso de estudio, al estar estudiando la deformación del terreno antes y después de la erupción en Cumbre Vieja, es óptimo seleccionar un día cercano a la fecha de erupción el 19 de septiembre de 2021.

En el caso de las imágenes ascendentes, se usa como maestra la imagen correspondiente al día 20-09-2021, mientras que para las imágenes descendentes se selecciona la fecha 22-09-2021, ambas las más cercanas al momento de la erupción de las disponibles.

Seleccionado este día, o por descarte la fecha más cercana posible, se observa la evolución de la deformación del terreno desde un punto de vista más objetivo. En las discusiones de este trabajo se explica de forma más detallada el proceso geológico procedente a esta erupción.

4.1.2 Procesado en SNAP

El flujo de trabajo seguido en SNAP para procesar las imágenes SAR y crear interferogramas y por último la elevación del terreno de la isla se puede observar en la Figura 21.

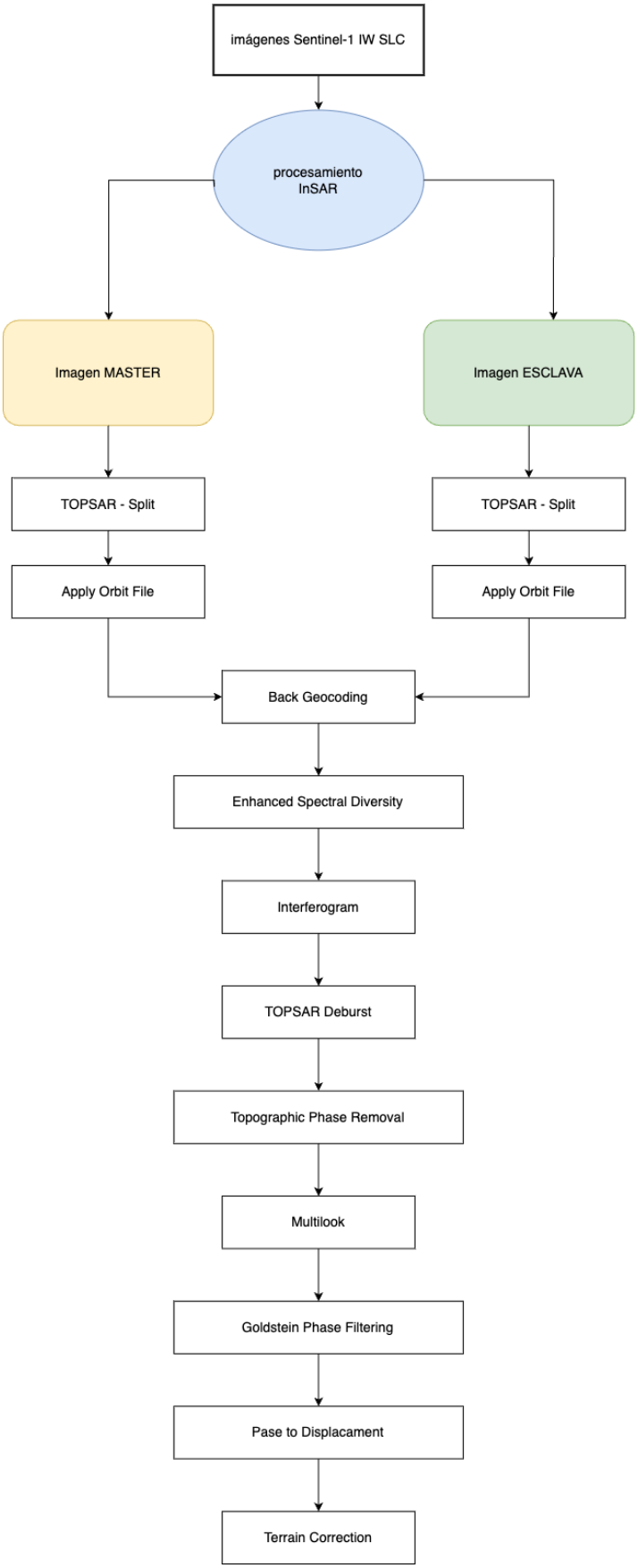


Figura 21: Flujo de trabajo completo InSAR

Dentro de este flujo de trabajo, en el software partiremos los procesos para una mayor rapidez en el procesado. En las Figuras 22 a 25 se aprecian los pasos en cada momento del procesamiento.

En la Figura 22 se llevan a cabo las primeras modificaciones a las imágenes descargadas. Este proceso se debe aplicar a todas las imágenes por igual, de esta forma se selecciona el área de trabajo y se aplican correcciones orbitales al producto.



Figura 22: Primer flujo trabajo SLC.

En el siguiente procesado, como se observa en la Figura 23, se selecciona tanto la imagen máster como una esclava y se coregistran, uniendo en un solo producto la información de ambas imágenes. Seguidamente, se aplican correcciones de acimut y rango a las imágenes esclavas respecto a la master con el operador Enhanced-Spectral-Diversity. Una vez están todas las correcciones aplicadas al producto, se lleva a cabo la creación del interferograma y se une cada imagen SLC, que hasta el momento se había procesado por separado, en una sola imagen, eliminando las zonas negras entre franjas.

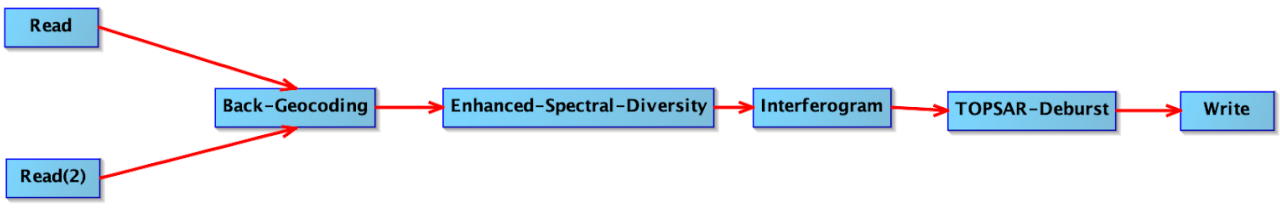


Figura 23: Segundo flujo de trabajo

En la Figura 24 se observa el siguiente paso llevado a cabo en el software, dónde se aplica un parámetro para eliminar la fase provocada por la topografía del terreno del área de estudio, se aplica un filtrado de ruido "speckle" para mejorar la interpretabilidad de las imágenes, además de otro filtrado para reducir los residuos y mejorar el desenvolvimiento de fase.



Figura 24: Tercer flujo de trabajo

Una vez aplicados todos estos parámetros, se realiza el desenvolvimiento de fase, el cual no se realiza directamente en el software de SNAP, sino en SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping), por lo que hay que exportar el producto que se ha generado tras este tratamiento**,** y una vez esté realizado dicho proceso, se vuelve a importar en el software.

Por último, se termina el procesado con SNAP tras realizar el flujo de trabajo que se muestra en la Figura 25**,** dónde en base al interferograma desenrollado se calcula a partir de la fase el desplazamiento en metros de las deformaciones ocurridas en el terreno, comparando en cada caso la imagen máster con las esclavas, y finalmente se aplica una corrección al terreno, para descartar las variaciones causadas por las alteraciones topográficas y la inclinación del sensor, corrigiendo así las distancias distorsionadas provocadas por los productos SAR.

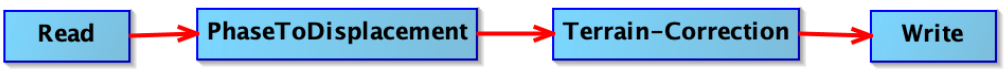


Figura 25: Cuarto flujo de trabajo

4.1.2.1 TOPSAR- Split.

Como se ha comentado anteriormente, las imágenes radar cuentan con diferentes franjas. El modo de franja interferométrica amplia (IW) captura tres subfranjas (IW1, IW2, IW3) utilizando la observación del terreno con 3 exploraciones progresivas SAR (TOPSAR), de modo que cada franja tiene un ángulo de incidencia diferente. Cada imagen de subfranja consta de una serie de ráfagas. El producto de entrada contiene 3 franjas IW y 10 ráfagas dentro de cada una de ellas.

Cada imagen radar descargada cuenta con 18 bandas, 3 bandas por cada polarización de cada franja. Teniendo en cuenta que las imágenes cuentan con una polarización VV y VH, poniendo como ejemplo la franja IW1:

- i_IW1_VH
- q_IW1_VH
- Intensity_IW1_VH
- i_IW1_VV
- q_IW1_VV
- Intensity_IW1_VV

Esta disposición se repite por tanto para las tres franjas que la imagen dispone, creando un total de 18 bandas. Según dónde se encuentre la zona de zona de estudio, se selecciona la franja correspondiente.

En la Figura 26 se distinguen las diferentes franjas, IW1, IW2, IW3 respectivamente sobre la cobertura de una imagen radar ascendente.



Figura 26: Visualización de las franjas IW1, IW2, IW3.

En la Figura 27 se observa el aspecto que tiene la imagen radar correspondiente a la franja IW2, dónde se encuentra la isla de la Palma, y, por tanto, la zona de estudio.

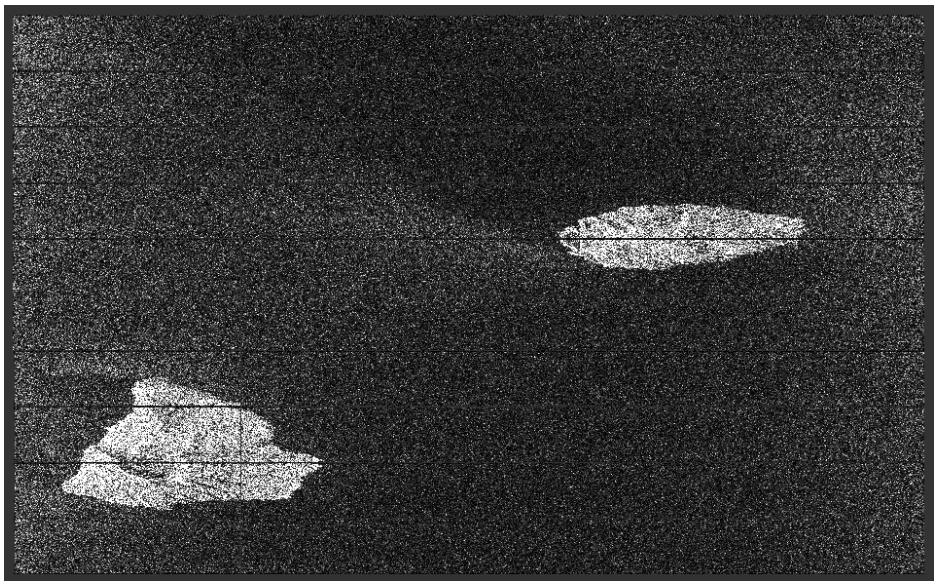


Figura 27: Imagen ascendente de intensidad IW2_VH (07-04-2021).

En este procesamiento se selecciona la franja y ráfagas de la zona de estudio, de esta manera se acota el espacio de trabajo y se optimiza la cantidad y tiempo de cómputo. También se selecciona con qué polarización se trabaja, en este caso, se opta por polarización VV. En el caso de este estudio, como se aprecia en la Figura 28, se utiliza la franja IW2, en concreto las ráfagas 7 a 10.

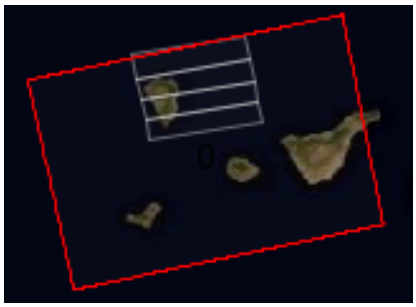


Figura 28: Selección de la franja IW y ráfagas correspondientes al área de trabajo.

Este recorte, o selección de parámetros, se aplica a todas las imágenes, tanto maestras como esclavas.

4.1.2.2 Orbitas Satelitales.

Una vez seleccionada la subfranja de la zona de estudio, se aplica una corrección orbital, corrigiendo los posibles errores causados por la falta de precisión en la posición del satélite en el momento de la captura de la imagen.

Las constelaciones satelitales no presentan órbitas estáticas, sino que experimentan variaciones ligeras que pueden incidir en la calidad de los productos generados. Por esta razón, es fundamental que cada imagen esté correctamente referenciada a la órbita del satélite que la capturó. En el caso específico del Sentinel-1, la órbita cuenta con un ciclo de 12 días y cada satélite completa 175 órbitas por ciclo, lo que permite obtener una imagen cada 6 días gracias a los dos satélites que integran la constelación.

No obstante, si se pretende llevar a cabo interferogramas con alta calidad, es imprescindible contar con una localización orbital lo más precisa posible. Esta es una limitación importante, ya que la precisión orbital más exacta tarda alrededor de 20 días en estar disponible después de la adquisición, y tiene una precisión típica de 1 cm. Si se requiere generar un interferograma de manera más inmediata, es posible emplear órbitas restituidas, que se generan 180 minutos después de la adquisición y se distribuyen con una precisión típica de 5 cm [45].

El software descarga automáticamente estas órbitas precisas, ya que las imágenes cumplen la condición de haber sido adquiridas por lo menos 20 días con anterioridad a la captura. El registro de las órbitas suministra una información precisa sobre la posición y velocidad del satélite en el sistema WGS84.

En la Figura 29 se aprecia el aspecto del producto tras realizar el primer flujo de trabajo sobre la imagen.

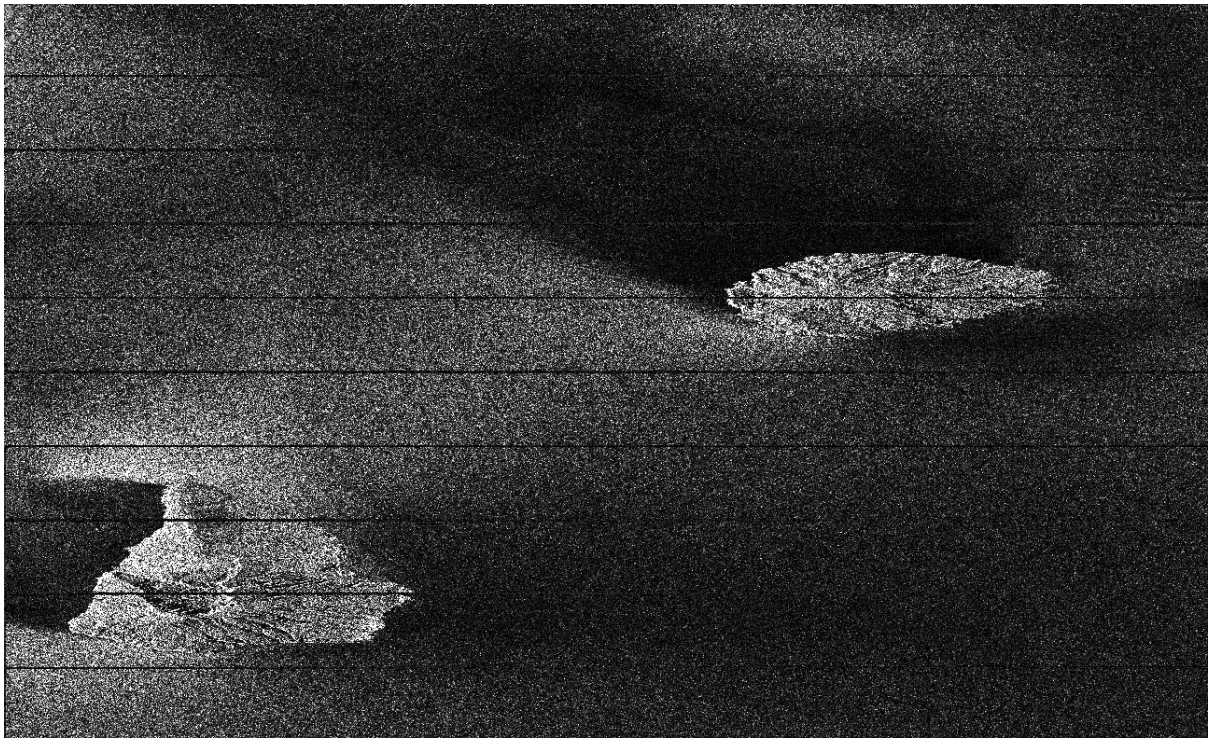


Figura 29: Banda coherencia tras el primer flujo de trabajo (04-07-2021)

4.1.2.3 Back- geocoding. Coregistro.

La función de “Back-Geocoding” registra conjuntamente dos productos divididos Sentinel-1 SLC (maestro y esclavo) de la misma subfranja utilizando las órbitas de los dos productos y un modelo de elevación digital (DEM), el cual es descargado directamente por el software.

Al volver a muestrear las imágenes esclavas en el cuadro maestro, primero se realiza la reducción y la demodulación de la imagen esclava, luego se realiza la interpolación de sincronización truncada. Por último, se aplican la reamplificación y la remodulación a la imagen esclava interpolada. Antes de realizar esta operación, es conveniente que ambos productos, tanto maestro como esclavo, tengan la misma subfranja y los mismos datos de polarización para el registro conjunto, además de que se hayan aplicado previamente las correcciones de órbitas precisas para conseguir un mejor resultado, tal y como se ha procedido. Así mismo, la salida tras realizar esta operación de “Back-geocoding” es un producto con las bandas maestra y esclava coregistradas en formato I/Q.

Esta función de coregistro alinea y superpone imágenes de diferentes bandas o de diferentes fechas para crear un producto compuesto que muestre información de múltiples fuentes. El principal objetivo de coregistrar imágenes es asegurar que estas correspondan a una misma ubicación geográfica, compartan resolución y orientación, independientemente del sensor de dónde provenga dicha imagen. Además de esta forma no muestran las diferencias propias causadas por distintas posiciones u orientaciones. Este proceso es de especial importancia en teledetección, ya que permite combinar información de diferentes sensores, creando una imagen más completa y precisa del área de interés.

4.1.2.4 Enhanced Spectral Diversity (ESD)

Esta función utiliza los datos en las áreas superpuestas de ráfagas adyacentes y realiza correcciones de rango y acimut para cada ráfaga. Este operador estima compensaciones rígidas de acimut y rango respecto a la imagen maestra considerando las compensaciones de múltiples pares esclavo-esclavo.

Por lo tanto, el resultado de esta operación es un producto con las bandas maestras y esclavas coregistradas, además de las correcciones de rango y acimut aplicadas a las bandas esclavas.

4.1.2.5 Interferograma.

Una vez se llega a este punto, con las imágenes propriamente corregidas, se computa el interferograma. Con el operador “Interferogram” se calcula el interferograma complejo, con o sin la sustracción de la referencia fase de tierra plana. Esta fase de referencia se resta usando un polinomio 2D, también estimado en este mismo proceso de generación de interferograma.

Si se conocen las órbitas del par interferométrico, la fase de la Tierra plana (flat-earth phase) se estima utilizando esta información orbital, además de sus correspondientes metadatos, y se resta del interferograma complejo. Esta es la fase presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de referencia, definido por el sistema de referencia de las órbitas de los satélites, siendo este WGS84, que es el sistema utilizado por todos los sistemas SAR espaciales.

La fase de tierra plana se calcula en una serie de puntos distribuidos sobre la imagen total, con lo que posteriormente se estima un polinomio 2D utilizando mínimos cuadrados que se ajusta a estas observaciones. Un polinomio de grado 5 normalmente es suficiente para modelar la fase de referencia para una escena SAR

completa, aproximadamente 100x100 km. Aun así, se puede seleccionar un grado más bajo para imágenes más pequeñas y un grado más alto para escenas de franja larga. Si se llegase a omitir la resta de la fase de Tierra plana, el interferograma formado tendría franjas causadas por la curvatura terrestre, por lo que dificultaría el proceso y análisis interferométrico.

Los parámetros principales que como usuario se pueden modificar son:

- Número de puntos para calcular la fase de referencia y su estimación con mínimos cuadrados. El valor predeterminado es 501, suficiente para escenas SAR de 100x100 km. Como este valor es más que suficiente para la zona de estudio, se mantiene tal cual.

- El grado del polinomio de tierra plana 2D. El grado recomendado, apropiado para la mayoría de los casos de uso, es el quinto grado, por lo que se mantiene.

- El método de interpretación de órbitas. Se determina también en el grado de un polinomio menor de grado cinco. En el caso de este estudio, se opta por usar un polinomio de grado 3.

Aparte de estos parámetros, se aplica un rango de coherencia con una ventana de tamaño 10 y una coherencia azimutal con una ventana de tamaño 2.

4.1.2.6 TOPSAR-Deburst.

Esta operación se encarga de convertir datos SAR (Synthetic Aperture Radar) adquiridos en modo TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans) en archivos de datos descomprimidos, lo que permite su posterior procesamiento y análisis.

Como se ha mencionado anteriormente, cada imagen de subfranja consta de una serie de ráfagas, dónde cada ráfaga se ha procesado como una imagen SLC separada. Las imágenes de ráfaga complejas enfocadas individualmente se incluyen, en orden de tiempo de acimut, en una sola imagen de subfranja con una demarcación de relleno negro en el medio. Hay suficiente superposición entre ráfagas adyacentes y entre subfranjas para garantizar la cobertura continua del suelo. Las imágenes de todas las ráfagas en todas las subfranjas se vuelven a muestrear en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en rango y acimut, conservando la información de fase.

El producto resultante tras realizar esta sucesión de parámetros, desde la elección de las franjas hasta esta operación, se observa en la Figura 30**.** El producto generado tras la creación del interferograma cuenta con varias bandas, contando con una de intensidad, fase y coherencia siendo mostrado en la figura concretamente la banda de fase. Se observa la figura de la isla, aunque está achatada, por lo que es necesario realizar correcciones.

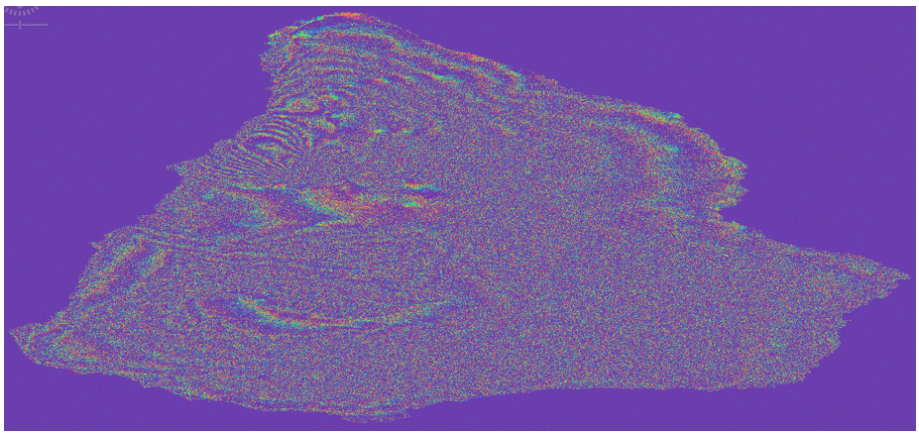


Figura 30: Producto tras el segundo flujo de trabajo. Banda de fase (04-07-2021).

4.1.2.7 Topographic phase removal.

Con este parámetro se estima y elimina la fase topográfica inducida del interferograma una vez realizado el “deburst”. Este operador en concreto identifica el modelo digital de elevaciones (DEM) del área del interferograma y lo sustrae del interferograma complejo. Al igual que en pasos anteriores, el modelo digital de elevaciones se descarga automáticamente de internet mediante el software.

El resultado de esta operación se guarda en forma de banda dentro del producto creado.

4.1.2.8 Multilook.

Como la imagen SAR original contiene ruido inherente de “speckle” o moteado, se aplica un procesamiento “multilook” para reducirlo y mejorar la interpretación de la imagen. Para realizar esto, se combinan varias imágenes de manera incoherente como si correspondiera a diferentes aspectos de la misma escena. Este procesamiento se conoce generalmente como procesamiento multilook. Como resultado, la imagen mejora la interpretabilidad de la misma.

Hay dos formas de implementar el procesamiento multilook:

- Mediante el promedio de dominio espacial de una imagen de una sola mirada, con o sin núcleos 2D específicos por convolución.

- Mediante el método de dominio de frecuencia utilizando el ancho de banda subespectral.

Este operador implementa el método multiaspecto en el dominio del espacio promediando una imagen de un solo aspecto con una pequeña ventana deslizante.

4.1.2.9 Goldstein Phase Filtering.

Este operador realiza un filtrado de fase del interferograma para reducir el ruido de fase, ya sea para la visualización o para facilitar el desenvolvimiento de fase que se mostrará en el siguiente paso. El método de filtrado que se implementa en este operador es el método de Goldstein propuesto por Goldstein & Werner en 1998 [46].

En la Figura 31 se observa el producto generado tras la implementación de estos parámetros. Este es el interferograma diferencial de salida, dónde la fase se representa en forma de franjas con un rango de (-π a π). Al comparar este resultado con el anterior se aprecia claramente como la forma de la isla se asemeja más a la realidad, además de poder apreciarse más fácilmente cada franja de color tras la aplicación de filtros para reducir el ruido de fase. Se puede intuir, conociendo dónde se encuentra el área de estudio, el hecho de que se ha producido algún tipo de deformación en la zona. Se debe tener en cuenta que se está procesando la imagen correspondiente al 4 de julio a la imagen master del 20 de septiembre del 2021.

Llegados a este punto, por tanto, se ha obtenido el interferograma enrollado. Para conseguir la información que se necesita de este producto, hay que desenrollar este interferograma y conseguir el desplazamiento.

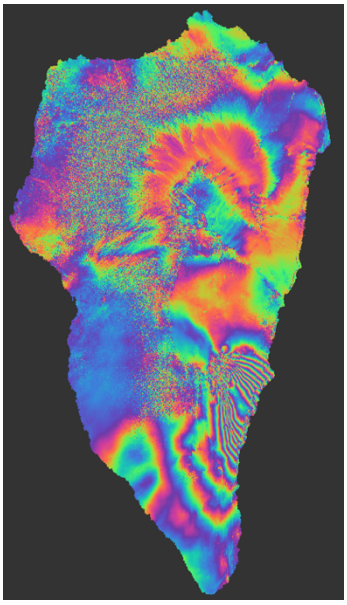


Figura 31: Banda fase tras aplicar el tercer flujo de trabajo (04-07-2021).

4.1.2.10 SNAPHU.

Como se comentó anteriormente, una vez llegado a este punto se debe realizar el desenvolvimiento de fase, o “phase unwrapping”, para conseguir el producto de este estudio. Esta función, sin embargo, no se realiza directamente en el software SNAP, sino a través de otro programa llamado SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping), específico para desenrollar imágenes interferométricas SAR. Este procesado es fundamental para conseguir las deformaciones de la zona de estudio.

SNAPHU utiliza técnicas de optimización de flujo de red y un enfoque estadístico para determinar la solución más probable para el desenrollado de fases. Es capaz de manejar datos complejos y grandes áreas de imagen, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para aplicaciones de monitoreo del terreno. Es la herramienta más estandarizada para procesar datos satelitales Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea. Al no poder ser procesado este desenrollo de fase directamente desde SNAP, se debe exportar el producto interferométrico a través del operador “Snaphu-Export”, como aparece en la Figura 32.

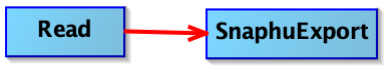


Figura 32: Exportación de datos a SNAPHU.

Realizado esto, se genera una carpeta que contiene un archivo con el comando necesario para ejecutar este programa, el cual varía dependiendo de la imagen que se procese en el momento. Se debe hacer directamente mediante el uso de terminales en Linux. Como ejemplo, el siguiente comando corresponde al procesamiento de la imagen esclava del día 2021-07-04 ascendente:

```
[ snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV_04Jul2021_20Sep2021.snaphu.img 3062 ]
```

Una vez se realiza este procesado, el que más tiempo de procesamiento consume por su complejidad, se importa de nuevo el producto al software SNAP mediante el operador “Snaphu-Import”, obteniendo así el producto desenrollado.

4.1.2.11 Phase to displacement.

Con el interferograma desenrollado, se puede llevar a cabo la conversión de fase interferométrica a desplazamiento definitivamente. En caso de que algunos de los puntos de dispersión en el suelo cambien ligeramente su posición relativa en el intervalo de tiempo entre las dos observaciones SAR, ya sea en caso de hundimiento, deslizamiento de tierra, terremoto, etc., entonces el siguiente término de fase aditivo, independiente de la línea base, aparece en la fase interferométrica (6):

$$\Delta\phi_d = -\frac{4\pi}{\lambda} d \tag{6}$$

La variación de fase interferométrica se puede dividir en tres contribuciones:

- Una variación de fase proporcional a la altitud relativa del terreno, referida a un plano de referencia horizontal. Si se dispone de un modelo de elevación digital (DEM), este término se puede restar de la fase interferométrica. Esta operación se conoce como eliminación de fase topográfica, y se realizó anteriormente.

- Una variación de fase proporcional a la diferencia de rango inclinado de los objetivos puntuales. Si se dispone de datos orbitales precisos, este término también se puede calcular y restar de la fase interferométrica. Esta operación se llama aplanamiento del interferograma o eliminación de fase de la Tierra plana, que también se ha realizado con anterioridad.

- Una variación de fase proporcional al desplazamiento relativo del dispersor.

Como resultado de las dos operaciones anteriores, se genera un mapa de fase proporcional sólo al desplazamiento relativo del terreno que se puede calcular mediante la siguiente fórmula (7):

$$d = -\frac{\lambda}{4\pi}\Delta\phi_d \tag{7}$$

Por lo tanto, el producto antes de realizar esta operación debe ser un interferograma con la fase topográfica y de Tierra plana eliminada previamente. El resultado tras este procesado es un mapa de desplazamiento en metros [25].

4.1.2.12 Terrain Correction.

Por último, se aplica una corrección del terreno, ya que, debido a las variaciones topográficas de una escena y la inclinación del sensor del satélite, las distancias pueden distorsionarse en las imágenes SAR, ya que los datos de la imagen que no estén directamente en la ubicación del nadir del sensor tendrán algo de distorsión.

Las correcciones del terreno cuentan con la función de compensar estas distorsiones, de modo que la representación geométrica de la imagen sea lo más cercana posible al mundo real. Para geocodificar los productos Sentinel-1, se utiliza el operador Range Doppler Terrain Correction que implementa el método de ortorrectificación Range Doppler [47].

El operador de corrección de terreno Doppler implementa el método de ortorectificación Doppler de rango para geocodificar imágenes SAR de una sola geometría de radar de ráster 2D. Utiliza información vectorial del estado de las órbitas disponible en los metadatos, las anotaciones de sincronización del radar, los parámetros de conversión de rango de inclinación a tierra, además de los datos de DEM de referencia para derivar la información precisa de geolocalización.

Una vez finalizado este proceso, el producto contiene la información correcta y corregida de la zona de interés, el cual se analizará convenientemente en los siguientes apartados.

En la Figura 33 se aprecia el resultado final tras aplicar todos los operadores correspondientes. Se observa claramente la anomalía producida en la zona de estudio, dónde ocurre una clara deformación, además de la corrección de posicionamiento de la isla. La paleta de colores ha sido escogida de las disponibles en el software SNAP, la cual muestra las elevaciones en colores cálidos. En el apartado de resultados y análisis se presentarán todas las imágenes procesadas y el análisis conllevado de ellas, además de cambiar la paleta de colores a otra más adecuada.

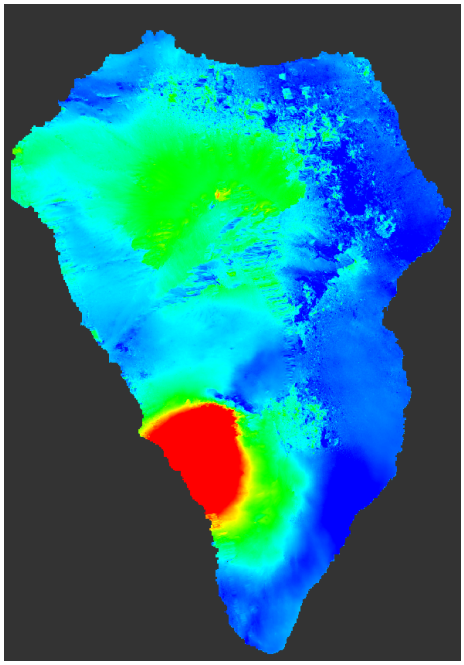


Figura 33: Producto final tras aplicar todos los flujos de trabajo.

En este estudio se centra el análisis en los procesados que se visualizan en las Tablas 6 y 7, correspondientes a las imágenes ascendentes y descendentes descargadas.

Imagen esclava	Imagen master
4/7/21	20/9/21
27/8/21	20/9/21
2/9/21	20/9/21
8/9/21	20/9/21
14/9/21	20/9/21
26/9/21	20/9/21
27/8/21	2/9/21
2/9/21	8/9/21
8/9/21	14/9/21

Tabla 6: Selección imágenes ascendentes.

Imagen esclava	Imagen master
29/8/21	22/9/21
4/9/21	22/9/21
10/9/21	22/9/21
16/9/21	22/9/21
28/9/21	22/9/21
29/8/21	4/9/21
4/9/21	10/9/21
10/9/21	16/9/21
16/9/21	22/9/21

Tabla 7: Selección imágenes descendentes

4.2 Procesamiento de imágenes Sentinel-1 GRD

Una vez procesado los productos interferométricos, se procede a tratar las imágenes radar Sentinel-1 GRD, con la premisa de obtener resultados sobre la velocidad de las coladas de lava una vez entra en erupción el volcán.

4.2.1 Selección y descarga de imágenes.

Como se ha mencionado anteriormente, se dispone de 10 imágenes, 5 en ascendente y otras 5 en descendente. Al igual que con InSAR, se toma una imagen de referencia y se coteja con el resto de días disponibles, de esta forma se compara la velocidad de este día de referencia con el resto, a medida que avanzan las coladas de lava la velocidad aumenta o disminuye dependiendo del terreno.

La descarga de las imágenes, al igual que las imágenes radar SLC, se realiza en la plataforma Open Access Hub de Copernicus. Aparte del tipo del producto de las imágenes, que en este caso es GRD, y las fechas de observación, que deben ser tras la erupción volcánica únicamente, el procedimiento de descarga es el mismo, al igual que la geometría y cobertura de las imágenes. De misma forma, el procesamiento es igual tanto en imágenes ascendentes como descendentes.

A la hora de seleccionar los productos, se toman teniendo en cuenta que las imágenes radar no se ven afectadas por el estado atmosférico de cada fecha. Además de tener en cuenta que el periodo de actividad volcánica dónde se producen efusiones de lava sobre la superficie terrestre transcurre entre el 19 de septiembre de 2021 hasta el 13 de diciembre de 2021.

En la Tabla 8 se observa la selección de la imagen con la que se compara, tanto en ascendente como descendente. En ambos casos se elige una fecha anterior a la erupción, de forma que se compara una imagen en la que el terreno sigue sin presentar ningún tipo de movimiento geológico en su superficie, siendo el 2 de

septiembre en ascendente, y el 4 de septiembre en descendente, con imágenes en las que las coladas de lava avanzan sobre el terreno.

Fecha		Tipo	Pasada	Track	Fecha		Tipo	Pasada	Track
2021-10-08	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-10-10	2021-09-04	GRD	descendente	169
2021-11-07	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-11-09	2021-09-04	GRD	descendente	169
2021-12-01	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-12-03	2021-09-04	GRD	descendente	169
2022-01-12	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2022-01-08	2021-09-04	GRD	descendente	169

Tabla 8: Selección de fechas de productos GRD

Una vez seleccionadas las imágenes, se procede al procesamiento en el software SNAP, como se explica en los siguientes apartados.

4.2.2 Procesado en SNAP.

Al igual que con el anterior procesamiento, se sigue una serie de pasos divididos en flujos de trabajo. En la Figura 34 se aprecia las distintas operaciones llevadas a cabo para conseguir el resultado deseado, en este caso la velocidad de las coladas de lava sobre la superficie terrestre los días posteriores a la erupción hasta que cesa toda actividad volcánica. Este procesado se divide en distintos flujos de trabajo para optimizar el procesado en SNAP, los cuales se explican a continuación.

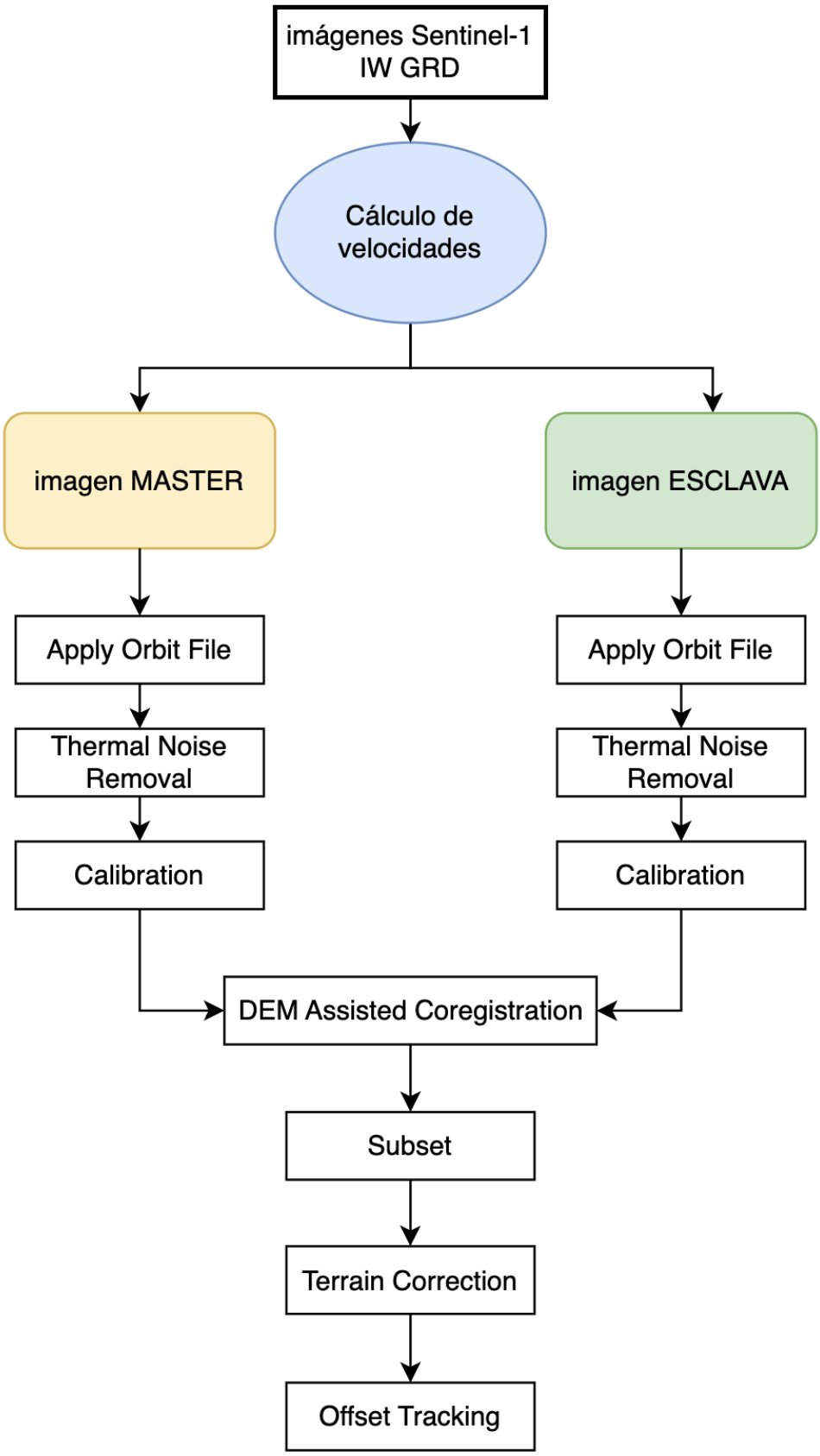


Figura 34: Flujo de trabajo completo para imágenes GRD

En el primer flujo de trabajo, como se observa en la Figura 35, una vez descargadas las correspondientes imágenes, se aplica correcciones orbitales, aplica un filtrado de ruido térmico a las imágenes SAR, además de llevar a cabo una calibración de las mismas. Se puede considerar un pre-procesamiento que se debe aplicar a todas las imágenes.



Figura 35: Primer flujo de trabajo GRD.

En el siguiente flujo de trabajo, según aparece en la Figura 36, procede a hacer la comparación entre imágenes, tomando una como referencia o master, y una como esclava. Con estas dos imágenes ya seleccionadas, se lleva a cabo un co-registro de las mismas, seguido de un recorte de la zona de interés y la aplicación de una corrección al terreno, eliminando así las variaciones topográficas y la inclinación del sensor de captura. Llegados a este punto, se obtiene un primer producto de imagen radar con las correcciones mencionadas hasta el momento. El siguiente producto se obtiene tras aplicar el operador “offset tracking” para la estimación del movimiento y su velocidad.

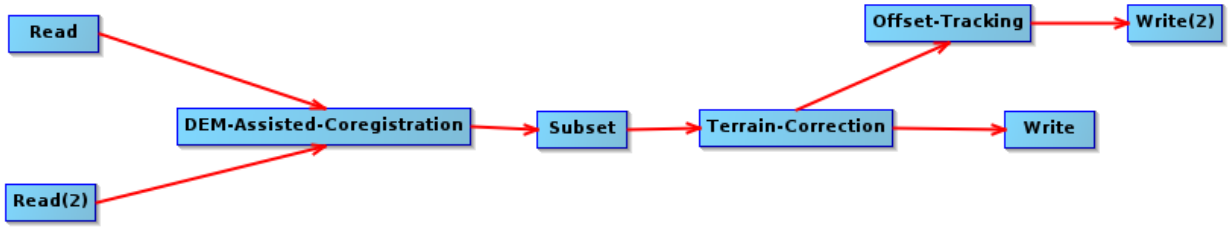


Figura 36: Segundo flujo de trabajo GRD.

Algunos de los parámetros aplicados en este procesado a imágenes radar GRD son iguales a los aplicados en el anterior procesamiento de imágenes radar SLC, en concreto “apply orbit file” y “terrain correction”, por lo que se obviará su correspondiente desarrollo, ya que queda explicado en apartados anteriores.

4.2.2.1 Thermal Noise Removal

Aplicando este parámetro a las imágenes radar se reduce el ruido térmico de las mismas. El ruido térmico en imágenes de radar se refiere a la interferencia aleatoria que puede aparecer en estas como resultado de la naturaleza misma del proceso de medición de radar. Este ruido puede provenir de varias fuentes, incluyendo la electrónica del sistema de radar, la atmósfera y otros factores ambientales.

Este tipo de ruido puede ser difícil de eliminar por completo. Sin embargo, con técnicas de procesamiento adecuadas, es posible reducir el impacto del ruido térmico y mejorar la calidad de las imágenes de radar, como es este caso tras aplicar dicho filtrado.

Para el caso de las imágenes seleccionadas para este estudio, se aplica el filtro siguiendo la polarización VV (Vertical - Vertical), ya que es la polarización más representativa del producto y en la que más puede afectar este fenómeno.

4.2.2.2 Calibration

El objetivo principal de esta operación de calibración es proporcionar imágenes en las que los valores de los píxeles se puedan relacionar directamente con la retrodispersión del radar de la escena. Aunque las imágenes SAR sin calibrar son suficientes para el uso cualitativo, las imágenes SAR calibradas son esenciales para el uso cuantitativo de los datos SAR.

El procesamiento típico de datos SAR, que produce imágenes de nivel 1, no incluye correcciones radiométricas y se queda atrás un sesgo radiométrico significativo. Por lo tanto, es necesario aplicar la corrección radiométrica a estas imágenes para que los valores de píxel de las mismas sean representativos realmente de la retrodispersión del radar en la superficie reflectante. La corrección radiométrica también es necesaria para la comparación de imágenes SAR adquiridas con

diferentes sensores, o adquiridas del mismo sensor, pero en diferentes momentos, en diferentes modos, o procesadas por diferentes procesadores.

Por lo tanto, tras la aplicación de estos factores, que han sido definidos como el primer flujo de trabajo en imágenes GRD, obtenemos resultados como los que se aprecian en la Figura 37**,** imágenes que están calibradas y filtradas.



Figura 37: Imagen tras el primer flujo de trabajo del 10-10-2021(descendente).

4.2.2.3 DEM Assisted Coregistration

Este operador realiza una función de coregistrar, al igual que en el procesamiento anterior con InSAR. En concreto, coregistra dos o más productos usando las órbitas de los mismos y un Modelo de Elevación Digital (DEM). Por lo tanto, se debe disponer de unas imágenes con la corrección de órbita aplicada y un DEM que es descargado automáticamente por el software.

El producto generado tras esta operación cuenta con las bandas maestra y esclava coregistradas en formato I/Q.

4.2.2.4 Subset

Este operador se utiliza para crear subconjuntos espaciales y/o espectrales de un conjunto de datos. El subconjunto espacial puede estar dado por posiciones de píxeles o un polígono geográfico. Es una herramienta de recorte.

En el caso de este estudio, se reconoce el área de estudio a simple vista, por lo que no es necesario coordenadas concretas para su selección. El cuadro de recorte, una vez elegido, es el mismo para todas las imágenes para que no haya problemas de superposición entre estas.

En la Figura 38**,** se observa el resultado tras la aplicación de estos operadores. Se aprecia cómo tras la aplicación del coregistro a partir de un Sistema Digital de Elevaciones (DEM) y de la corrección terreno, hay información en la zona de costa que se pierde. Viene dado por la propia geometría de la imagen radar y los procesos internos del software.

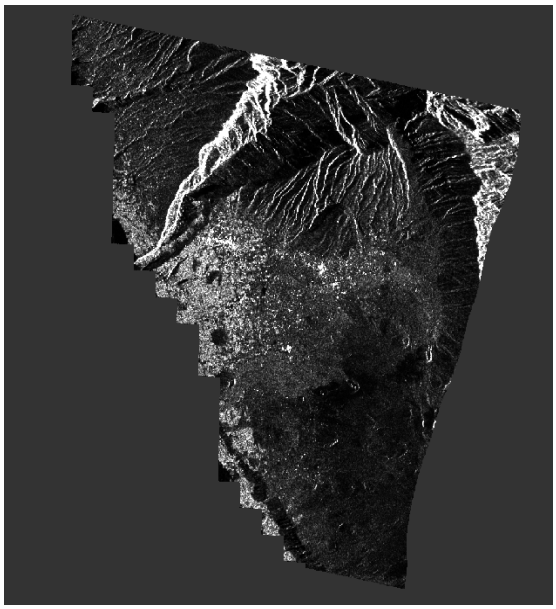


Figura 38: Imagen de la banda Sigma0_VV del 10-10-2021

4.2.2.4 Offset tracking

Este operador estima el movimiento de las superficies de los glaciares entre dos imágenes SAR (maestra y esclava) tanto en dirección de rango inclinado como de azimut. Para el caso de este estudio, se trata de aplicar esta función al movimiento de las coladas de lava, ya que se cuenta con similitudes entre estos dos desplazamientos. Se debe tener en cuenta que, aunque las coladas magmáticas tienen un movimiento lento, sigue siendo mayor que el que puede tener un glaciar, por lo tanto se debe ajustar los parámetros de esta función acorde con este.

En concreto, realiza una correlación cruzada en parches de GCP seleccionados en imágenes maestras y esclavas, y calcula las velocidades de los glaciares, o en este caso de las coladas, en función del cambio calculado para cada GCP. Finalmente, el mapa de velocidad se calcula mediante la interpolación de las velocidades calculadas para la cuadrícula GCP.

En la Figura 39 se observa el producto resultante, dónde las zonas rojas son aquellas que cuentan con mayor velocidad de desplazamiento entre imagen master y esclava. La paleta de colores de dicho resultado ha sido generada automáticamente en el software SNAP, por lo que, para una mejor representación y control sobre los parámetros observables, estos productos son exportados a QGIS.

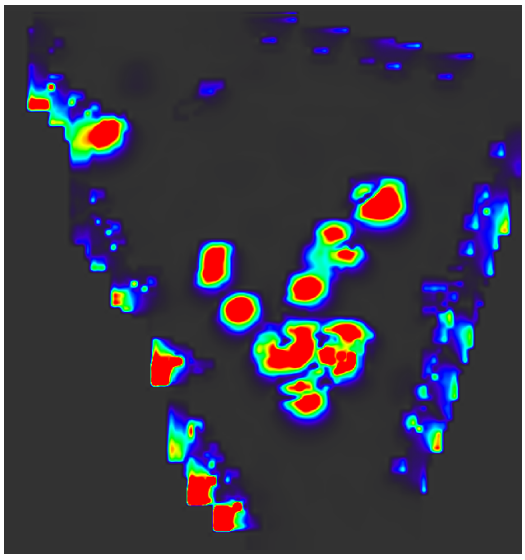


Figura 39: Mapa de velocidad del 10-10-2021

4.3 Procesamiento de imágenes Sentinel-2.

Por último, se lleva a cabo el procesamiento de las imágenes multiespectrales Sentinel-2 para observar el avance de las coladas de lava a nivel visual, algo complicado de conseguir con imágenes SAR ya que su formato dificulta esta comprensión, además de realizar un estudio sobre el área arrasada por las coladas una vez cesada la actividad volcánica.

4.3.1 Selección y descarga de imágenes.

Para este estudio se cuenta con 18 imágenes, 17 de las cuales están espaciadas en fecha entre el momento de la erupción y el final de la misma, mientras que una imagen corresponde a una fecha posterior al cese de actividad volcánica. En tanto que las imágenes tomadas en periodos de actividad tienen el objetivo de monitorizar el avance de las coladas, la imagen tomada a posteriori tiene el propósito de clasificar el área ocupada por las mismas una vez confirmado el cese de dicha actividad.

Al contrario que con las imágenes SAR, los productos multiespectrales si se ven afectados por fenómenos atmosféricos. Es complicado, por tanto, seleccionar imágenes en las que se visualice claramente la escena de estudio, ya que además de las nubes que puedan oscurecer la zona, el propio humo y ceniza de la erupción afecta a la mayoría de imágenes en este periodo de tiempo.

4.3.2 Procesado en SNAP

Para procesar estas imágenes Sentinel-2, se sigue el flujo de trabajo que se muestra en la Figura 40. Se aplican menos operaciones que las usadas anteriormente para procesar las imágenes radar, además de ser relativamente más sencillas, por lo que consumen menos tiempo de procesado.

En los siguientes apartados se muestra por separado tanto el procesamiento para la visualización de las coladas de lava, como las operaciones necesarias para seleccionar el área arrasada por las mismas.

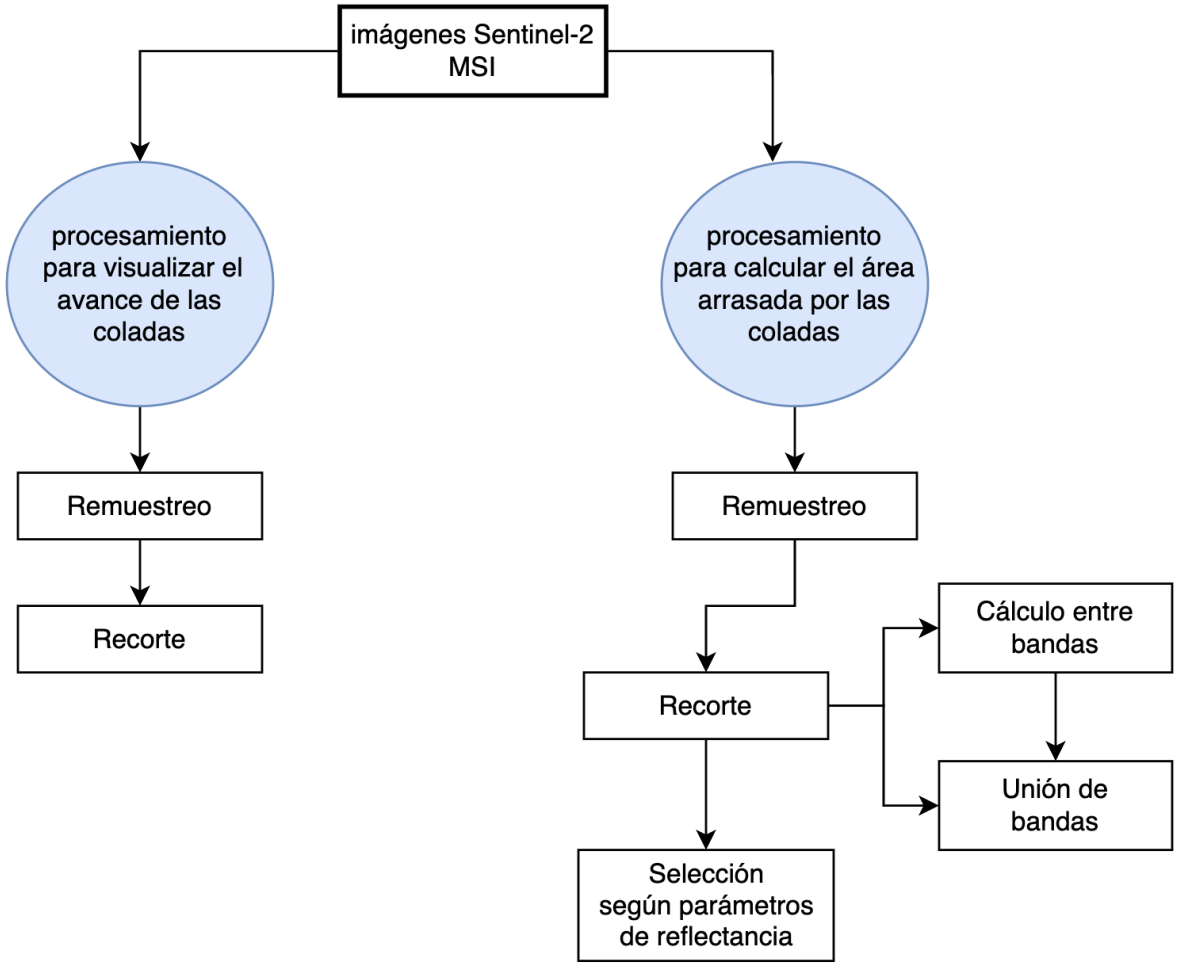


Figura 40: Flujo de trabajo de las imágenes Sentinel-2

4.3.2.1 Avance de las coladas de lava.

Para visualizar el avance de las coladas de lava apenas hay un procesamiento complejo en comparación con los apartados anteriores. Las imágenes Sentinel-2 descargadas se ven sometidas a pocas modificaciones, ya que el resultado esperado está considerado más visual que analítico.

En la Figura 41 se aprecia la geometría de la cobertura de estas imágenes Sentinel-2 desde la plataforma Open Access Hub de Copernicus, las cuales cubren por completo la isla de La Palma sin necesidad de mosaicar más de una imagen por día.

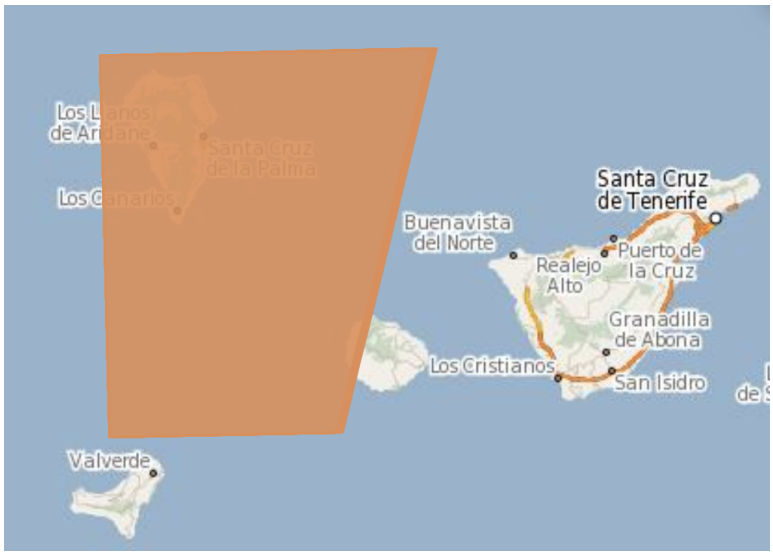


Figura 41: Cobertura imágenes Sentinel-2

Uno de los productos descargados en RGB (colores naturales de MSI) se observa en la Figura 42**,** donde el rojo corresponde a la banda B4, el verde a la banda B3 y el azul a la banda B2. Aparte de la condición atmosférica de ese día en particular, en la que había nubes obstruyendo la vista completa de la isla, apenas se distingue la zona de la erupción.

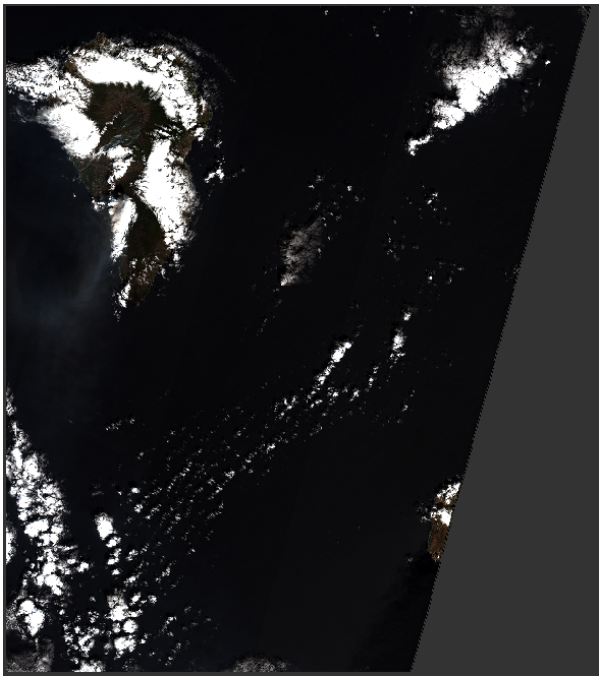


Figura 42: Imagen RGB de la fecha 10-10-2021

En la Figura 43 se aprecia el flujo de trabajo seguido en el software SNAP, dónde se lleva a cabo un remuestreo para igualar la resolución de cada banda de la imagen y un recorte en la zona de interés, en este caso la Isla de la Palma en su totalidad.



Figura 43: Flujo de trabajo

Tras este procesamiento se obtiene el siguiente resultado, mostrado en la Figura 44 sobre la misma imagen que la mostrada en la Figura 42**,** dónde el principal cambio a simple vista es el recorte de la zona de interés.

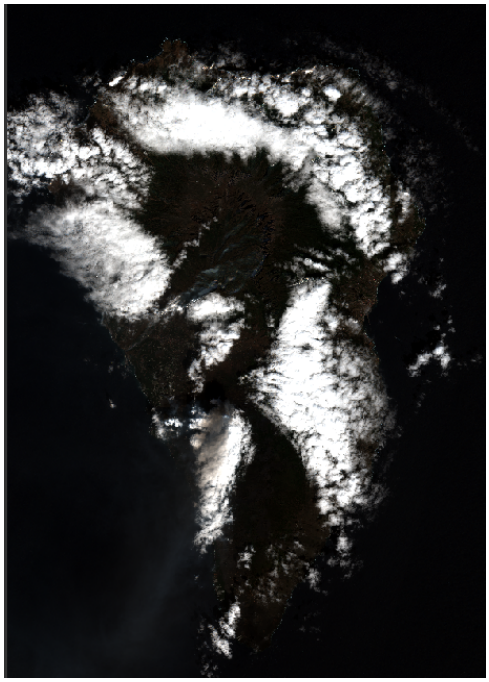


Figura 44: Resultado tras el procesado en RGB.

Las imágenes pertenecientes a Sentinel-2 cuentan con 13 bandas espectrales en 3 espacios de diferentes resoluciones, es decir, el área de superficie representada por un píxel varía entre bandas dependiendo en qué espacio esté. En el siguiente esquema presentado en la Figura 45, se muestra el alcance de 13 bandas espectrales en Sentinel-2 desde el visible y el infrarrojo cercano hasta el infrarrojo de onda corta en diferentes resoluciones espaciales que van desde 10 a 60 m en el suelo [48].

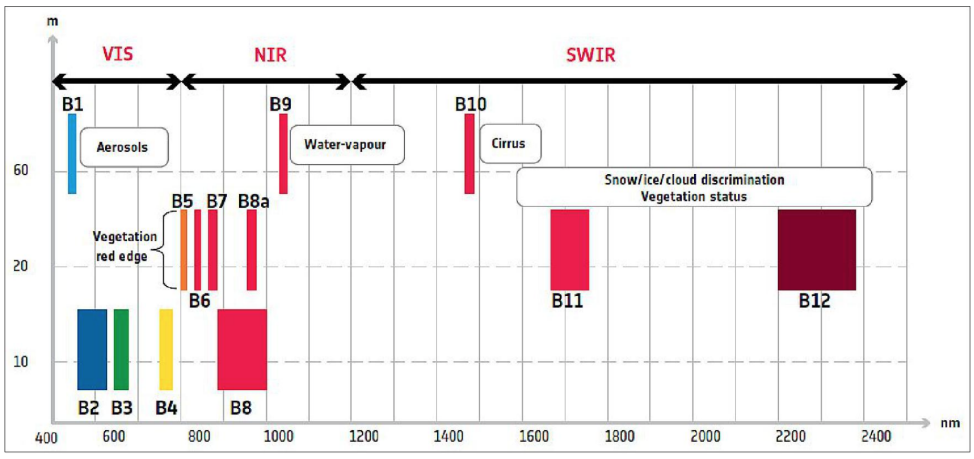


Figura 45: Resolución espacial MSI con longitudes de onda

El remuestreo se realiza sobre la banda 2 de dicha imagen, la cual tiene una resolución de 10 m. Para mejorar la visualización de las coladas de lava, se debe formar la imagen RGB con bandas diferentes en la posiciones rojo, verde y azul. En el caso anterior estaban dispuestas de manera que crease una imagen lo más parecida a la percepción del ojo humano, por lo que ahora se cambia la disposición a rojo con banda 12, verde con banda 11 y azul con banda 4. En la Tabla 9 se muestran las correspondientes disposiciones.

	Color natural	Falso color
R	B4	B12
G	B3	B11
B	B2	B4

Tabla 9: Disposición de las bandas multiespectrales

En la Figura 46 se observa la imagen generada con esta disposición de bandas en RGB, y cómo posibilita la visualización concisa, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas de la zona, de las coladas que discurren en la ladera de la isla.

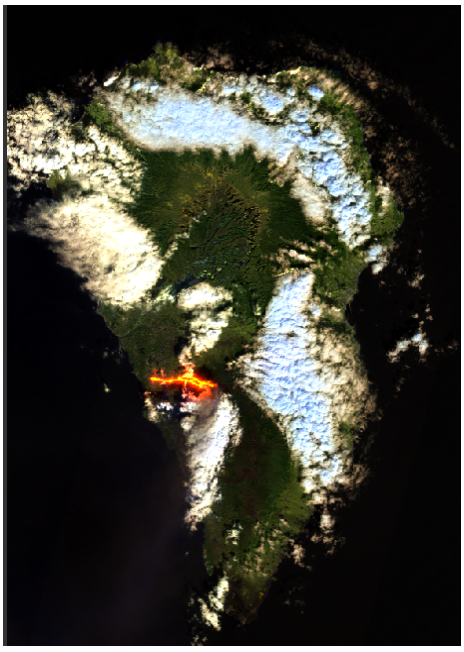


Figura 46: Resultado tras el proceso en RGB- False Color

Por lo tanto, al comparar las dos imágenes, se aprecia que mientras que aquella que cuenta con colores naturales no es distinguible la lava, cuando es usada la Banda 12 en el canal rojo y la Banda 11 en el canal verde se distingue mejor la situación. Estas dos bandas están en frecuencias de la parte Infrarroja de Onda Corta del espectro electromagnético, además, B11 es ideal para distinguir diferentes tipos de suelo.

Con esta combinación, también usando la Banda 4 en el canal azul, se puede "leer" el calor de la lava que aún no se ha enfriado y se está representando en rojo. Además, es posible separar cuáles de las partes blancas corresponden a nubes y cuáles corresponden a ceniza o humo volcánico.

4.3.2.2 Área afectada por las coladas volcánicas.

Una vez realizado el procesamiento para visualizar el avance de las coladas magmáticas, se procede a calcular a partir de una imagen Sentinel-2 el área quemada por culpa de estas mismas coladas.

La geometría de la imagen adquirida es exactamente igual al apartado anterior, con la única diferencia de que esta corresponde a la fecha del 3 de enero de 2021. En la Figura 47 se aprecia la imagen RGB (MSI color natural) antes de que se le aplique ninguna modificación. Como se puede observar, se ha elegido específicamente este día ya que no hay nubes y es reciente a los últimos días de actividad volcánica.

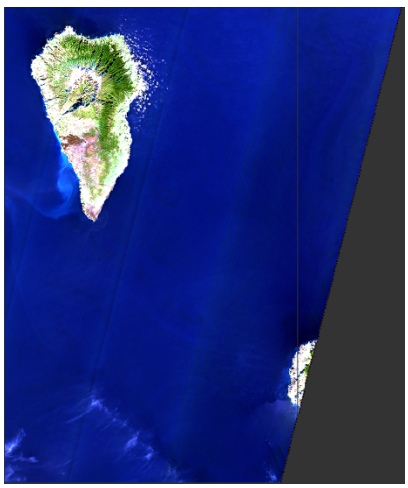


Figura 47: Imagen RGB del 03-01-2022

Al igual que en procesos anteriores, se sigue un flujo de trabajo que se ve representado en la Figura 48**.** Estos pasos a seguir para obtener el producto deseado cuentan con un remuestreo de la imagen y un recorte, como en el apartado anterior, además de una operación entre bandas espectrales, necesario para calcular el parámetro NBR que clasifica zonas quemadas dentro del área de estudio.

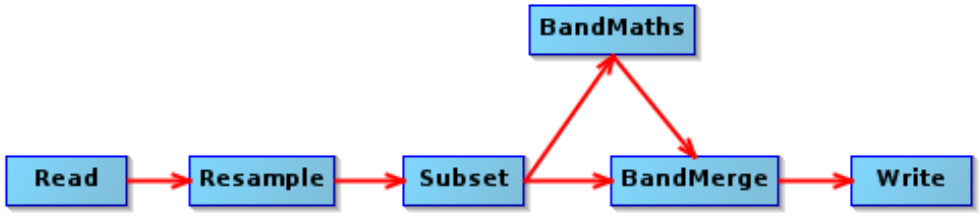


Figura 48: Flujo de trabajo para calcular el parámetro NBR.

A la hora de hacer el recorte, además de seleccionar la zona de interés dentro de la imagen descargada, se selecciona tan solo las bandas B3, B8 y B12, ya que serán las únicas necesarias para realizar el cálculo del NBR (8) (Normalized Burn Ratio).

$$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12} = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (8)$$

Dónde NIR se refiere a “Near Infrared” o infrarrojo cercano, correspondiente a una región del espectro electromagnético que se encuentra justo por encima del espectro visible y por debajo del espectro del infrarrojo medio. El rango de longitud de onda del NIR es de aproximadamente 750 a 2500 nanómetros. Por otra parte, SWIR se refiere a “Short Wave Infrared” o infrarrojo de onda corta, correspondiente a la región del espectro electromagnético justo por encima del espectro del NIR y por debajo del espectro infrarrojo medio, con un rango de longitud de onda de alrededor de 1000 y 2500 nanómetros. En la Figura 49 se aprecia la disposición de cada región en el espacio electromagnético según la longitud de onda de cada uno [49].

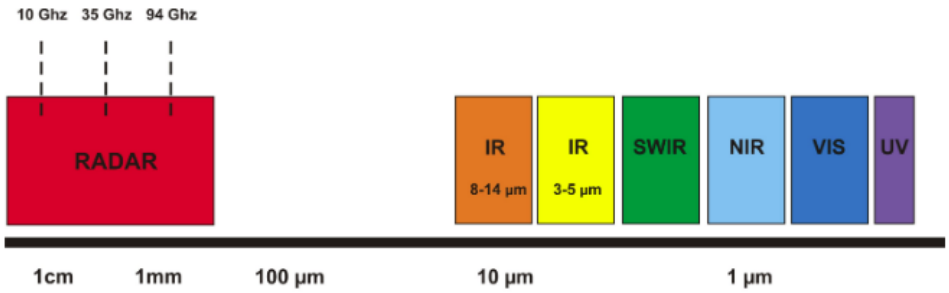


Figura 49: Disposición espacial de los rangos espectrales electromagnéticos

La vegetación sana tiene una reflectancia muy alta en el infrarrojo cercano y una reflectancia baja en la parte infrarroja de onda corta del espectro. Las áreas quemadas, por otro lado, tienen una reflectancia relativamente baja en el infrarrojo cercano y una alta reflectancia en la banda infrarroja de onda corta. Un valor alto de NBR generalmente indica vegetación saludable, mientras que un valor bajo indica suelo desnudo y áreas quemadas recientemente.

En la Figura 50 se aprecian las diferentes curvaturas en la reflectancia según la respuesta espectral al incidir contra diferentes superficies, observando como con la vegetación tiene efectivamente una mayor reflectancia en los espacios electromagnéticos correspondientes al NIR, mientras que las zonas quemadas presentan mayor reflectancia en espacios cercanos al SWIR [50].

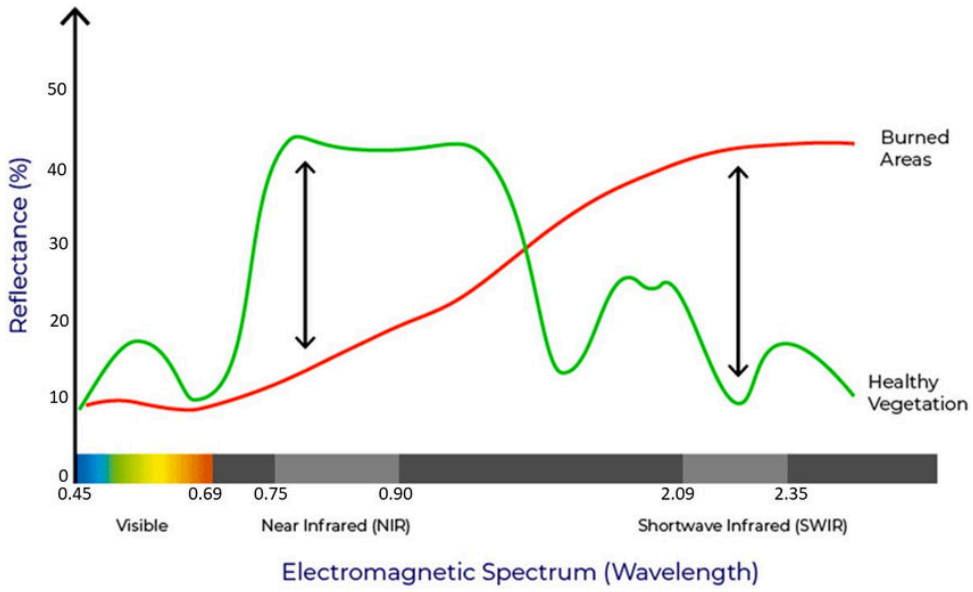


Figura 50: Curvas de respuesta espectral según su reflectancia.

Una vez realizada esta operación, obtenemos un producto que contiene las bandas B3, B8 y B12 además de una nueva banda NBR. En la Figura 51**,** se puede observar dicho resultado, sin embargo, no es el esperado. Aunque es posible distinguir levemente las coladas de lava de la isla, tanto la generada recientemente como las más antiguas, no se consigue una clasificación tan distinguible como la esperada, ya que el objetivo al conseguir este producto era poder enmascarar las zonas quemadas y contabilizarlas apropiadamente.

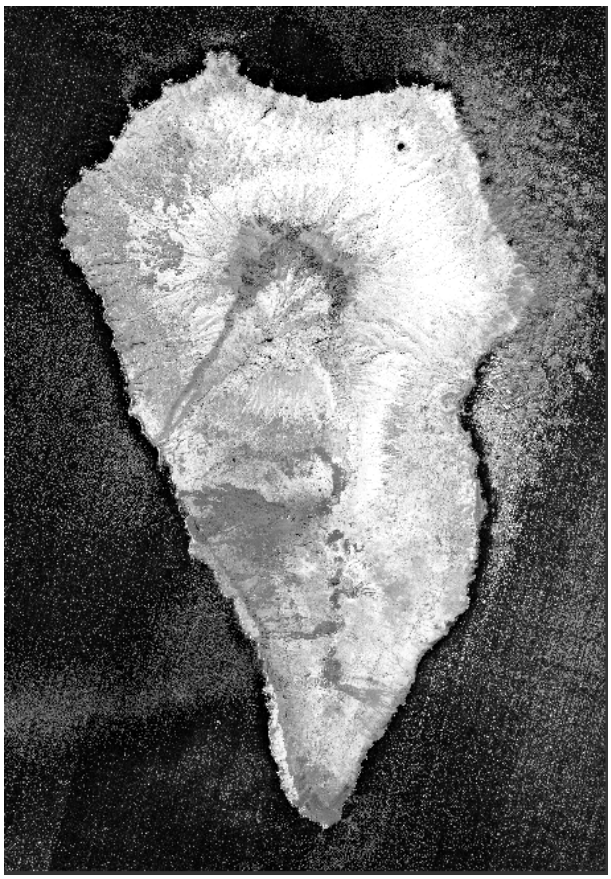


Figura 51: Cálculo de NBR.

Esta falta de contraste se produce ya que la superficie arrasada por las coladas no es exactamente una superficie vegetal que ha sufrido un incendio. Se ha creado una nueva superficie con material volcánico, que, aunque presenta calor residual, no cumple las características para su distinción tras la aplicación de este parámetro NBR.

Por lo tanto, para buscar otra forma de llevar a cabo esta clasificación del área arrasada por las coladas, contamos con las bandas disponibles en los productos de Sentinel-2. En las siguientes Figuras 52 a 54 se visualizan las bandas 8, 12 y 3 respectivamente. En ellas se ve con mayor claridad la colada más reciente y causa de este estudio. En la Tabla 10 se resumen las características de cada una de estas bandas.

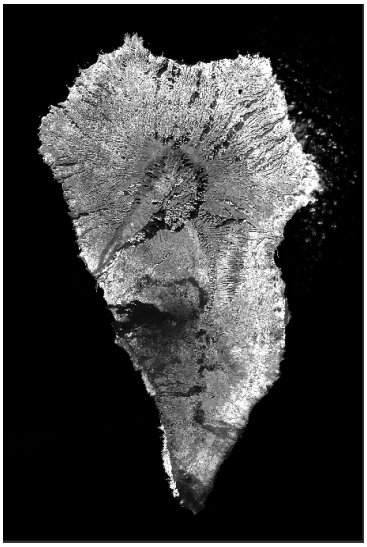


Figura 54: Banda 8



Figura 53: Banda 12



Figura 52:Banda 3

	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 3- Green	0.54 - 0.57	10
Banda 8- Near Infrared (NIR)	0.78 - 0.90	10
Banda 12- SWIR 2	2.10 - 2.28	20

Tabla 10: Características de longitud de onda y resolución de las bandas.

Para realizar esta clasificación se toma la banda 8 (NIR), ya que al ser una banda que captura en un espectro de infrarrojos, consigue información sobre vegetación, calidad del suelo o humedad del mismo. En la Figura 55 se aprecian las características principales de esta banda, proporcionado por el propio software SNAP. Aparte de los tamaños de onda espectral, se observa que las unidades de medida son “dl”, en el caso de este software, es el acrónimo de “adimensional”, por lo que la reflectancia se define como la relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente, siempre con valores entre 0 y 1.

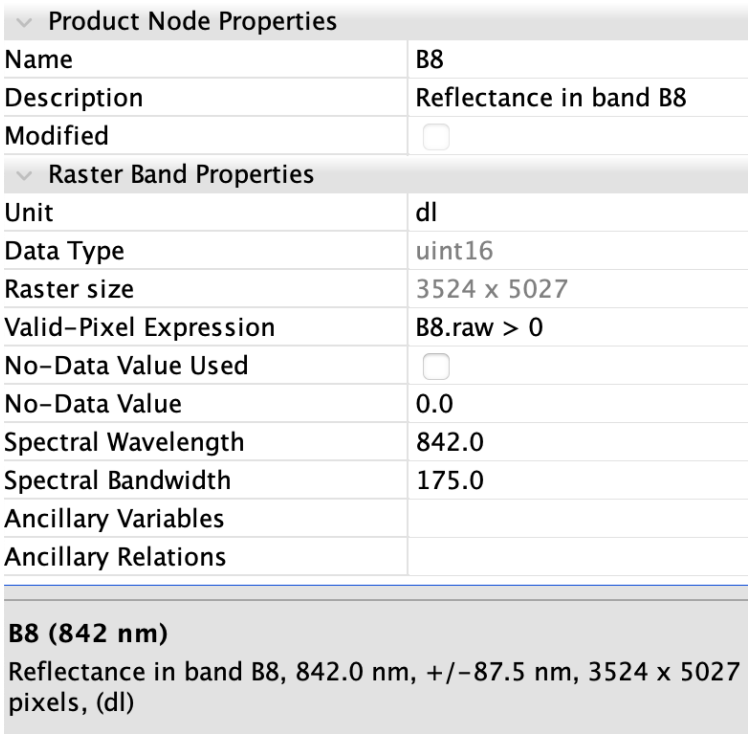


Figura 55: Propiedades de la banda 8

Las coladas de lava tienen características únicas por ser zonas de la superficie calientes, sin ningún tipo de vegetación, y sin signos de humedad presente. Siguiendo este criterio, es posible observar sobre la propia imagen los valores característicos de reflectancia de la superficie dentro de estas coladas de lava y fuera de ellas, llegando a la conclusión de que los valores internos rondan desde los 0.01 hasta los 0.03 mientras que los externos rondan entre los 0.03 hasta los 0.5 aproximadamente.

Con esta información, en la opción de “Band Maths” del software, con la que es posible realizar operaciones con las bandas espectrales, se realiza una condicional expresando que, si el valor de reflectancia de un pixel no se encuentra entre los estudiados dentro de la colada, se anule directamente. En código de esta operación es el siguiente:

```
if ((0.01 <= B8) && (B8 <= 0.03)) then B8 else NaN
```

De esta forma, se consigue otra banda en la cual solo se ha seleccionado aquellos píxeles con los mismos valores de reflectancia que son de interés. En la Figura 56 se aprecia la clasificación generada tras aplicar este parámetro. Aunque hay bastantes píxeles dispersos que no son de relevancia para el estudio, se observa claramente como las coladas de lava han sido diferenciadas del resto del terreno.

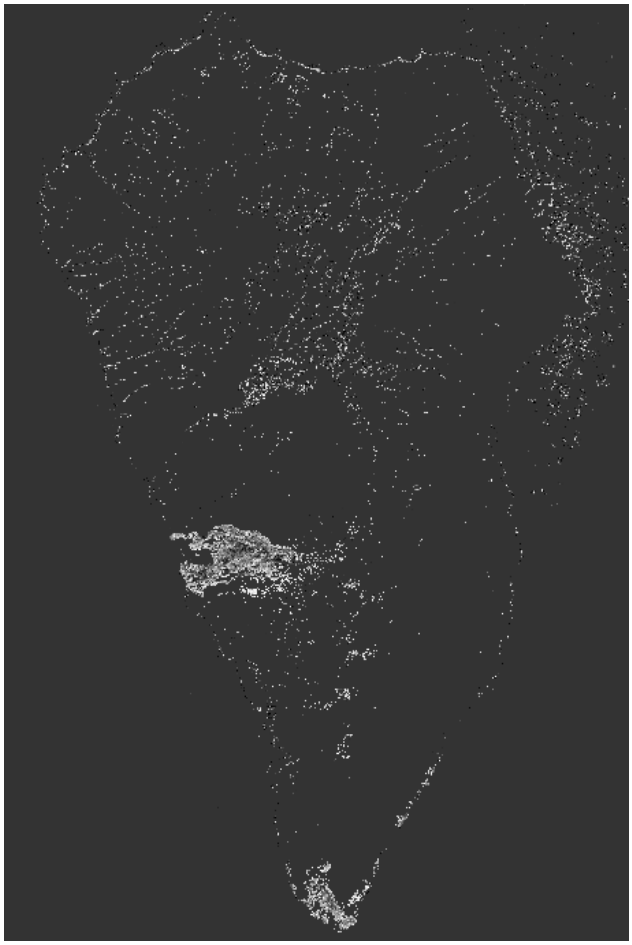


Figura 56: Selección según banda 8

Todo ruido que aparece son zonas de la isla en las que la reflectividad del suelo es igual a la zona de estudio es descartado. Teniendo en cuenta que la isla de la Palma es volcánica, es de esperar que se encuentren superficies con las mismas características, especialmente se denota en el sur de la isla, dónde hay un área notable clasificada también con este método aplicado, provocando por erupciones volcánicas pasadas que aportan estas cualidades al terreno.

En la Figura 57 se aprecia con mayor detalle la zona de estudio. El análisis y la presentación de los resultados se llevará a cabo en los siguientes apartados, por lo que la correspondiente explicación del cálculo del área y la veracidad de estos datos será corroborada en ellos.

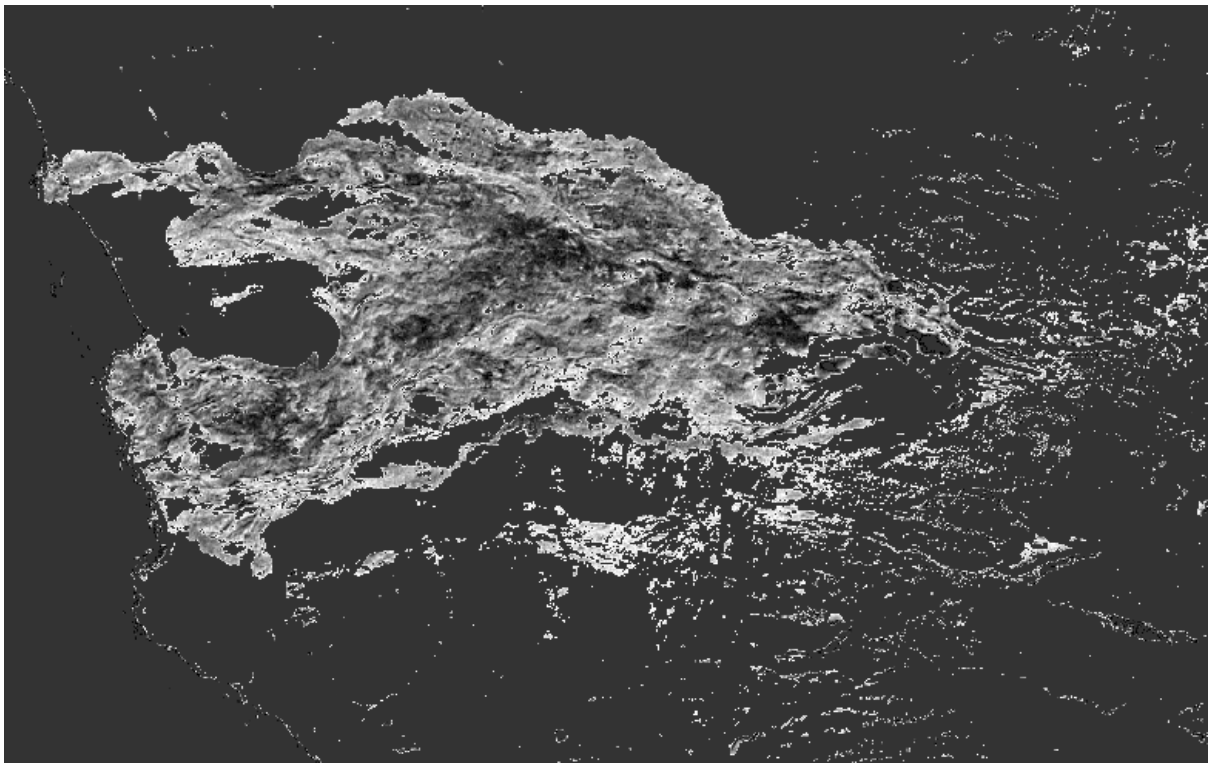


Figura 57: Visualización de la calcificación sobre la zona de interés.

5. Resultados y discusión

En este apartado se presentan y discuten los datos resultantes tras el procesado de todos los productos, además de la visualización de cada uno de ellos, observando así las diferentes evoluciones tanto pre como post eruptivas.

Se procederá a analizar los datos obtenidos y las consecuencias que han tenido sobre el área de estudio, obteniendo diferentes perfiles extensionales para observar las deformaciones a lo largo del tiempo de observación, además de comparar los datos calculados con datos reales objetivos. De esta manera, se considera si los resultados tienen significancia real.

5.1 Resultados InSAR.

En este proceso llevado a cabo con imágenes radar, se obtienen mapas de deformación de la isla, comparando diferentes imágenes tomadas en fechas diferentes, con una imagen master.

En las siguientes imágenes se observa cada resultado tras el procesamiento junto a 4 perfiles de la zona de interés, tanto transversales como longitudinales, obteniendo así datos precisos de la deformación de la isla. En la Figura 58 se aprecia la disposición de los perfiles y su respectiva numeración. Los perfiles están creados para que sigan la disposición desde A hasta A' en todos sus casos.

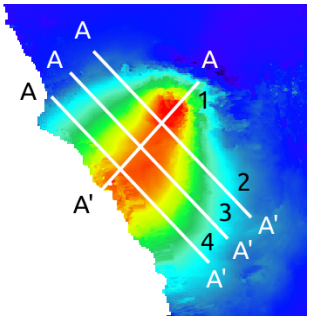


Figura 58: Disposición de los perfiles en el área de estudio.

La leyenda para la paleta de color seleccionada se aprecia en la siguiente Figura 59. Ha sido seleccionada para que represente las subsidencias en colores fríos y las elevaciones en colores cálidos progresivamente. Como se observa más adelante, y en el anexo de este trabajo, se produce una elevación de alrededor de 30 cm en el área de estudio, que en la paleta se ve representada en rojo.

color	valor [m]
	-0.047
	-0.016
	0.014
	0.045
	0.076
	0.107
	0.137
	0.168
	0.199
	0.229
	0.260
	0.291

Figura 59: Paleta colores SNAP.

Para este estudio se ha recopilado y procesado información desde el 4 de julio de 2021 hasta finales de ese mismo año. Todas las imágenes procesadas se encuentran en el anexo, mientras que en este apartado se discutirán y explicarán aquellos resultados más significativos. Hay que tener en cuenta que hay 29 resultados por pasada, tanto ascendente como descendente, y en la mayoría de ellos no aportan información nueva.

5.1.1 Resultados ascendentes.

Para el caso de las imágenes ascendentes, en primer lugar, se aprecian los resultados de la primera imagen descargada del 4 de julio. Esta es comparada con la master tomada del 20 de septiembre, un día después de la erupción.

Teniendo en cuenta que esta comparación viene dada entre el momento más lejano que se dispone de la erupción (imagen esclava), y el momento más cercano a ella (imagen maestra), se aprecia la máxima deformación que sufre la isla. Se elige esta fecha, por tanto, como la más representativa para demostrar cuál ha sido el mayor desplazamiento a causa de la actividad volcánica.

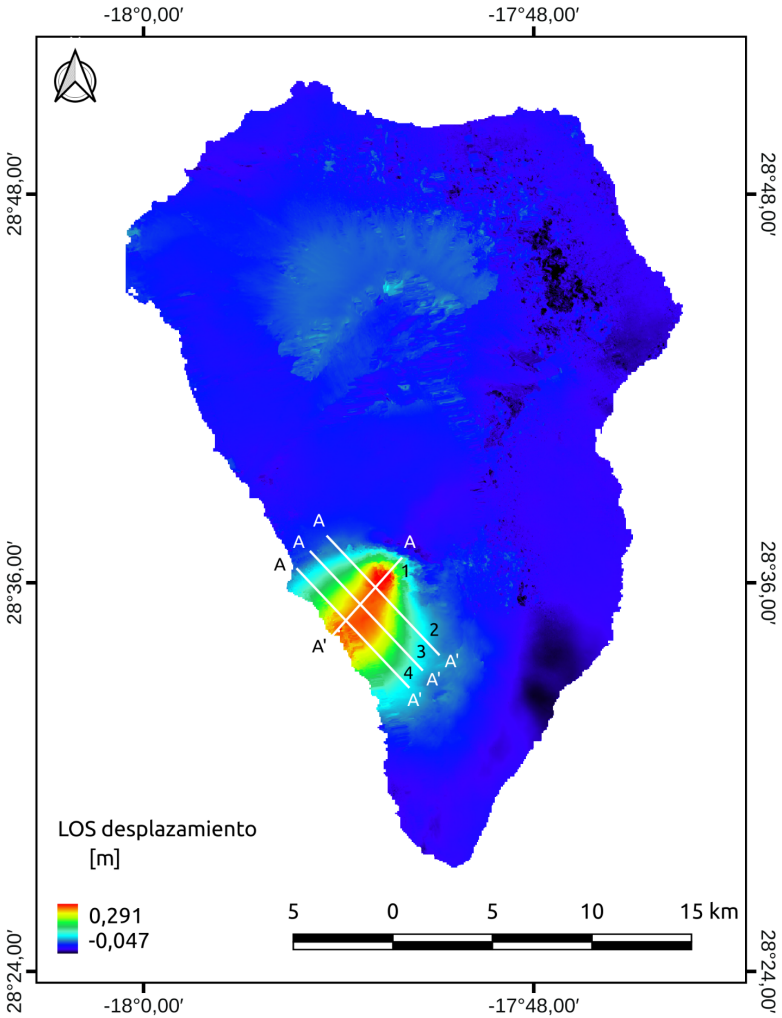
A partir de este momento, las siguientes imágenes mostradas en el anexo, apenas sufren variaciones. Esto indica que la isla no se deformó notablemente hasta los días previos a la erupción, por lo que en este apartado se muestra la primera y las últimas fechas disponibles, ya que son las que aportan más información. Además, en lo concerniente a los días que se pueden considerar críticos, se cambia la imagen máster para poder contabilizar de manera más precisa el momento exacto en el que la isla sufre las deformaciones.

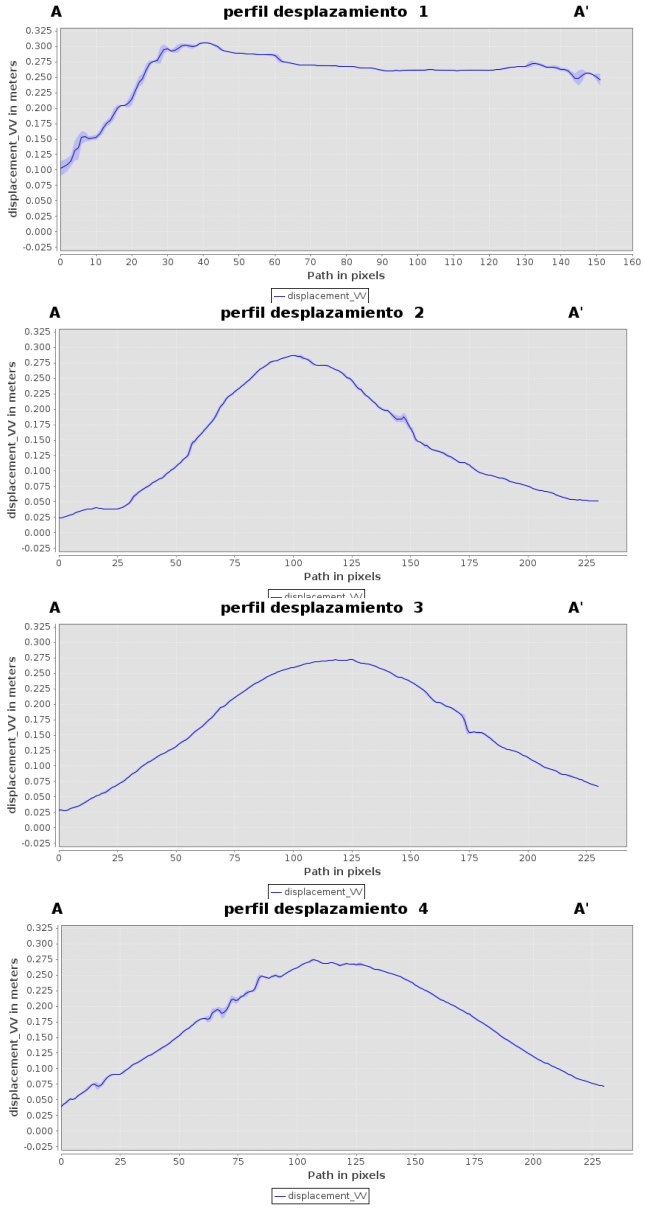
En la siguiente Tabla 11 se muestran las imágenes que a continuación se presentan, siguiendo el mismo orden en fecha.

Imagen esclava	Imagen master
04-07-2021	20-09-2021
27-08-2021	20-09-2021
02-09-2021	20-09-2021
08-09-2021	20-09-2021
14-09-2021	20-09-2021
26-09-2021	20-09-2021

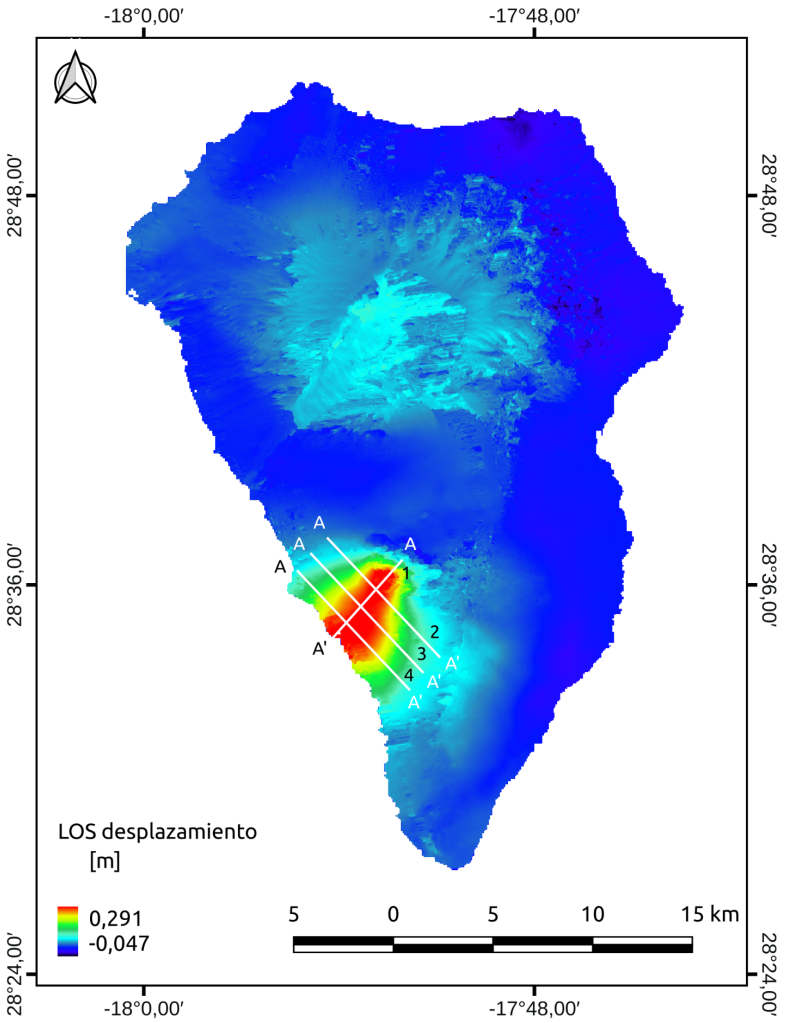
Tabla 11: Imágenes ascendentes representativas.

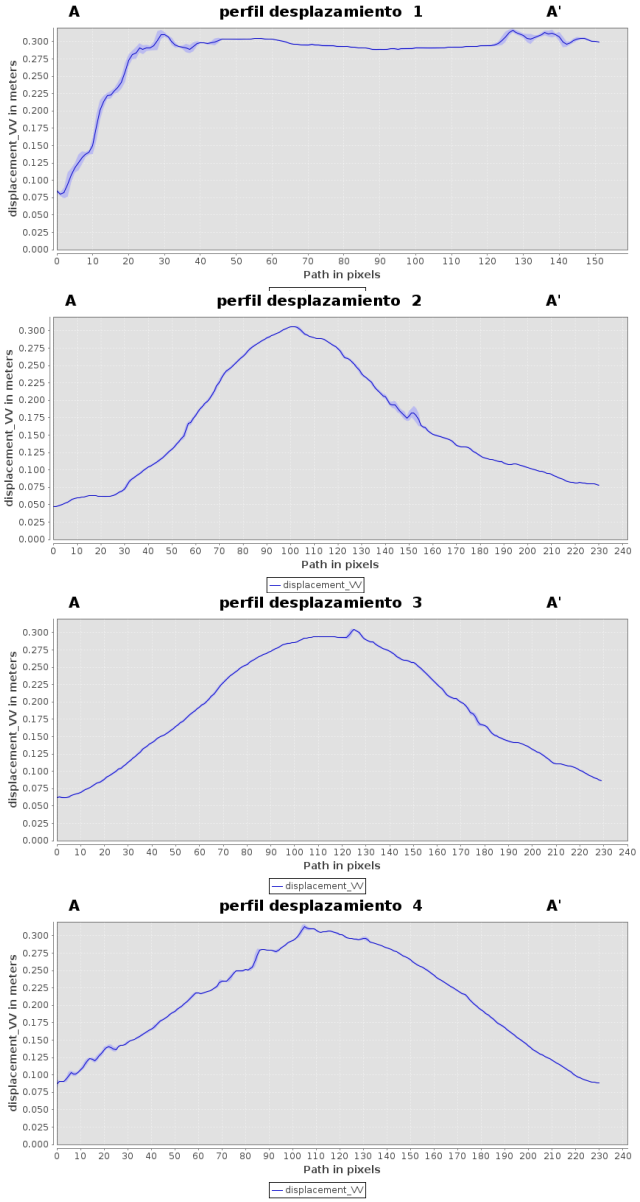
Resultado 04-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



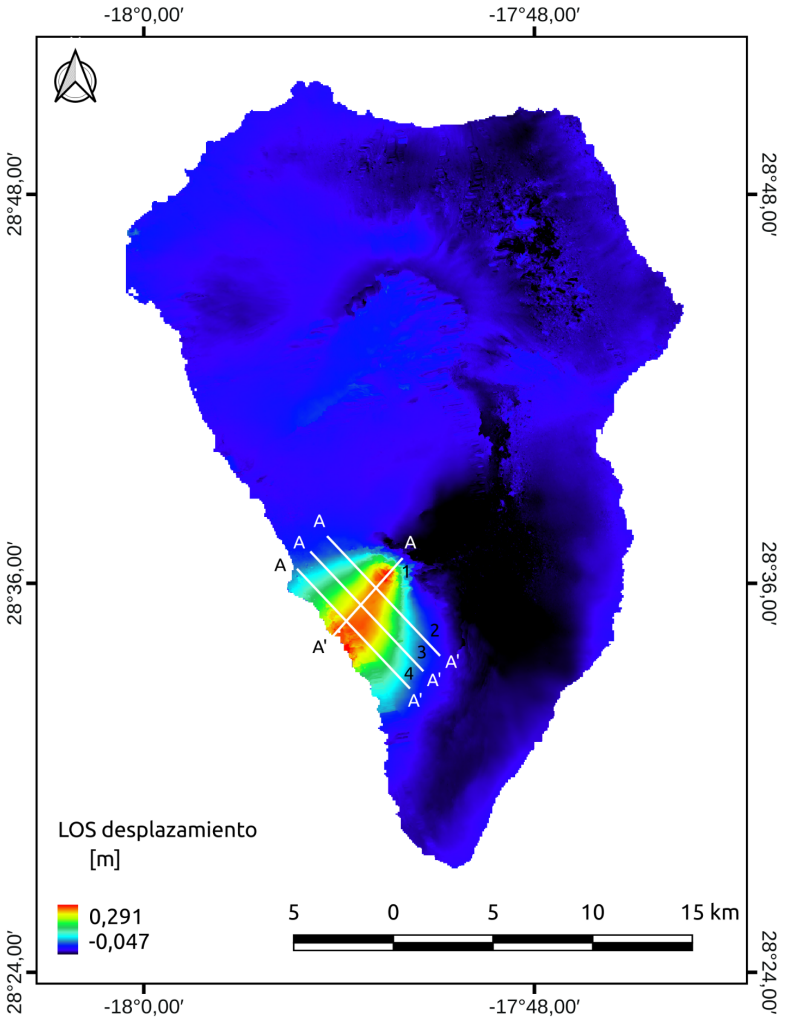


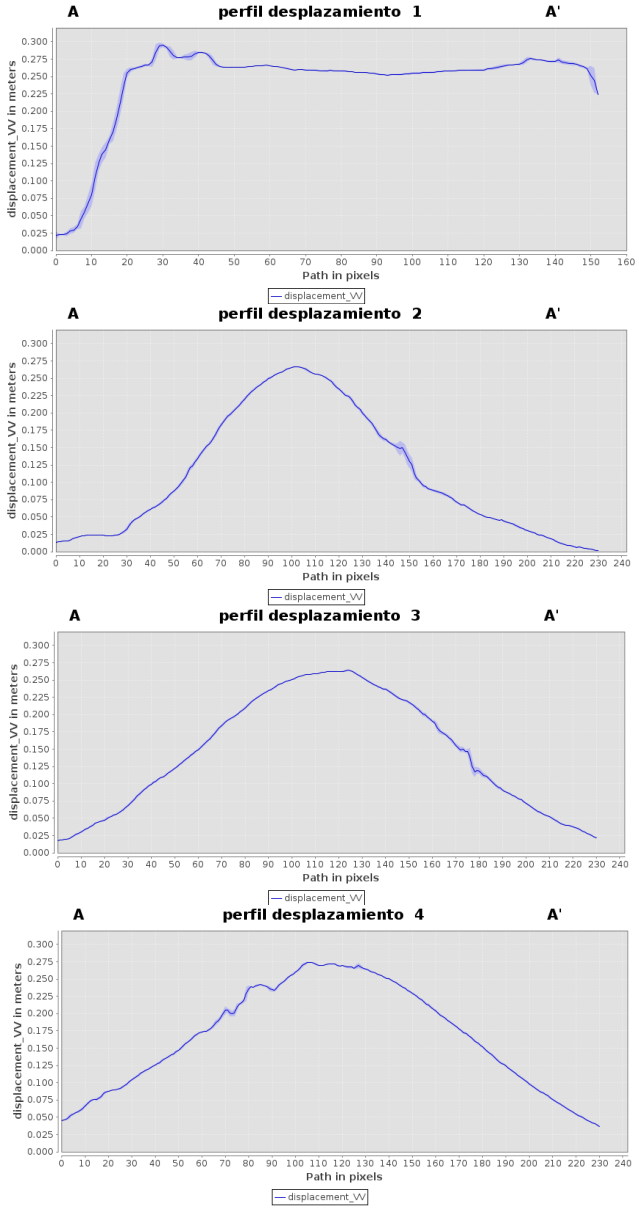
Resultado 27-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



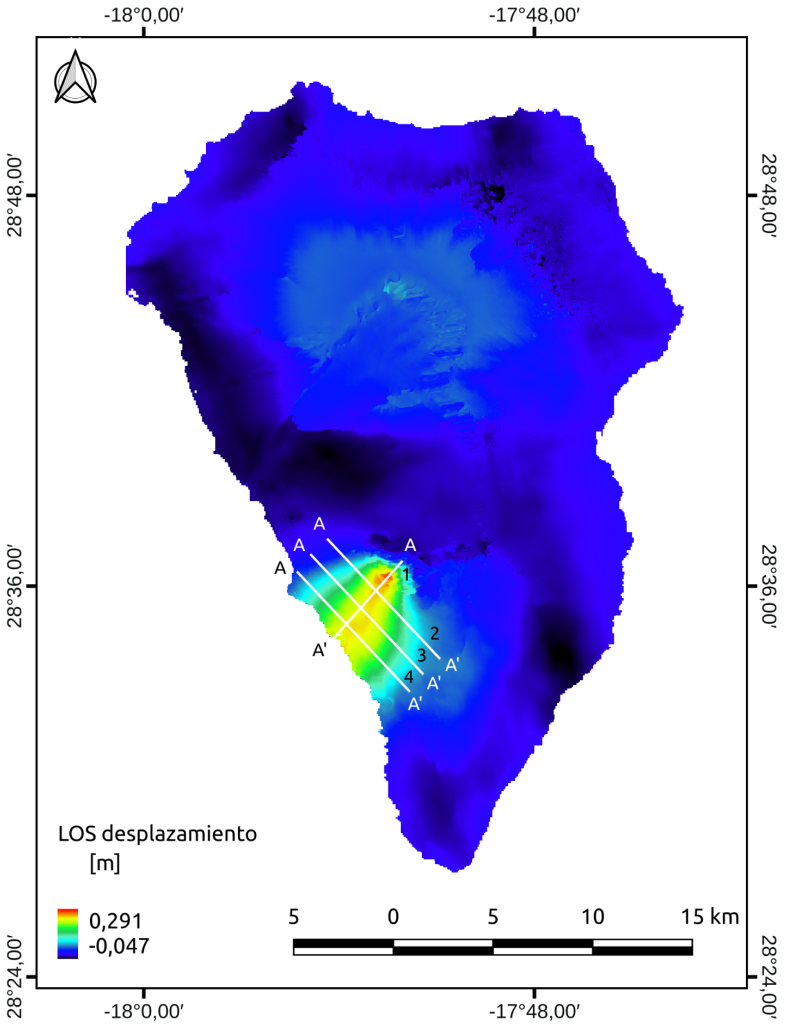


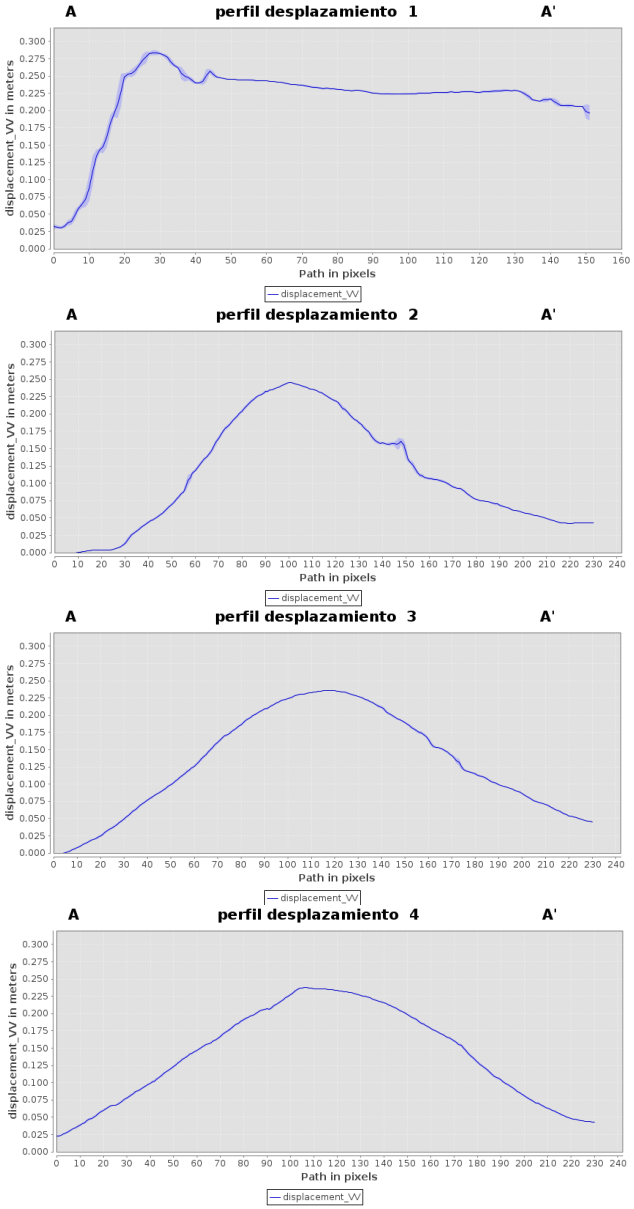
Resultado 02-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



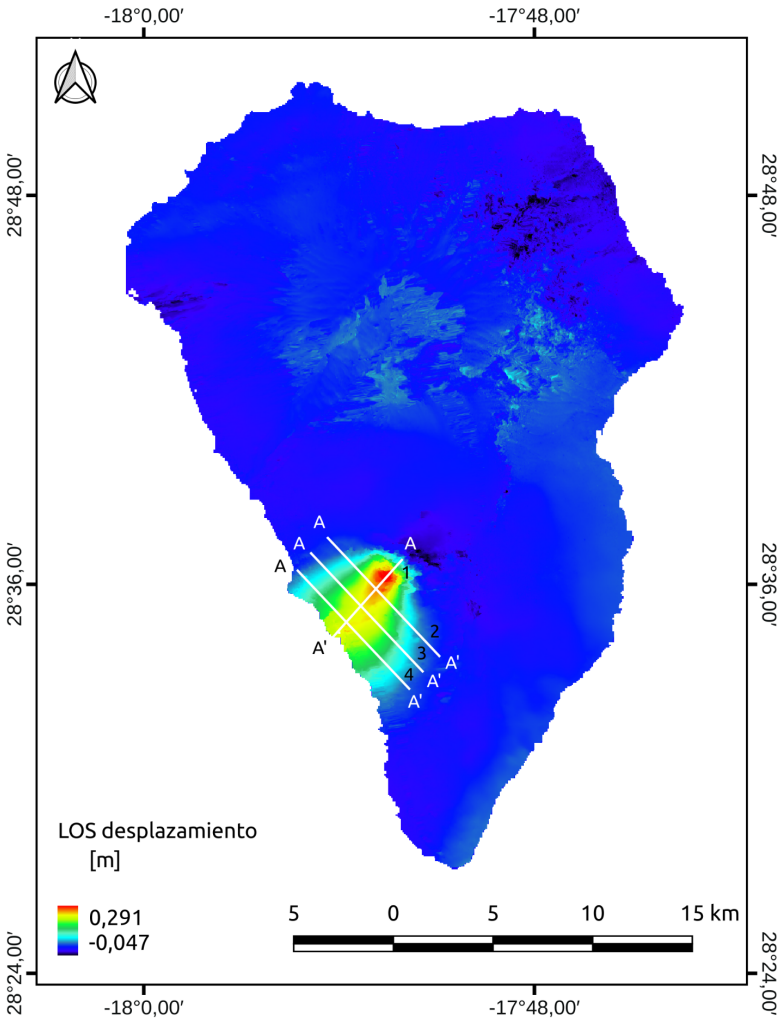


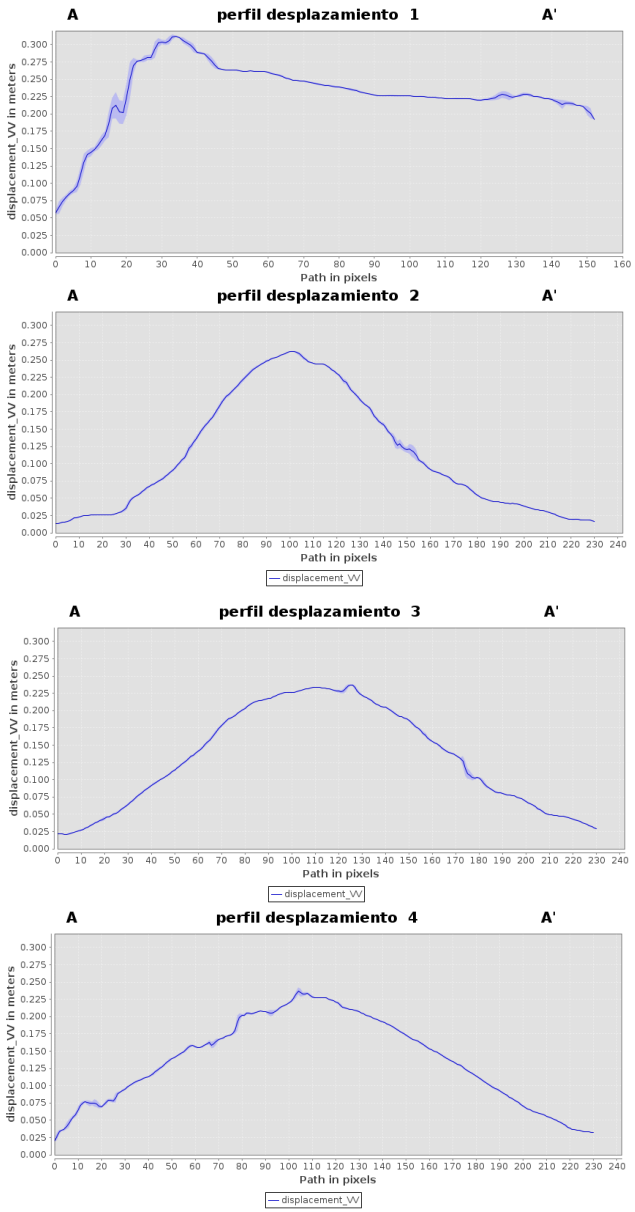
Resultado 08-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



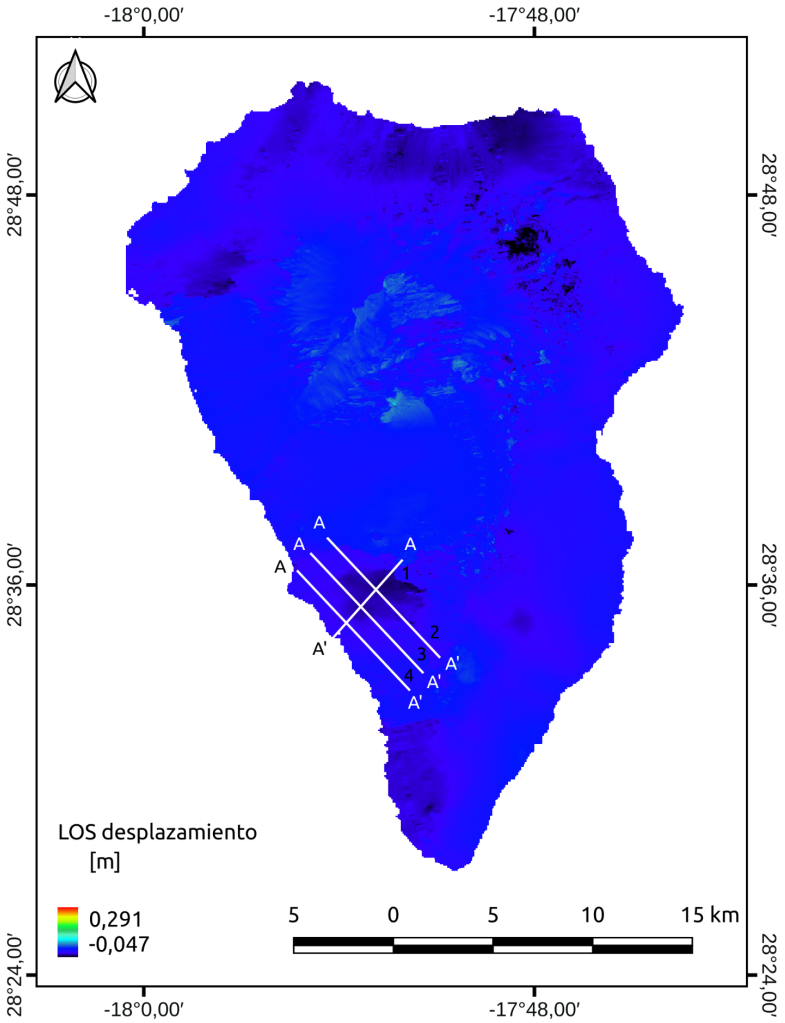


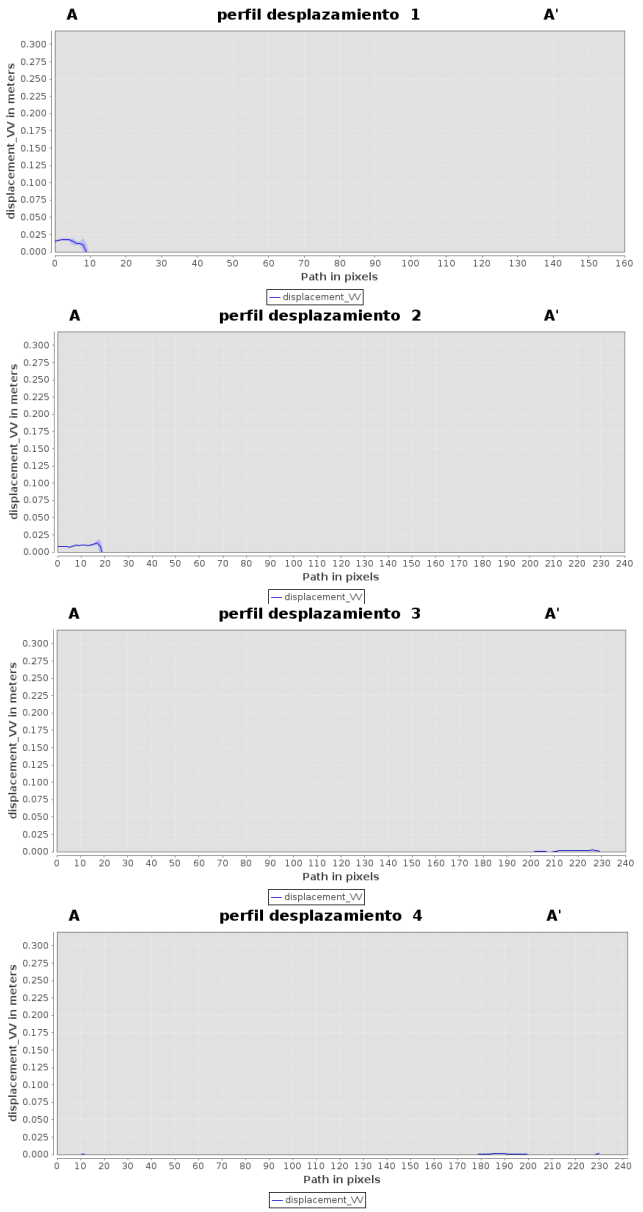
Resultado 14-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)





Resultado 26-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)





Observando los resultados, se aprecia cómo la deformación disminuye cuanto más se acerca la imagen esclava a la maestra, hasta llegar a la última imagen, en la cual no se aprecia ningún tipo de deformación, como se proclama en los perfiles transversales y longitudinal. Por este motivo, al comparar la fecha correspondiente al 26-09-2021 (esclava) con el 20-09-2021 (master), se observa cómo no hay ningún tipo de deformación, ya que, llegada esa fecha, la imagen esclava es mayor que la maestra, por lo que se está comparando dos imágenes post eruptivas. Se llega a la conclusión, por tanto, de que se eleva el terreno de la isla antes de la erupción, y cuando se produce la expulsión de los primeros materiales magmáticos cesa esta elevación.

Se dispone y se han procesado imágenes hasta finales del 2021, y como se puede apreciar en el anexo, todos los productos generados tras la erupción volcánica no presentan cambios significativos en deformaciones del terreno. Esto quiere decir que una vez se ha expulsado la lava del subsuelo, cesa la elevación de la superficie de la zona de estudio.

Analizando los productos mencionados, correspondientes a las fechas del 27 de agosto hasta el 14 de septiembre, la fecha más cercana a la erupción en la toma de imágenes ascendentes, se observa en la Tabla 12 la variación en centímetros observada en los perfiles transversales y longitudinales. En esta se muestra la máxima deformación correspondiente a cada día.

	Longitudinal (1) [m]	Transversal (2) [m]	Transversal (3) [m]	Transversal (4) [m]
27-ago	0.340	0.300	0.290	0.350
2-sept	0.280	0.260	0.260	0.275
8-sept	0.275	0.250	0.230	0.230
14-sept	0.260	0.240	0.225	0.210

Tabla 12: Variación en metros en la deformación de la isla dependiendo de la fecha.

En la Figura 60 se aprecia visualmente esta evolución, en la que se ve cómo a medida que la fecha de la imagen esclava se aproxima a la fecha de la imagen master, la deformación en metros disminuye, pasando de estar la media en 30 a estar a 25 cm el 14 de septiembre. Esto indica que el momento de deformación de la isla se encuentra muy próximo al momento de erupción del volcán.

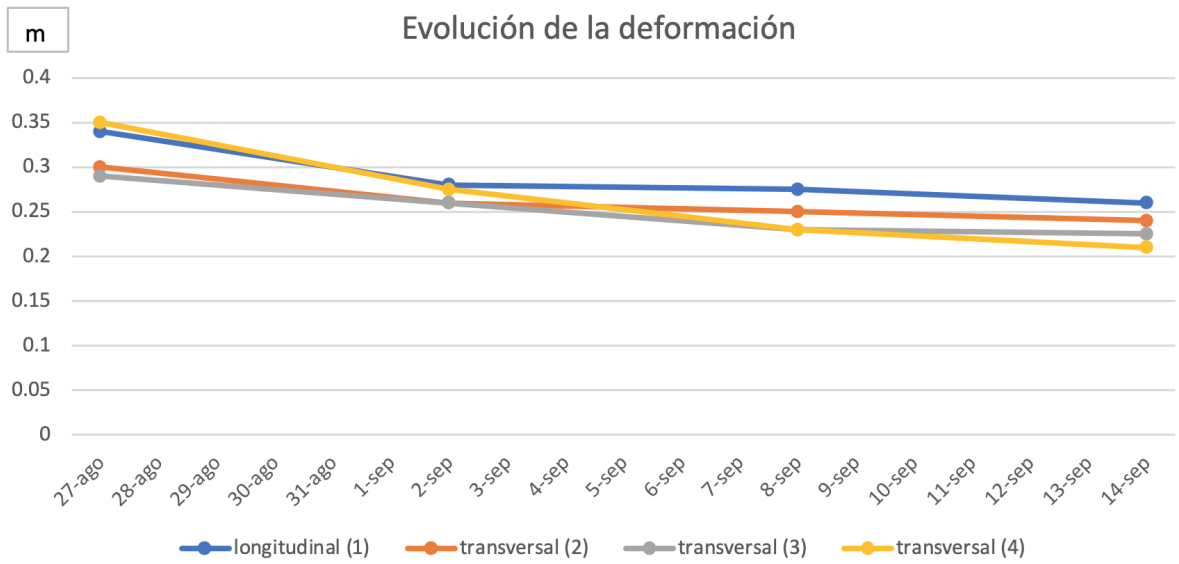


Figura 60: Gráfico de la evolución en la deformación del terreno con imágenes ascendentes tras el procesado.

Teniendo en cuenta que el 14 de septiembre es la última imagen esclava disponible en ascendente, se asume que la deformación de estos 25 centímetros sucede entre este día y el 20 de septiembre, que es la imagen master, es decir 6 días. Con esta conclusión, se observa que el proceso de deformación del terreno durante la evolución volcánica previa a una erupción es de carácter inmediato, con un lapso de tiempo de apenas unos días entre la detección inicial de la deformación superficial.

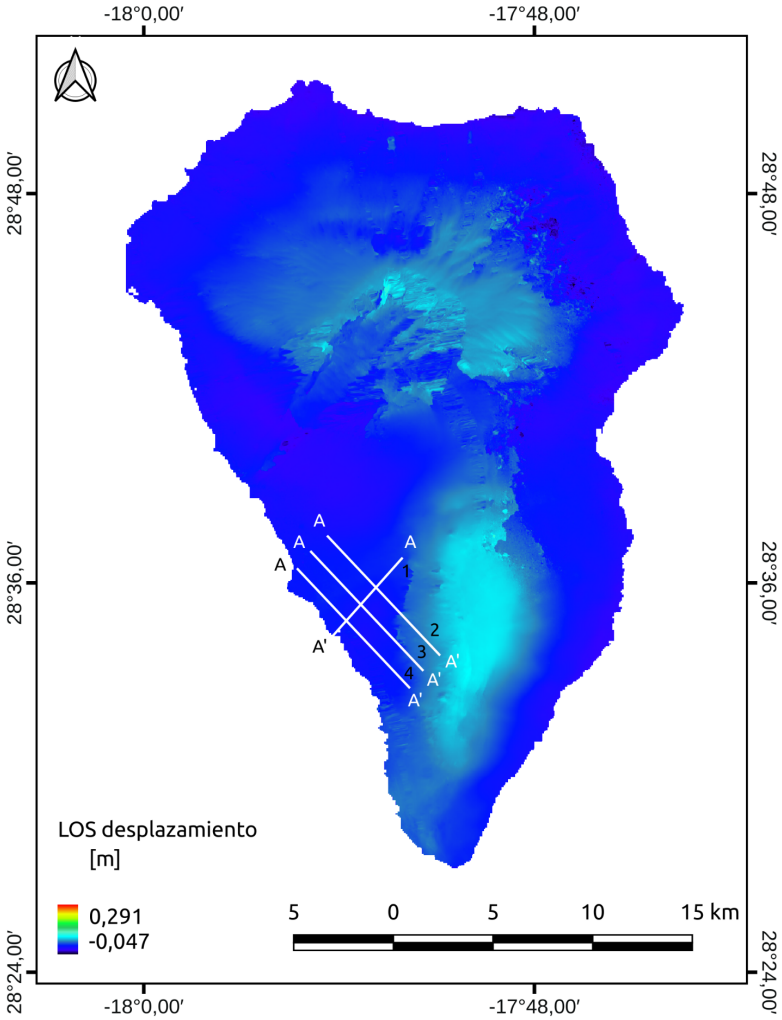
Para cuantificar de forma más exacta la elevación del terreno en cada día, se realiza un proceso en el que se cambia la imagen maestra, para comparar así día por día cada imagen y definir en qué momento se produjo la mayor deformación, teniendo en cuenta que las imágenes SAR de Sentinel-1 tienen una resolución temporal de 6 días.

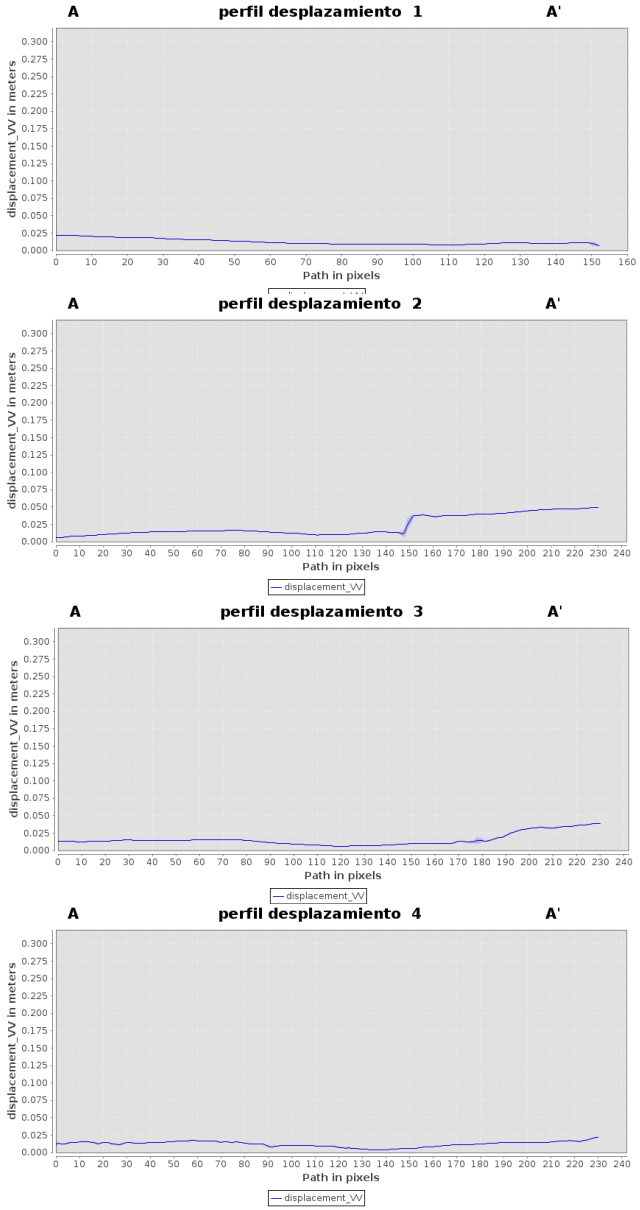
En la Tabla 13, se aprecia cada imagen maestra con su correspondiente esclava, correspondiendo al orden de representación que tienen los productos a continuación.

Imagen esclava	Imagen master
27-08-2021	02-09-2021
02-09-2021	08-09-2021
08-09-2021	14-09-2021

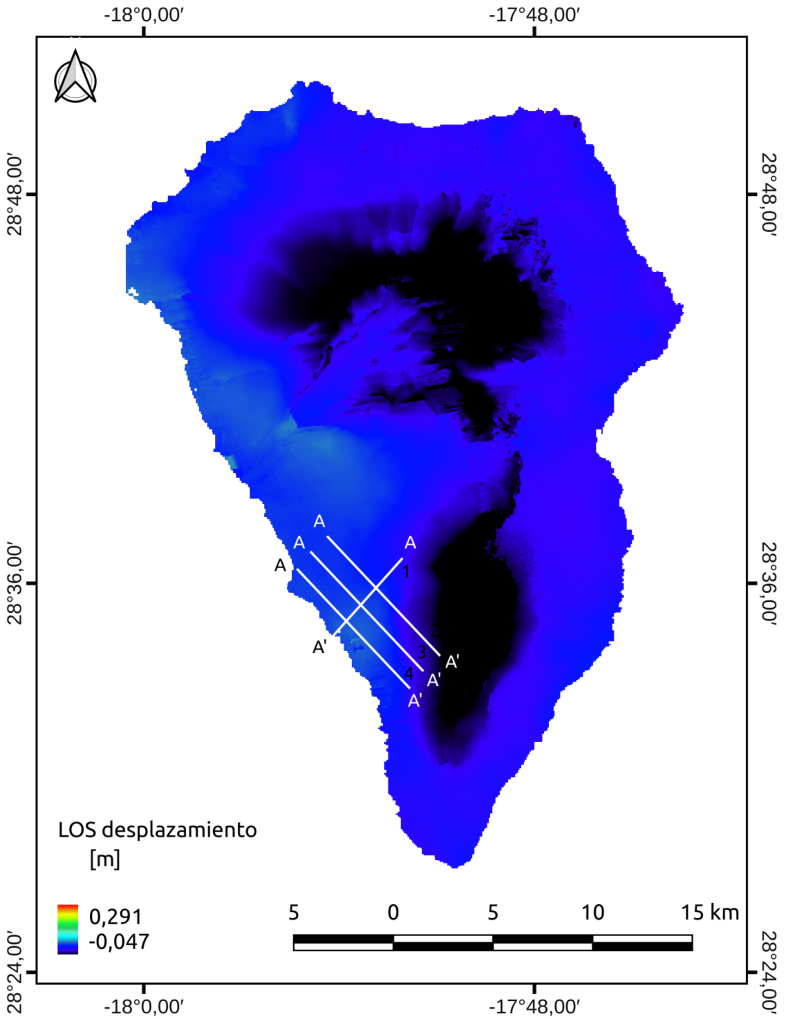
Tabla 13: Disposición de imágenes ascendentes procesadas con diferentes imágenes master

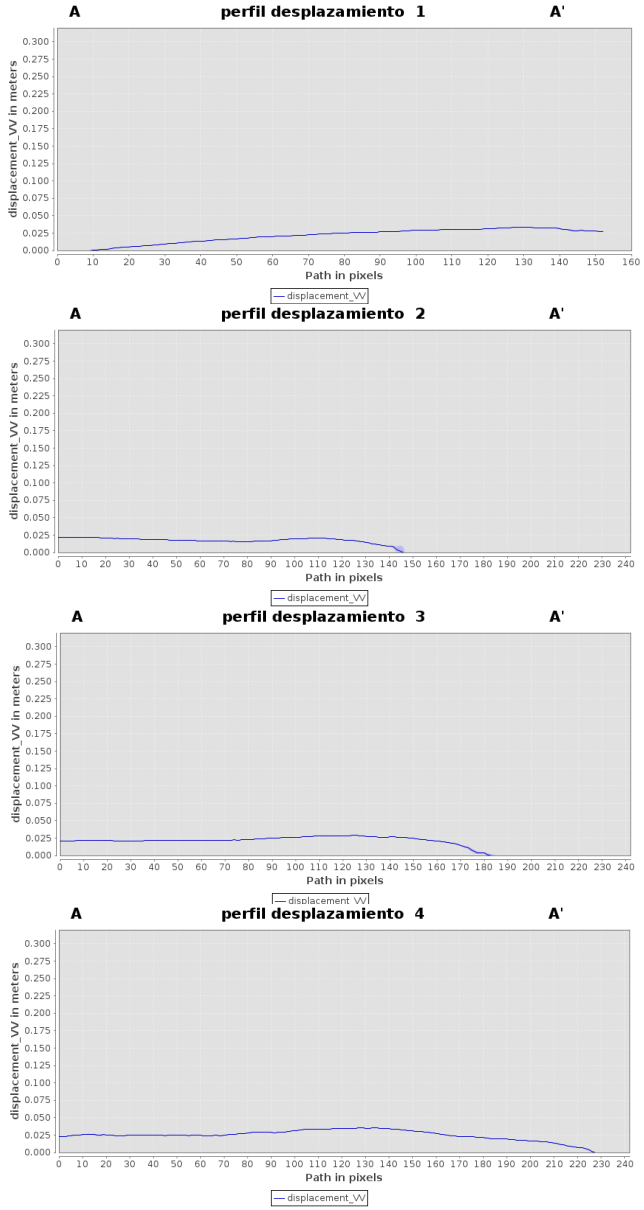
Resultado 27-08-2021 (slave) con 02-09-2021 (master)



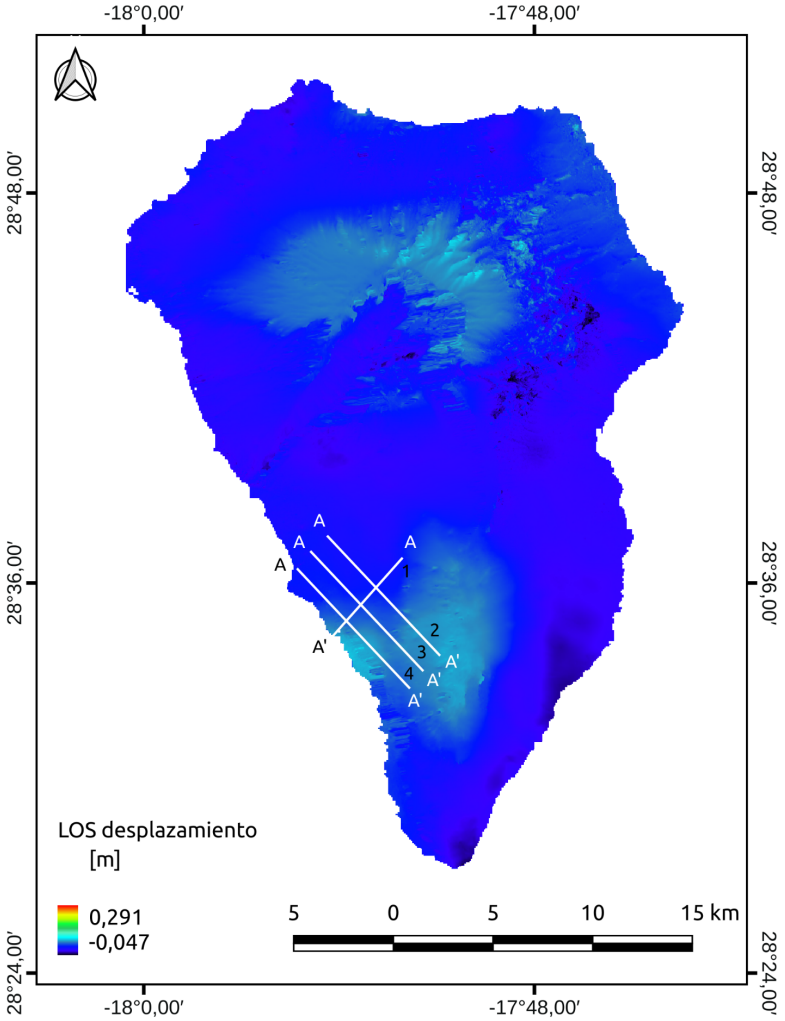


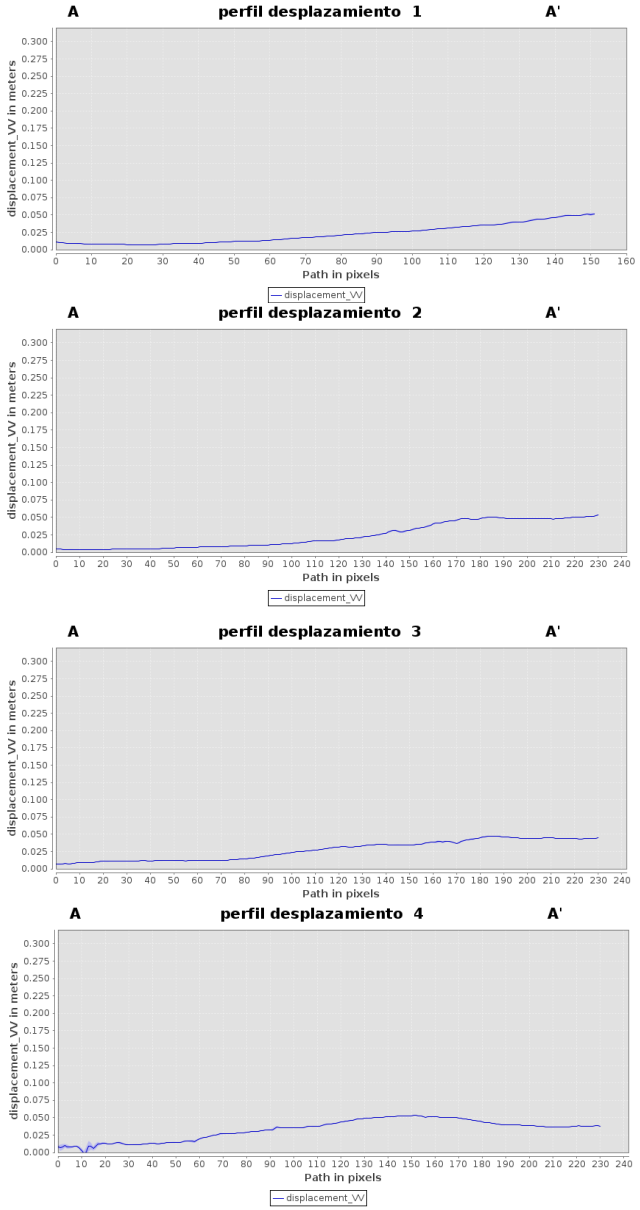
Resultado 02-09-2021 (slave) con 08-09-2021 (master)





Resultado 08-09-2021 (slave) con 14-09-2021 (master)





Aunque no se aprecia visualmente por la disposición de la paleta de colores, al obtener los perfiles de la zona de estudio se observan las variaciones ocurridas entre cada día. En la siguiente Tabla 14 se cuantifica en centímetros la máxima variación entre días.

Slave	Master	Longitudinal (1) [m]	Transversal (2) [m]	Transversal (3) [m]	Transversal (4) [m]
27-ago	2-sept	0.025	0.050	0.040	0.020
2-sept	8-sept	0.030	0.025	0.030	0.040
8-sept	14-sept	0.050	0.050	0.050	0.050
	∑ =	0.105	0.125	0.120	0.110

Tabla 14: Cuantificación de la progresión en la deformación 1.

Como se observa en la Tabla 14**,** hay un incremento en la deformación progresiva entre imágenes maestras y esclavas cuanto más se aproxima la fecha de la erupción. Cuando se suma el conjunto de deformaciones calculados en días independientes, se obtiene que entre el 27 de agosto y el 14 de septiembre, se produce un incremento aproximadamente de 10 cm.

Si introducimos la deformación que se produce entre el 14 de septiembre y el 20, se observa claramente que es el periodo de tiempo en el que más se deforma la zona de estudio, como se puede apreciar en la Tabla 15.

Slave	Master	Longitudinal (1) [m]	Transversal (2) [m]	Transversal (3) [m]	Transversal (4) [m]
27-ago	2-sept	0.025	0.050	0.040	0.020
2-sept	8-sept	0.030	0.025	0.030	0.040
8-sept	14-sept	0.050	0.050	0.050	0.050
14-sept	20-sept	0.260	0.240	0.225	0.210
	∑ =	0.365	0.365	0.345	0.320

Tabla 15: Cuantificación de la progresión en la deformación 2.

5.1.2 Resultados descendentes.

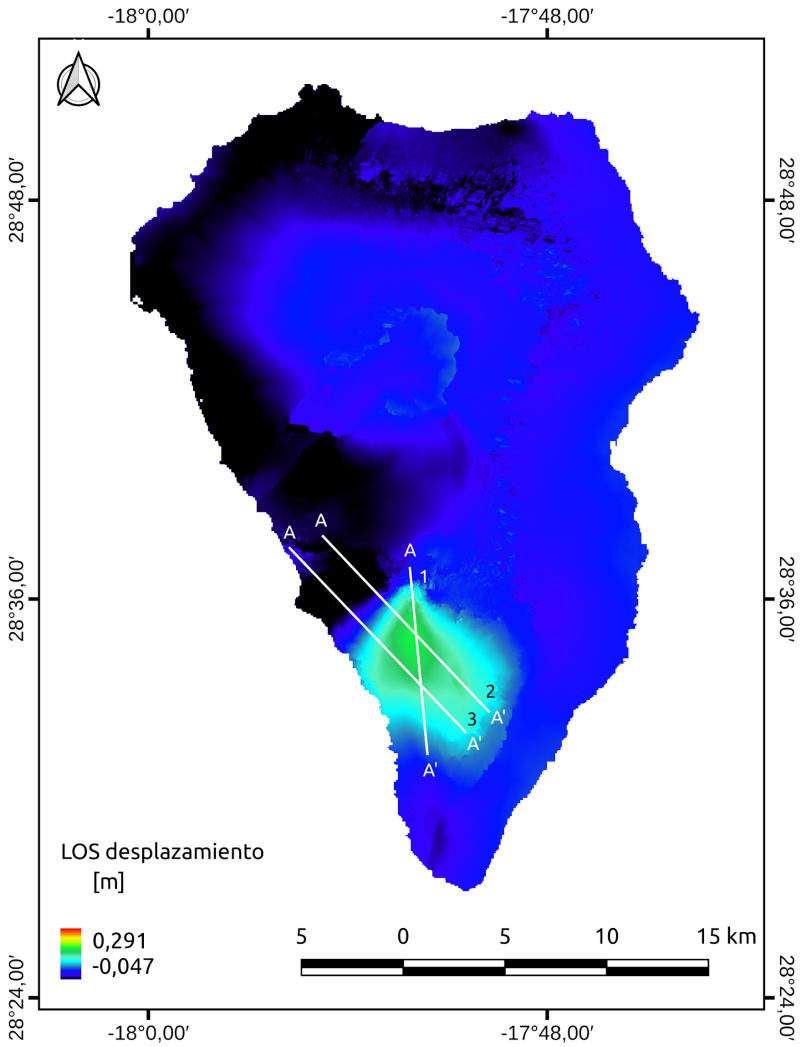
El procedimiento en el caso de las imágenes descendentes es exactamente igual que con las ascendentes. Se observan en este apartado de igual modo las imágenes más representativas para el estudio, mientras que el resto se mantendrá en el anexo. En ellas se ven variaciones parecidas a las ascendentes, teniendo en cuenta que las fechas de estas imágenes no coinciden con las previas y que el ángulo de observación varía entre pasadas ascendentes y descendentes. Estas variaciones consiguen mostrar más detalles sobre el momento de elevación del terreno de la isla.

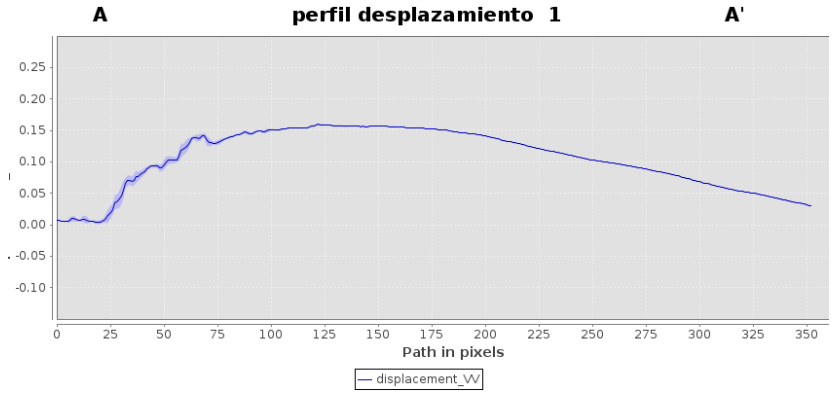
En la Tabla 16 se muestran los resultados previos a la erupción volcánica, manteniendo la imagen master como el 22 de septiembre de 2021, la imagen más cercana a la fecha de erupción. En ellas se aprecia la elevación de la isla, y como en el último día disponible antes de la imagen master, es decir, el 16 de septiembre, es la fecha en la que aparece la mayor deformación. Esta información coincide con la observada en el caso del proceso de imágenes ascendentes.

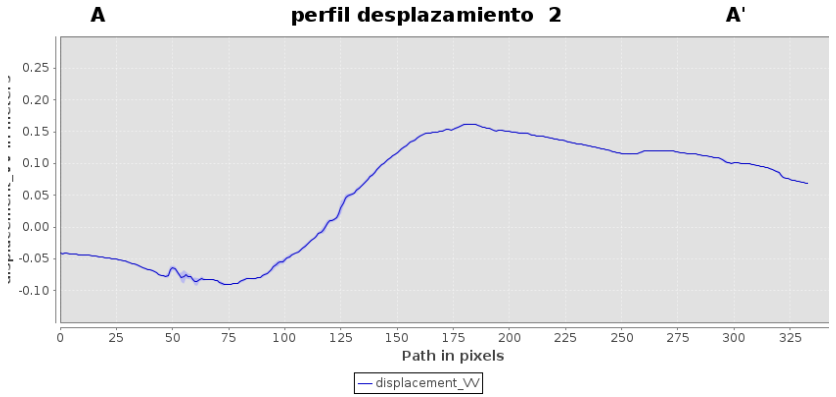
Imagen esclava	Imagen master
29-08-2021	22-09-2021
04-09-2021	22-09-2021
10-09-2021	22-09-2021
16-09-2021	22-09-2021
28-09-2021	22-09-2021

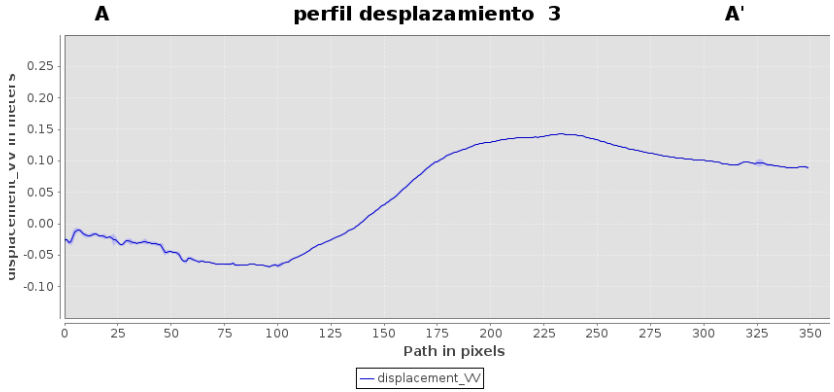
Tabla 16: Disposición de imágenes ascendentes previas a la erupción procesadas.

Resultado 29-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

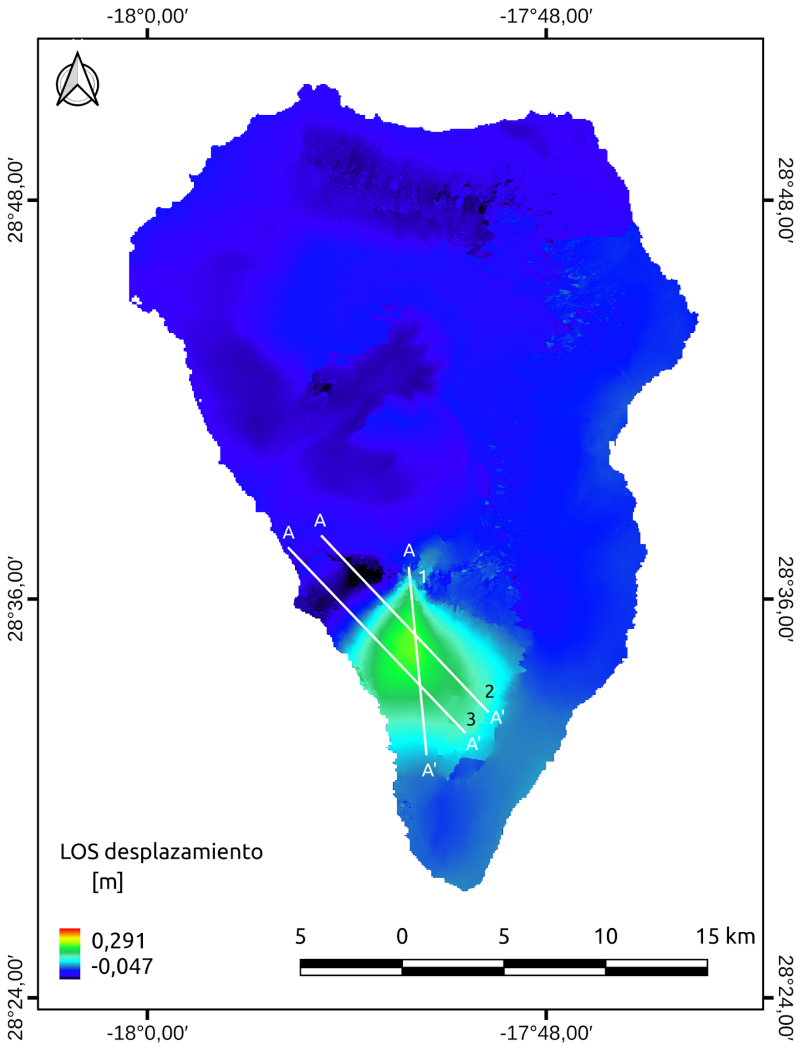


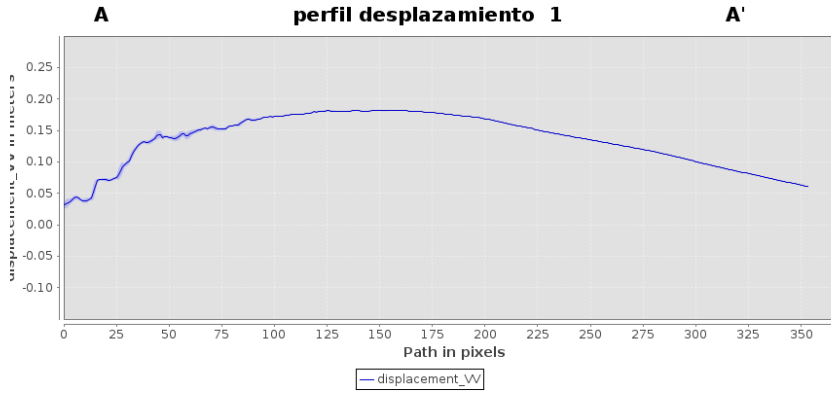




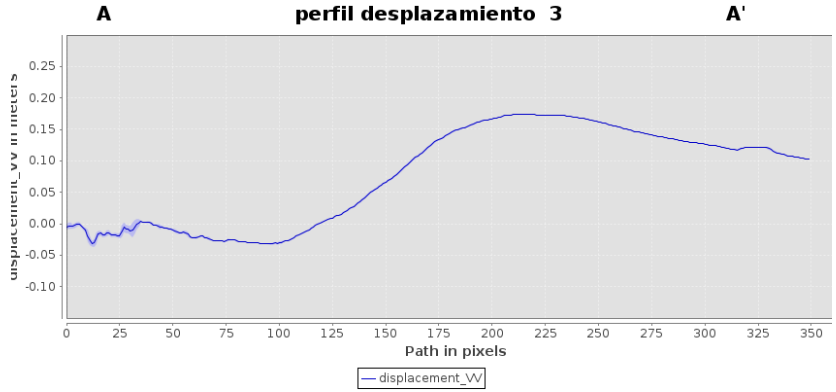


Resultado 04-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

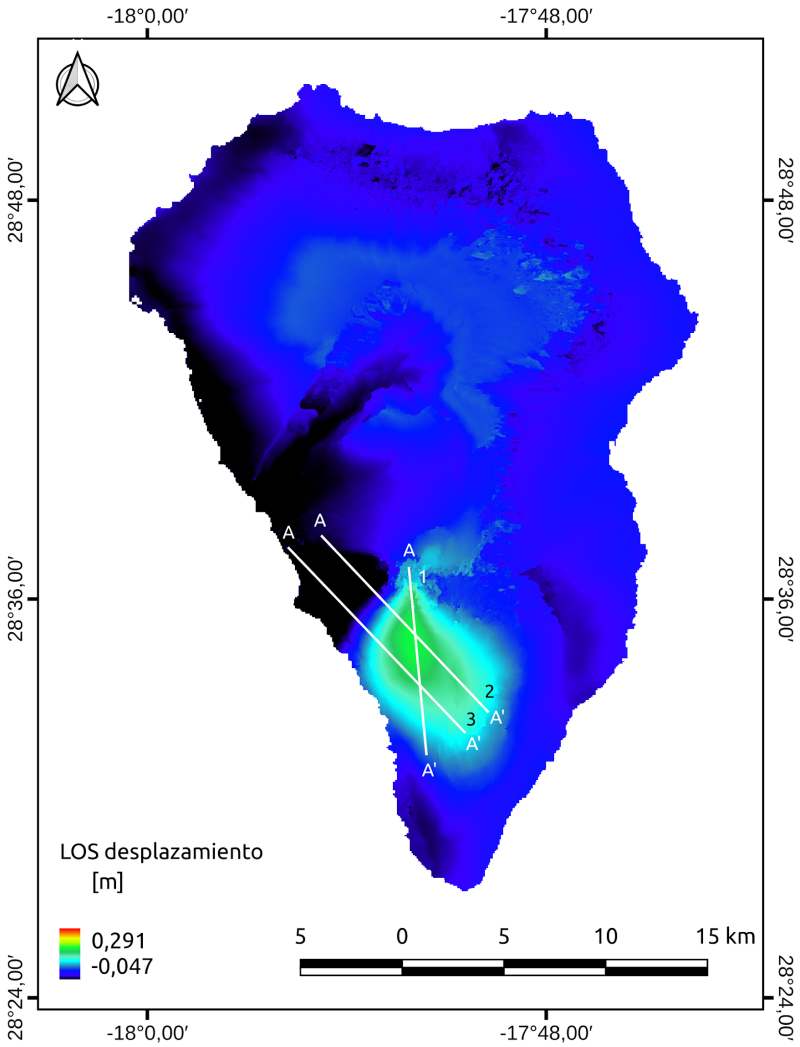


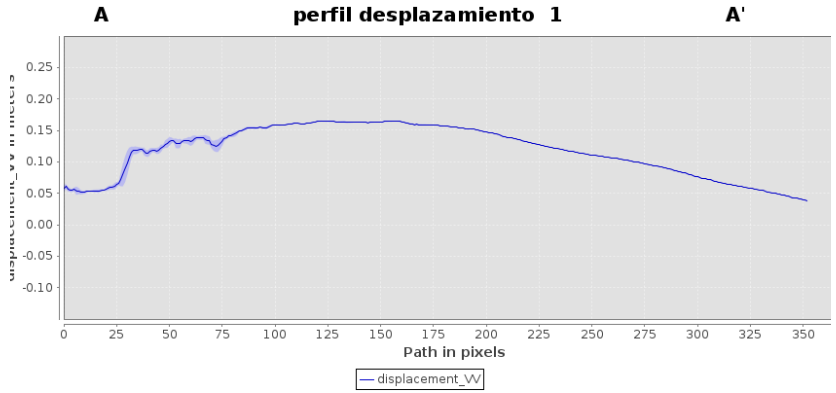


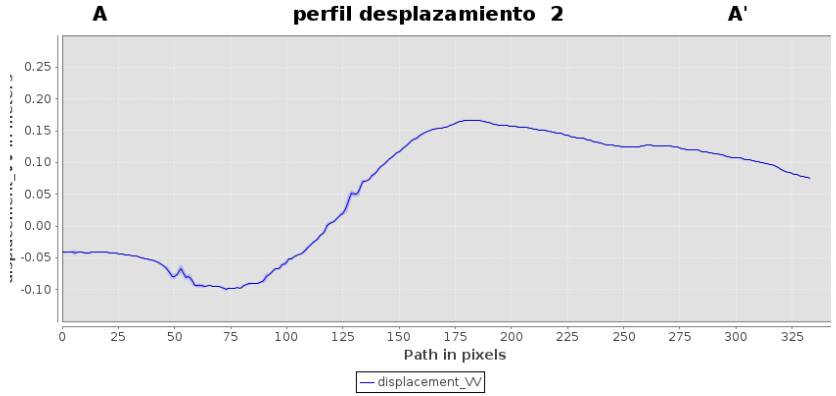


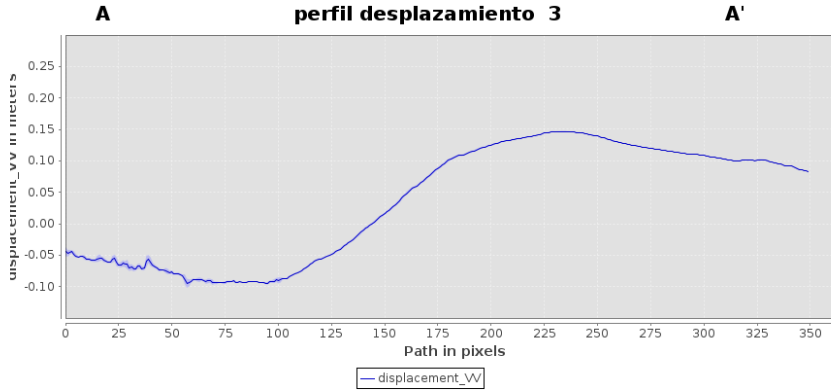


Resultado 10-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

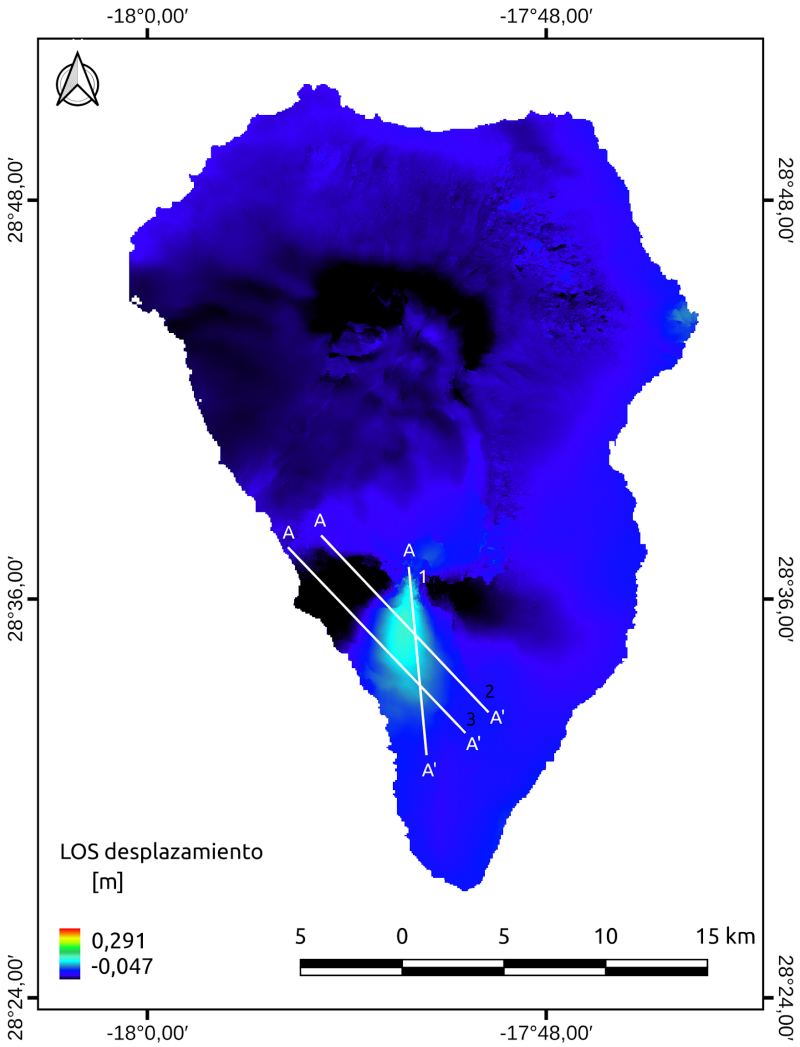


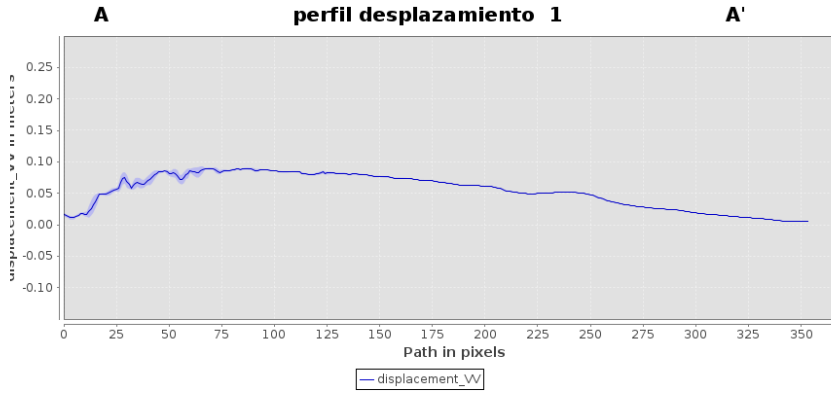


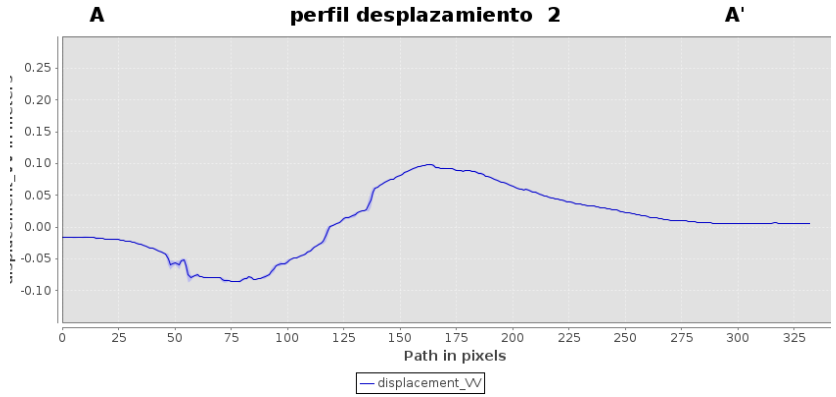




Resultado 16-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

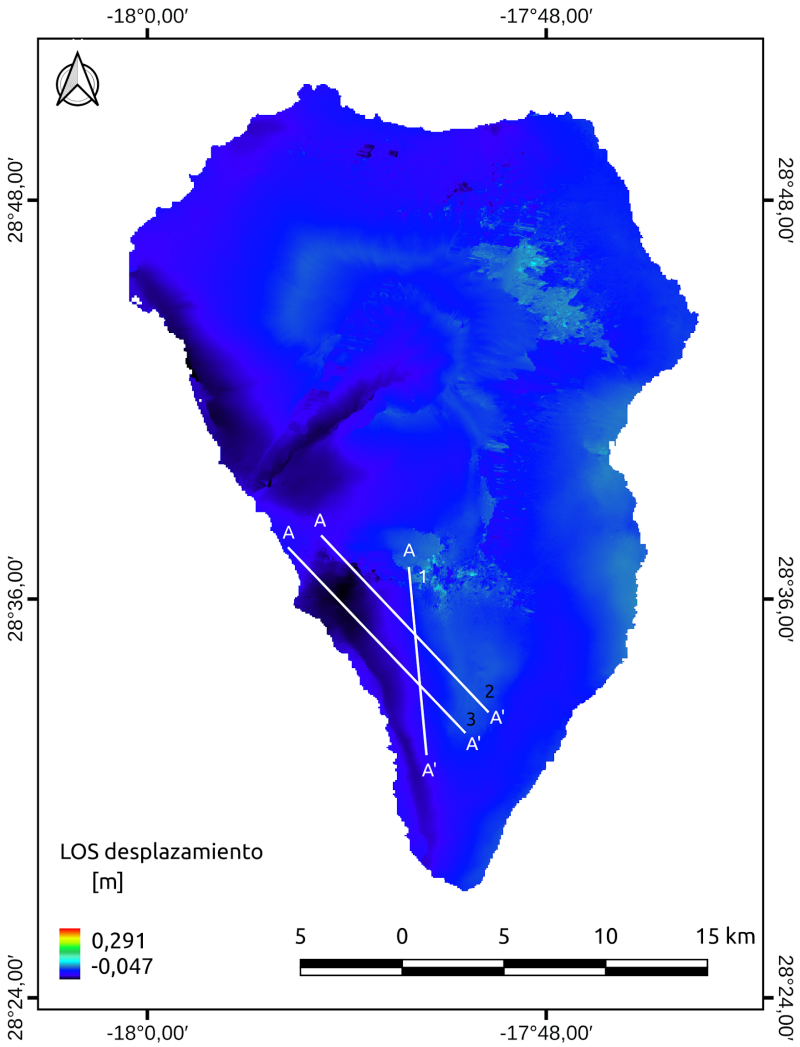


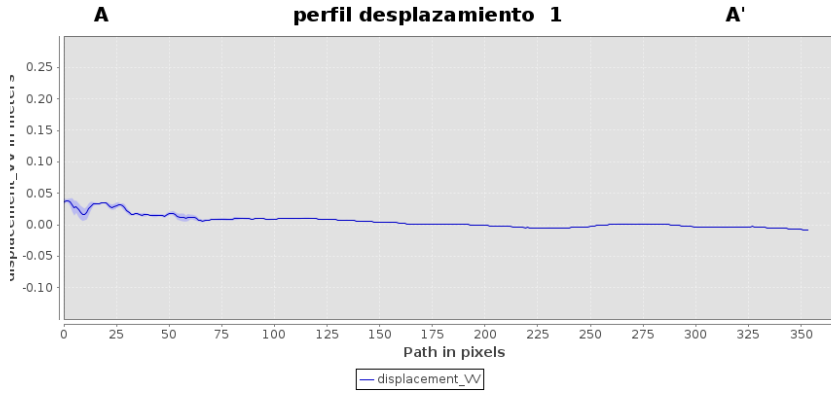


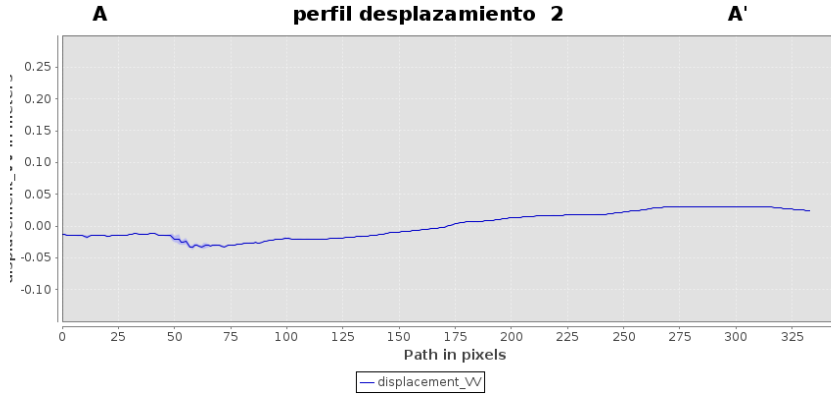


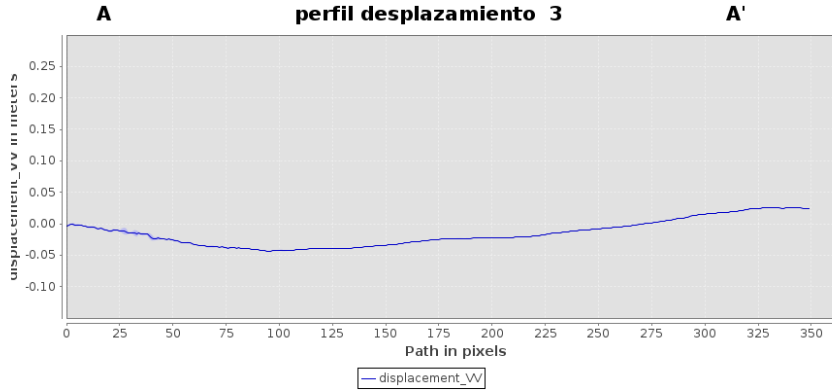


Resultado 28-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)









Como es apreciable, las deformaciones disminuyen a medida que se aproximan a la imagen master, hasta llegar a la última imagen, dónde la fecha de comparación con la master sobrepasa la fecha de erupción, por lo que la deformación se mantiene próxima a 0 metros.

Al contrario que con las imágenes ascendentes, la forma de la deformación en la isla, y los máximos que se observan en los perfiles, difieren. Esto se debe al cambio en el ángulo de observación LOS (Line of Sight), que dependiendo desde qué punto observe el terreno, cambia la perspectiva de las deformaciones del mismo. En la Figura 61 se muestra la línea de visión de un satélite SAR sobre un terreno con una determinada pendiente [51].

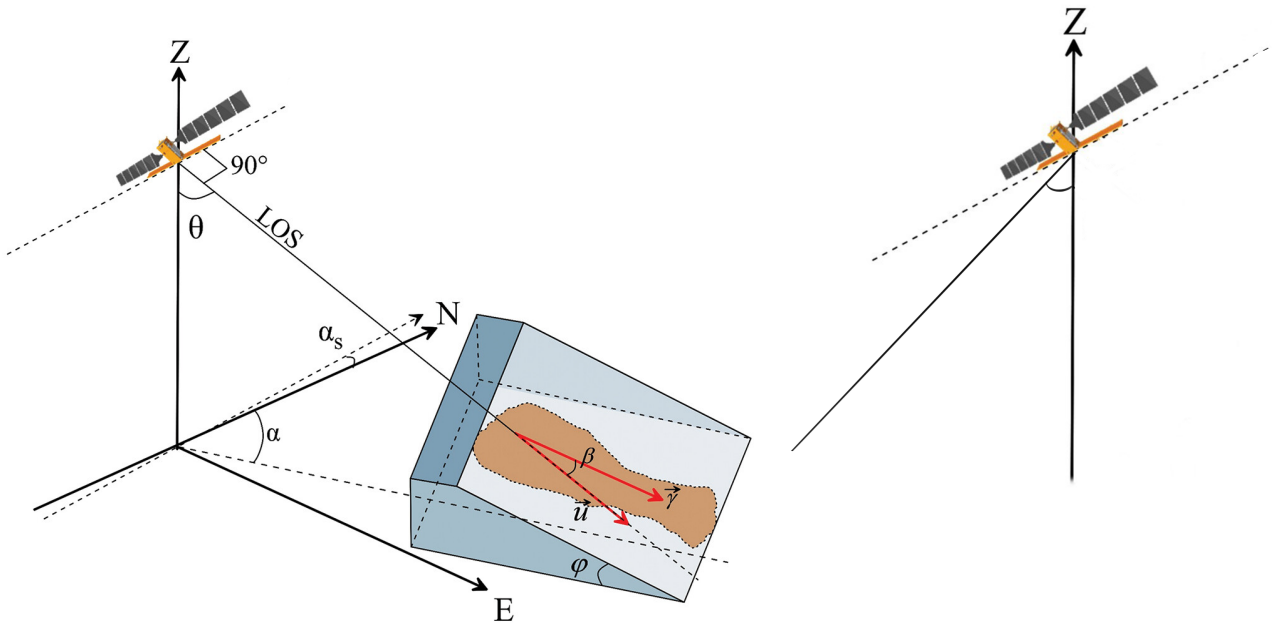


Figura 61: Observación ascendente y descendente LOS

Por este motivo, la máxima deformación observada en las imágenes descendentes ronda los 15 cm.

En la Tabla 17, al igual que se hizo en el caso de los resultados con imágenes ascendentes, se aprecia la deformación observada en los perfiles longitudinales y transversales en las fechas correspondientes a la Tabla 14.

	Longitudinal (1)	Transversal (2)	Transversal (3)
29-ago	0.16	0.17	0.14
4-sept	0.18	0.17	0.17
10-sept	0.16	0.16	0.15
16-sept	0.09	0.10	0.05

Tabla 17: Variación en metros de la deformación del terreno.

Basada en esta tabla, en la Figura 62 se aprecia la evolución de estas deformaciones de cada imagen esclava con la maestra, cuanto más se acerca a la erupción más disminuye la deformación, pasando de ser de casi 20 centímetros a 9 aproximadamente. Esta bajada tan brusca en la deformación indica que la mayor elevación del terreno se produce los días más cercanos a la erupción.

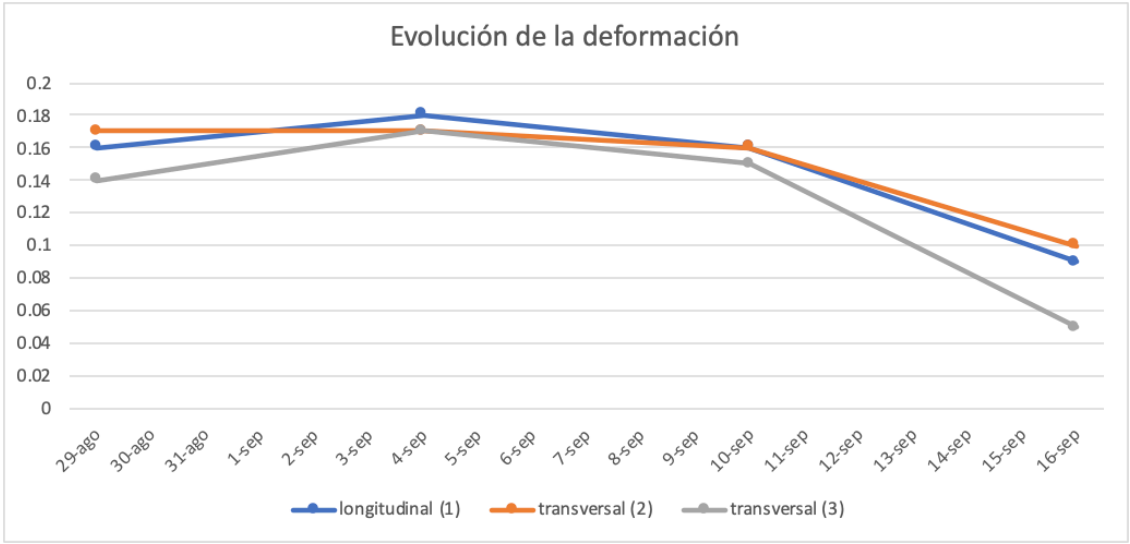


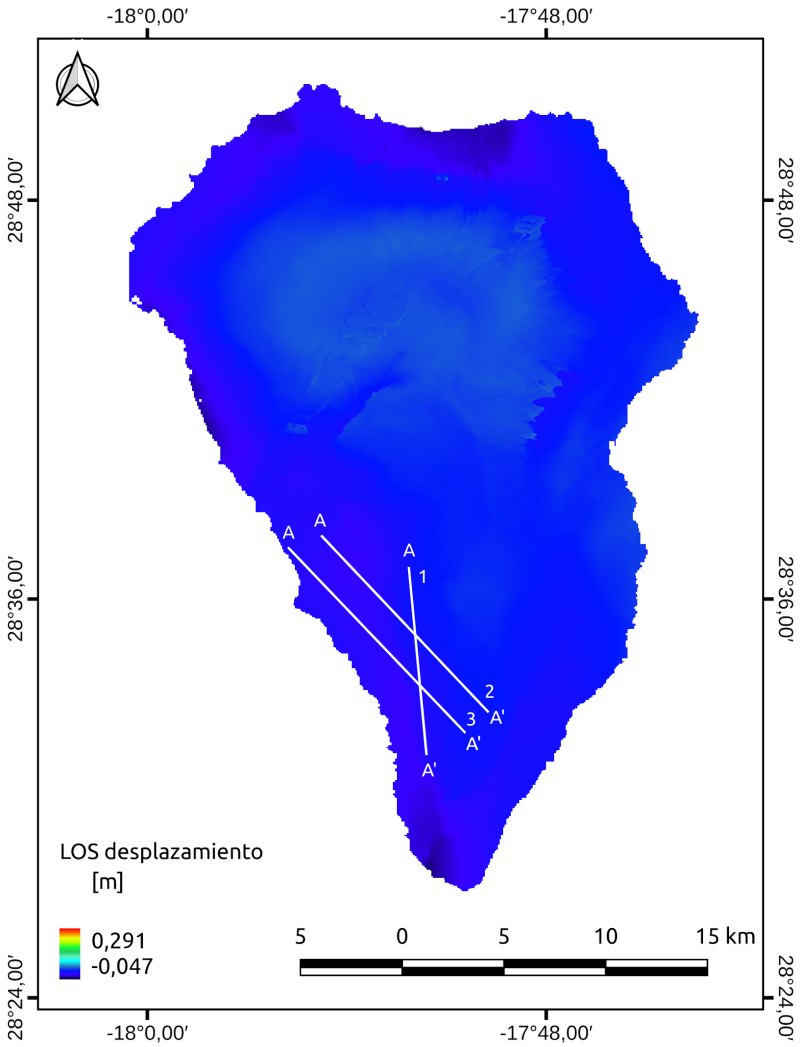
Figura 62: Gráfico de la evolución en las deformaciones del terreno con imágenes descendentes.

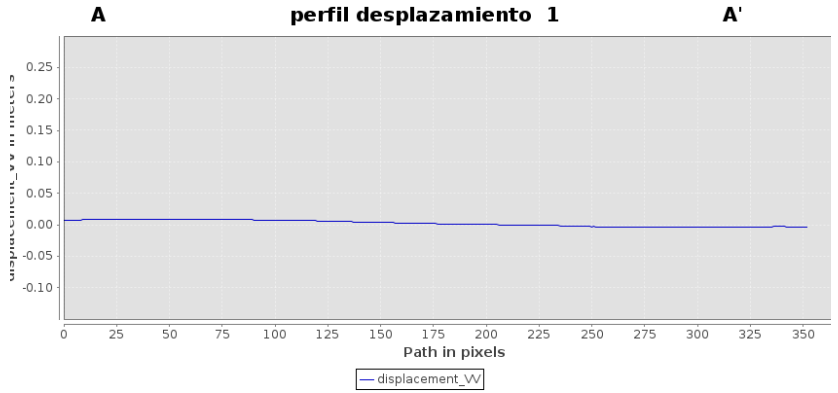
Al igual que en el apartado anterior, para cuantificar de forma más precisa la elevación del terreno cada día independientemente, se cambia la fecha de la imagen master como se aprecia en la Tabla 18. De esta forma, se puede cuantificar la deformación producida en cada periodo de tiempo.

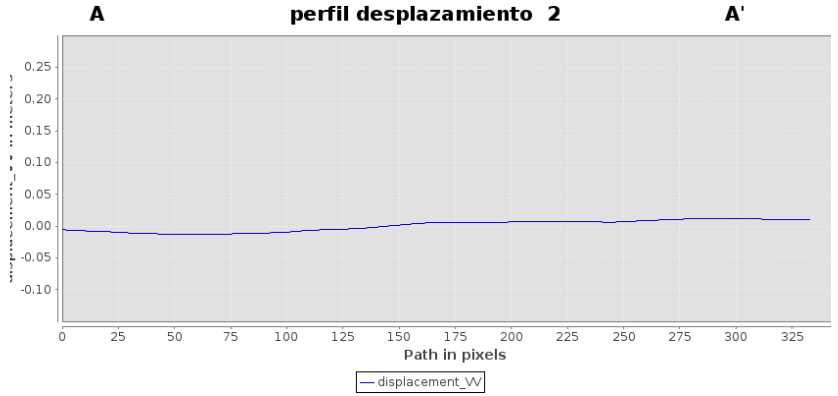
Imagen esclava	Imagen master
29-08-2021	04-09-2021
04-09-2021	10-09-2021
10-09-2021	16-09-2021
16-09-2021	22-09-2021

Tabla 18: Disposición de imágenes descendentes procesadas con diferentes imágenes master.

Resultado 29-08-2021 (slave) con 04-09-2021 (master)

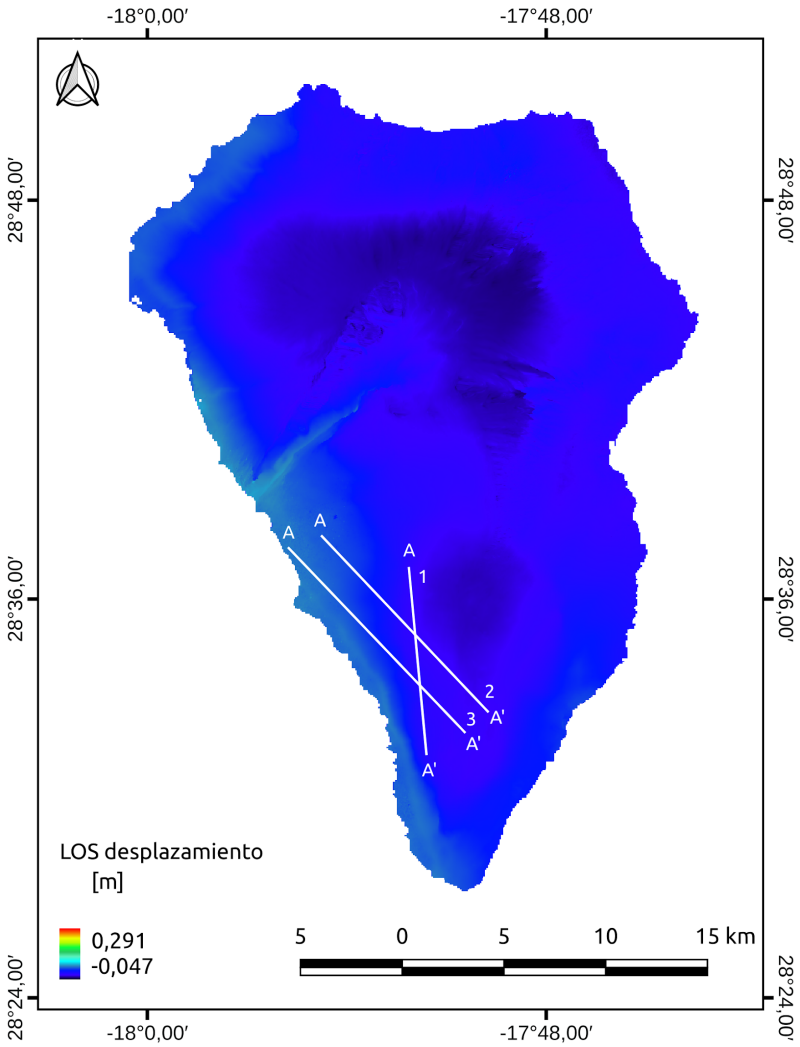




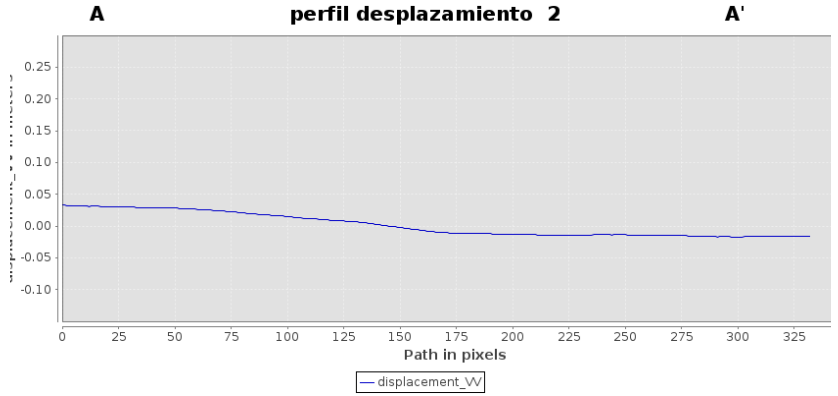


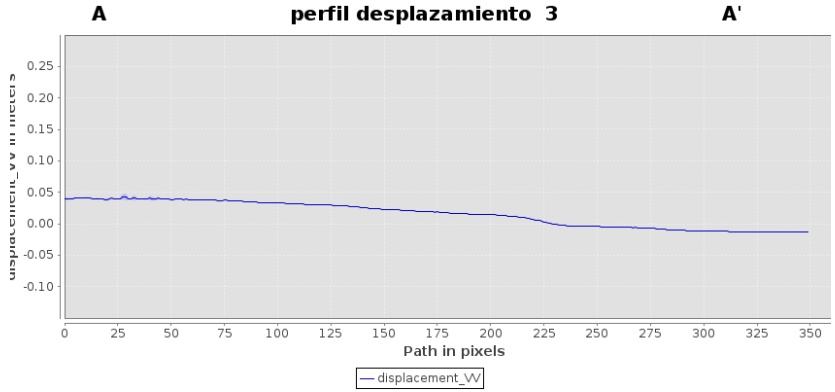


Resultado 04-09-2021 (slave) con 10-09-2021 (master)

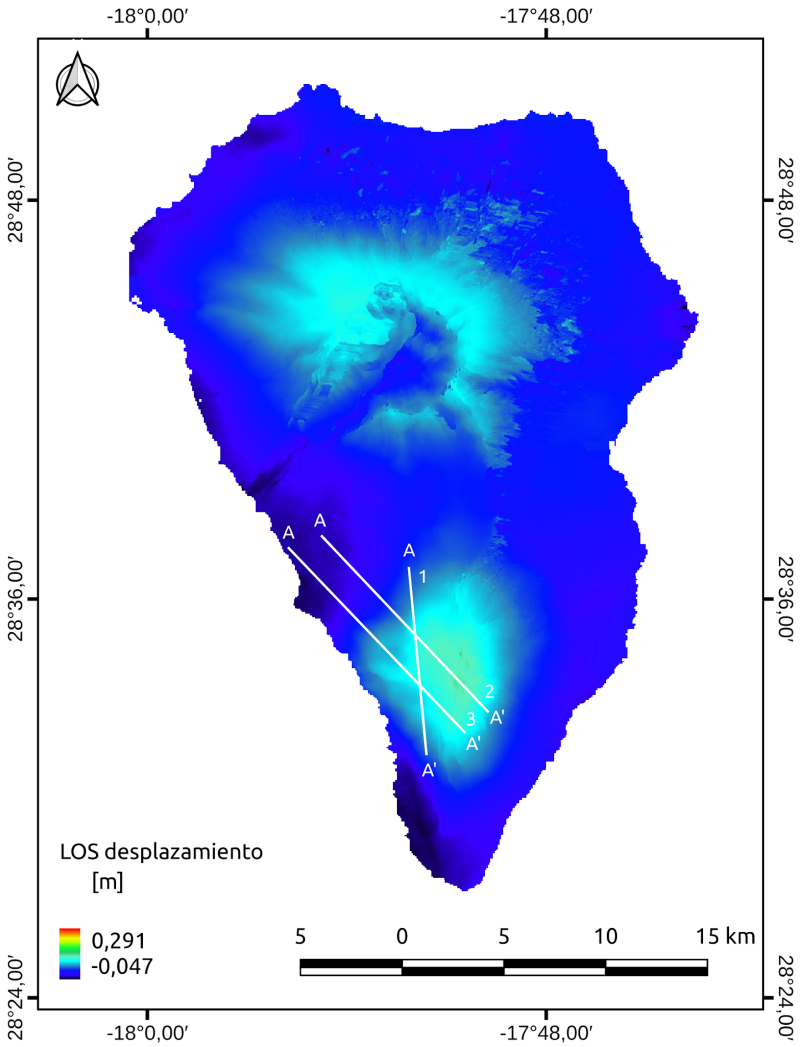


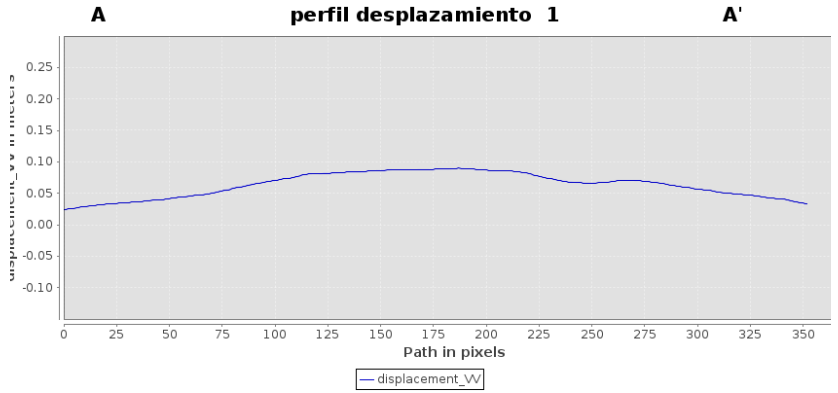


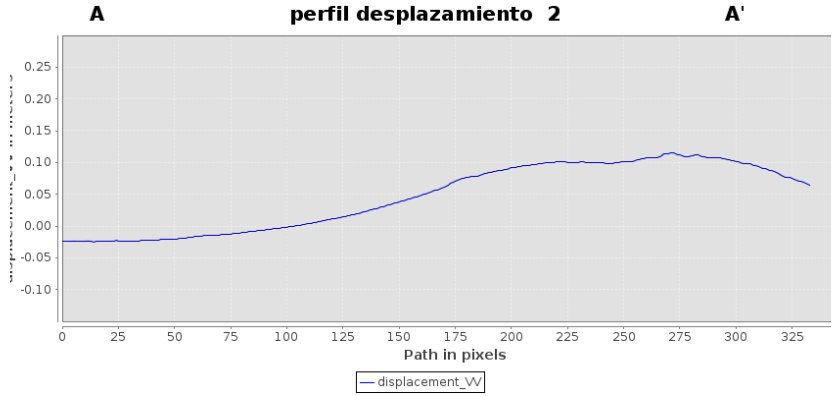


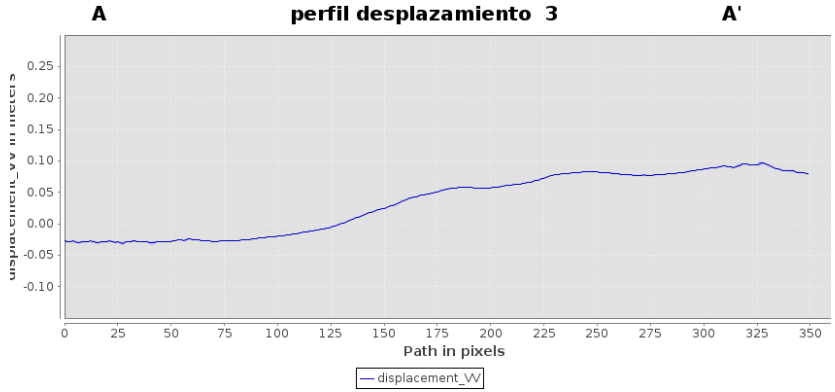


Resultado 10-09-2021 (slave) con 16-09-2021 (master)

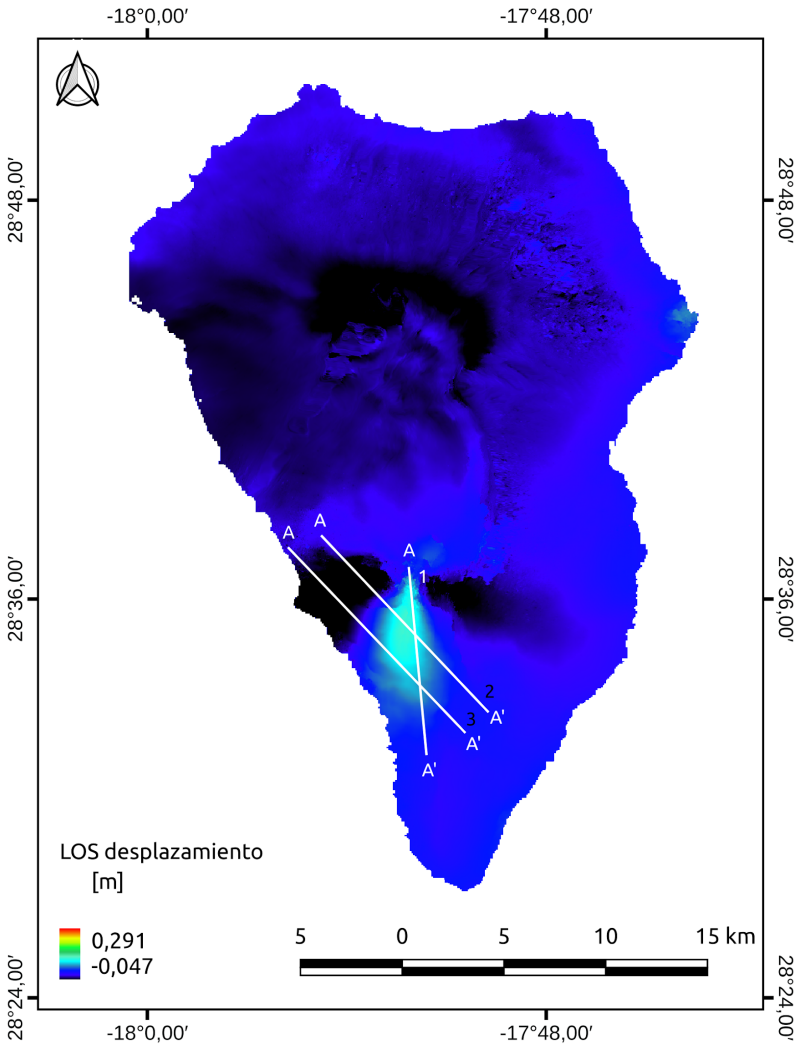


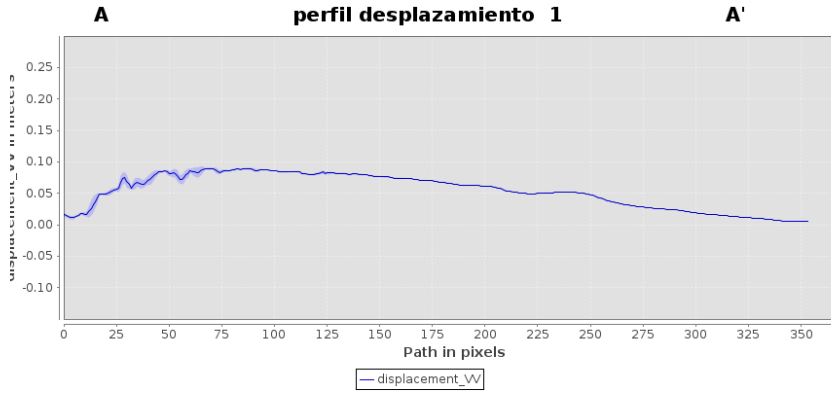


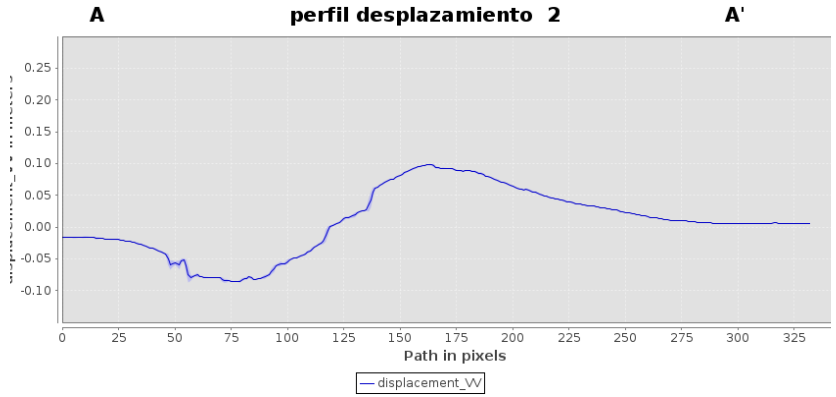


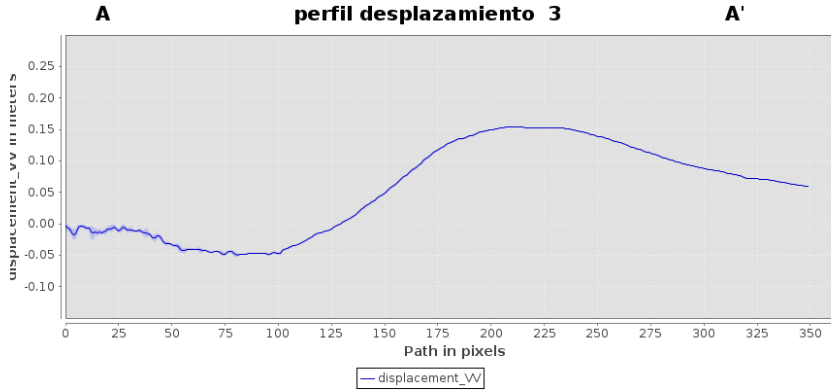


Resultado 16-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)









Observando la información de los perfiles, se recopilan las variaciones producidas en cada fecha en la Tabla 19, incluyendo la suma de estas deformaciones para obtener la totalidad de la deformación.

Slave	Master	Longitudinal (1) [m]	Transversal (2) [m]	Transversal (3) [m]
29-ago	4-sept	0.01	0.01	0.00
4-sept	10-sept	0.00	0.04	0.05
10-sept	16-sept	0.09	0.12	0.10
16-sept	22-sept	0.09	0.10	0.15
	∑ =	0.19	0.27	0.3

Tabla 19: Cuantificación de la progresión en la deformación de la isla.

Es visible cómo las deformaciones más representativas se producen entre el 10 de septiembre y el día de la erupción. Quiere decir que la isla empezó a deformarse 9 días antes de la erupción, teniendo en cuenta que esta se produjo el 19 de septiembre. En las imágenes ascendentes se obtenía que la mayor deformación se producía entre el 14 y el 20 de septiembre, mientras que se apreciaba una menor entre el 8 y el 14 de septiembre. Con esta nueva información proporcionada por las imágenes descendentes se puede acotar este periodo de deformación, ya que entre el 4 y el 10 de septiembre apenas se producen movimientos según los productos generados con imágenes descendentes.

5.1.2 Discusión.

Los productos Sentinel-1 IW SLC fueron procesados para obtener interferogramas multitemporales que indican un obvio movimiento del terreno. Esta deformación específica está relacionada con el ascenso de magma e inflación del suelo por su causa. Es importante destacar que a medida que aumenta la línea de base temporal de los pares interferométricos seleccionados, disminuye la calidad de los interferogramas generados debido a la decorrelación temporal.

Se puede observar un movimiento relativo hacia el satélite en colores cálidos en los resultados preeruptivos, lo que sugiere una inflación del suelo antes de la erupción inminente. Una vez producida la erupción volcánica, es posible identificar áreas que se alejan del satélite tanto en los datos ascendentes como descendentes, aunque muy levemente. Estas áreas se representan en colores oscuros y están relacionadas con la deflación del volcán, aunque a simple vista no son reconocibles, los perfiles generados del terreno corroboran la información.

Estos resultados se pueden comparar con diferentes artículos científicos publicados para comparar la correlación con la información resultante del estudio. Concretamente, De Luca y otros [52] y Kyriou y Nikolakopoulos [53], los cuales también aplican técnicas InSAR para la medición de la deformación en la isla de La Palma, obtienen resultados muy parecidos o iguales, tanto en ascendente como descendente. Con movimientos aproximados a los 30 y 20 cm para la máxima deformación, también concluyen que el mayor desplazamiento ocurre los días previos a la erupción, en concreto entre el 16 y 19 de septiembre.

De igual manera, el artículo [53] también confirma que tras la erupción se produce una subsidencia en la zona de actividad volcánica una vez se ha expulsado el material magmático. Se llega así a la conclusión de que las deformaciones se producen por el afloramiento de este material proveniente del manto terrestre, y que una vez es expulsado la isla recupera levemente su anterior posición.

5.2 Resultados GRD.

Al igual que en resultados anteriores, se obtienen mapas del objeto de estudio, en este caso la velocidad del terreno por día. Al ser la lava el único material en movimiento en esta zona y en este periodo de tiempo, se considera este procedimiento como el estudio de la velocidad de las coladas de lava.

En la Tabla 20 se informa de los días procesados, tanto en ascendente como en descendente, siendo la imagen master en el caso de la pasada ascendente el 2 de septiembre de 2021, mientras que para la descendente es el 4 de septiembre de 2021. El hecho de que sean días diferentes influye en el resultado, además de la propia diferencia entre sensores.

Fecha		Tipo	Pasada	Track	Fecha		Tipo	Pasada	Track
2021-10-08	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-10-10	2021-09-04	GRD	descendente	169
2021-11-07	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-11-09	2021-09-04	GRD	descendente	169
2021-12-01	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2021-12-03	2021-09-04	GRD	descendente	169
2022-01-12	2021-09-02	GRD	ascendente	60	2022-01-08	2021-09-04	GRD	descendente	169

Tabla 20: Selección de fechas de productos GRD

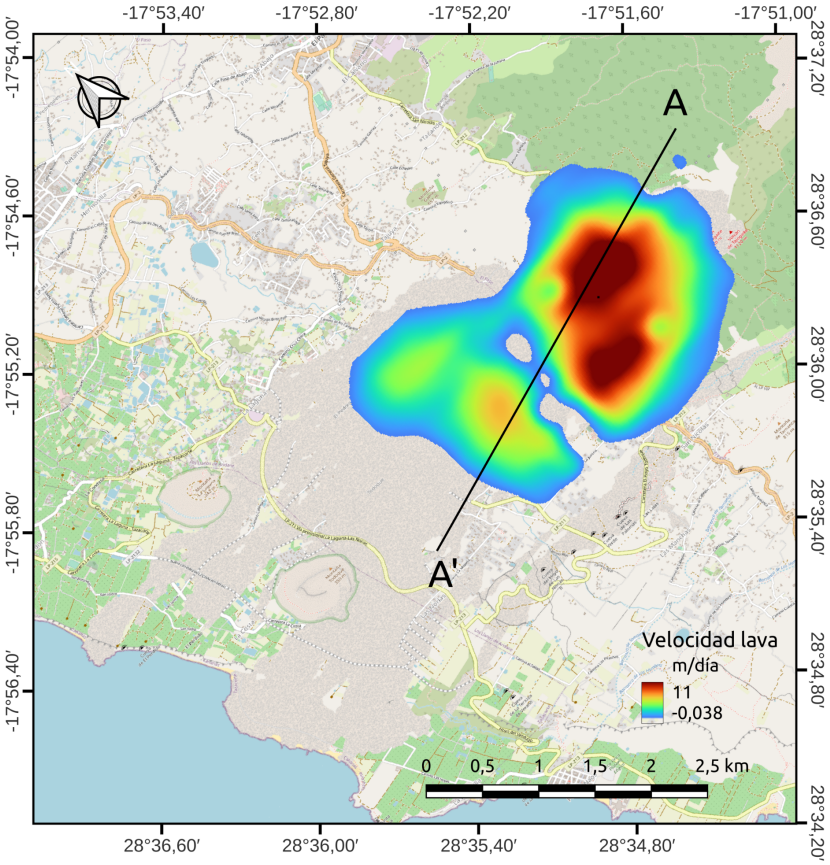
En los siguientes apartados se aprecian los resultados de ambas pasadas, teniendo en cuenta que la paleta de colores de los mapas generados es la mostrada en la Figura 63, donde la máxima velocidad se representa en rojo siendo esta de 11 metros al día.

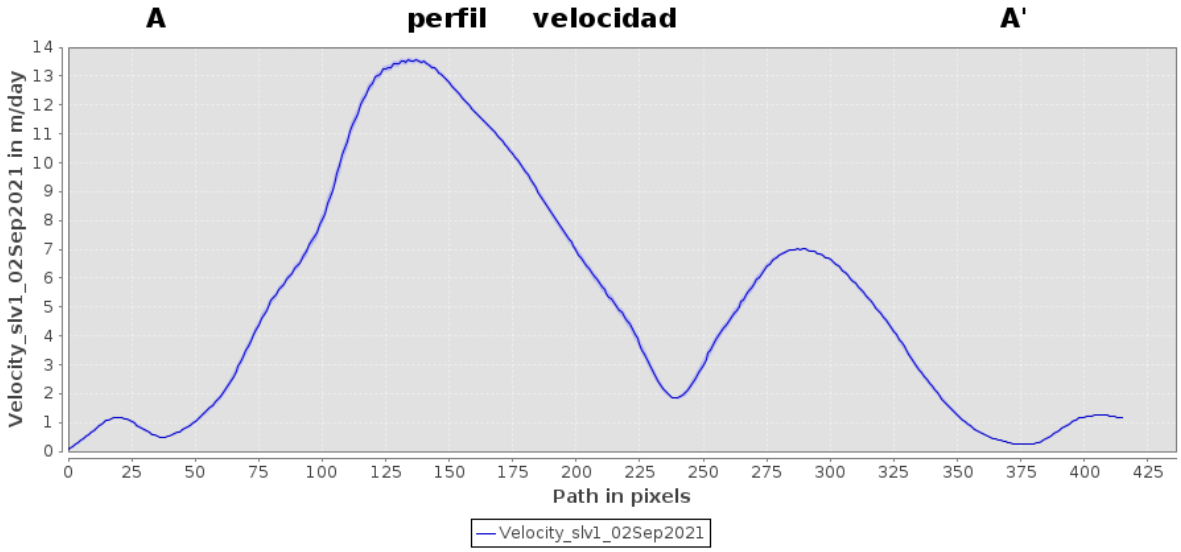


Figura 63: Paleta de colores de la velocidad de la lava.

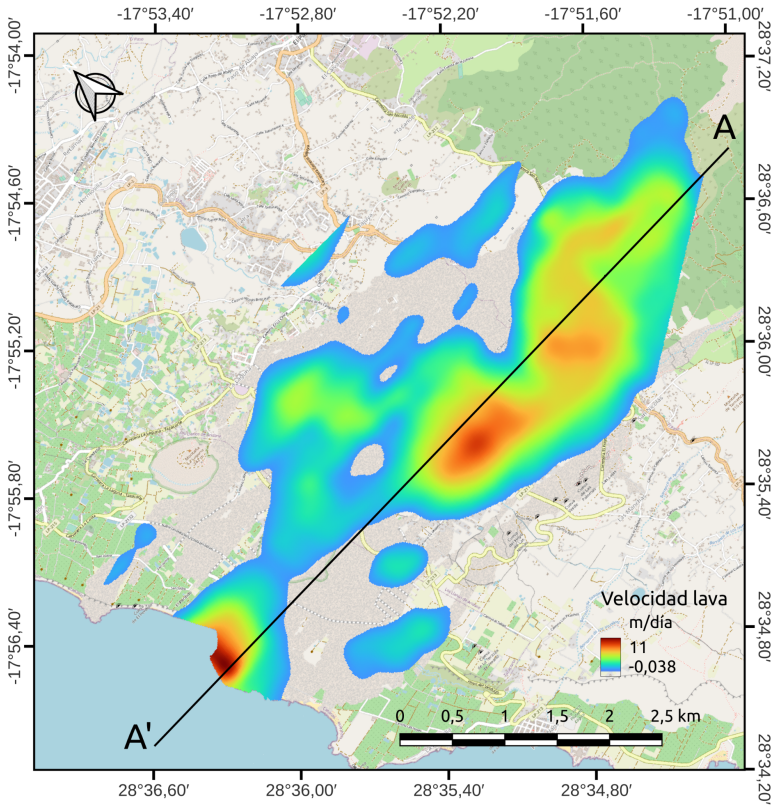
5.2.1 Resultados ascendentes.

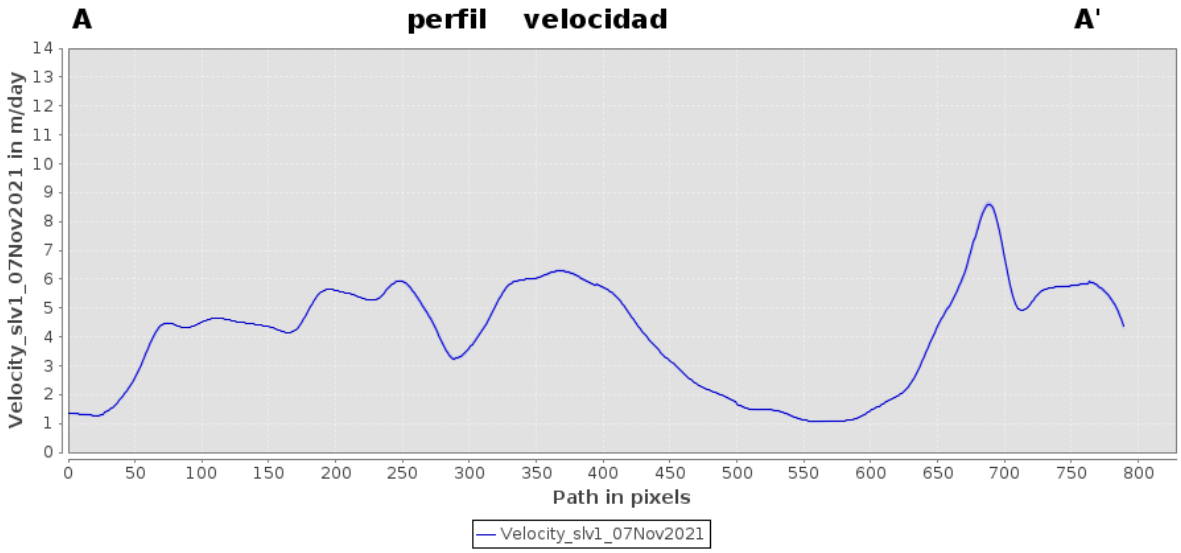
02-09-2021 08-10-2021



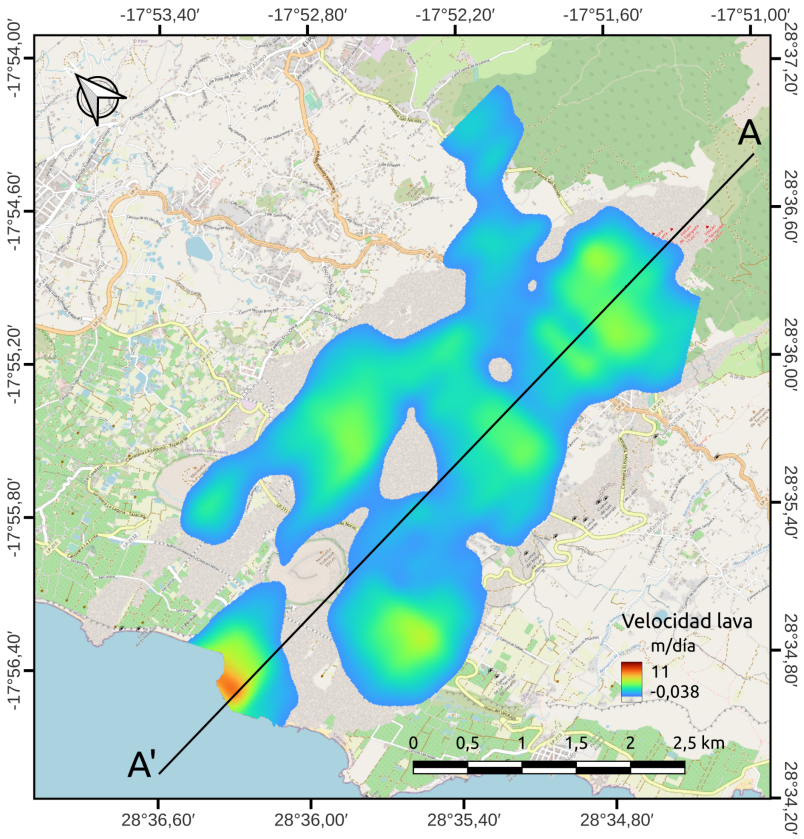


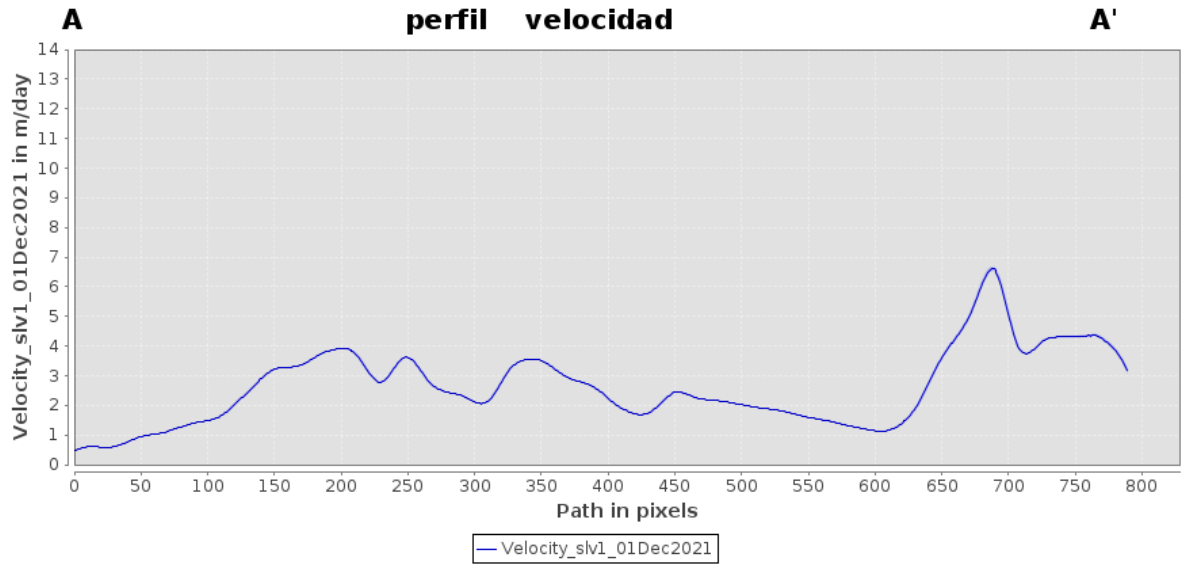
02-09-2021 07-11-2021



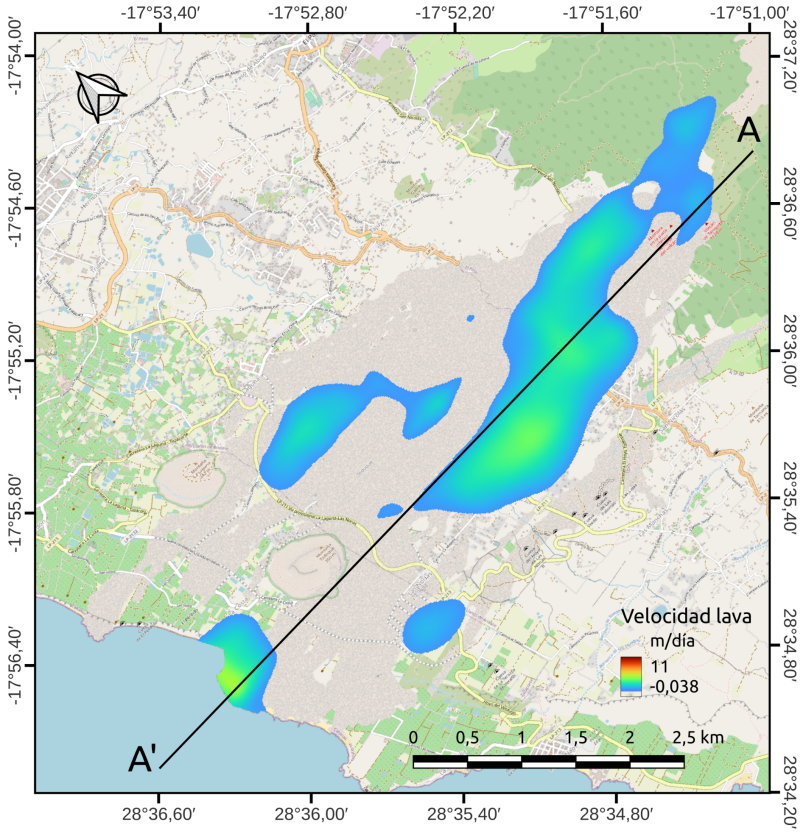


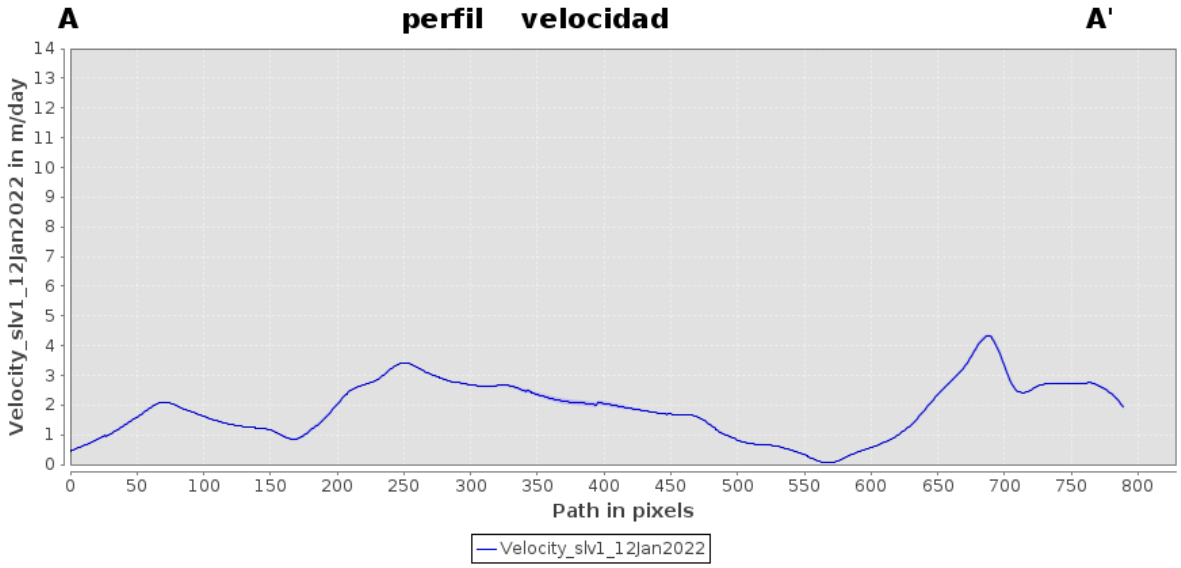
02-09-2021 01-12-2021





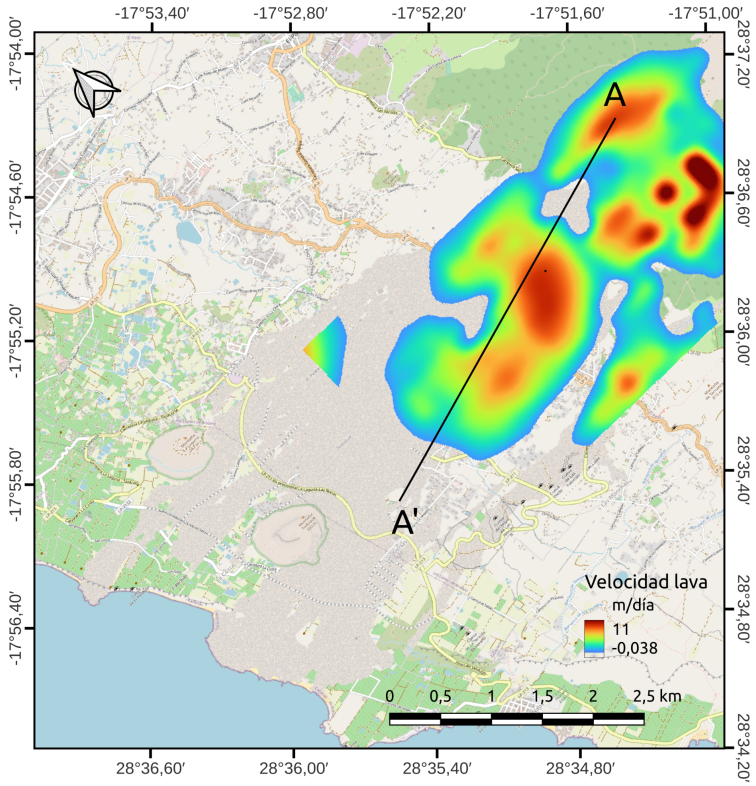
02-09-2021 12-01-2022

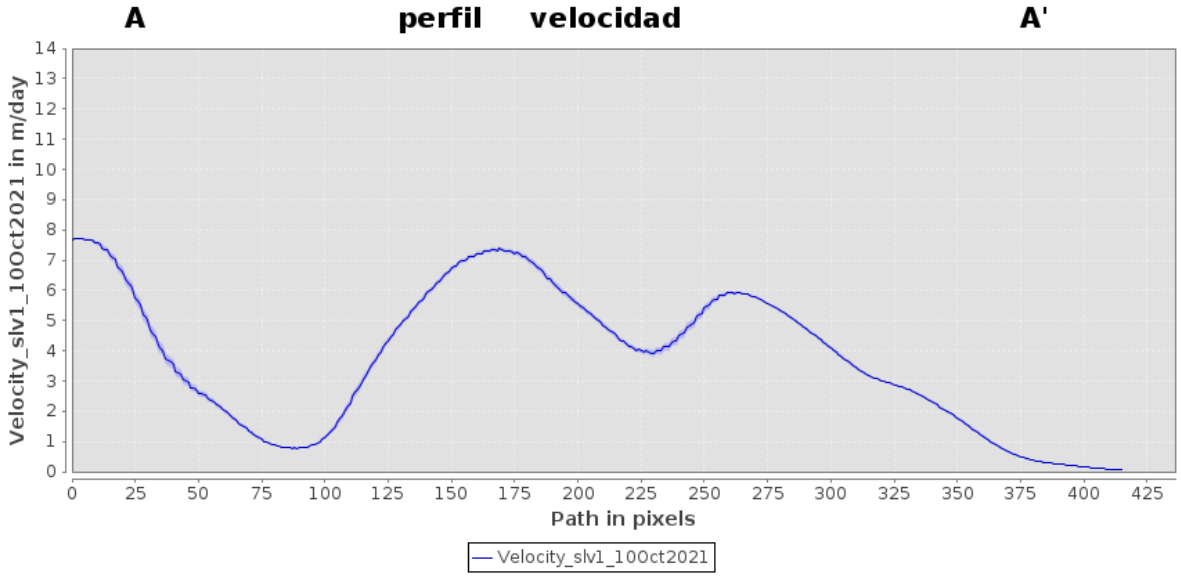




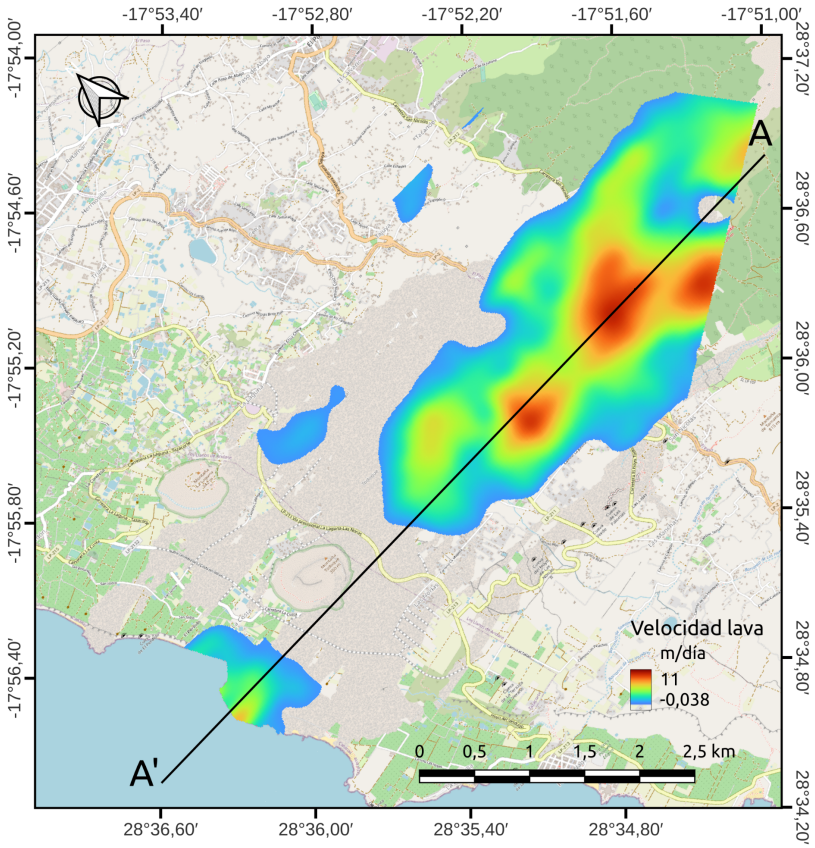
5.2.2 Resultados descendentes.

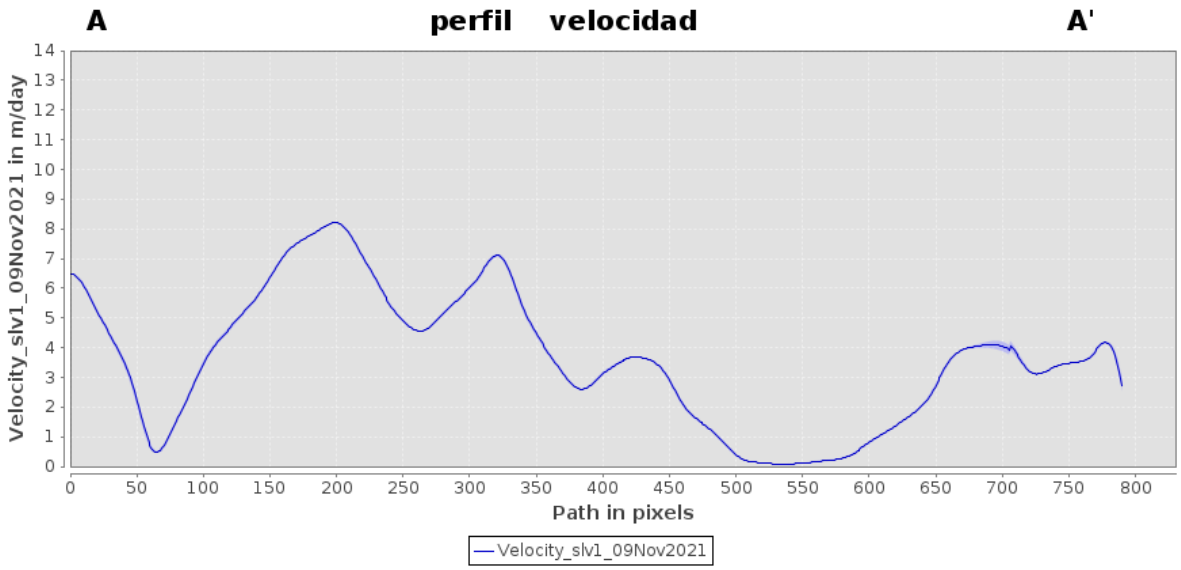
04-09-2021 10-10-2021



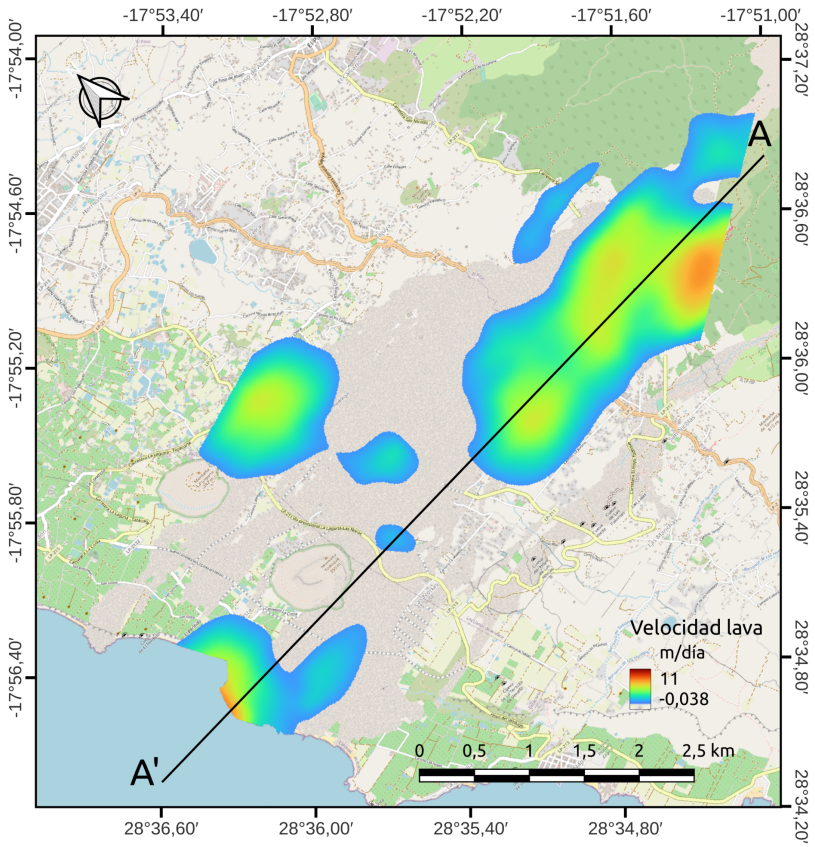


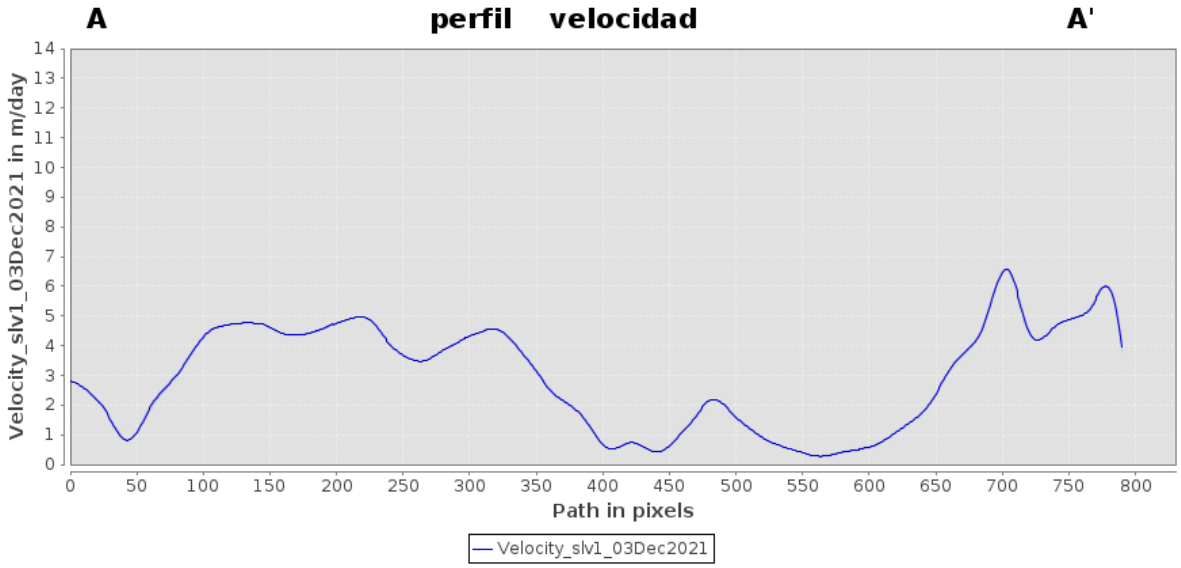
04-09-2021 09-11-2021



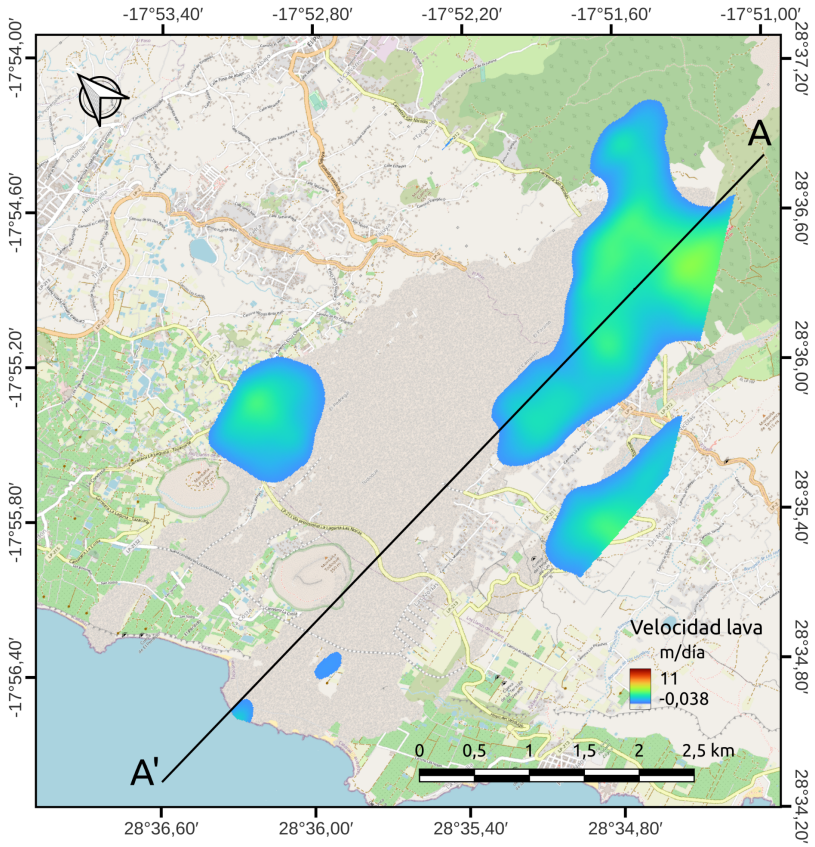


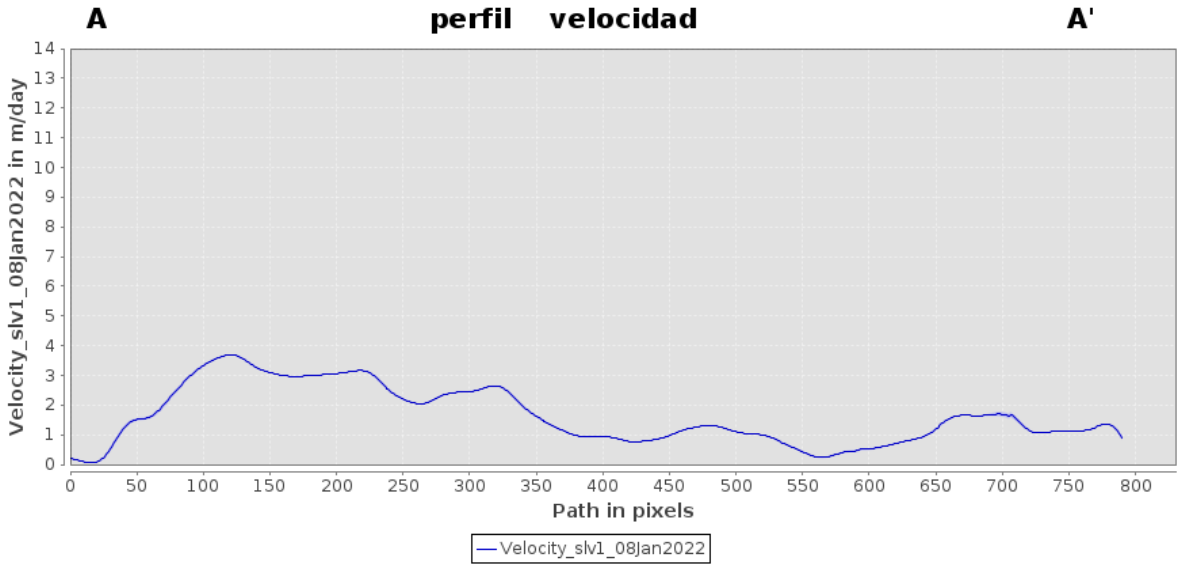
04-09-2021 03-12-2021





04-09-2021 08-01-2022





5.2.3 Discusión.

Una vez vistos los resultados, se aprecia como la máxima velocidad se encuentra el día 8 de octubre, con una velocidad que llega a los 14 metros por día. Tanto en ascendente como descendente, las fechas del 8 y 10 de octubre son las que presentan valores más altos de velocidad. En ese momento, las coladas de lava no habían llegado todavía a la costa, y la actividad volcánica estaba en sus momentos más altos, provocando más expulsión de material. El hecho de que la pendiente de la ladera en la que se encuentra la boca del volcán sea mayor también provoca un desplazamiento más veloz de los materiales sobre esta.

En los productos de noviembre, tanto el 7 como el 9, se aprecia como las coladas de lava han llegado hasta la costa de la isla, además de tener una velocidad media de 8 m al día. La velocidad se reduce considerablemente con las imágenes disponibles de octubre, registrando su máximo en zonas costeras, lo que da a entender que los materiales magmáticos se siguen depositando en el océano. Los mapas generados en diciembre muestran que sigue habiendo movimiento en la superficie, pero notablemente más lento que en fechas anteriores. Su máximo sigue registrando en zonas de costa, siendo de 7 m, mientras que la media en el resto del terreno según el perfil generado es de 5 o 6 m. Por último, hay resultados de enero de 2022, tanto el 8 como el 12, cuando la actividad volcánica había cesado completamente. Aunque no se vierten materiales como tal desde la boca del volcán, los materiales que siguen en la superficie pueden sufrir pequeños desplazamientos para terminar de ajustarse a la topografía hasta quedar totalmente solidificados. La velocidad por día de estas imágenes por tanto es la menor, con una media en ambas de 4 o 3 m.

Esta misma técnica es usada también por Kyriou y Nikolakopoulos [53] para medir la velocidad de las coladas, aunque el resultado de ese estudio recoge valores de velocidad menores a los obtenidos en este procesamiento. Hay que tener en cuenta que la técnica utilizada para medir la velocidad de estas coladas no es la apropiada para el estudio, ya que fue diseñada para cuantificar el movimiento de glaciares, por lo que los resultados no tienen la misma fiabilidad que los obtenidos con InSAR, por ejemplo. Aun así, es interesante para observar el avance de la lava sin depender de imágenes ópticas que se ven afectadas por efectos atmosféricos o la propia ceniza de la erupción.

5.3 Visualización coladas de lava con Sentinel-2.

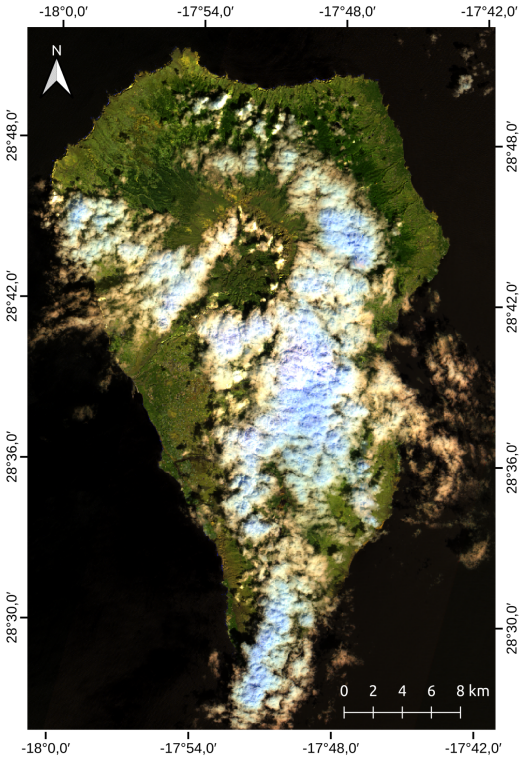
En este apartado se procede a visualizar las imágenes descargadas desde Sentinel-2 en la zona de estudio para observar el avance de las coladas. Al ser imágenes que se ven afectadas por los efectos atmosféricos, y al estar estas imágenes altamente afectadas por los mismos, no se lleva a cabo ningún estudio analítico de las mismas aparte de la propia observación.

Aunque en la mayoría de imágenes no se llega a observar la escena a causa de la nubosidad, si se aprecia cómo la lava avanza hacia la línea de costa. En la Tabla 21 se observan todas las imágenes disponibles, representadas en el mismo orden.

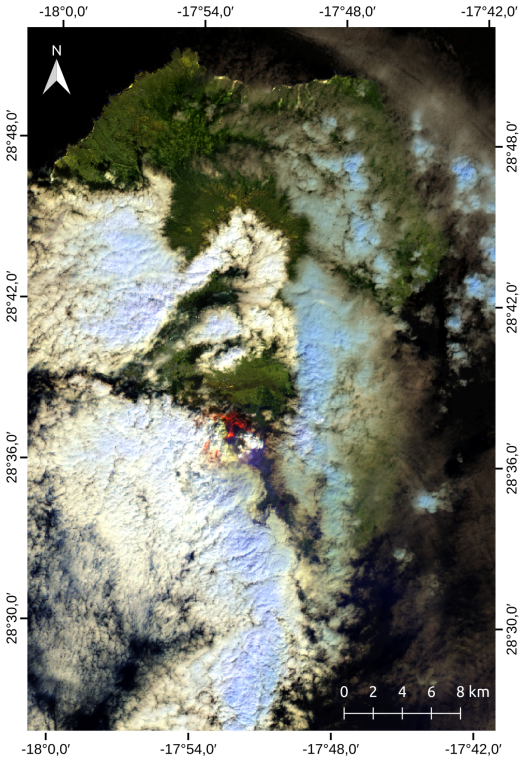
Fecha	Tipo producto
2021-09-15	S2MSI2A
2021-09-20	S2MSI2A
2021-09-25	S2MSI2A
2021-09-30	S2MSI2A
2021-10-05	S2MSI2A
2021-10-10	S2MSI2A
2021-10-15	S2MSI2A
2021-10-20	S2MSI2A
2021-10-25	S2MSI2A
2021-10-30	S2MSI2A
2021-11-09	S2MSI2A
2021-11-14	S2MSI2A
2021-11-19	S2MSI2A
2021-11-29	S2MSI2A
2021-12-04	S2MSI2A
2021-12-09	S2MSI2A
2021-12-14	S2MSI2A
2022-01-03	S2MSI2A

Tabla 21: Imágenes Sentinel-2

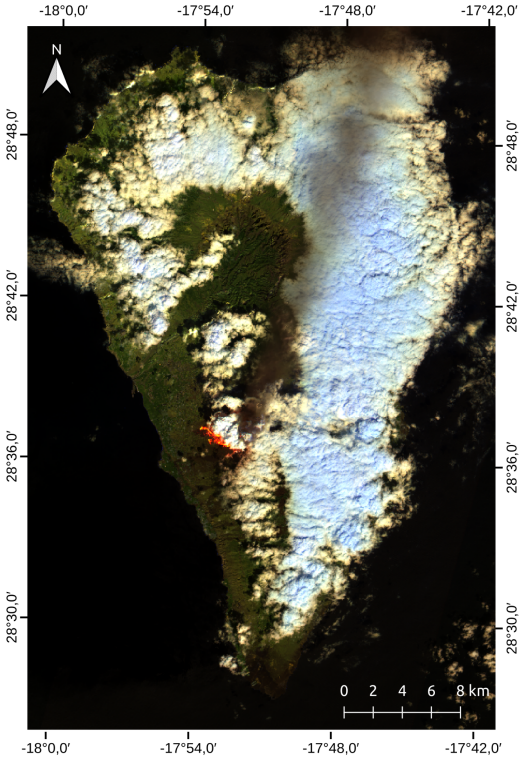
15-09-2021



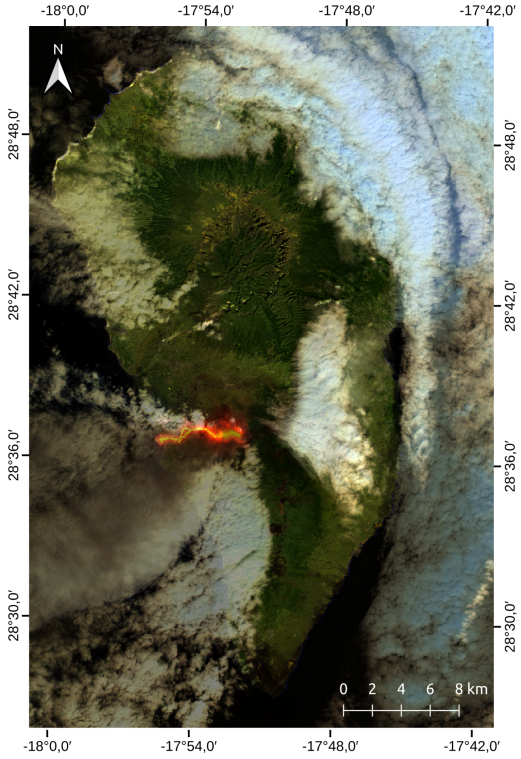
20-09-2021



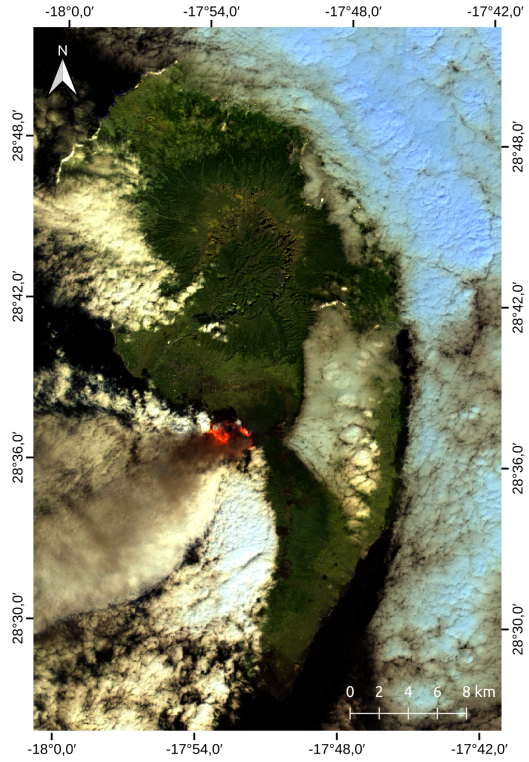
25-09-2021



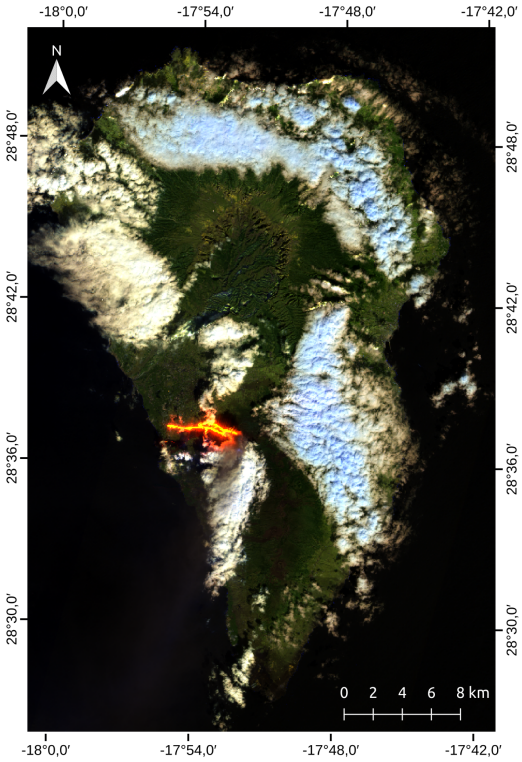
30-09-2021



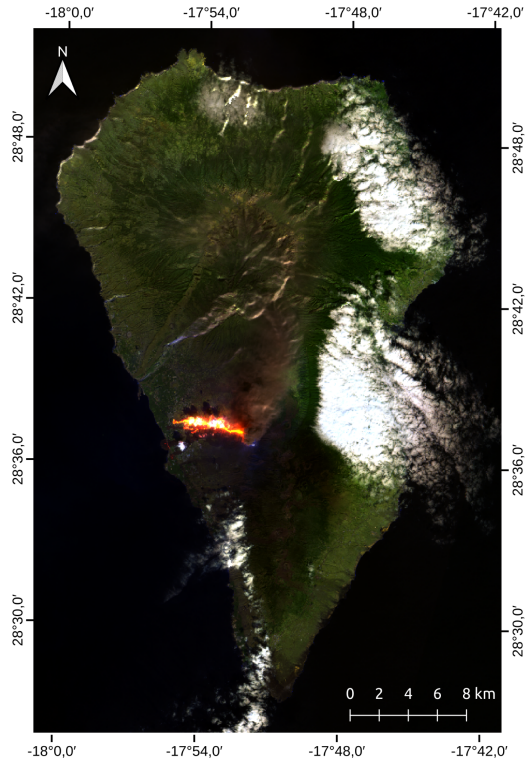
05-10-2021



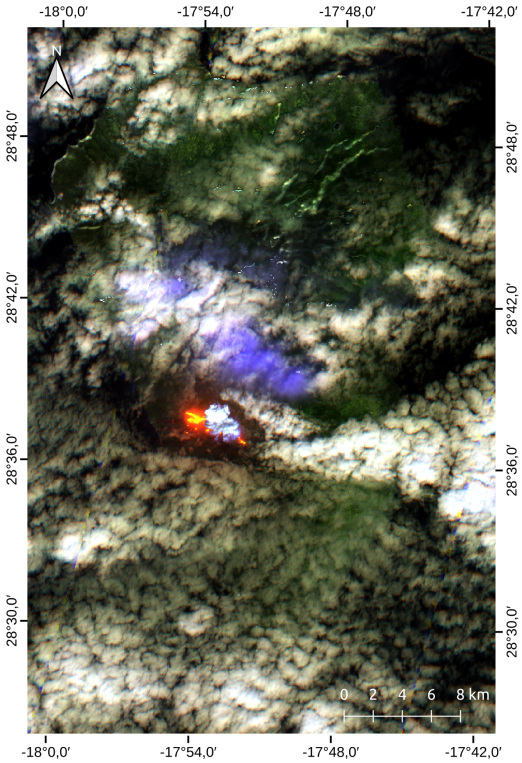
10-10-2021



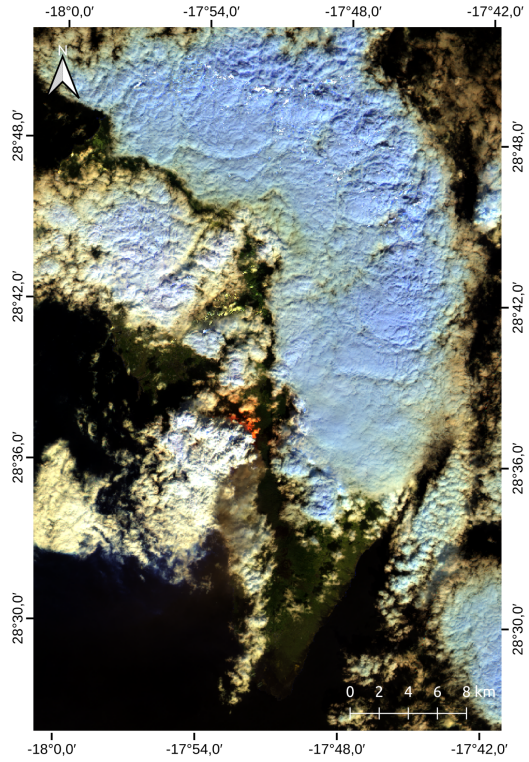
15-10-2021



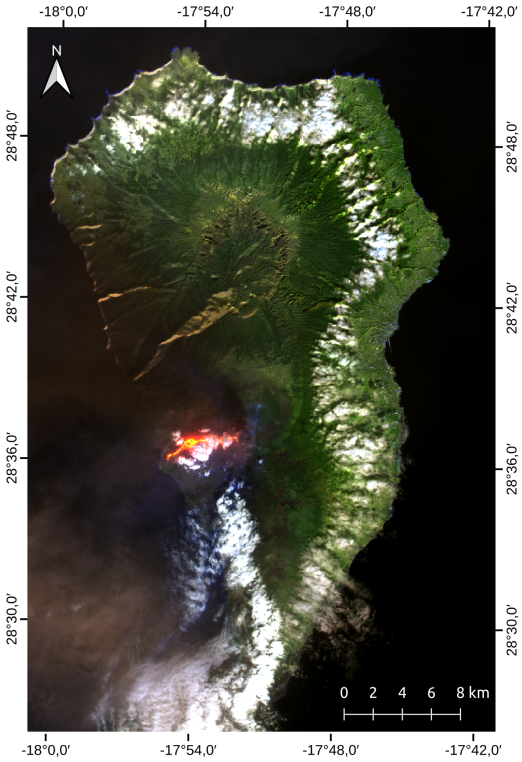
20-10-2021



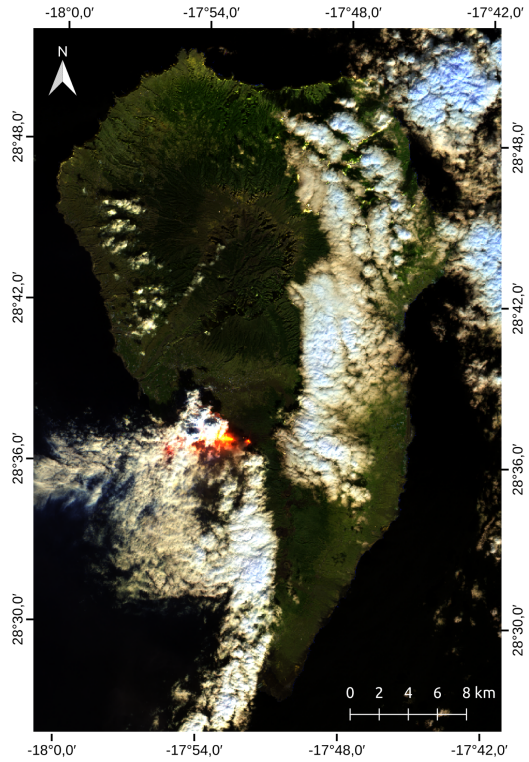
25-10-2021



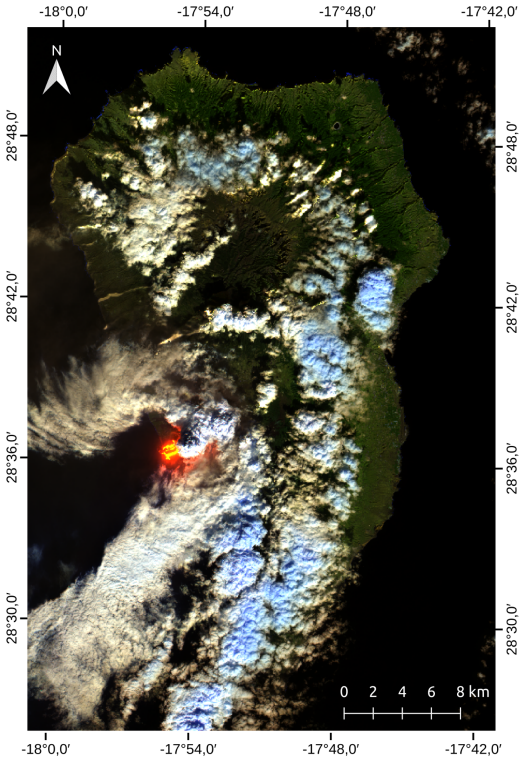
30-10-2021



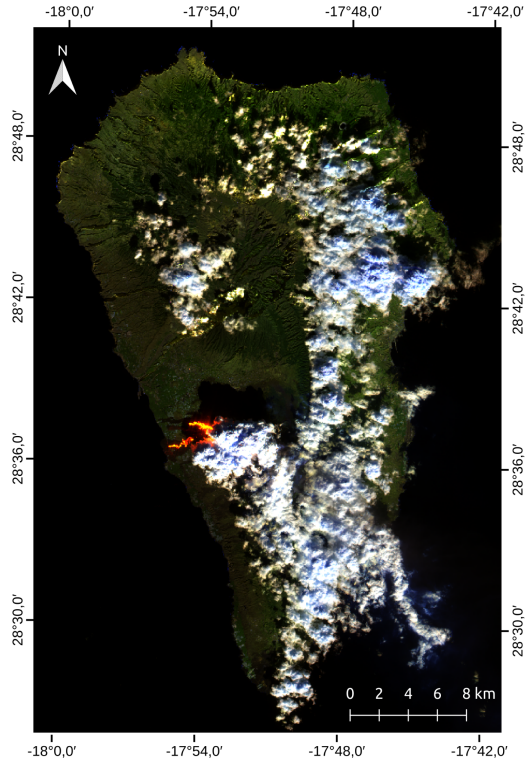
09-11-2021



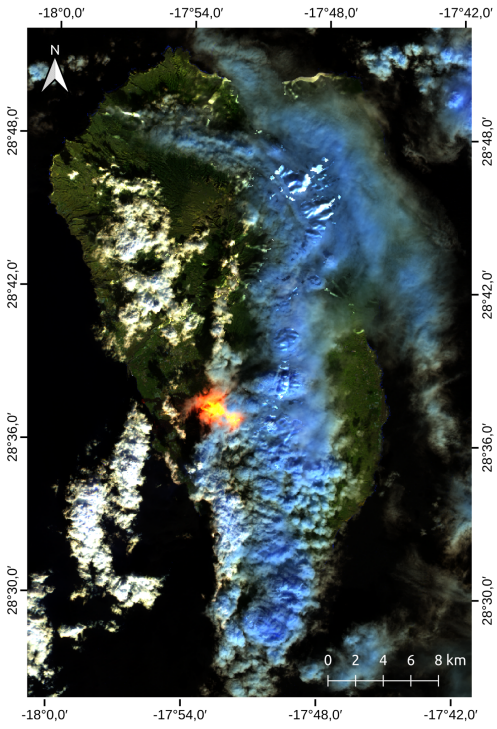
14-11-2021



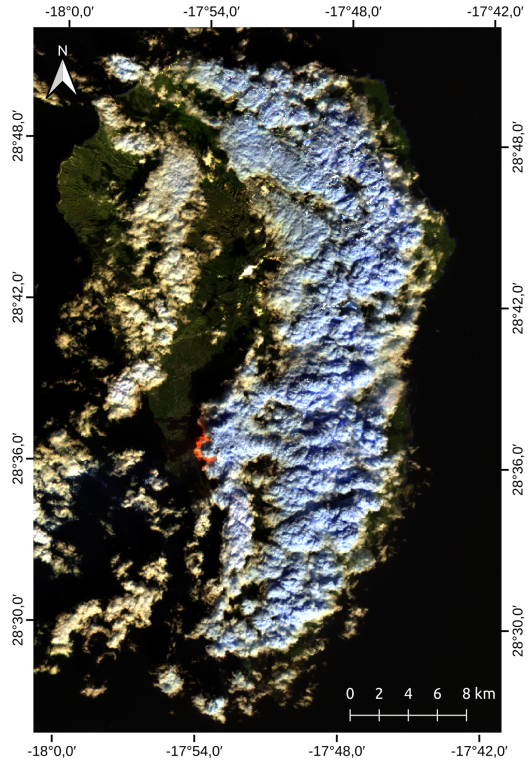
19-11-2021



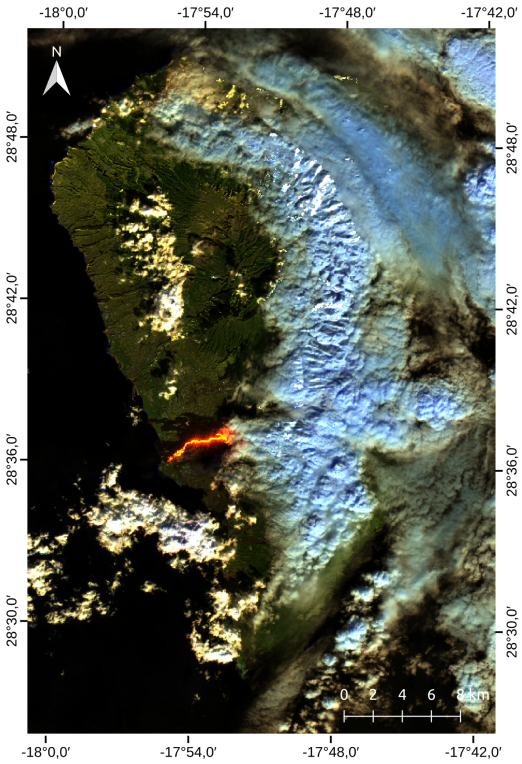
29-11-2021



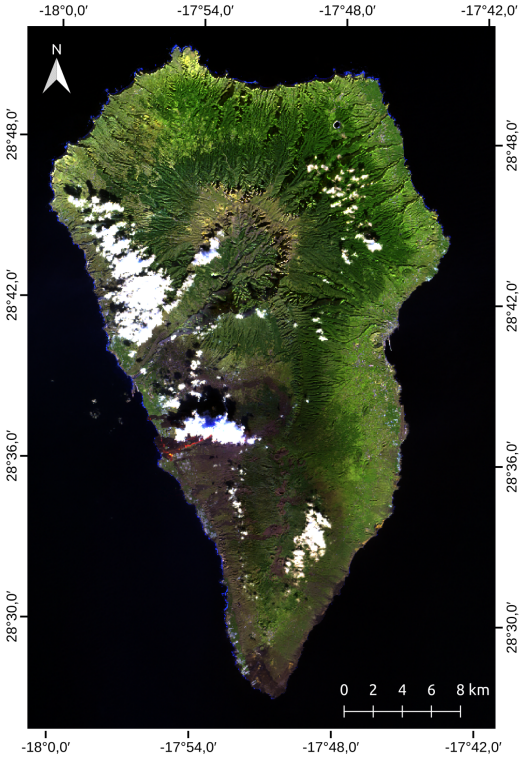
04-12-2021



09-12-2021



14-12-2021



5.4 Cálculo del área arrasada por las coladas.

Como se explicó anteriormente, se calcula y representa el área arrasada por las coladas de lava una vez ha cesado la actividad volcánica. Para ello se selecciona una imagen en la que no haya nubes y facilite la visualización a la zona de estudio. En el procedimiento, se selecciona a partir de una banda multiespectral la información de interés.

En este apartado se lleva a cabo la representación en el software QGIS, además de los diferentes procedimientos necesarios para vectorizar la imagen y obtener de ella la información necesaria, siendo esta el área arrasada. Además, se contrasta con información proveniente del IGN (Instituto Geográfico Nacional), ya que disponen de una base de datos con los efectos provocados por el volcán, aparte de la topografía de la zona. En la Figura 64 se aprecia la banda 8, la cual ha sido procesada para extraer la información para realizar la selección.

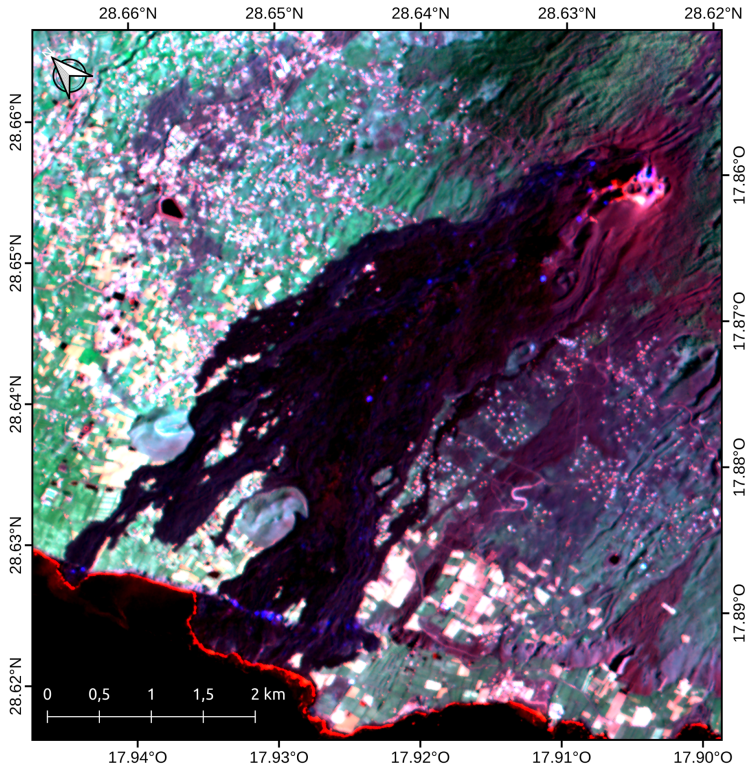


Figura 64: Imagen banda 8 RGB

En la Figura 65 se aprecia la selección que se llevó a cabo en SNAP sobre la zona de estudio, observando así que esta corresponde con el trazo de las coladas volcánicas.

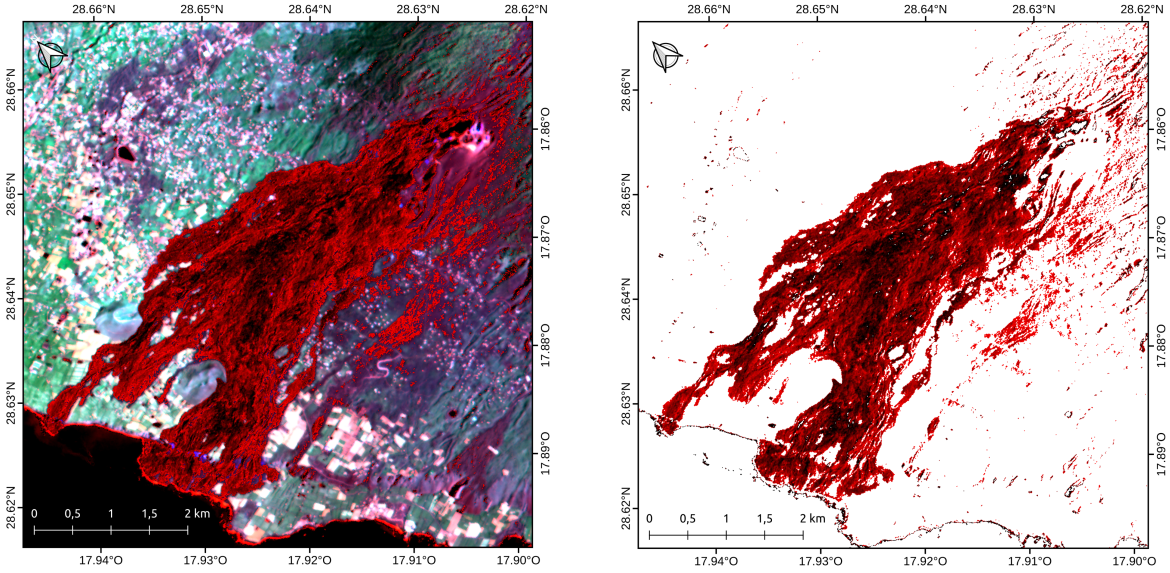


Figura 65: Selección zona de interés por SNAP

Hay que tener en cuenta que esta selección exportada es un raster, por lo que no tiene las características vectoriales precisas para calcular el área de la misma. Además, no todos los píxeles exportados corresponden a las coladas ya que otros puntos en la superficie terrestre cuentan con la misma respuesta espectral que la zona de interés. Por lo tanto, se vectoriza esta imagen usando herramientas del software QGIS y con la información visual de la imagen RGB se seleccionan tan solo aquellas zonas que corresponden a las coladas.

Como se aprecia en la Figura 66**,** se ha vectorizado la totalidad de la banda exportada, y se ha reducido al área de interés con la ayuda visual de la imagen RGB.

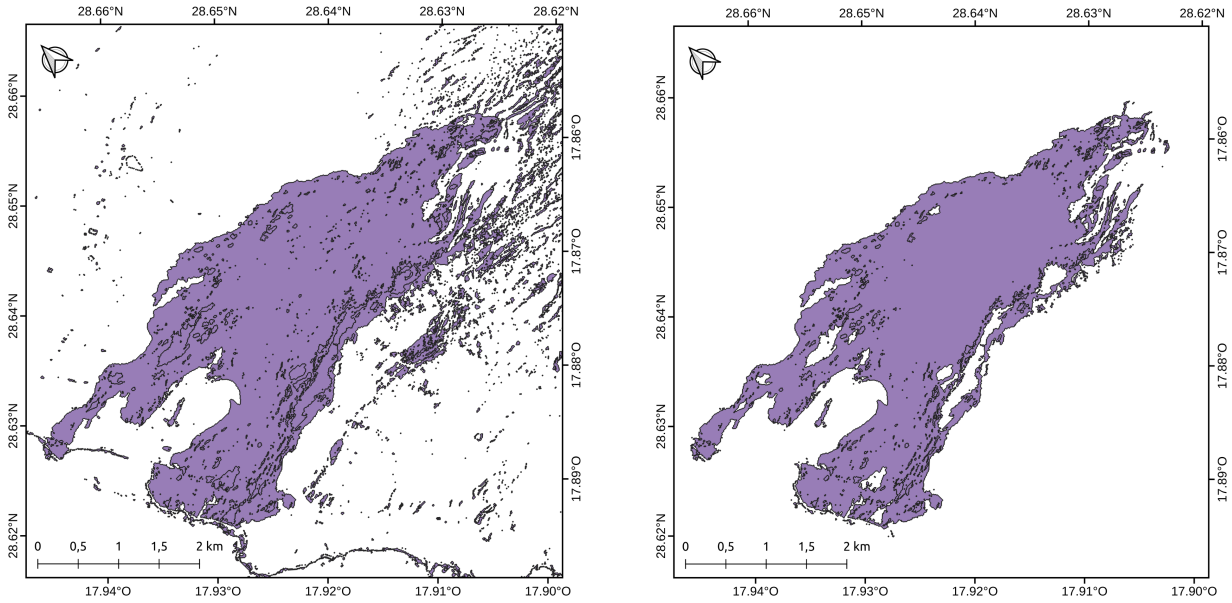


Figura 66: Vectorización y simplificación de la zona seleccionada.

Una vez hecho este proceso, se unifica la vectorización de la capa en una sola figura usando de nuevo herramientas de QGIS, de esta manera es posible calcular el área del polígono, mientras que con el caso anterior se calcularía cada polígono por separado. En la Figura 67 se aprecia el polígono unificado, además de su posición sobre la imagen RGB, asegurando así que se corresponde la información espacial.

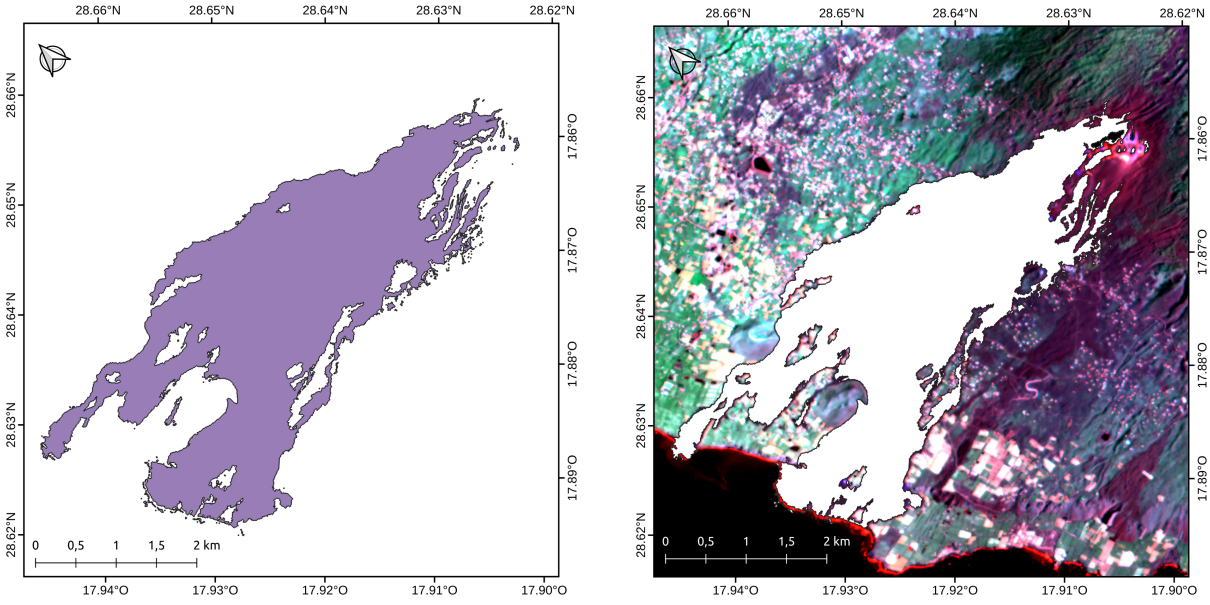


Figura 67: Unificación de la capa vectorial y posición sobre la zona de interés.

Una vez obtenida esta información, se compara con la disponible en el IGN, la cual cuenta con datos oficiales del siniestro. En la Figura 68 se observan ambas imágenes, el polígono gris correspondiendo a la información del IGN mientras que el blanco por el método de selección explicado en este trabajo.

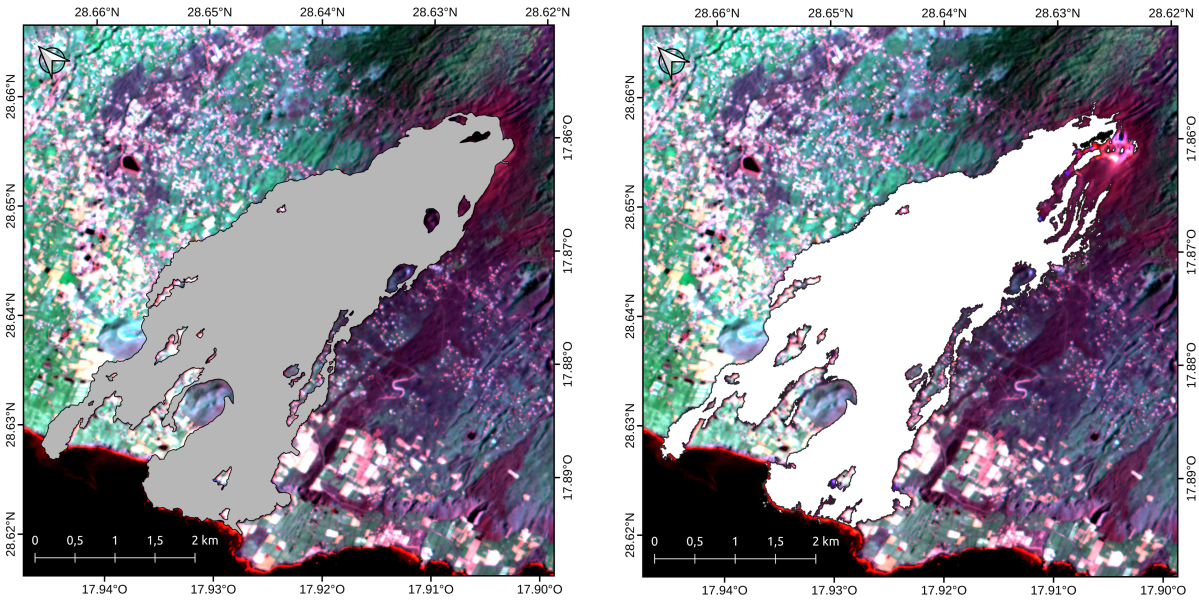


Figura 68: Visualización de las coladas de lava del IGN y la calculada.

A simple vista es posible comprobar la correspondencia entre datos. Como en este estudio se ha trabajado tan solo con la reflectancia de la banda 8 para hacer esta selección, hay zonas cercanas a la boca volcánica que no han sido debidamente reconocidas, ya sea por la acumulación de ceniza en la zona que ofrece una respuesta espectral diferente o por la limitación de la propia banda espectral.

Es importante tener en cuenta que lo considerado como área arrasada puede variar dependiendo de los criterios utilizados para medir el impacto de la erupción.

En la Tabla 22 se muestran los resultados tras calcular el área de la zona, además de la comparación con el área calculada por el IGN.

	Área [ha]
Selección del estudio	1112.9
Datos del IGN	1239.6

Tabla 22: Área en hectáreas arrasada por las coladas de lava.

Hay una diferencia de 127 ha aproximadamente entre los datos provenientes del IGN con los calculados, principalmente por las zonas de terreno cercanas a la boca volcánica que no han sido debidamente clasificadas.

6. Conclusiones

Durante el transcurso de este trabajo se ha evidenciado el enorme potencial de la técnica que emplea datos de interferometría radar de satélite para estudiar las deformaciones del terreno. Esta técnica nos brinda la capacidad de cuantificar el movimiento y el comportamiento de los objetos en cuestión de manera precisa y efectiva.

La utilización de la técnica de InSAR ofrece mediciones cuantitativas altamente precisas (en milímetros) de deformación, con una densidad de mediciones elevada y una resolución espacial muy alta. Estas mediciones abarcan áreas extensas y no requieren la instalación de equipos en el campo ni intervenciones dentro del área a estudiar. De esta forma, se logra extraer información precisa y confiable sobre la deformación en la línea de visión (LOS) del área de interés, lo que proporciona una visión temporal cuantitativa de los eventos ocurridos.

El presente estudio se centró en mapear la deformación del suelo causada por la reciente actividad volcánica en la isla de La Palma. En este contexto, se recopilaron y procesaron productos del satélite Sentinel-1 utilizando técnicas de InSAR y seguimiento de desplazamiento, además de las imágenes satelitales Sentinel-2 para la visualización del avance de las coladas y el cálculo del área arrasada.

Los puntos clave de la investigación se pueden resumir de la siguiente manera:

- Los interferogramas del Sentinel-1 son capaces de capturar la deformación del suelo relacionada tanto con el ascenso de magma e inflación del suelo unos días antes de la erupción, como con la fase eruptiva.
- El movimiento relativo hacia el satélite indicó una inflación del suelo antes de la erupción inminente, mientras que la deflación posterior a la erupción estuvo acompañada de un movimiento relativo alejándose del satélite.
- Se obtiene una deformación máxima de 30 centímetros para las imágenes ascendentes y alrededor de 20 centímetros para imágenes descendentes.
- El seguimiento de desplazamiento se utilizó con éxito para monitorear la evolución de los flujos de lava en la isla durante todo el periodo eruptivo.

- Se detectaron velocidades de lava elevadas (>14 m/día).
- Posibilidad de monitorizar el movimiento de las coladas de lava con imágenes radar que no dependen del estado atmosférico.
- Las imágenes multiespectrales del avance de las coladas de lava, aunque incongruentes para análisis temporales o analíticos por la imposibilidad de visión a causa de fenómenos atmosféricos y volcánicos, ofrecen la posibilidad de monitorizar visualmente el avance de las coladas en el periodo de tiempo de la actividad volcánica.
- El cálculo del área arrasada por las coladas mediante clasificación de distintas reflectancias del terreno posibilita realizar este tipo de análisis sin la necesidad de desplazarse al lugar de los hechos u obtener información mucho más precisa que la obtenida en este estudio.

Con la posibilidad que ofrecen estas técnicas de monitorización con imágenes radar, se puede considerar una fuente de información prácticamente en tiempo real que se puede utilizar como solución inmediata para la reducción de riesgos y la gestión de peligros. Este método de teledetección posibilita el estudio de una zona con resultados fiables sin la necesidad de estar presente en ella.

La metodología explicada y realizada en este estudio es extrapolable a otras zonas de la superficie que sufran características similares.

Referencias

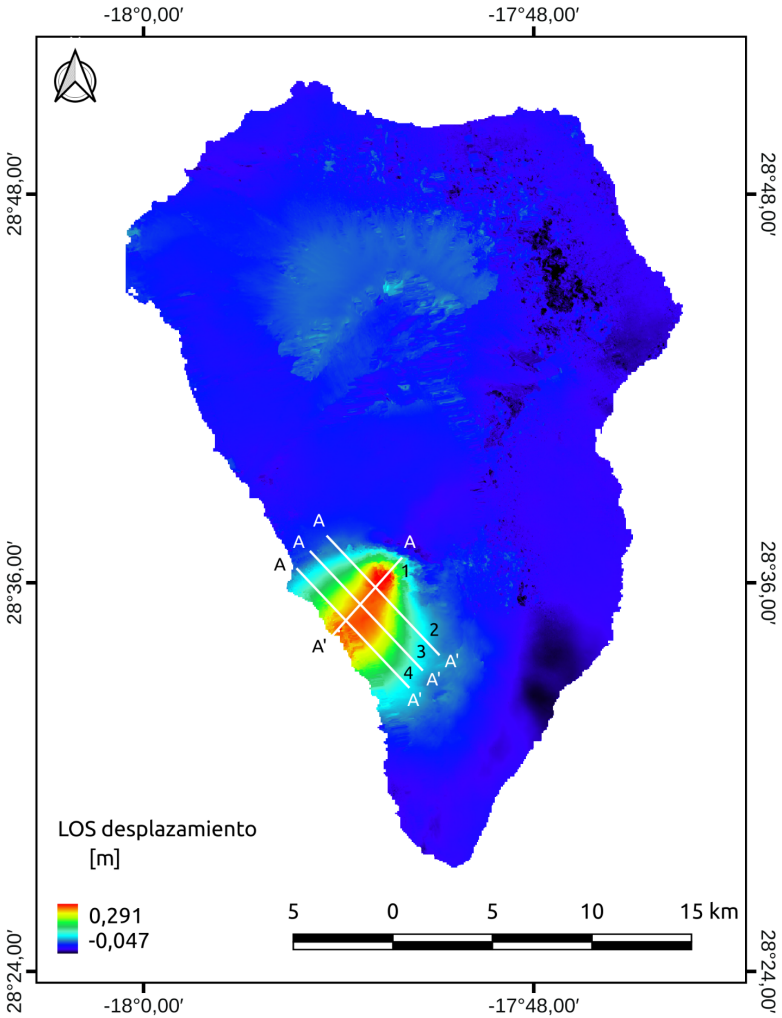
[1] N. M. Sánchez, «Técnicas de vigilancia volcánica. La Palma: de observación a medición», junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/70843/
[2] L. Palma, «La Palma», 2007.
[3] B. OsmanoÄlu, F. Sunar, S. Wdowinski, y E. Cabral-Cano, «Time series analysis of InSAR data: Methods and trends», *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 115, pp. 90-102, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.
[4] J. Fernández *et al.*, «Shallow magmatic intrusion evolution below La Palma before and during the 2021 eruption», *Sci. Rep.*, vol. 12, n.º 1, p. 20257, 2022.
[5] R. P. López, P. G. Silva, J. L. Giner-Robles, y M. Á. Rodríguez-Pascua, «Desde la erupción volcánica de La Palma», *Cuaternario Geomorfol.*, vol. 35, n.º 3-4, pp. 3-6, 2021.
[6] M. E. Gónzalez Cárdenas, R. U. Gosálvez Rey, R. Becerra Ramírez, y E. Escobar Lahoz, «La erupción de Cumbre Vieja de 2021. Isla de La Palma (España)», 2022.
[7] J. M. Castro y Y. Feisel, «Eruption of ultralow-viscosity basanite magma at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands», *Nat. Commun.*, vol. 13, n.º 1, p. 3174, 2022.
[8] F. J. Santa-Cecilia Mateos, A. García de la Vega, R. Martín Moreno, y others, «La erupción del volcán Cumbre Vieja en la Isla de La Palma (2021). El enfoque educativo de un volcán urbano», *Didácticas Específicas*, 2021.
[9] H. A. Zebker, S. Hensley, P. Shanker, y C. Wortham, «Geodetically Accurate InSAR Data Processor», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, n.º 12, pp. 4309-4321, 2010, doi: 10.1109/TGRS.2010.2051333.
[10] A. E. Saavedra Vaca y E. P. Kirby Powney, «Generación y evaluación de Modelos Digitales de Superficie utilizando sensores SAR (INSAR) en zonas de alta nubosidad en el Ecuador Continental.».
[11] J. Beltrán Gracia, «Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) para la observación de eventos sísmicos en el sur de México», 2022.
[12] E. Podest, «Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética», 2017.
[13] A. Freeman y S. L. Durden, «A three-component scattering model for polarimetric SAR data», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, n.º 3, pp. 963-973, 1998.
[14] P. Messina, «Side-looking Airborne Radar (SLAR) System Operations», *Paula Messina*. http://www.geo.hunter.cuny.edu/terrain/radarii.html
[15] R. Bürgmann, P. A. Rosen, y E. J. Fielding, «Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earthâs Surface Topography and Its Deformation», *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 28, n.º 1, pp. 169-209, 2000, doi: 10.1146/annurev.earth.28.1.169.
[16] I. H. Woodhouse, *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press, 2017.
[17] A. Hay y A. Ng, «Advanced Satellite Radar Interferometry for Ground Surface Displacement Detection», feb. 2023.
[18] Y. Qin, E. Hoppe, y D. Perissin, «Slope hazard monitoring using high-resolution satellite remote sensing: Lessons learned from a case study», *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 9, n.º 2, p. 131, 2020.
[19] P. Leinenkugel, «The Combined Use of Optical and SAR Data for Large Area Impervious Surface Mapping», PhD Thesis, University Salzburg, 2010.
[20] I. A. Belmonte y B. S. Caamaño, «Una aplicación basada en imágenes SAR para el monitoreo y prevención de inundaciones en Argentina», B.S. thesis, 2009.
[21] J. W. Merchant, «Remote sensing of the environment: an earth resource perspective», *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.*, vol. 27, n.º 4, pp. 311-311, 2000.
[22] R. Klees y D. Massonnet, «Deformation measurements using SAR interferometry: potential and limitations», *Geol. En Mijnb.*, vol. 77, pp. 161-176, 1999.
[23] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, D. Massonnet, y J. Lichtenegger, «ESA/ESRIN (retired), Frascati, Italy», 2007.

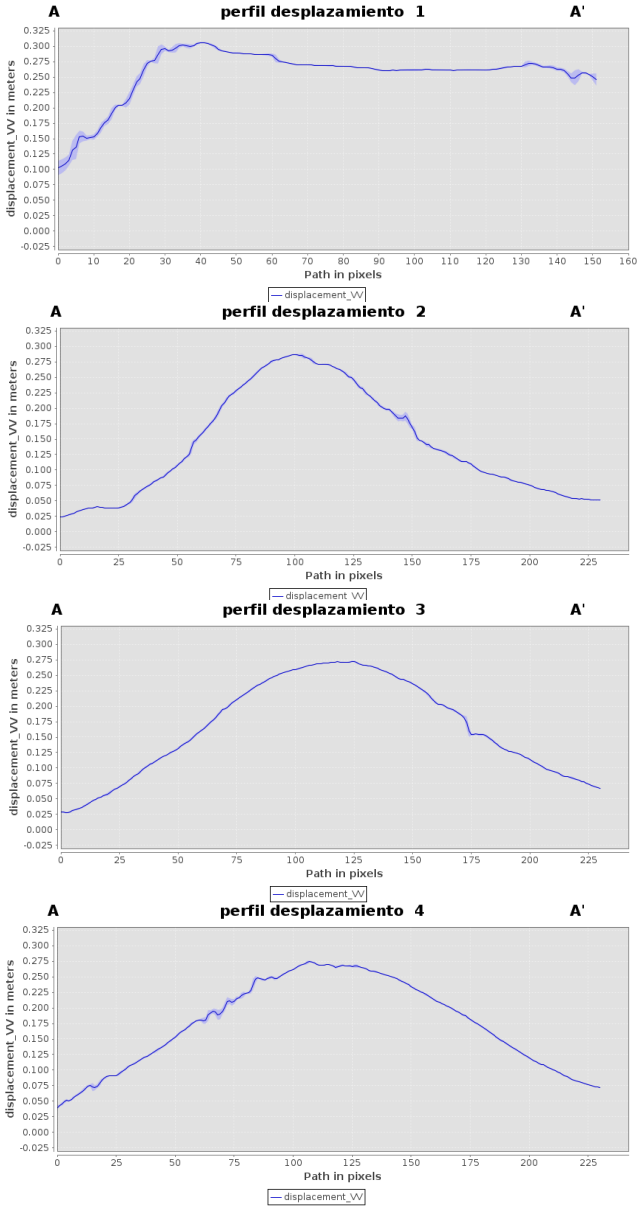
[24] A. Abd, «Study of Earthquake and flood hazards of Khanaqin-Abbasan NE Iraq using Remote Sensing and GIS Techniques», PhD Thesis, 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.16883.86565.
[25] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, y D. Massonet, *InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation*, vol. 19. 2007.
[26] G. R. S. AG, «SAR Processing».
[27] F. Sica *et al.*, «InSAR Decorrelation at X-Band From the Joint TanDEM-X/PAZ Constellation», *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 18, n.º 12, pp. 2107-2111, 2021, doi: 10.1109/LGRS.2020.3014809.
[28] M. Martone, P. Rizzoli, y G. Krieger, «Volume decorrelation effects in TanDEM-X interferometric SAR data», *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 13, n.º 12, pp. 1812-1816, 2016.
[29] J. Jung, D. Kim, M. Lavalle, y S.-H. Yun, «Coherent Change Detection Using InSAR Temporal Decorrelation Model: A Case Study for Volcanic Ash Detection», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, n.º 10, pp. 5765-5775, 2016, doi: 10.1109/TGRS.2016.2572166.
[30] R. Ahmed, P. Siqueira, S. Hensley, B. Chapman, y K. Bergen, «A survey of temporal decorrelation from spaceborne L-Band repeat-pass InSAR», *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, n.º 11, pp. 2887-2896, 2011.
[31] P. Agram y M. Simons, «A noise model for InSAR time series», *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 120, n.º 4, pp. 2752-2771, 2015.
[32] B. Osmanoğlu, F. Sunar, S. Wdowinski, y E. Cabral-Cano, «Time series analysis of InSAR data: Methods and trends», *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 115, pp. 90-102, 2016.
[33]; Miguel Ángel Manso Callejo, «Imágenes Radar Satélite. Aplicación a la cartografía y la topografía.» [En línea]. Disponible en: http://pdi.topografia.upm.es/m.manso/docs/Teledeteccion_radar.pdf
[34] M. Agudo, E. Biescas, O. Monserrat, J. Martínez, M. Crosetto, y G. Herrera, ?«` Cómo medir deformaciones del terreno con teledetección radar?», *6ª Sem. Geomática Barc.-Esp.*, 2003.
[35] E. Sillerico, M. Marchamalo, J. Rejas, y R. Martínez, «La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción», *Inf. Constr.*, vol. 62, n.º 519, pp. 47-53, 2010.
[36] J. Sousa y L. Bastos, «Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse», *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, n.º 3, pp. 659-667, 2013.
[37] G. Schubert, *Treatise on geophysics*. Elsevier, 2015.
[38] G. Michel, «Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar (DInSAR)».
[39] B. Osmanoğlu, F. Sunar, S. Wdowinski, y E. Cabral-Cano, «Time series analysis of InSAR data: Methods and trends», *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 115, pp. 90-102, 2016.
[40] A. Ferretti, C. Prati, y F. Rocca, «Permanent scatterers in SAR interferometry», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, n.º 1, pp. 8-20, 2001.
[41] M. Vassileva, F. Giulio Tonolo, P. Riccardi, D. Lecci, P. Boccardo, y G. Chiesa, «Satellite SAR interferometric techniques in support to emergency mapping», *Eur. J. Remote Sens.*, vol. 50, n.º 1, pp. 464-477, 2017.
[42] A. Gatti y A. Bertolini, «Sentinel-2 products specification document», *Available Online Accessed Febr. 23 2015 Httpsearth Esa Intdocuments247904685211Sentinel-2 Prod. Specif. Doc.*, 2013.
[43] Copernicus, «Level-1 SLC Products». [En línea]. Disponible en: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/single-look-complex
[44] instituto nacional de técnica aeroespacial, «Los modos de adquisición en Sentinel-1». [En línea]. Disponible en: https://www.inta.es/INTA/en/blogs/copernicus/BlogEntry_1547802440975#
[45] S. O. ESA, «POD products and requirements». European Space Agency, 2023. [En

línea]. Disponible en: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/pod/products-requirements
[46] R. M. Goldstein y C. L. Werner, «Radar interferogram filtering for geophysical applications», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 25, n.º 21, pp. 4035-4038, 1998.
[47] D. Small y A. Schubert, «Guide to ASAR geocoding, RSL-ASAR-GC-AD, issue 1.0», en *University of Zurich*, 2008.
[48] M. Drusch *et al.*, «Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services», *Remote Sens. Environ.*, vol. 120, pp. 25-36, 2012.
[49] camouflaje ssz, «SSZ Camouflage», p. 1, 1 de enero de 2023.
[50] E. Alcaras, D. Costantino, F. Guastaferro, C. Parente, y M. Pepe, «Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): a new index for sentinel-2 imagery», *Remote Sens.*, vol. 14, n.º 7, p. 1727, 2022.
[51] M. Polcari, M. Palano, y M. Moro, «Performance evaluation of different SAR-based techniques on the 2019 ridgecrest sequence», *Remote Sens.*, vol. 13, n.º 4, p. 685, 2021.
[52] C. De Luca, E. Valerio, F. Giudicepietro, G. Macedonio, F. Casu, y R. Lanari, «Pre- and Co-Eruptive Analysis of the September 2021 Eruption at Cumbre Vieja Volcano (La Palma, Canary Islands) Through DInSAR Measurements and Analytical Modeling», *Geophys. Res. Lett.*, vol. 49, n.º 7, p. e2021GL097293, 2022, doi: https://doi.org/10.1029/2021GL097293.
[53] A. Kyriou y K. G. Nikolakopoulos, «Lava Mapping Using Sentinel-1 Data after the Occurrence of a Volcanic Eruption—The Case of Cumbre Vieja Eruption on La Palma, Canary Islands, Spain», *Sensors*, vol. 22, n.º 22, p. 8768, 2022.

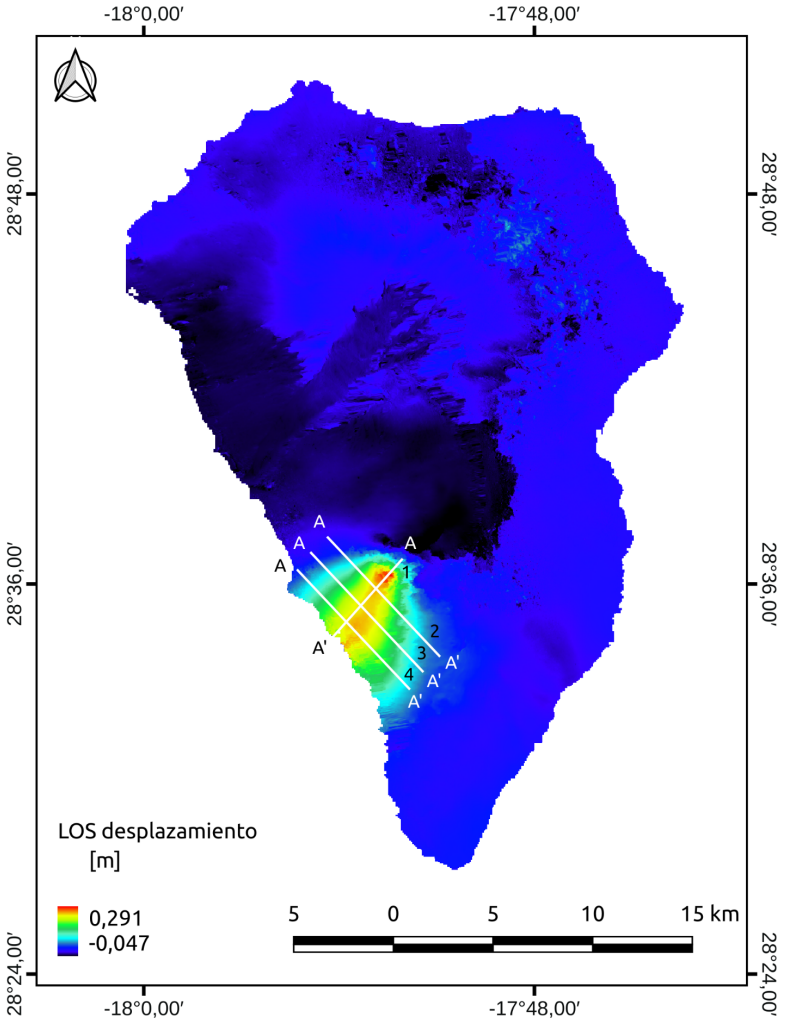
ANEXO 1. Producto ascendente.

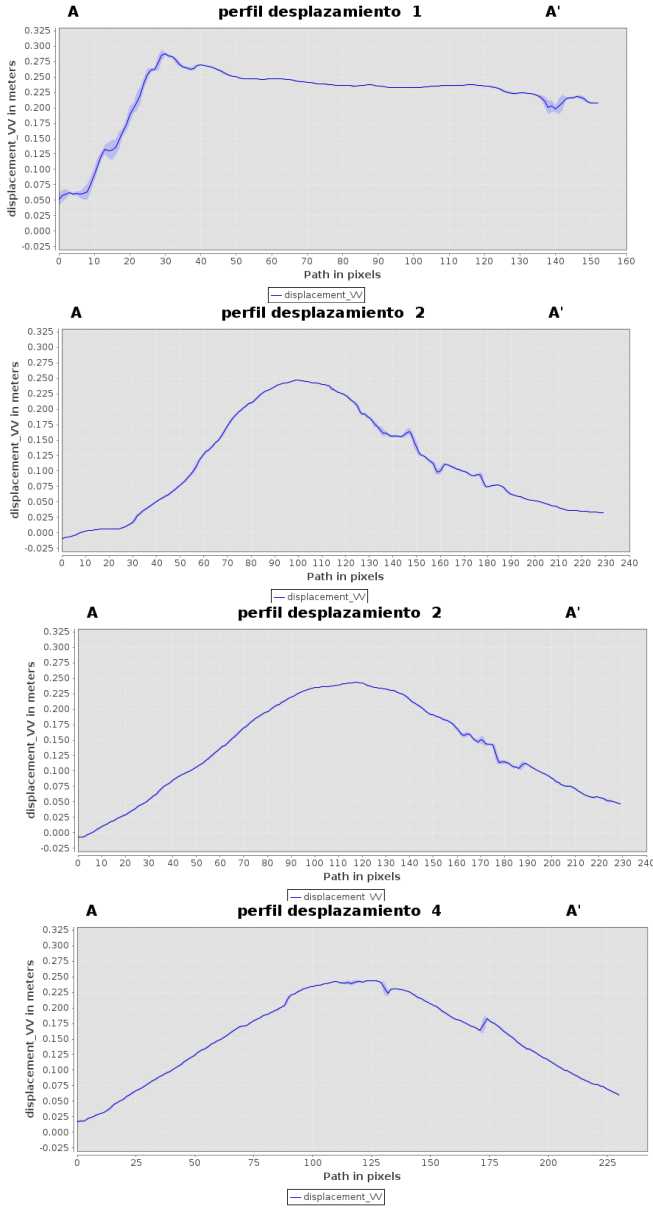
Resultado 04-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



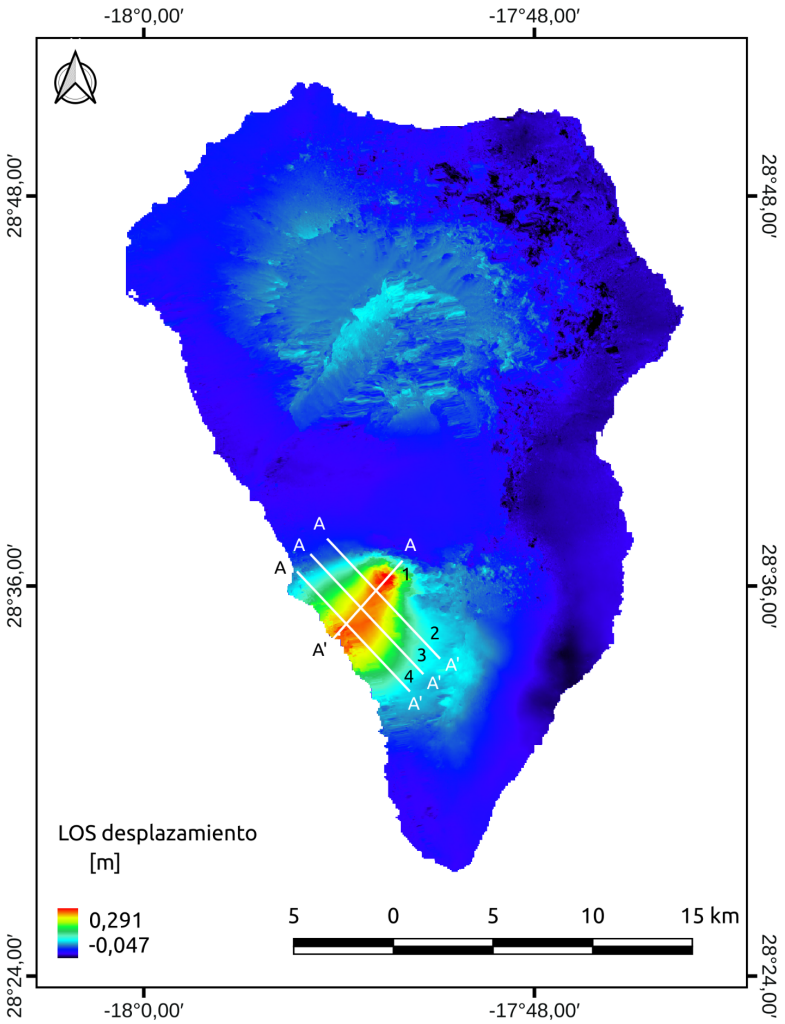


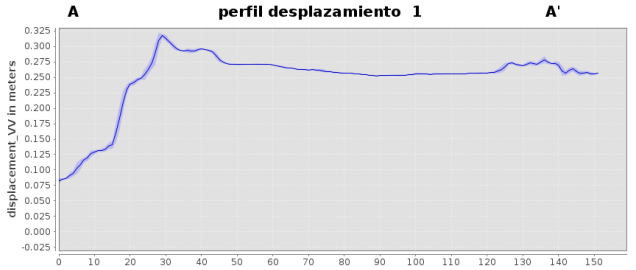
Resultado 10-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master).

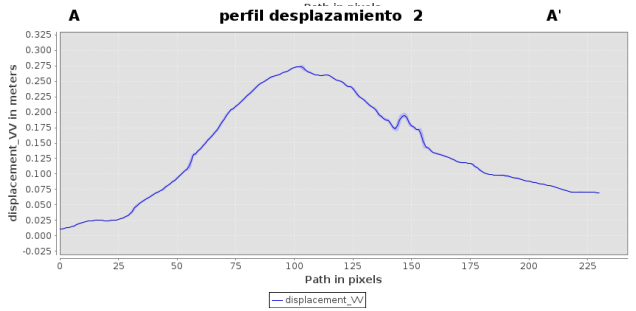


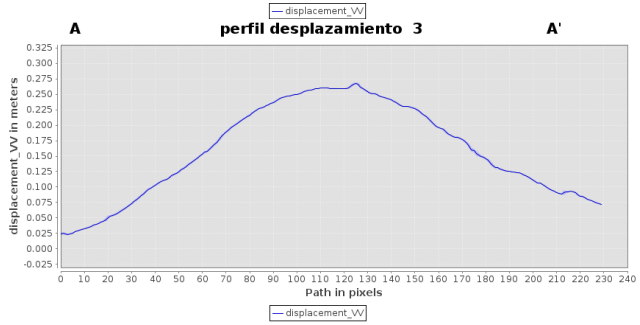


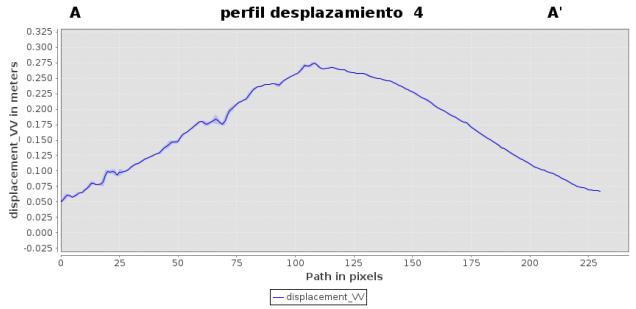
Resultado 16-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



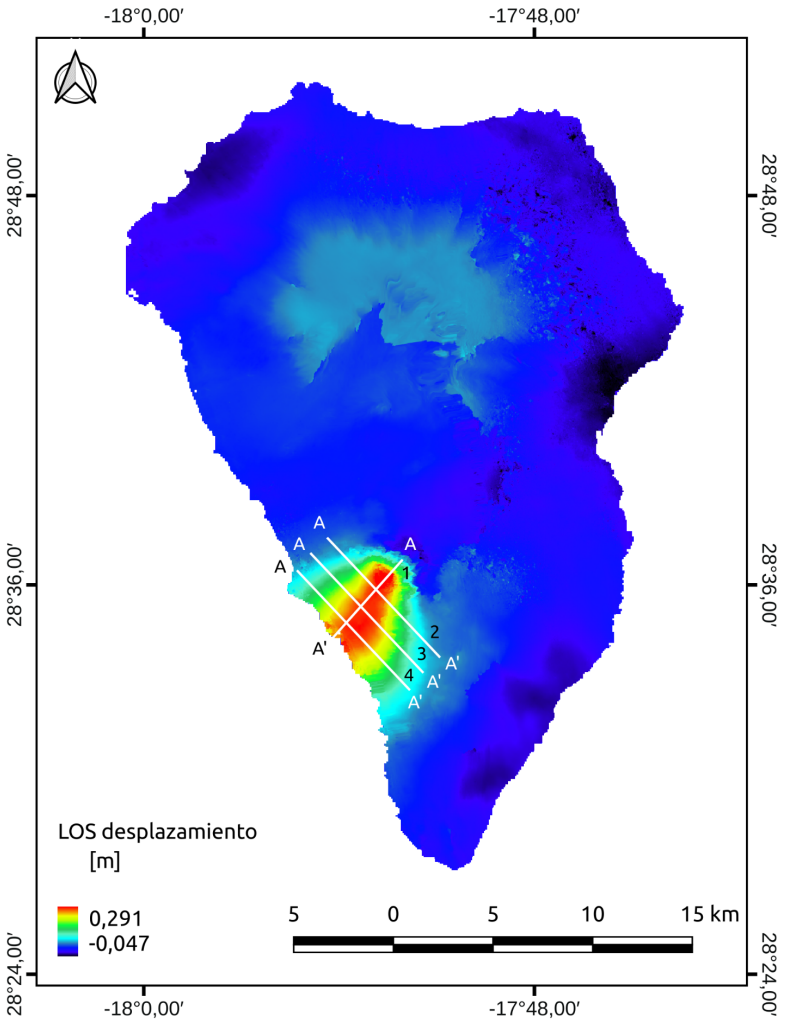


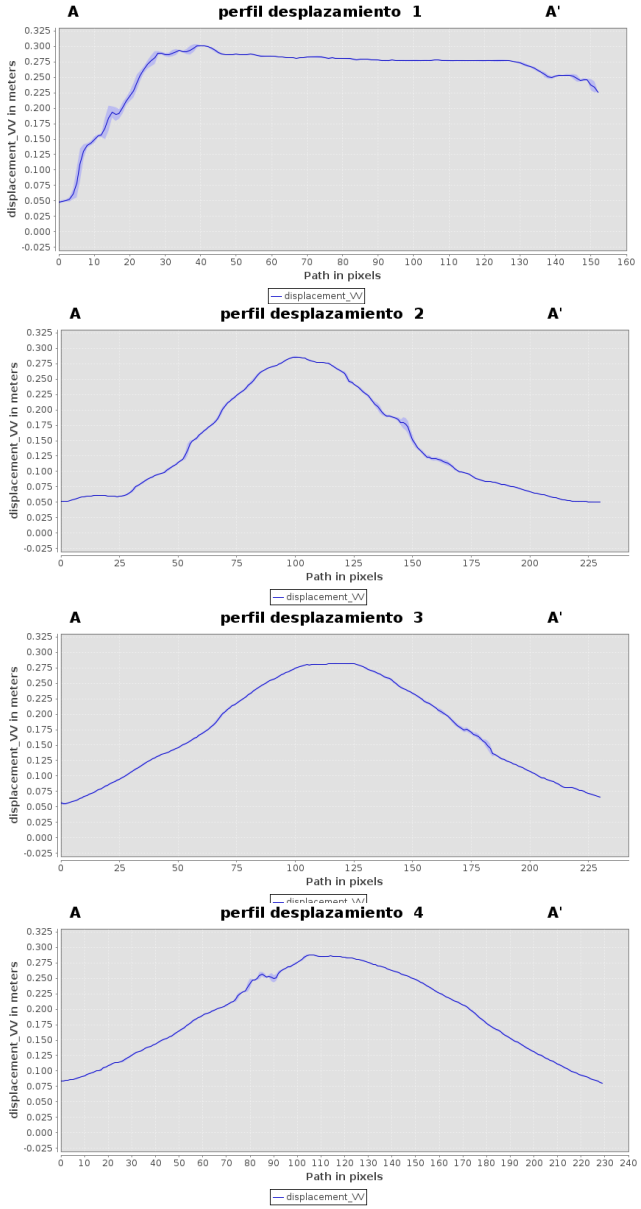




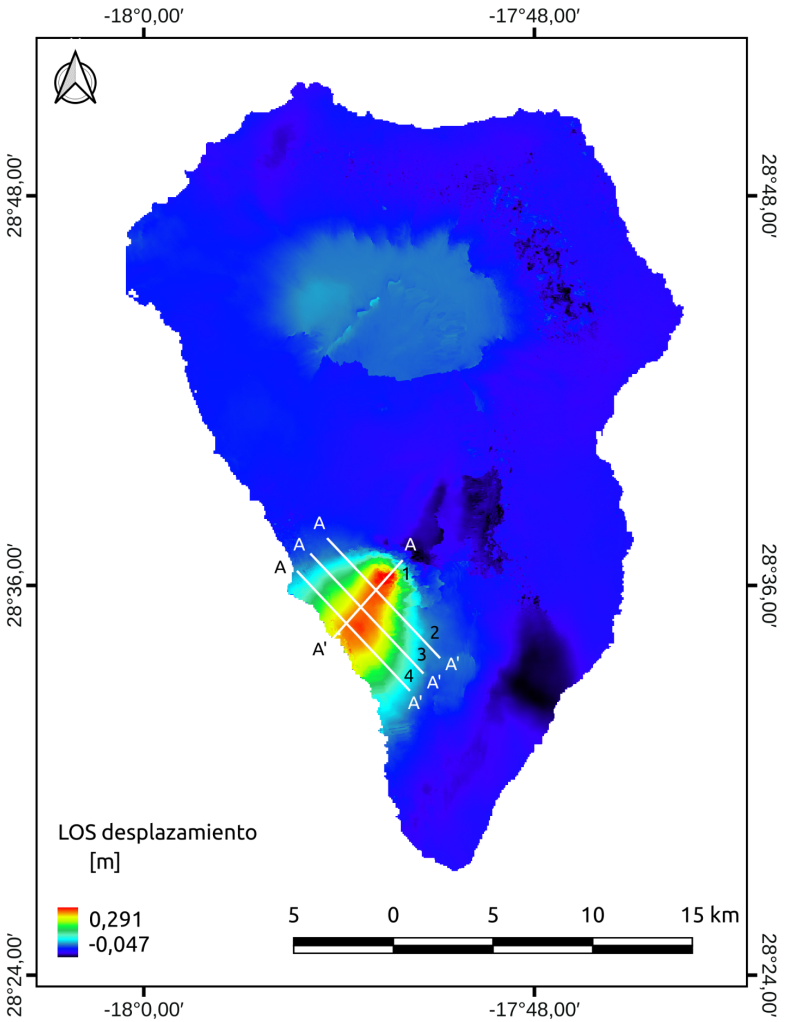


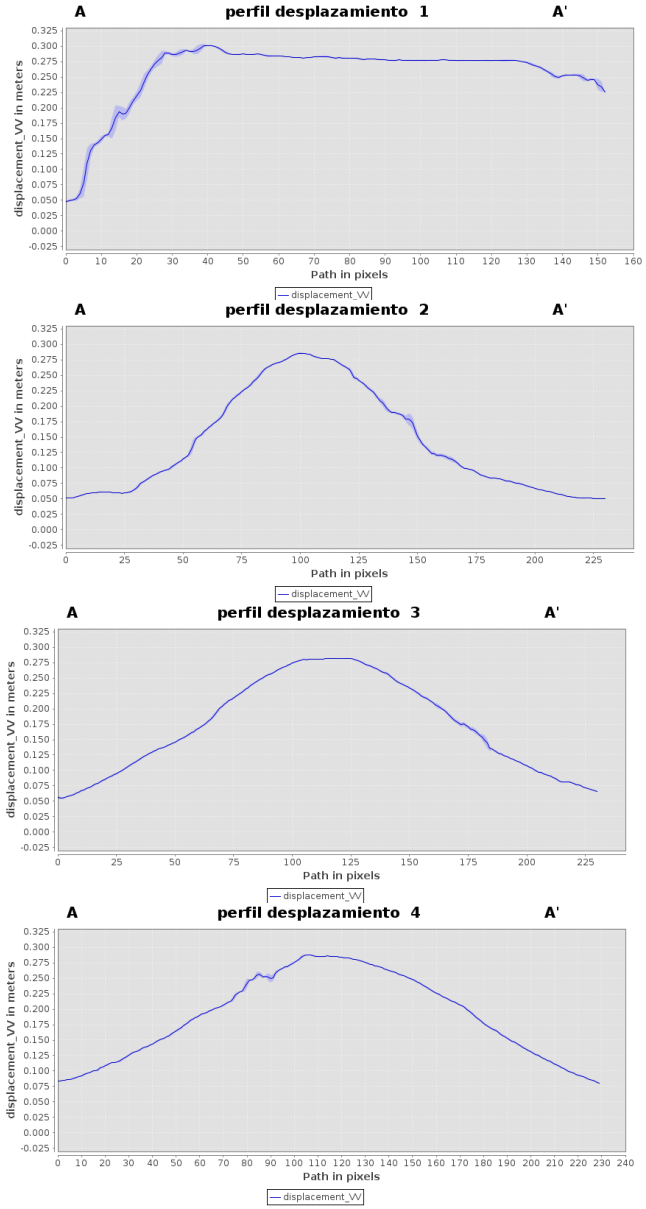
Resultado 22-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



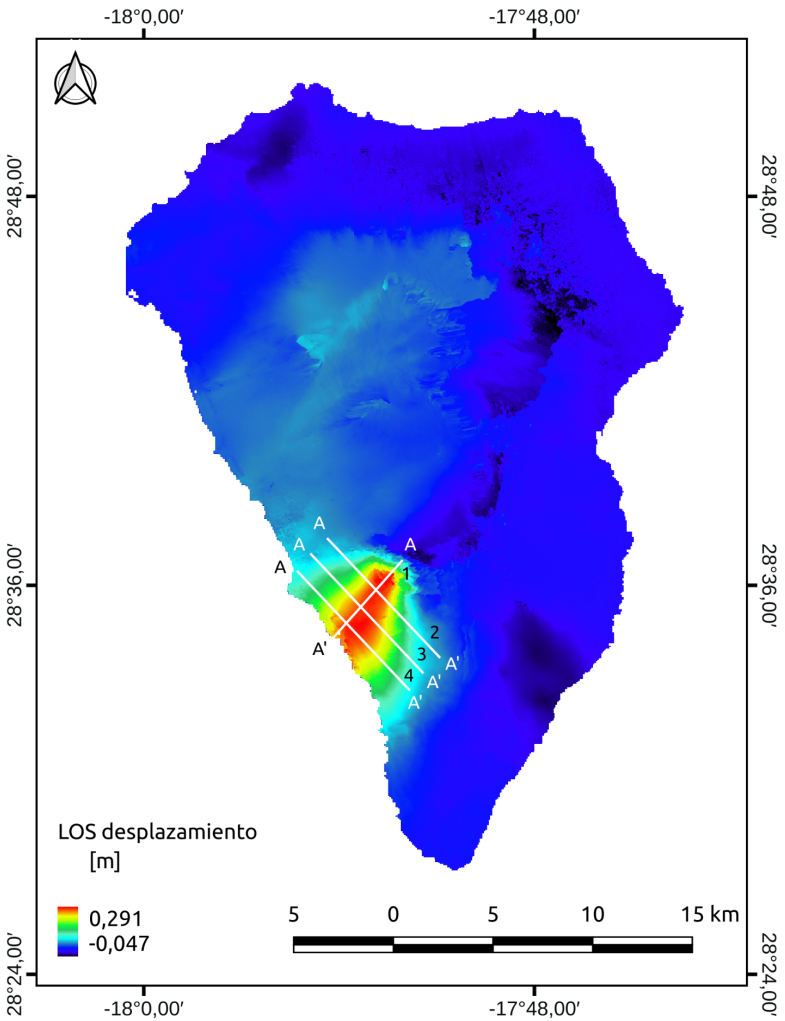


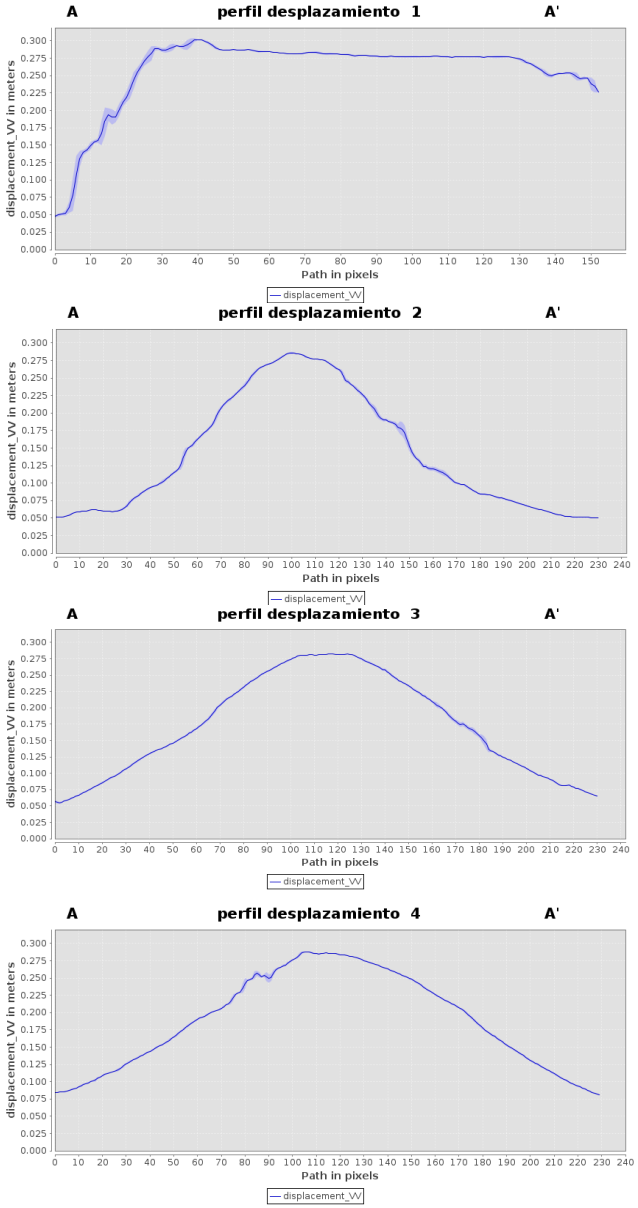
Resultado 28-07-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



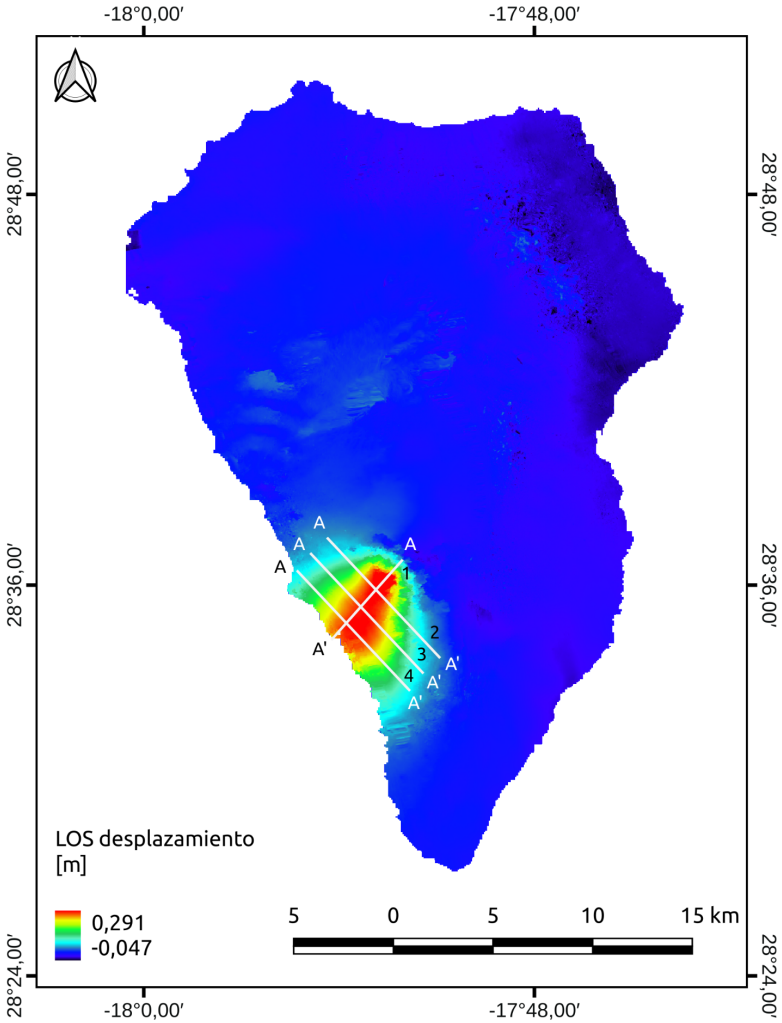


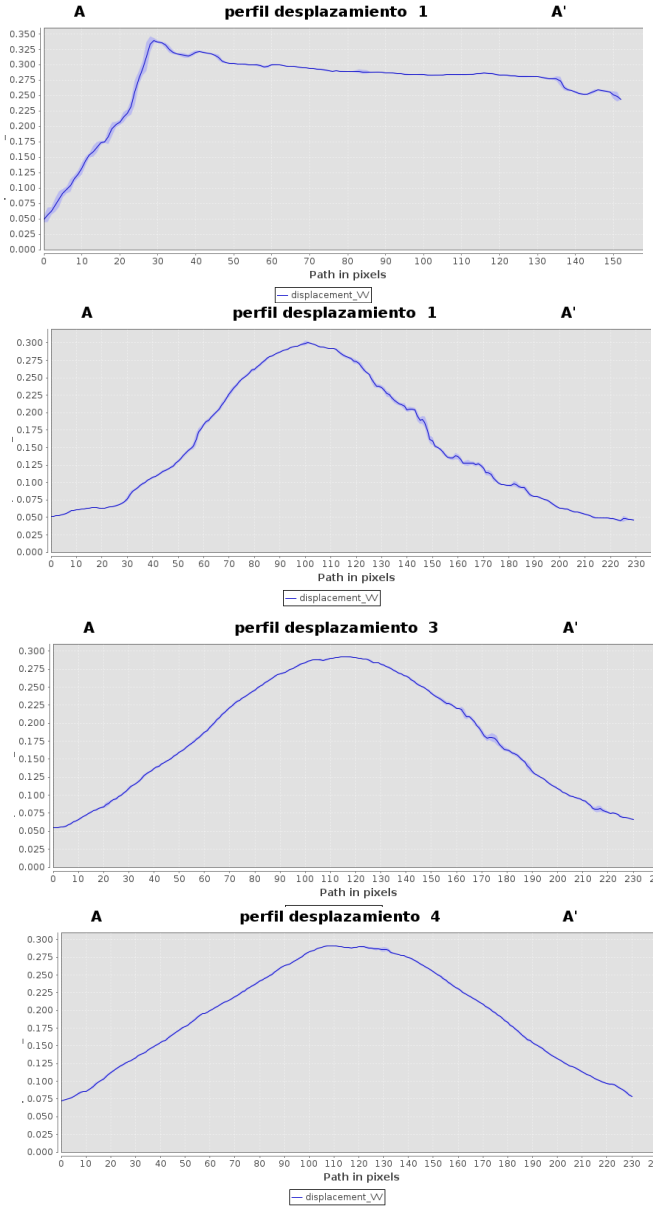
Resultado 03-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



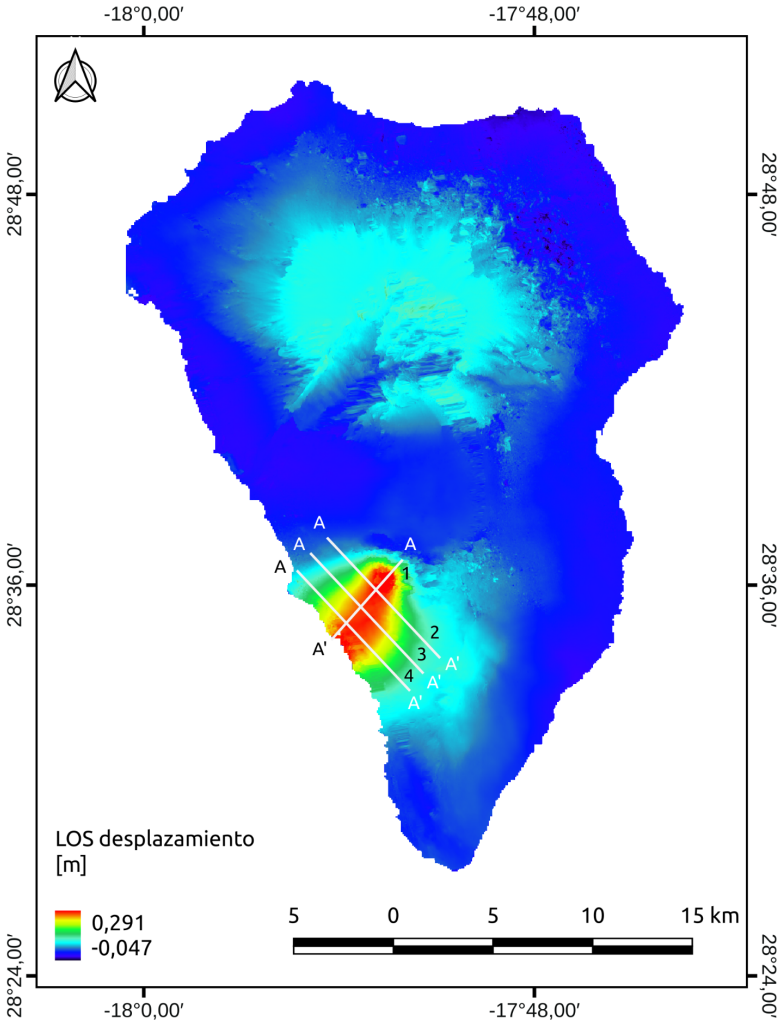


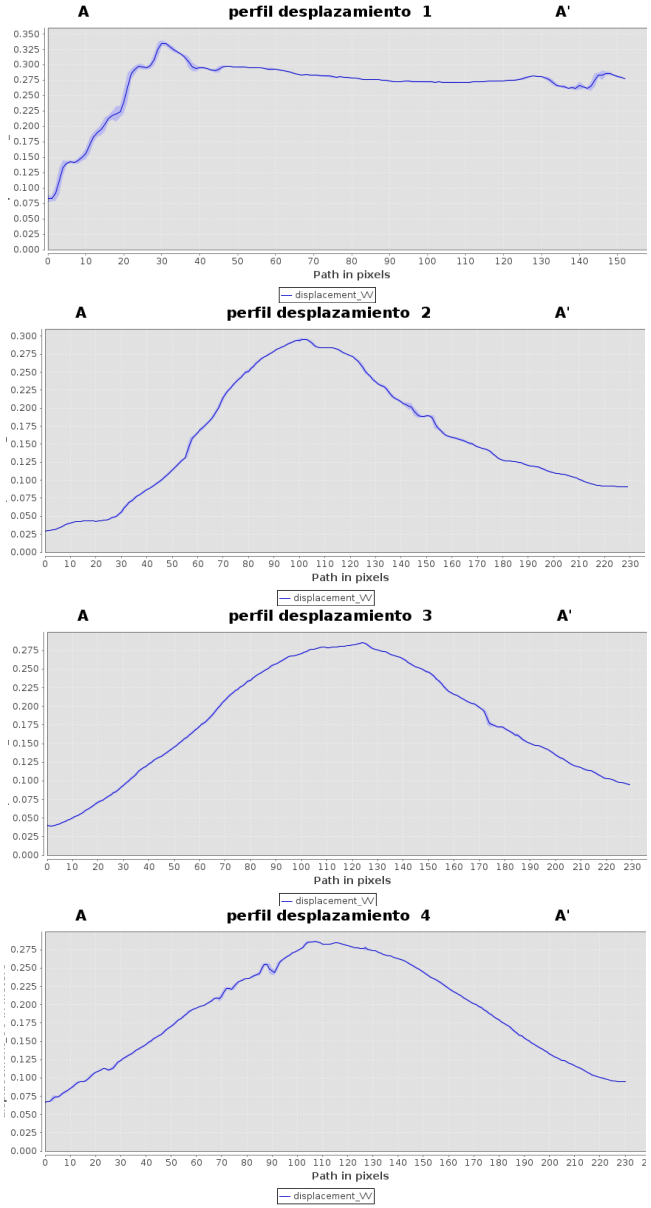
Resultado 09-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



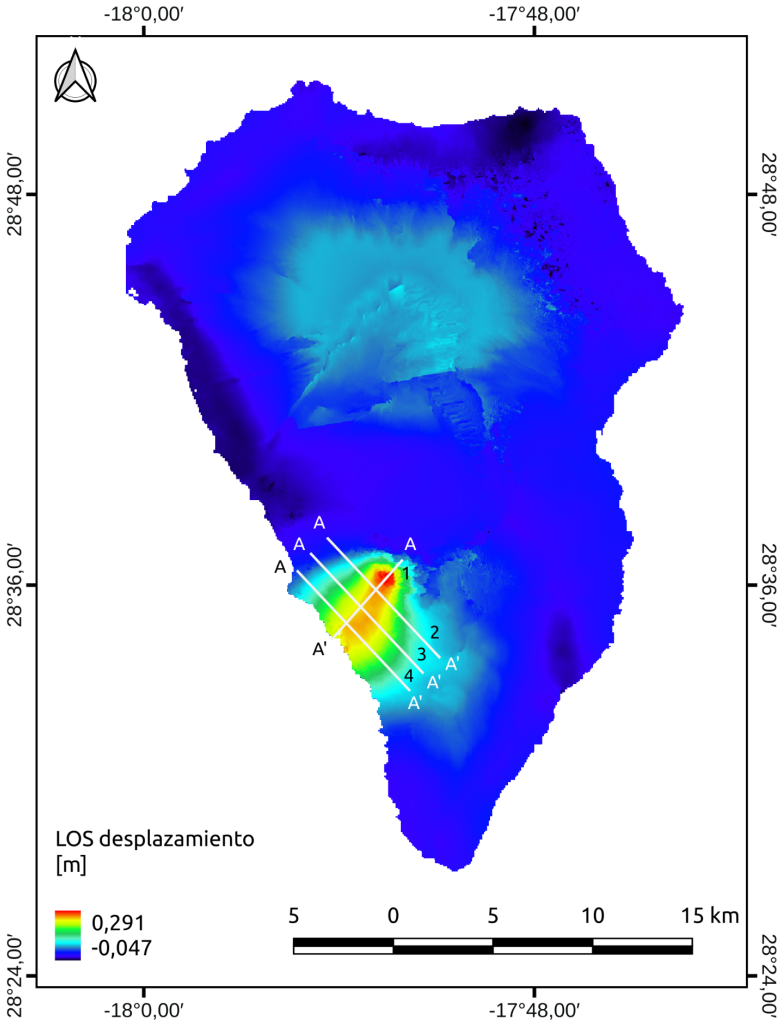


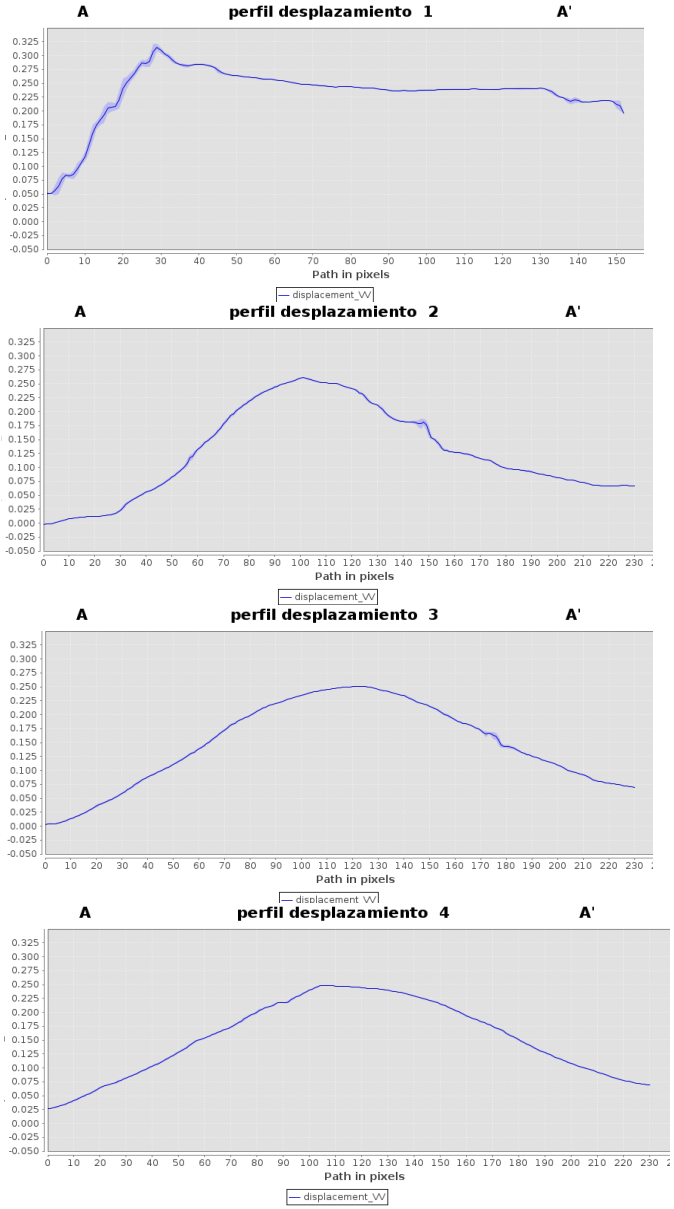
Resultado 15-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



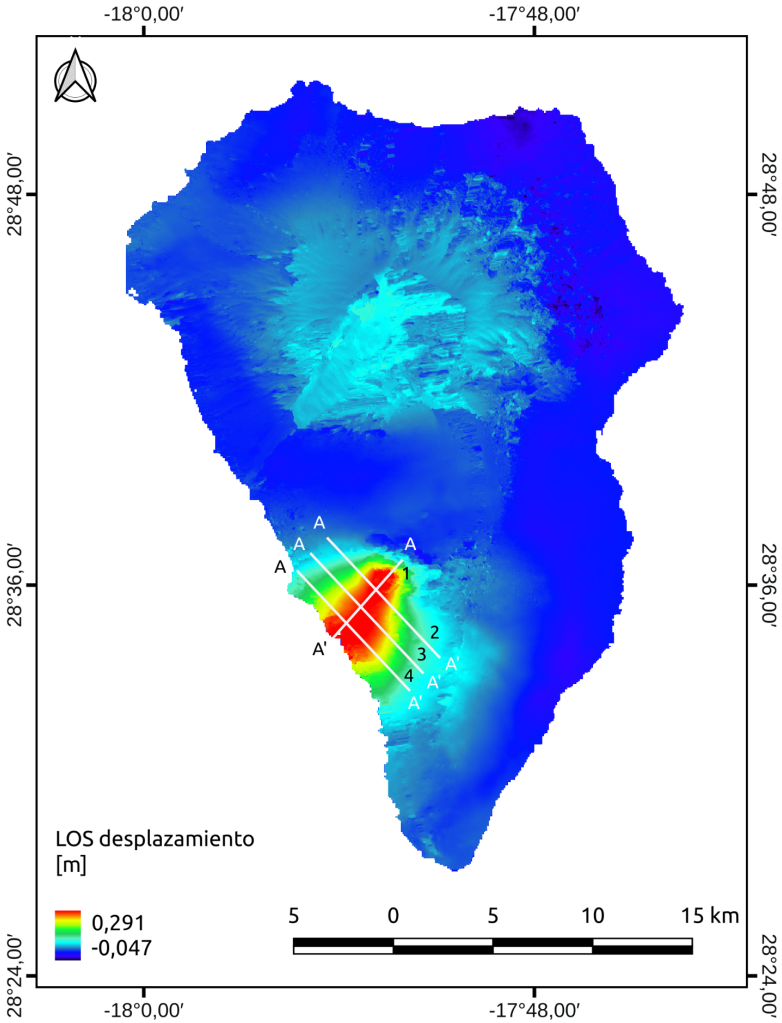


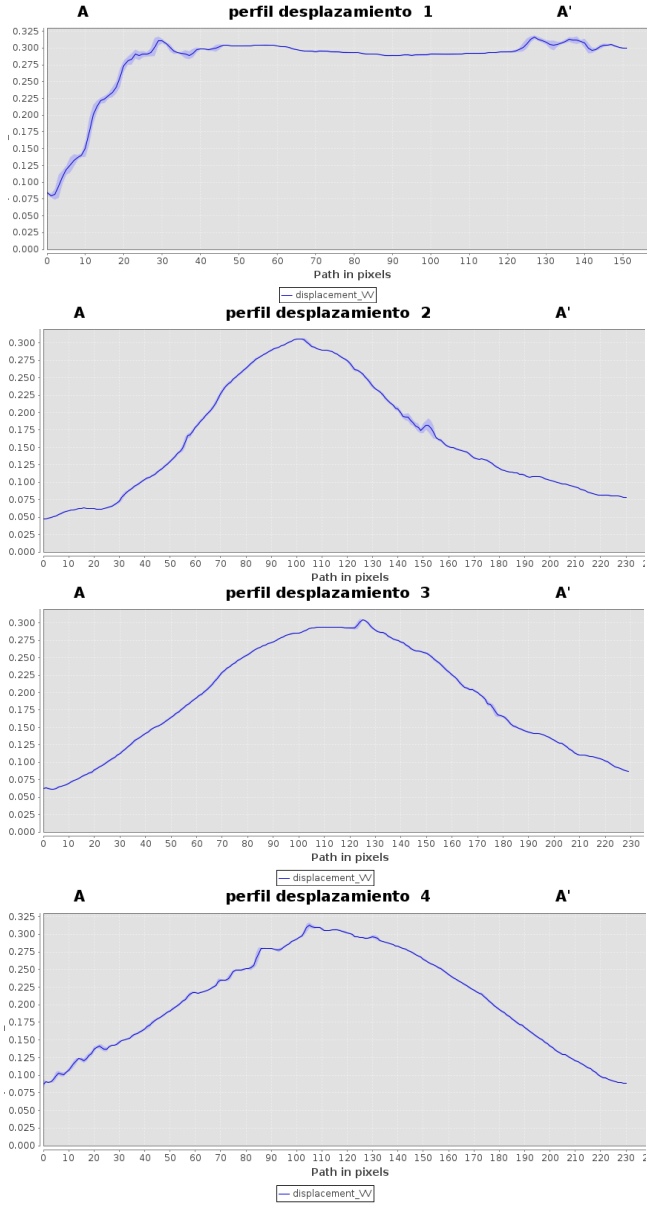
Resultado 21-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



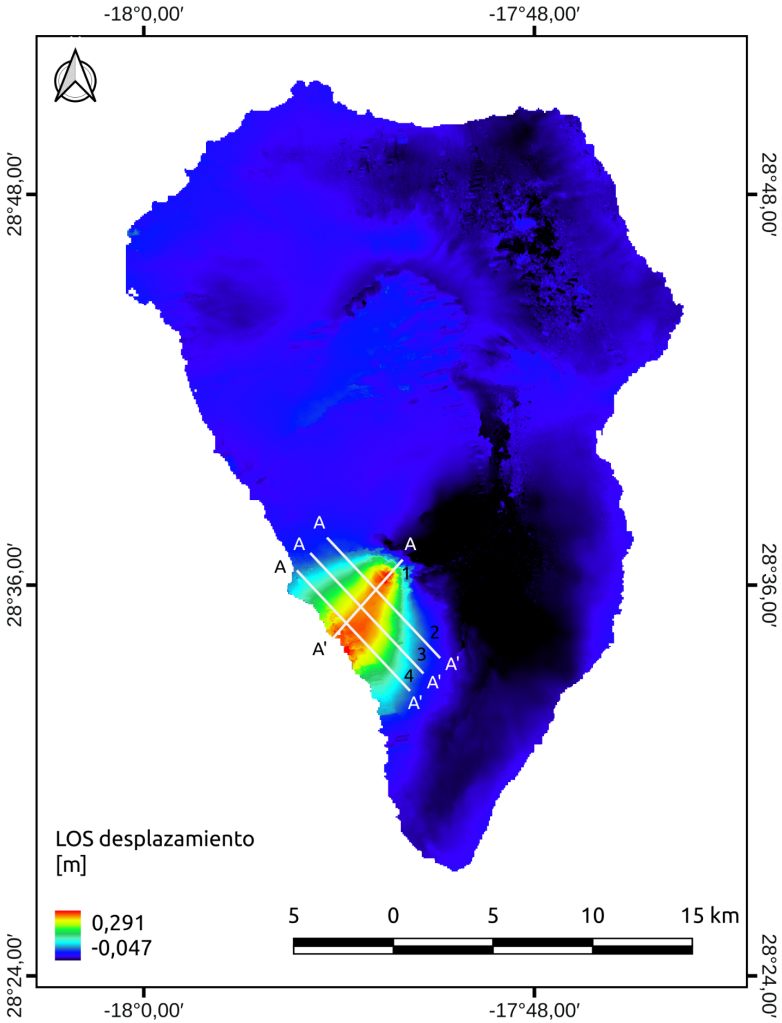


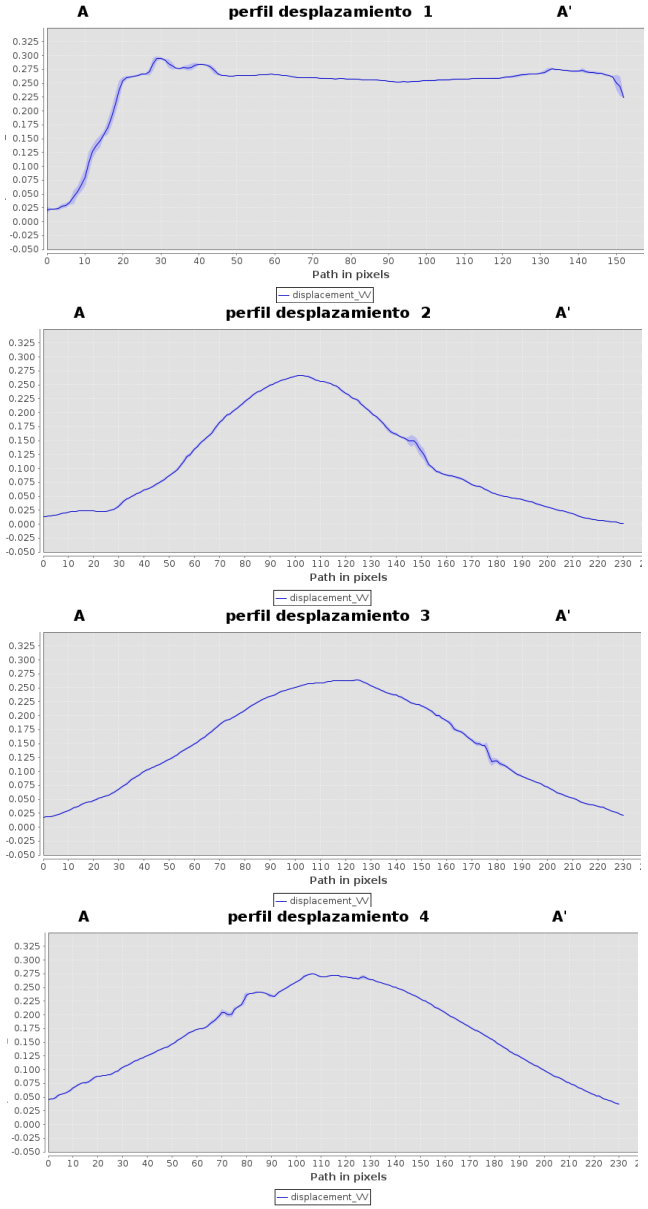
Resultado 27-08-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



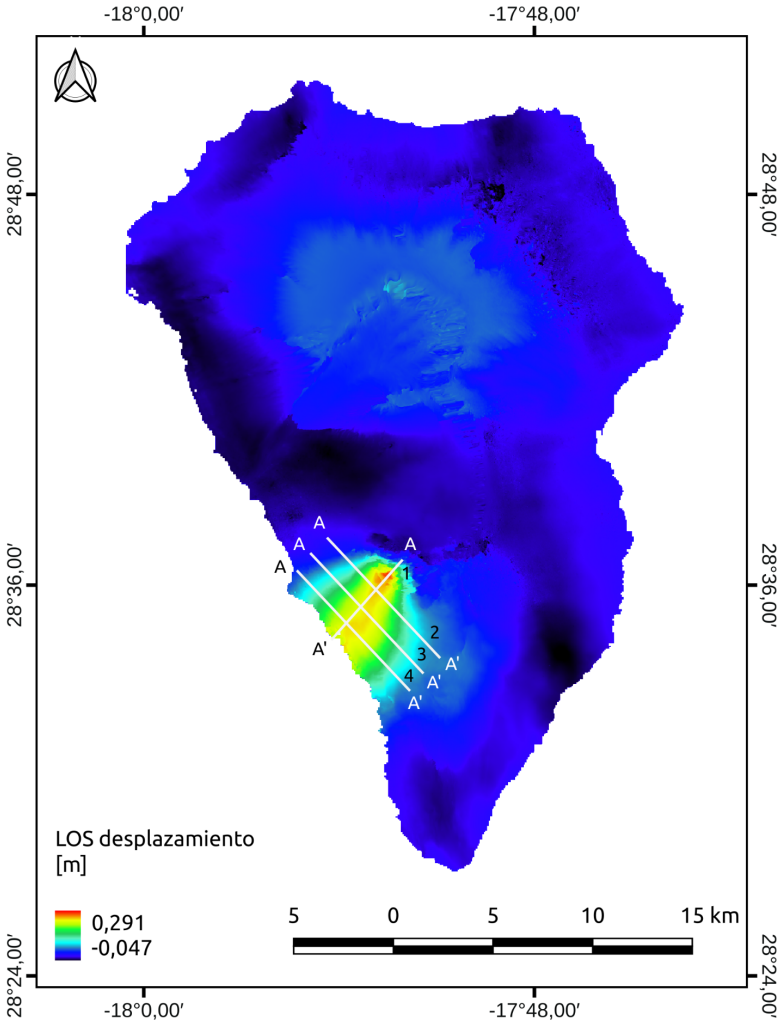


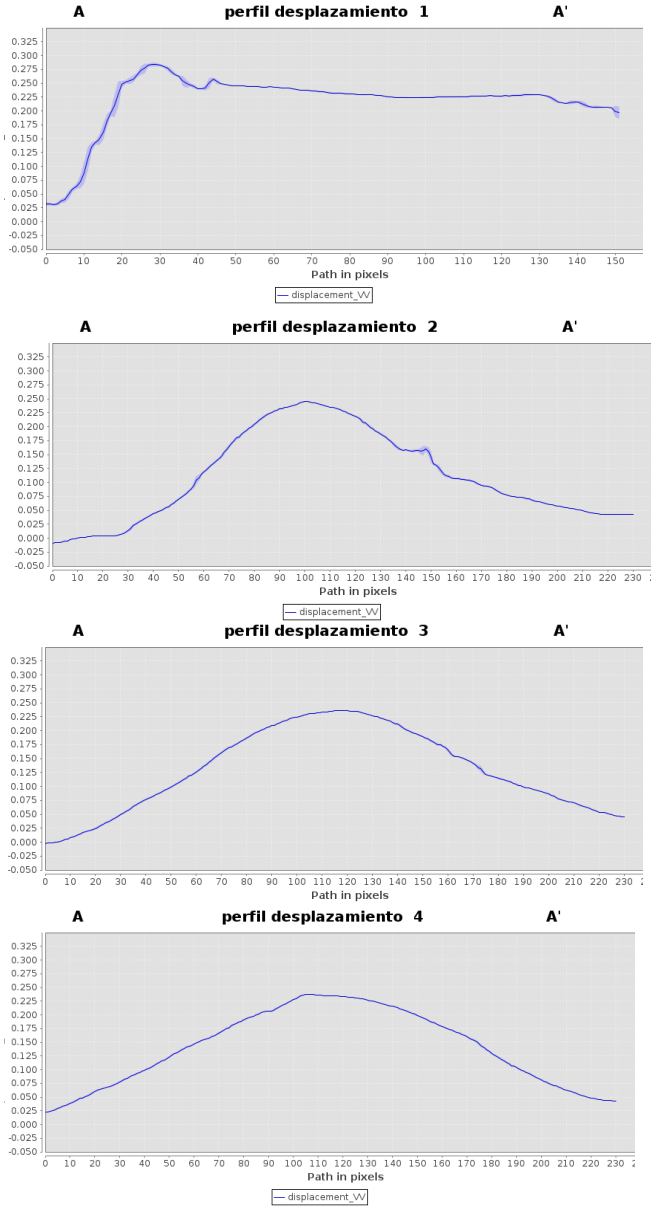
Resultado 02-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



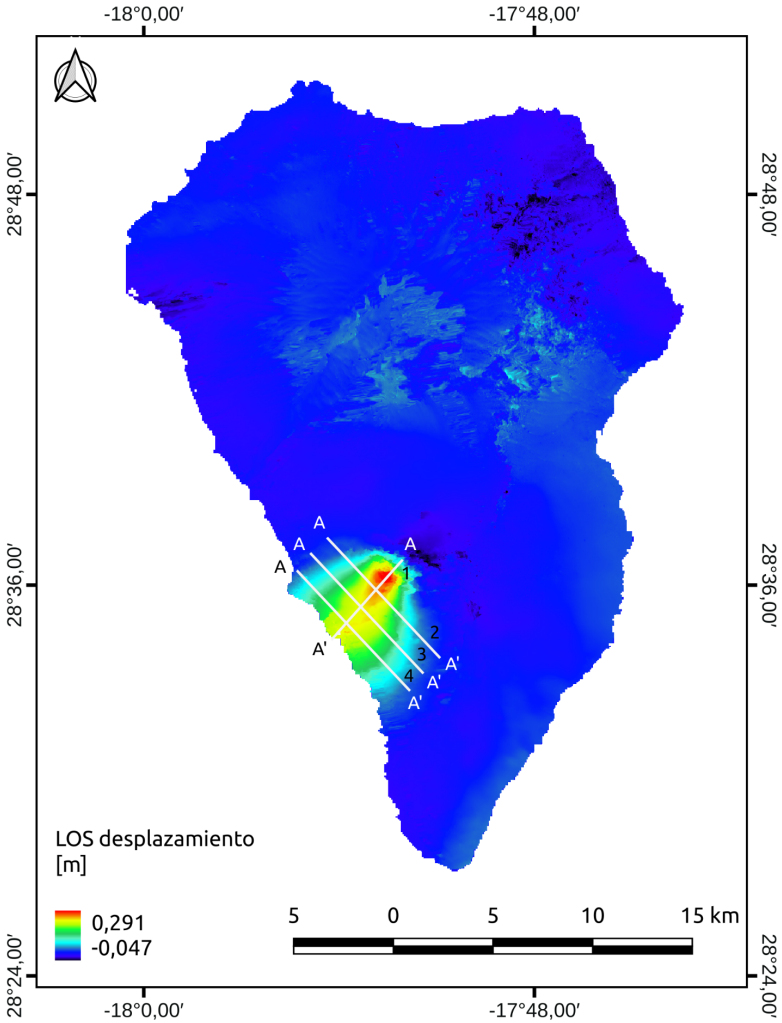


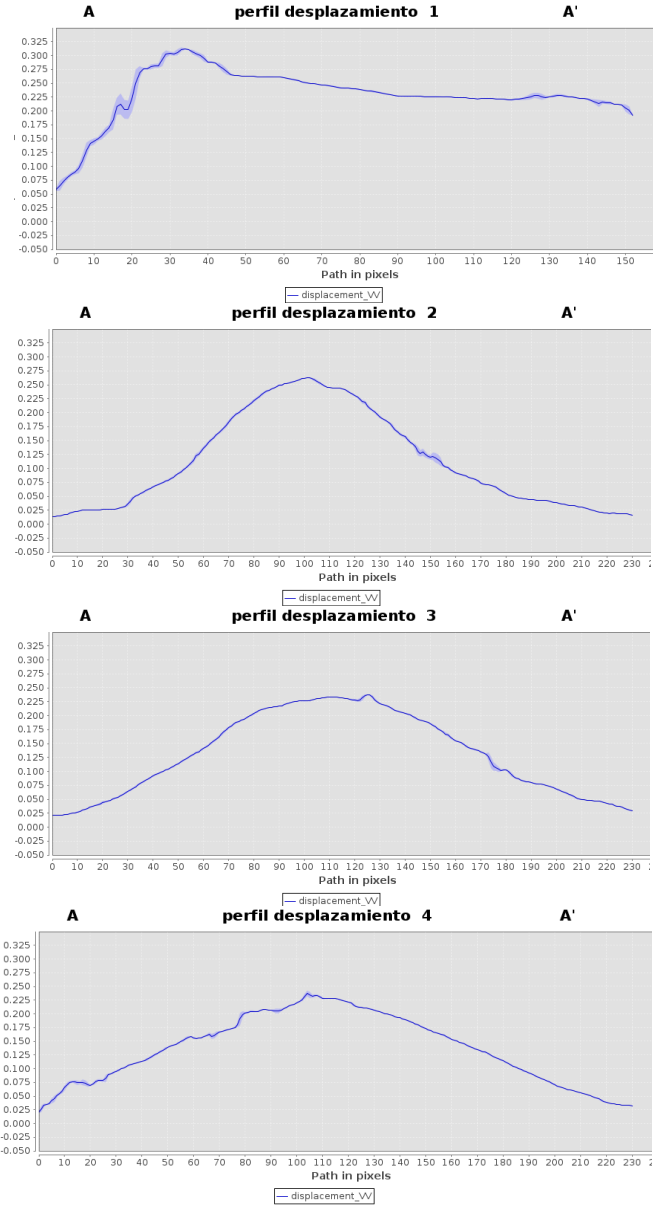
Resultado 08-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



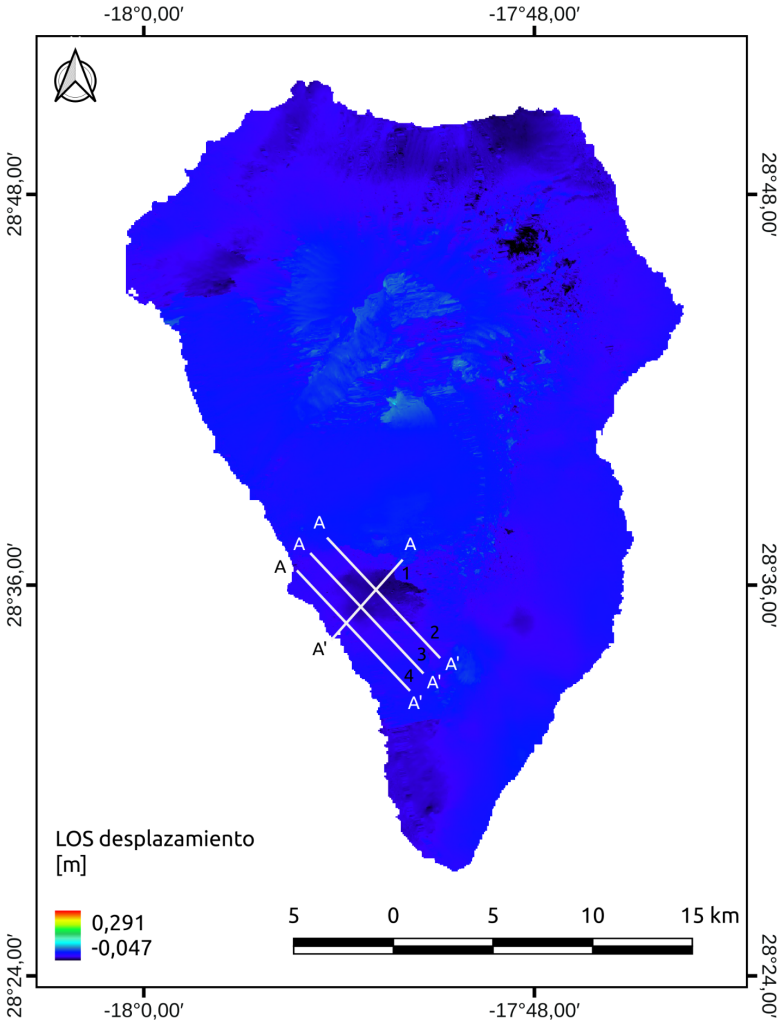


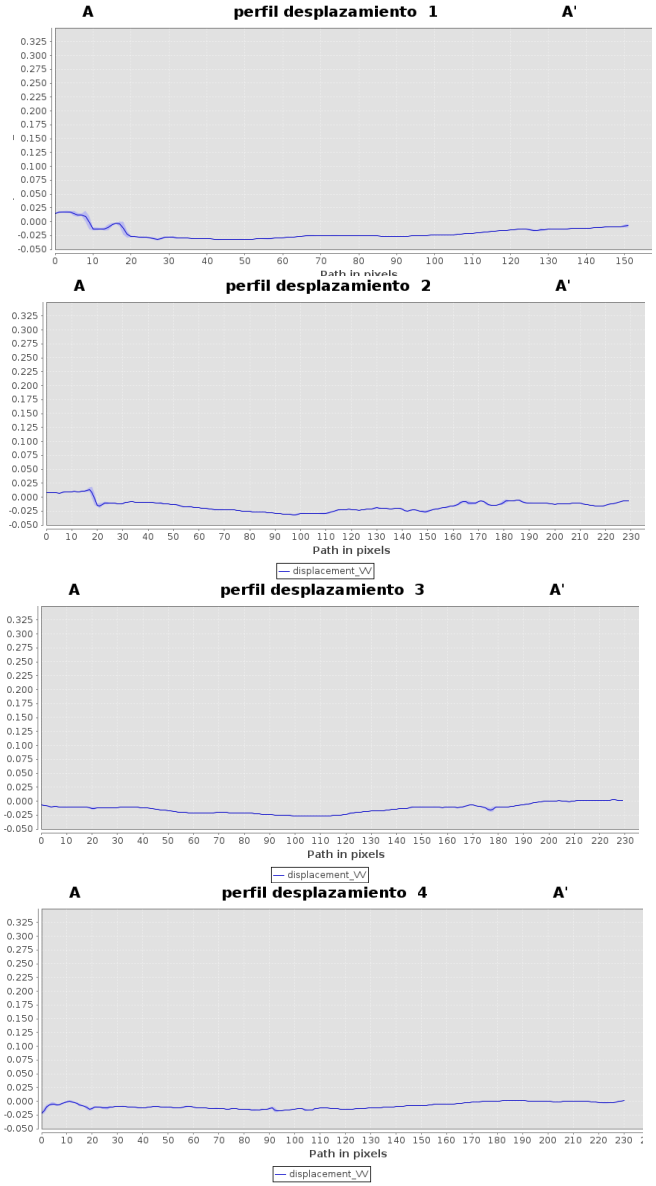
Resultado 14-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



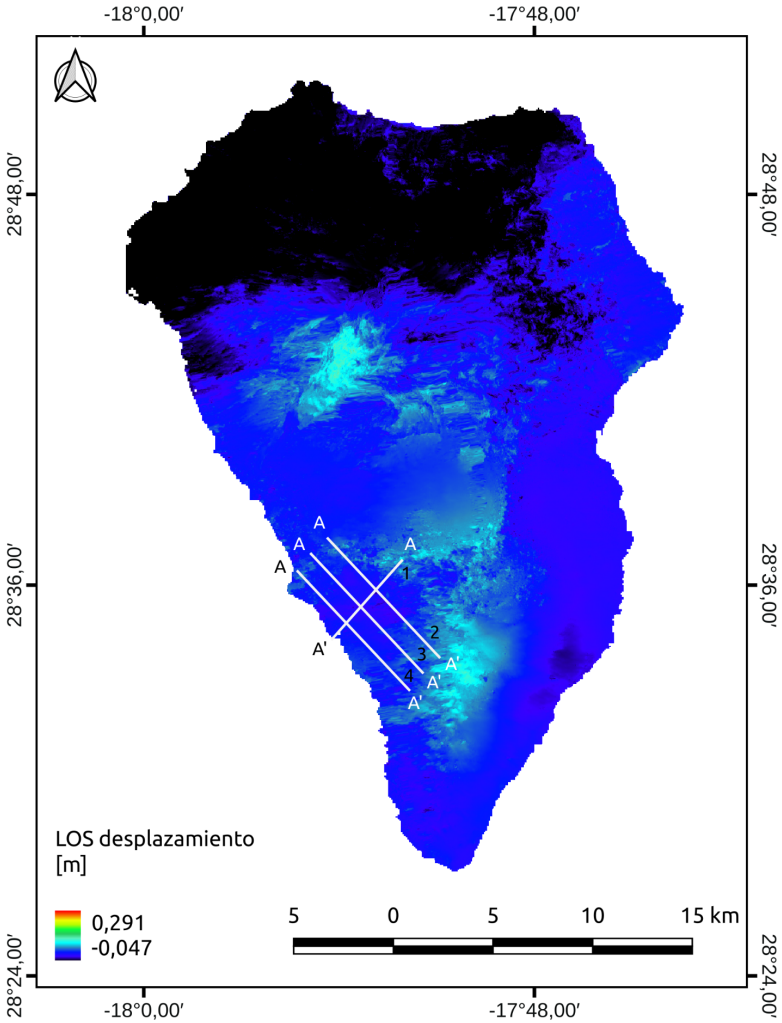


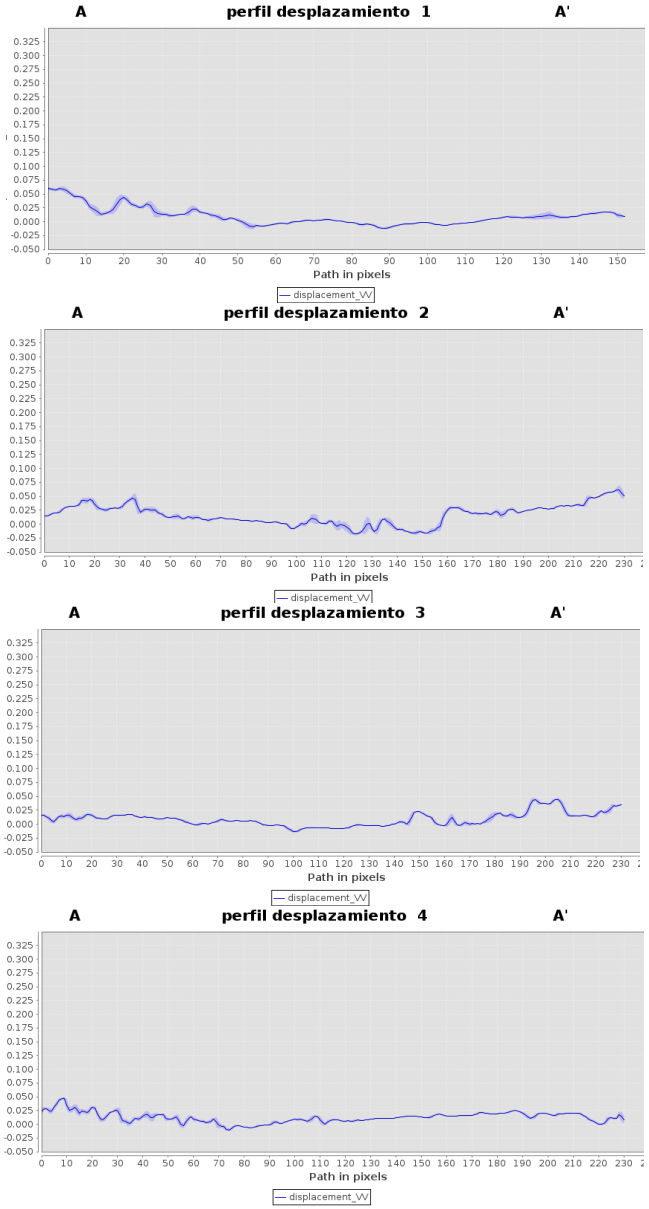
Resultado 26-09-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



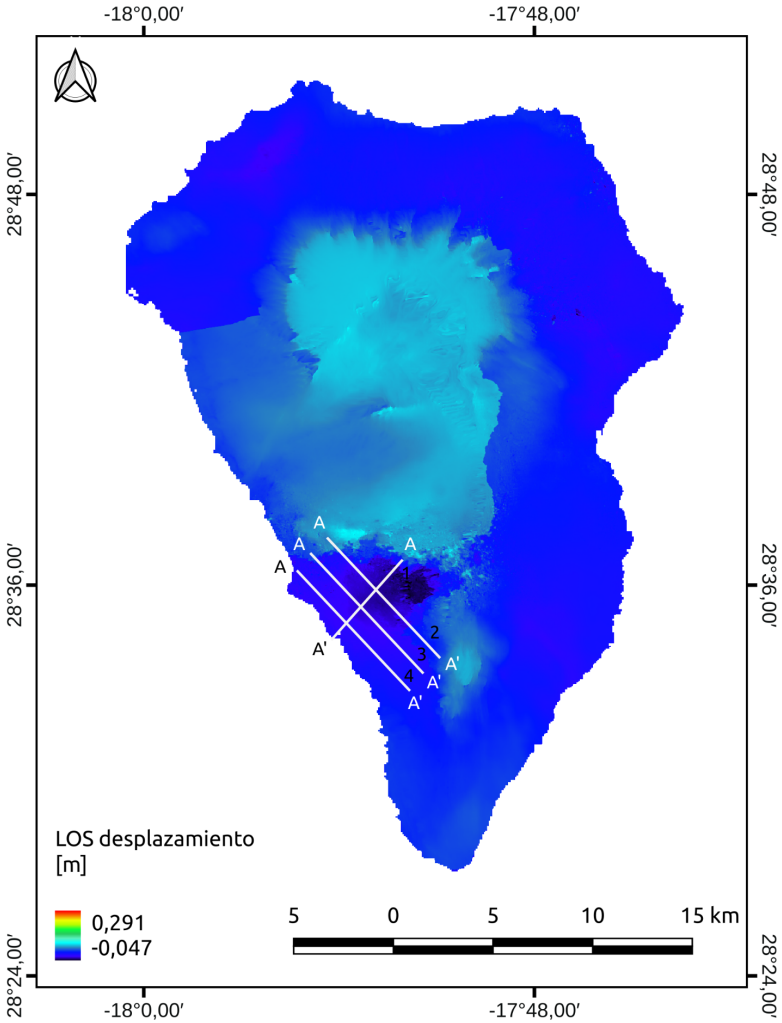


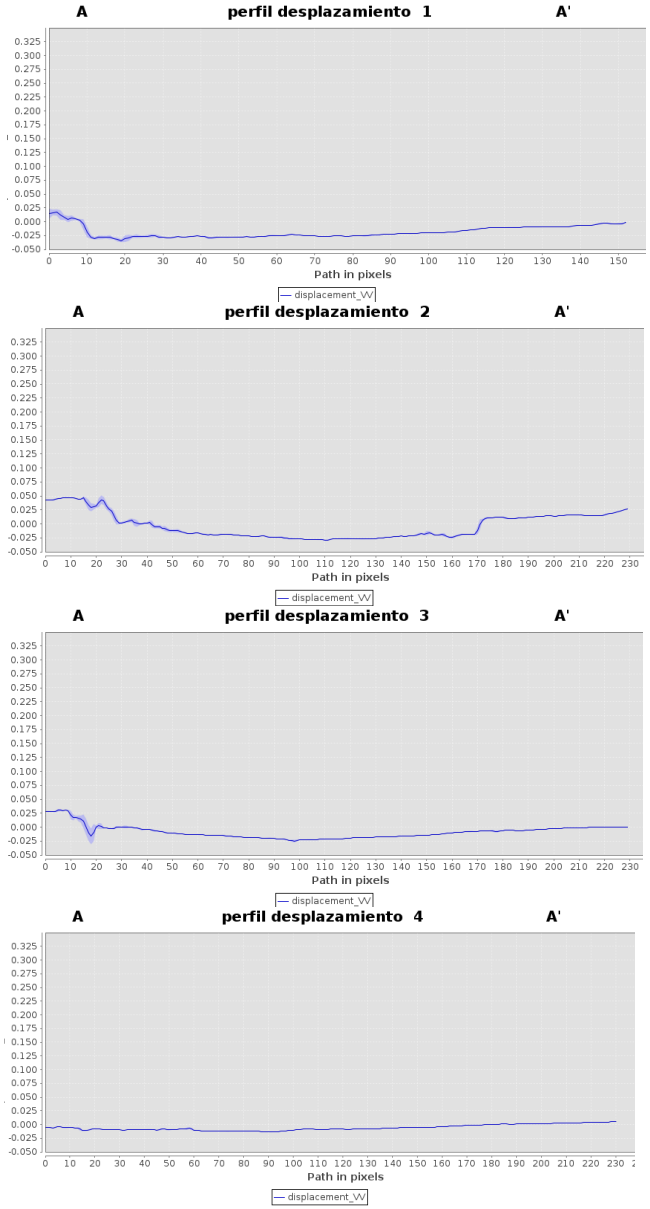
Resultado 02-10-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



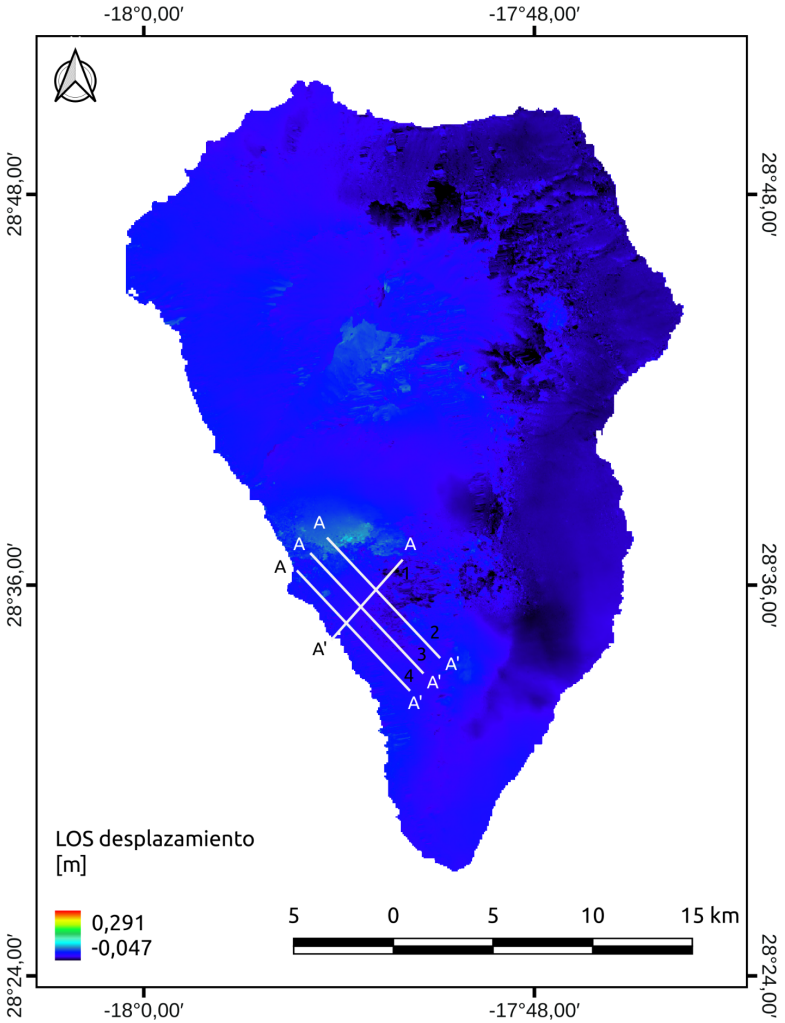


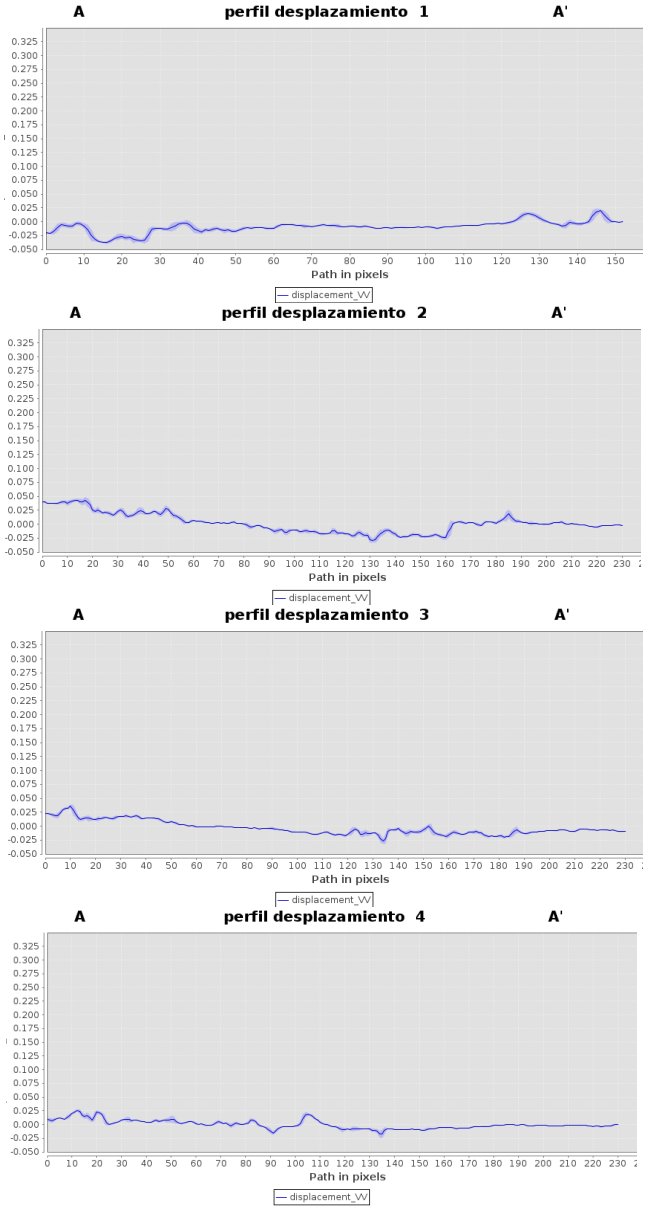
Resultado 08-10-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



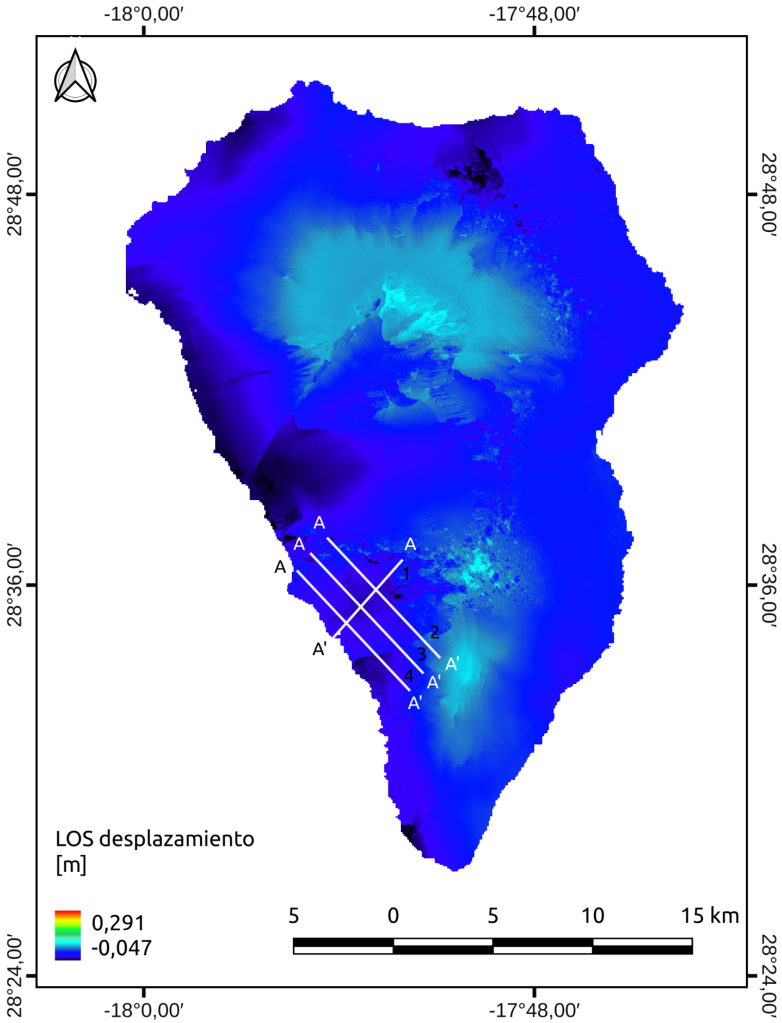


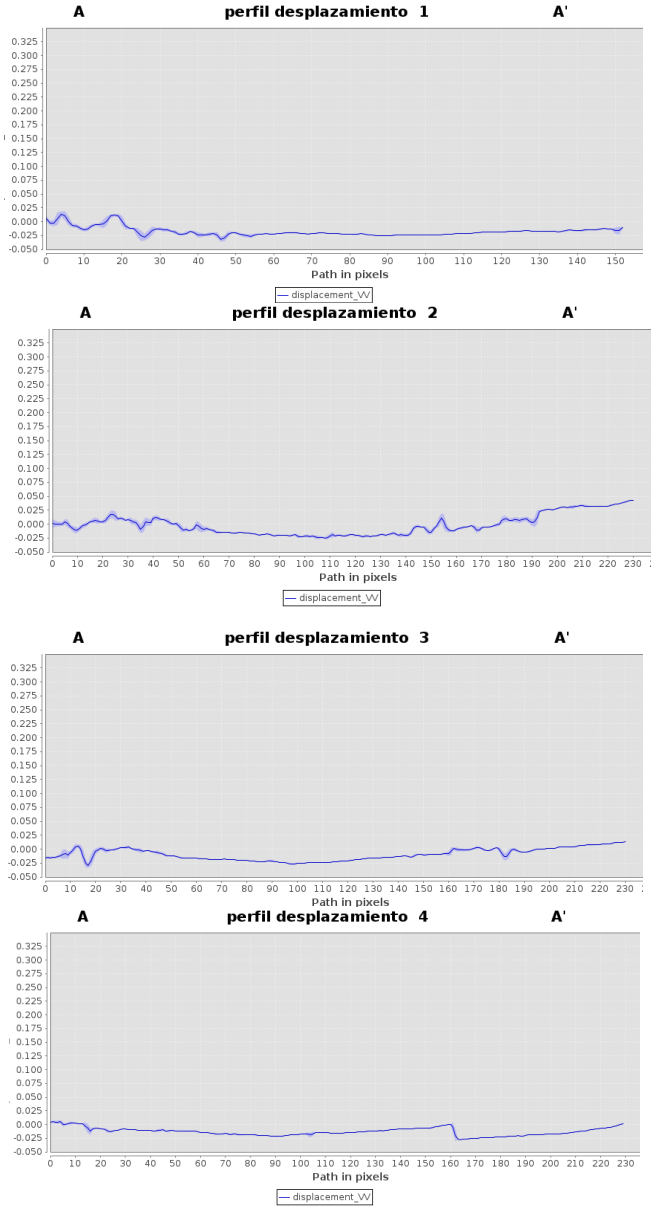
Resultado 14-10-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



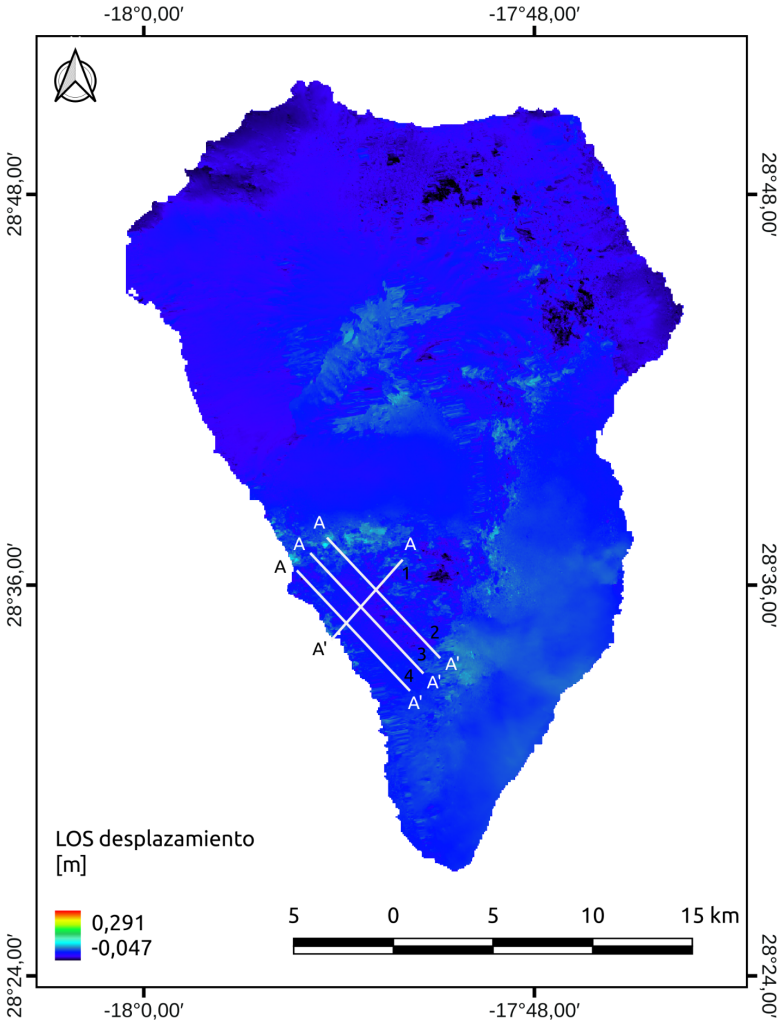


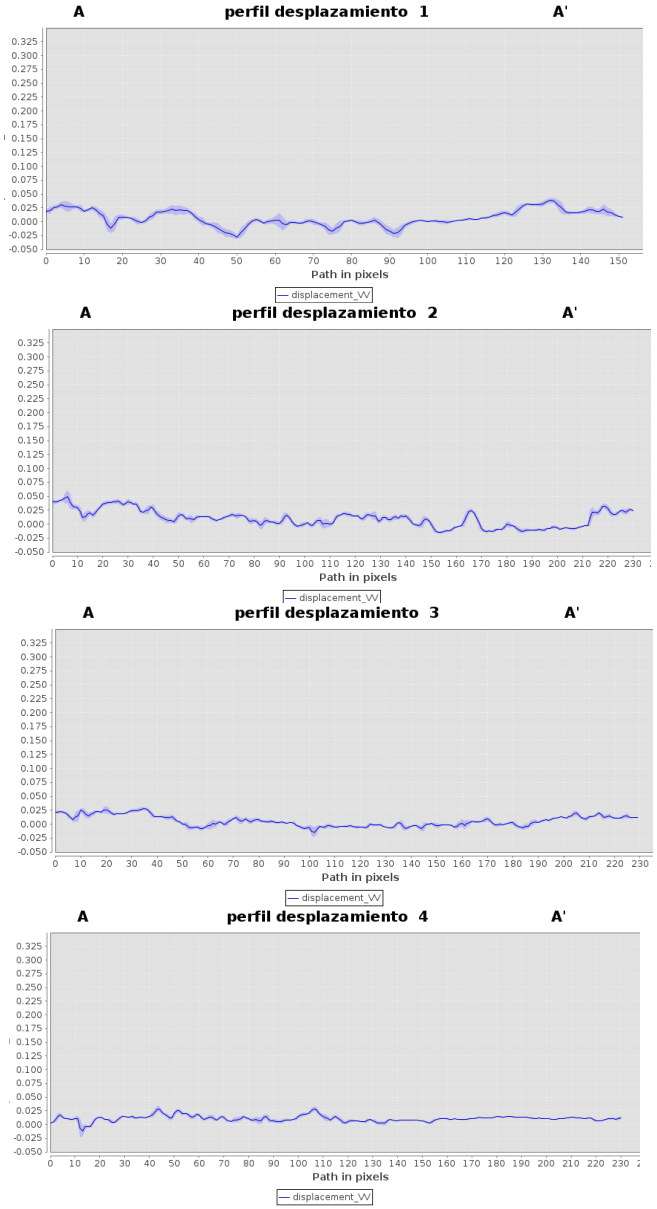
Resultado 20-10-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



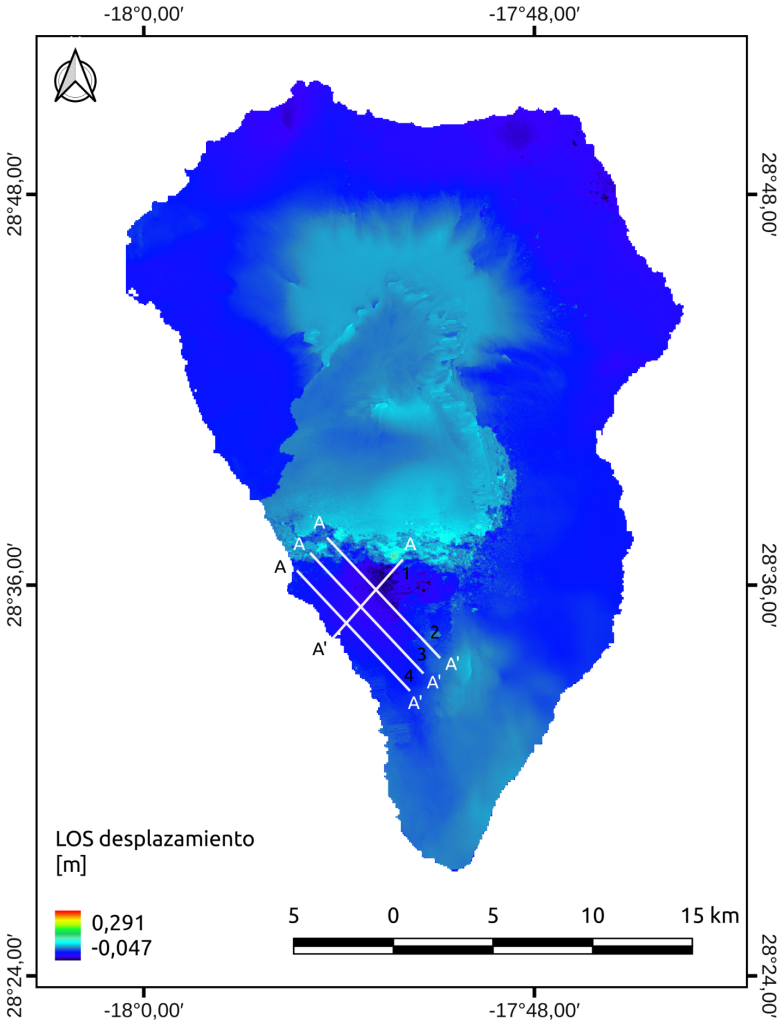


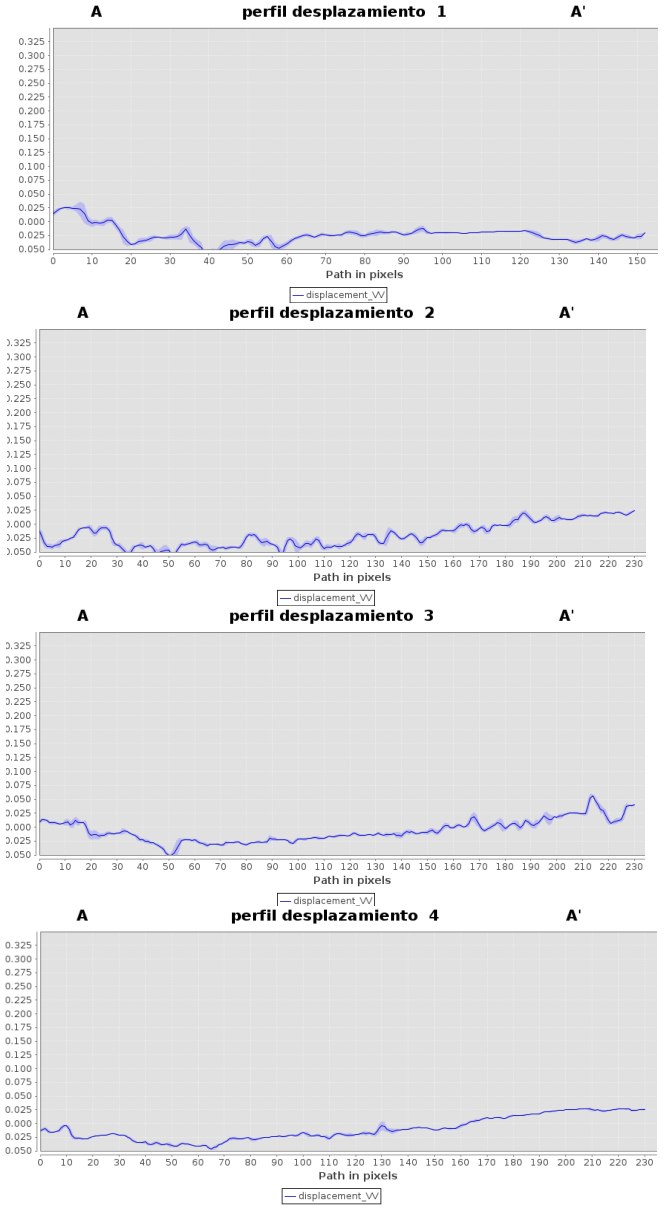
Resultado 26-10-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



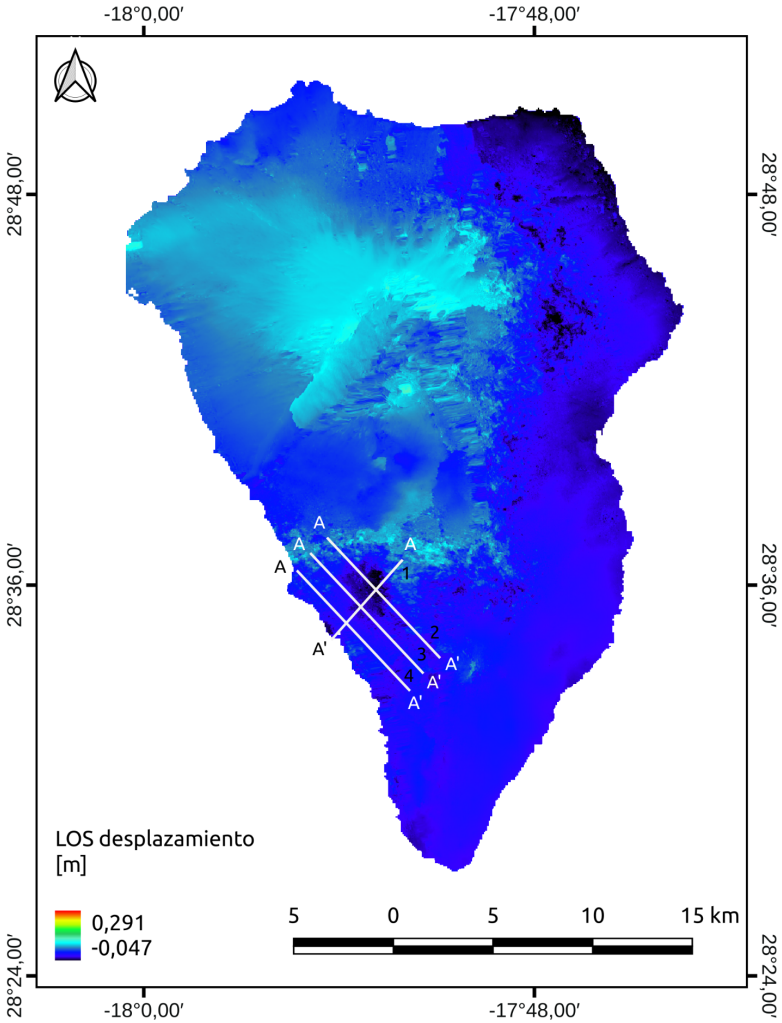


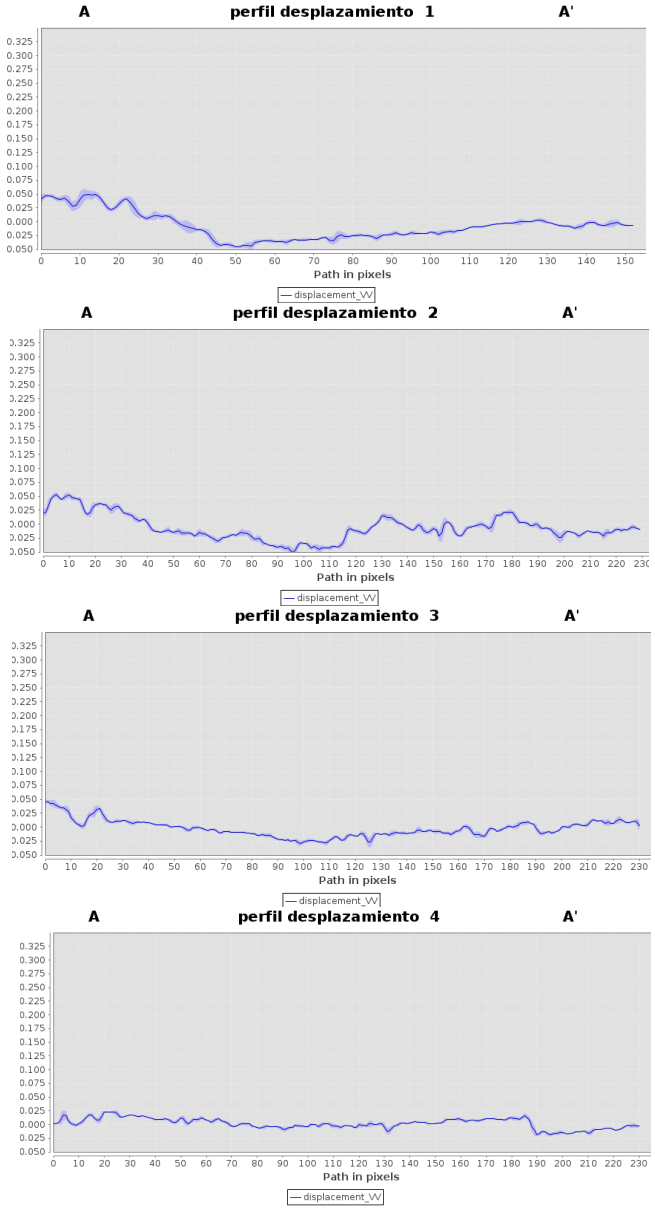
Resultado 01-11-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



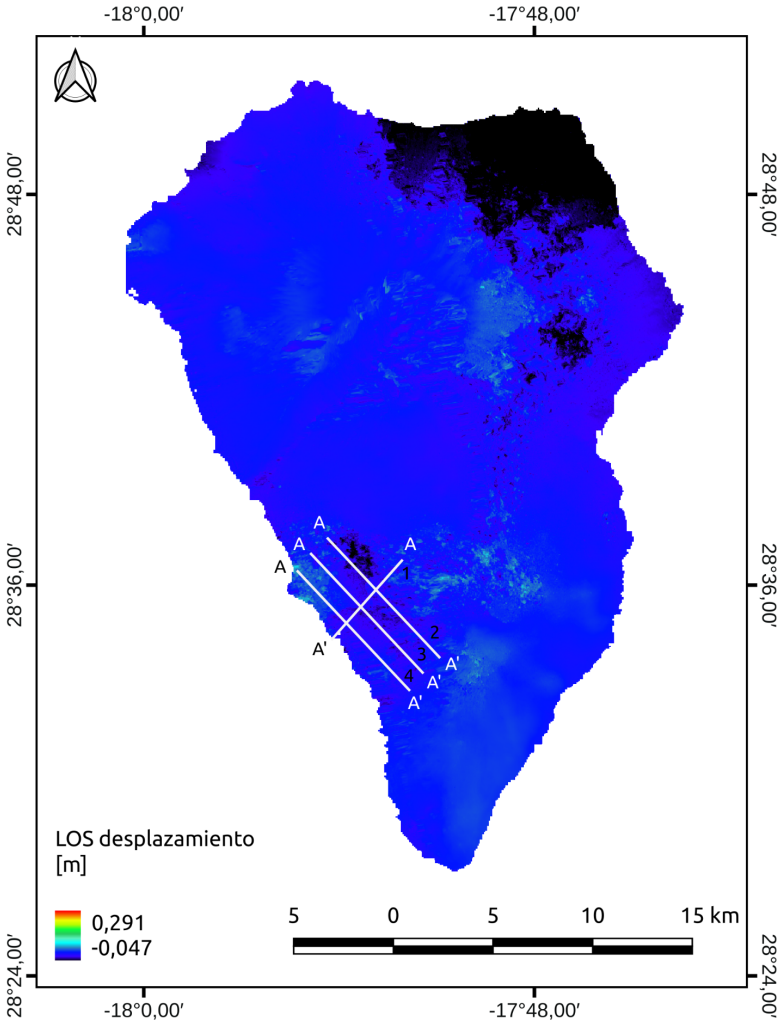


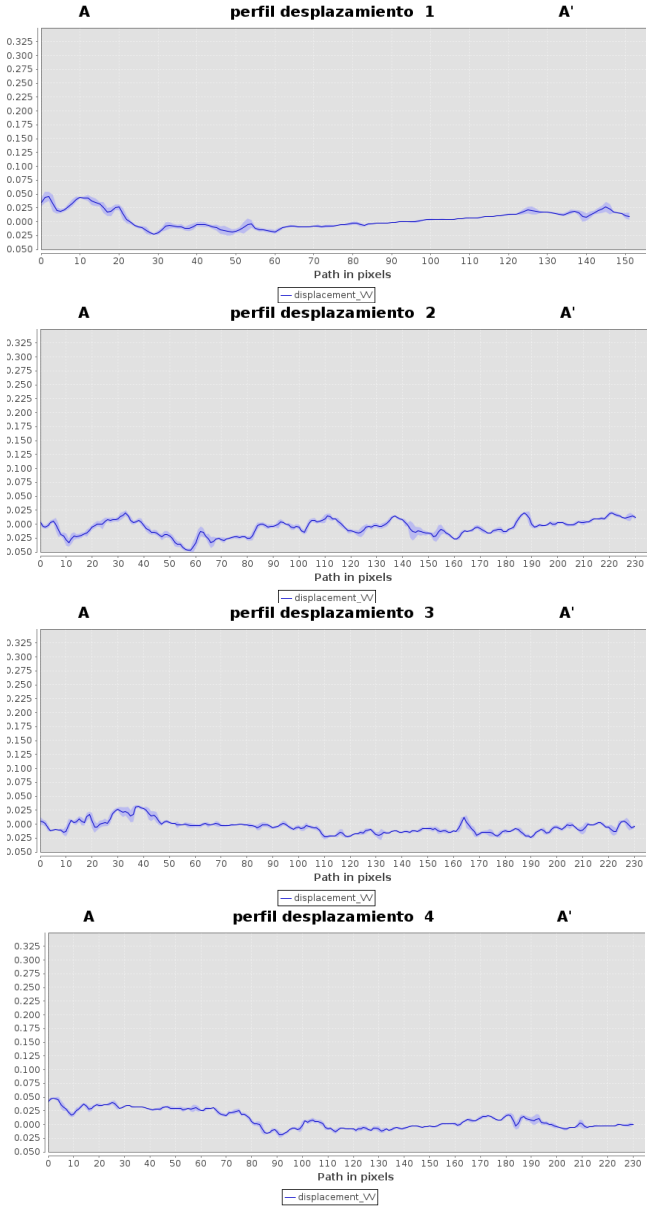
Resultado 07-11-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



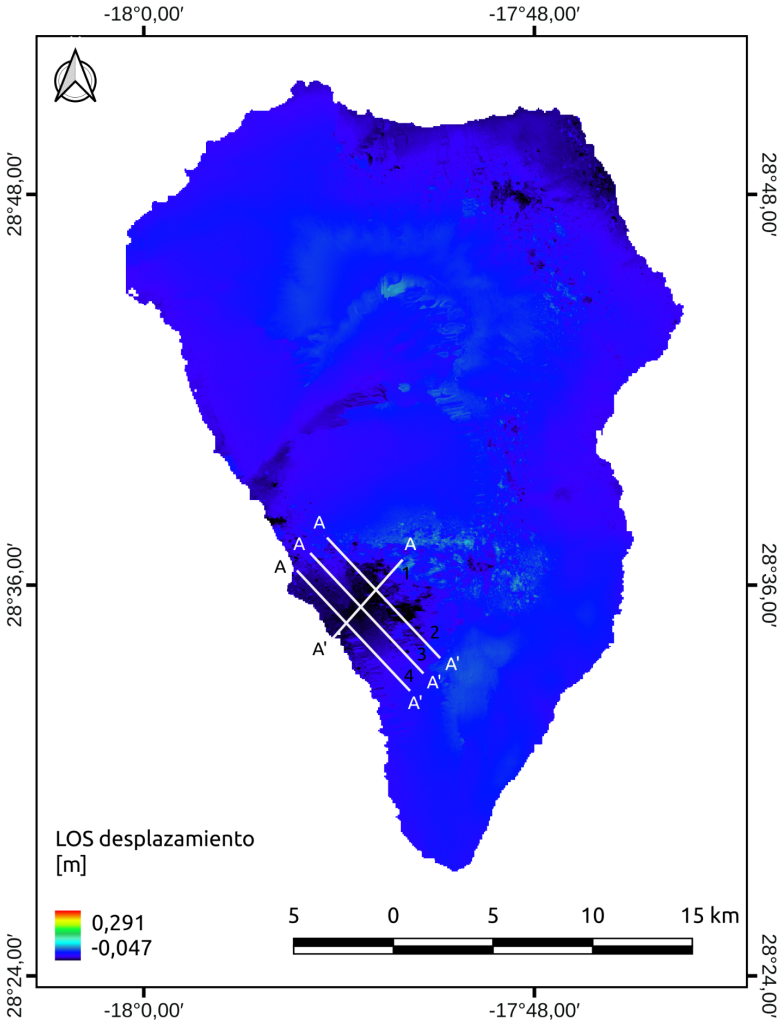


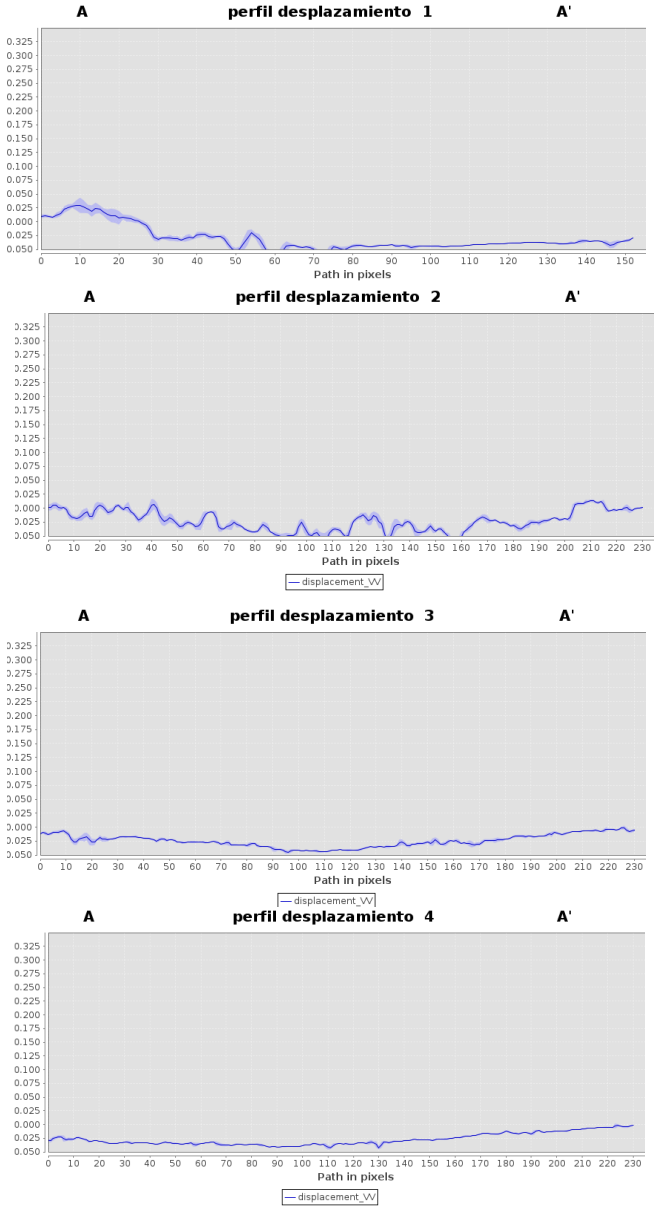
Resultado 13-11-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



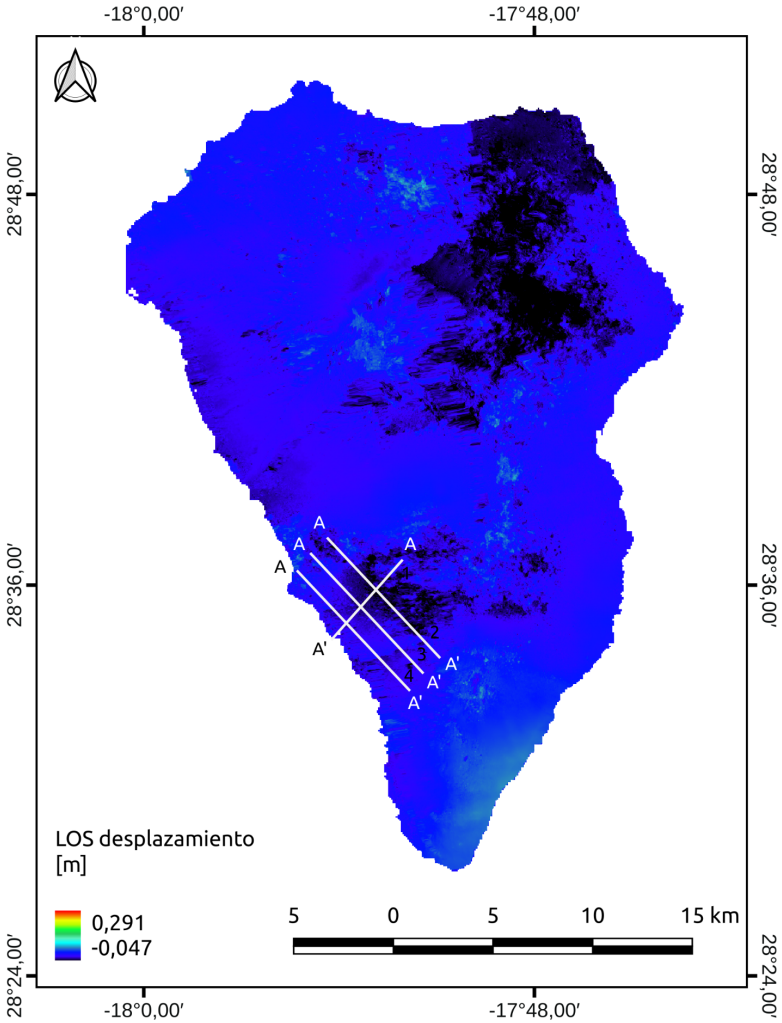


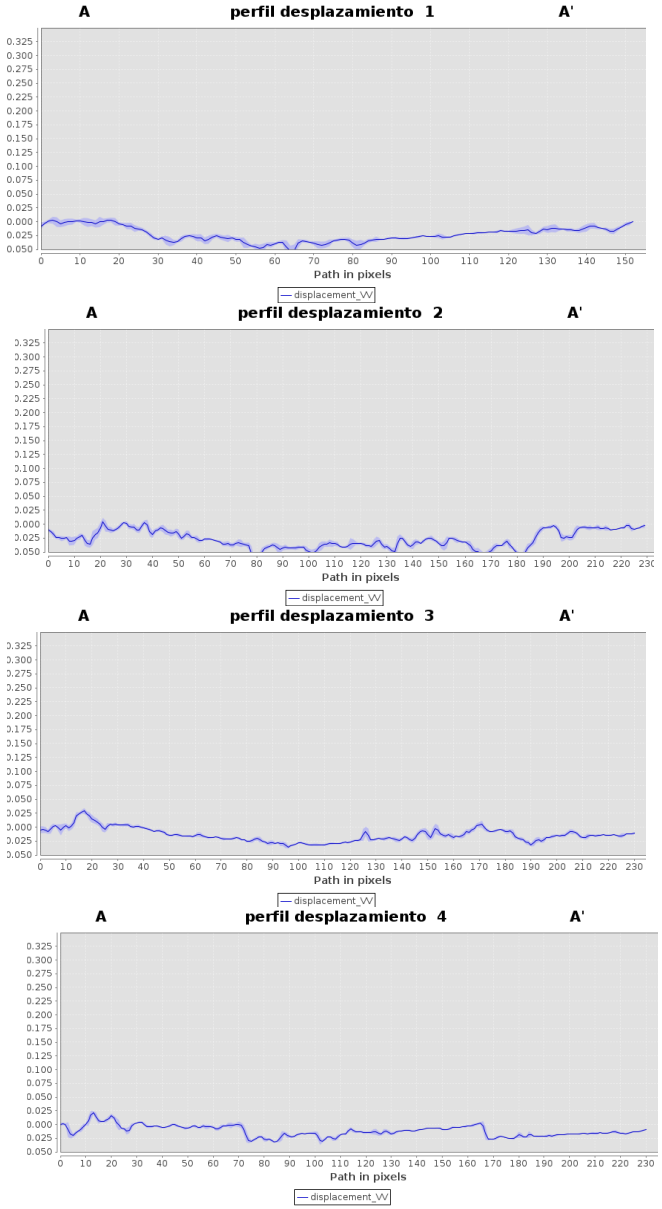
Resultado 19-11-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



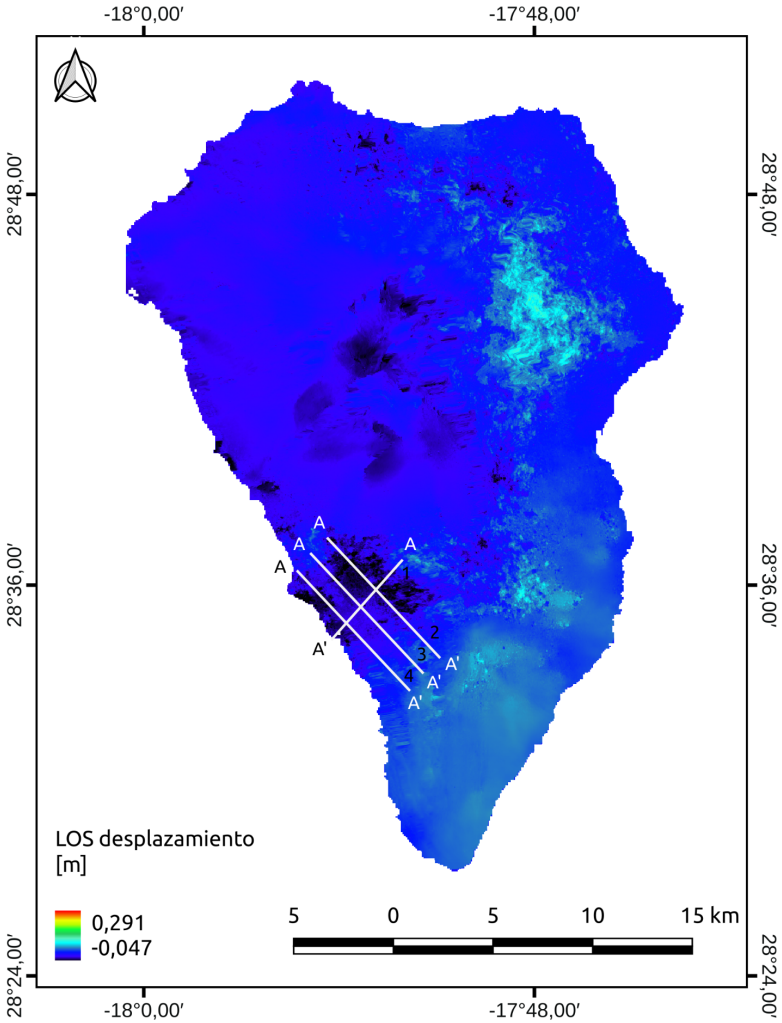


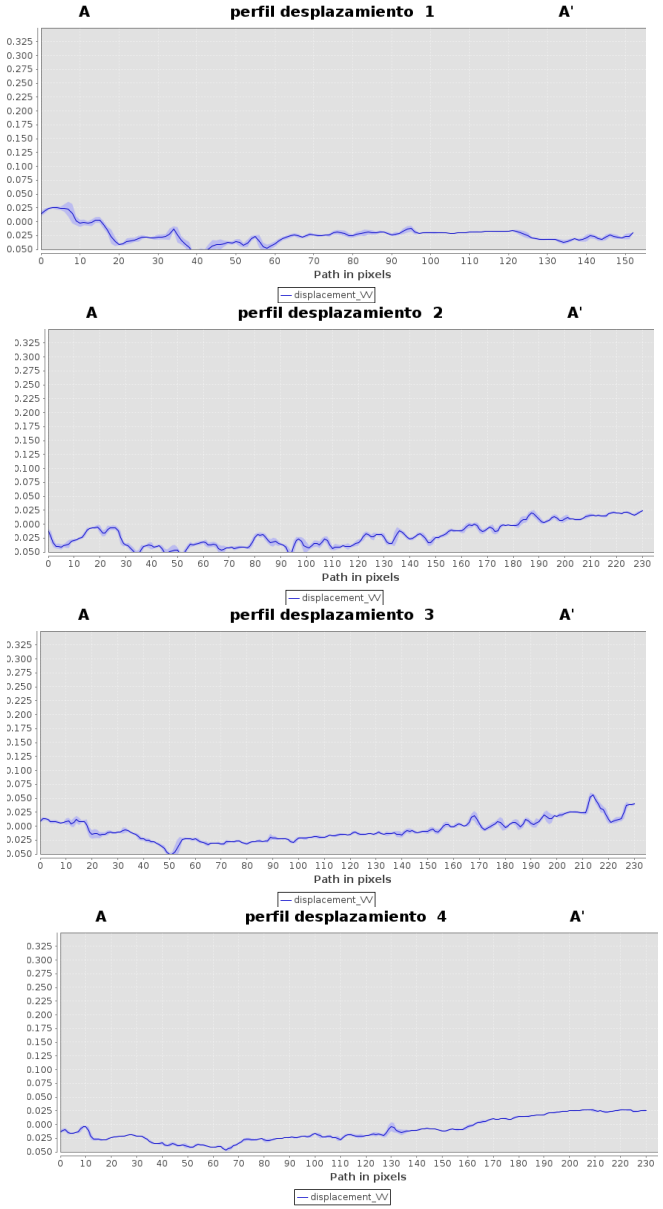
Resultado 25-11-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



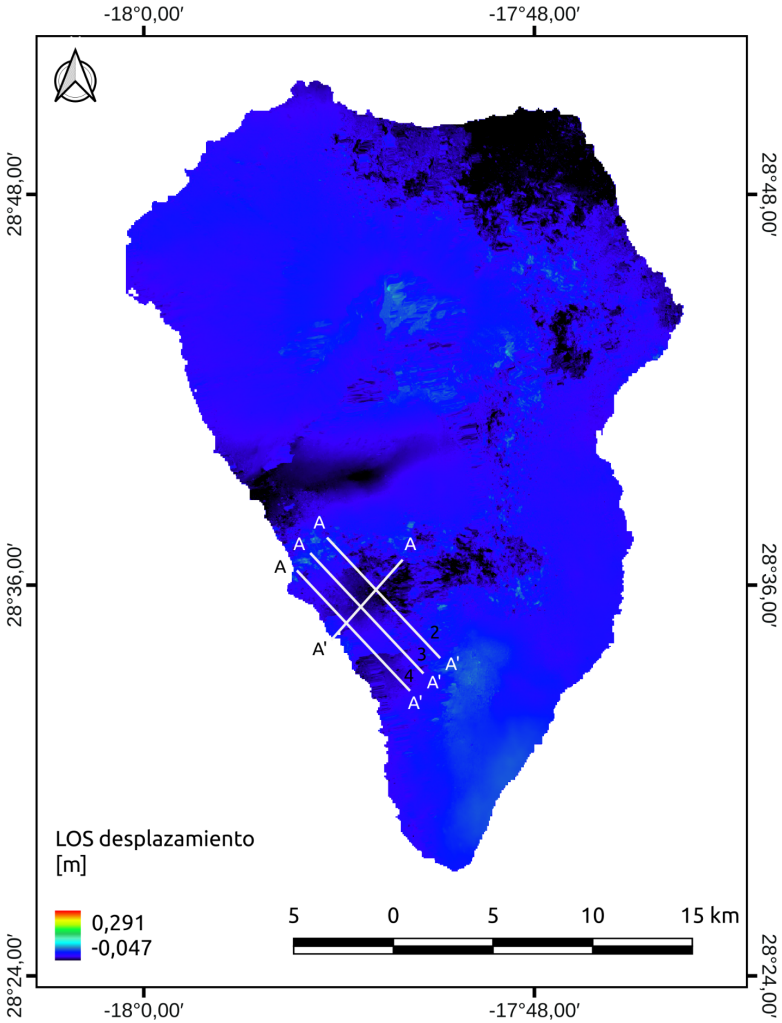


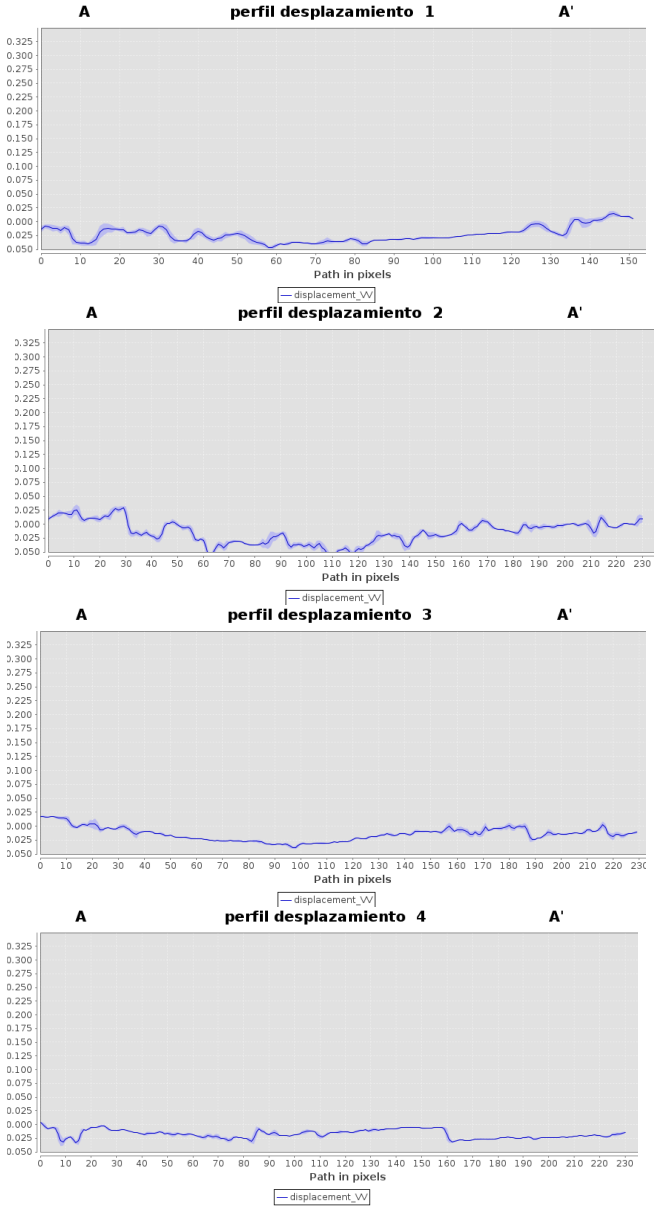
Resultado 01-12-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



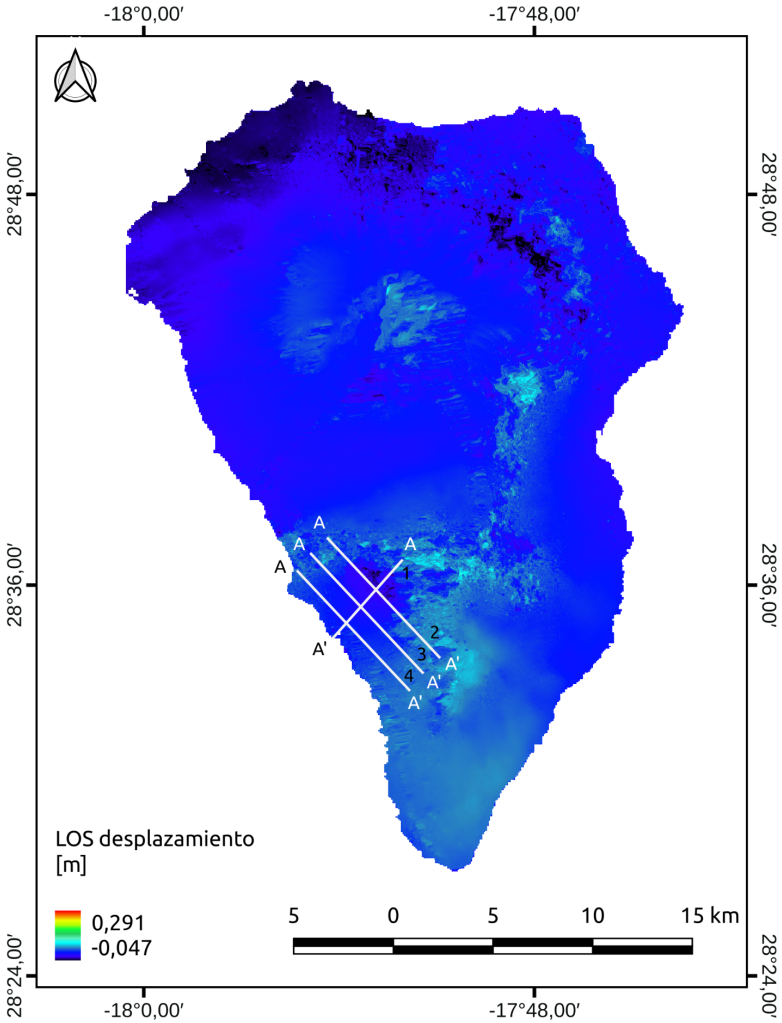


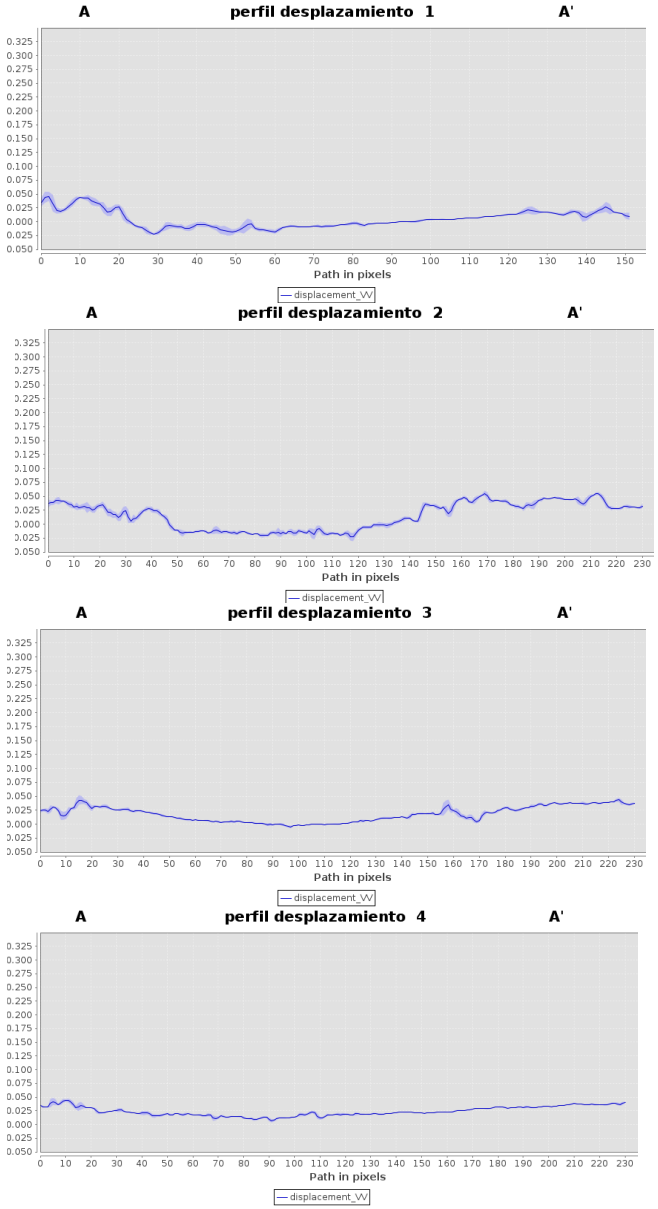
Resultado 07-12-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



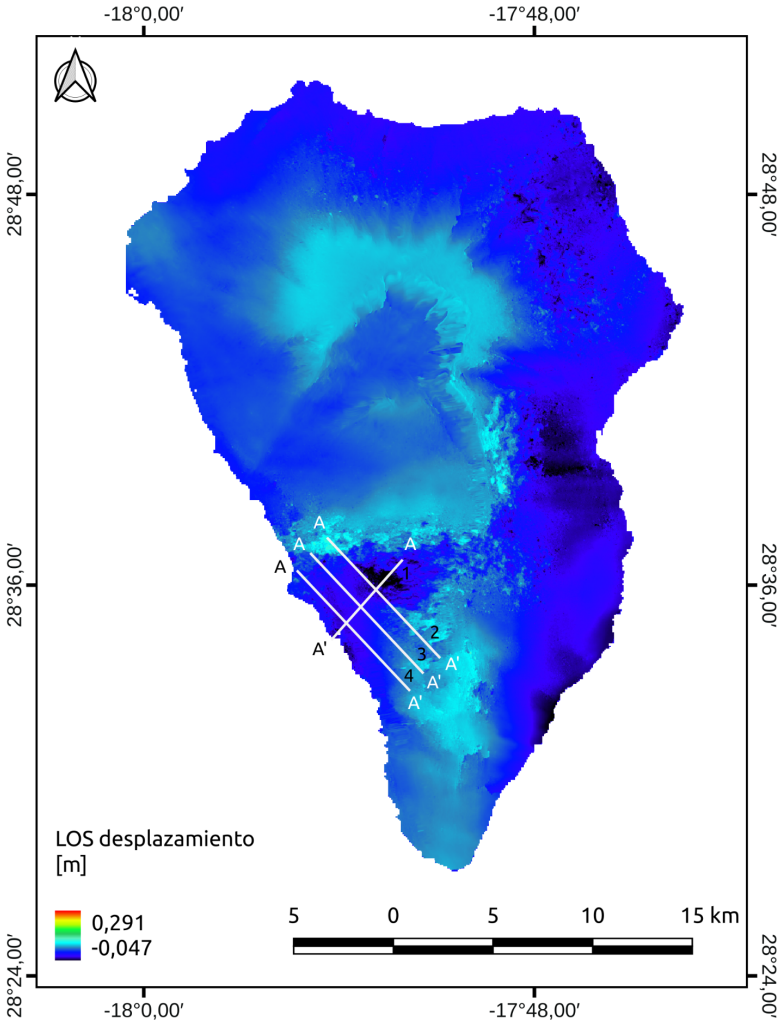


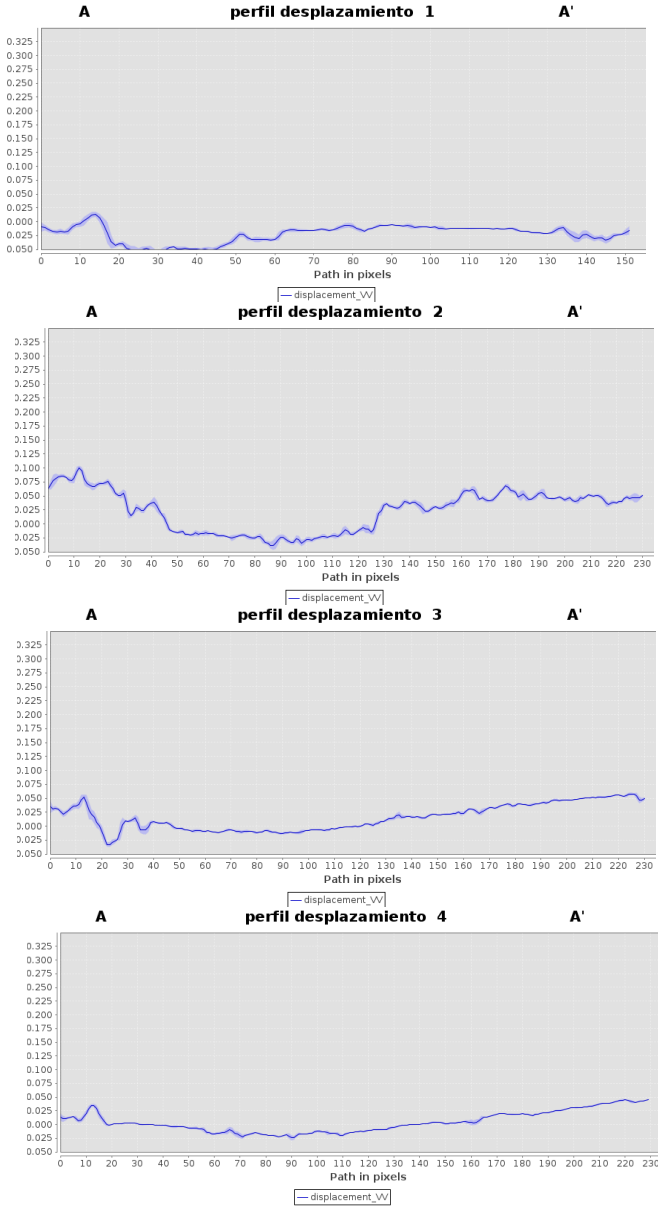
Resultado 13-12-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)



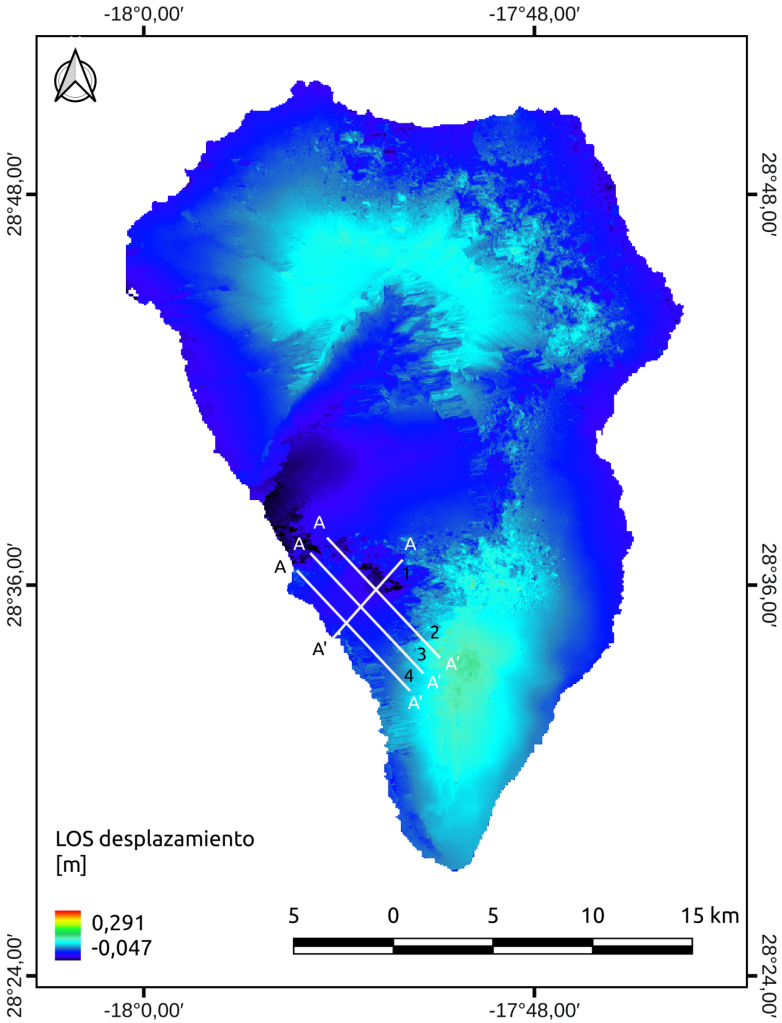


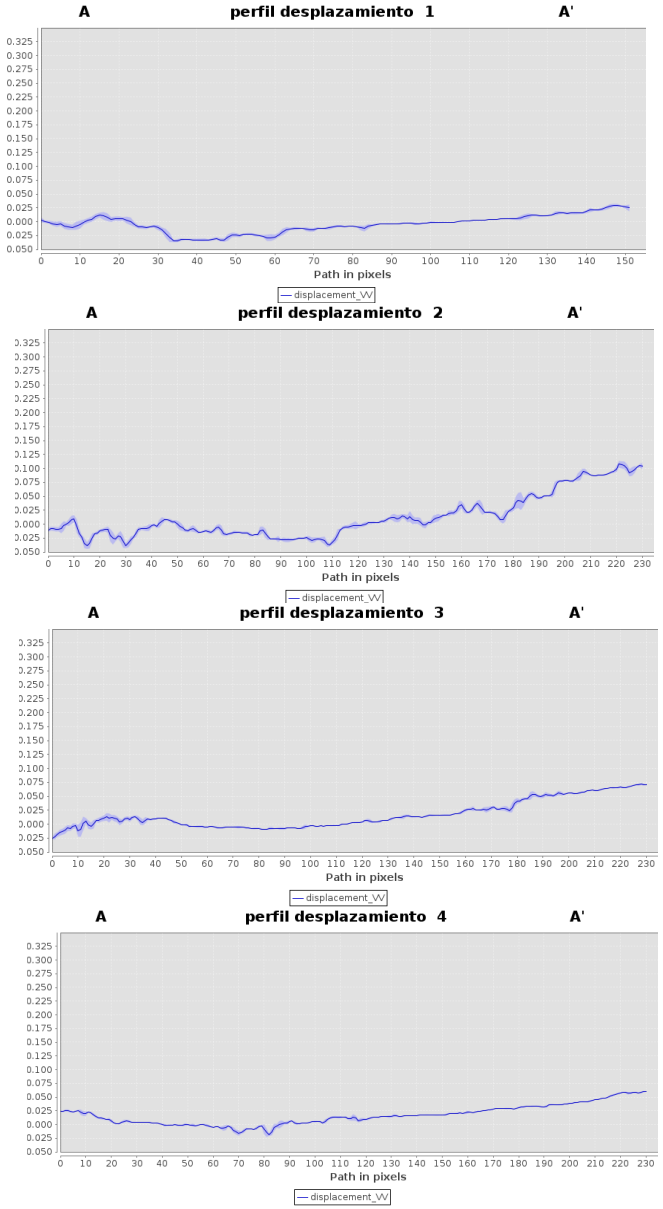
Resultado 19-12-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)





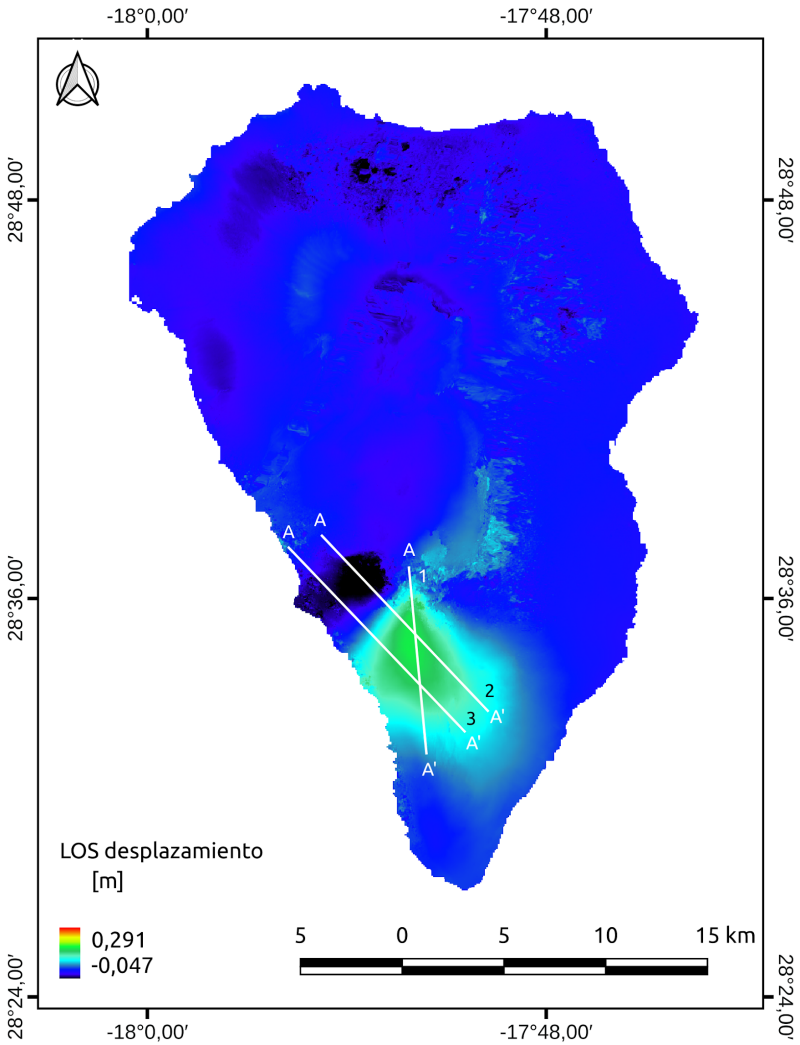
Resultado 31-12-2021 (slave) con 20-09-2021 (master)

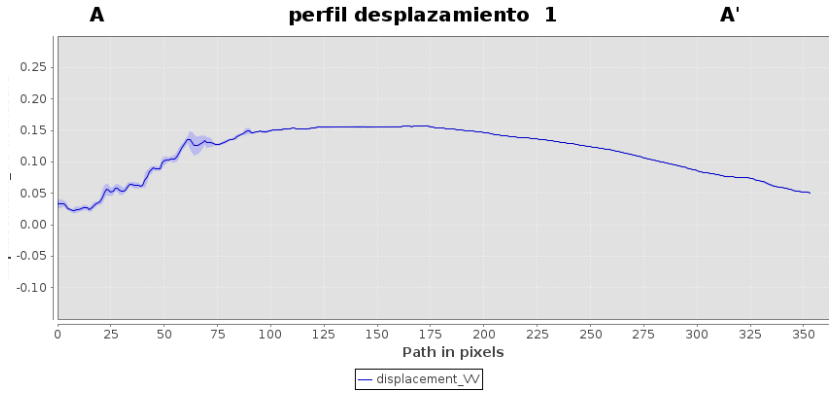


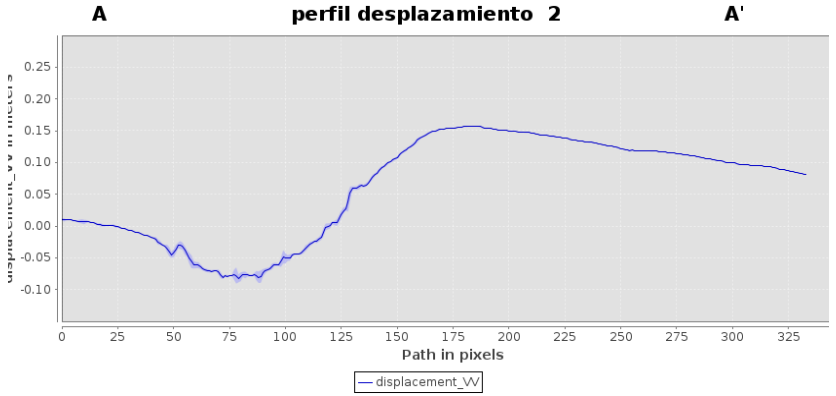


ANEXO 2. Producto descendente.

Resultado 12-07-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

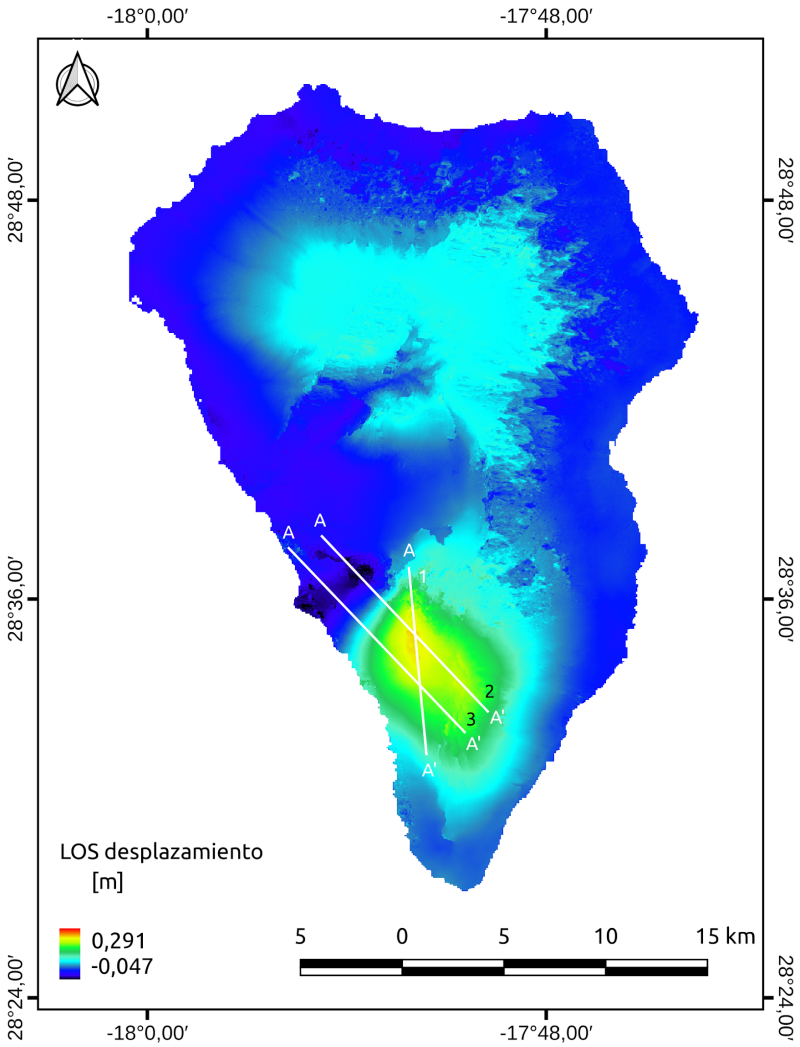


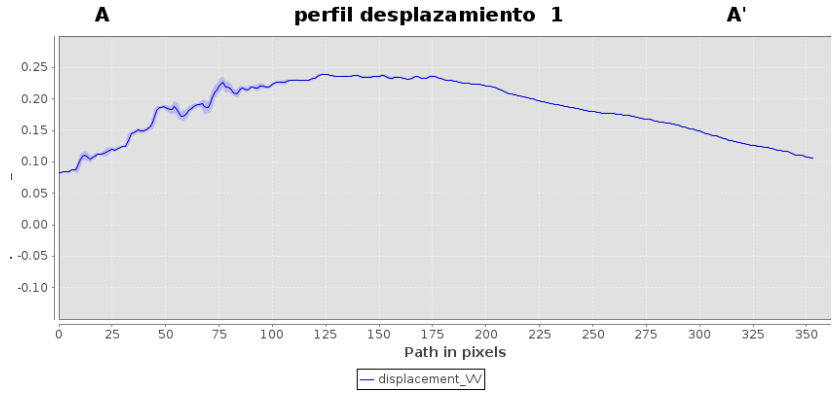


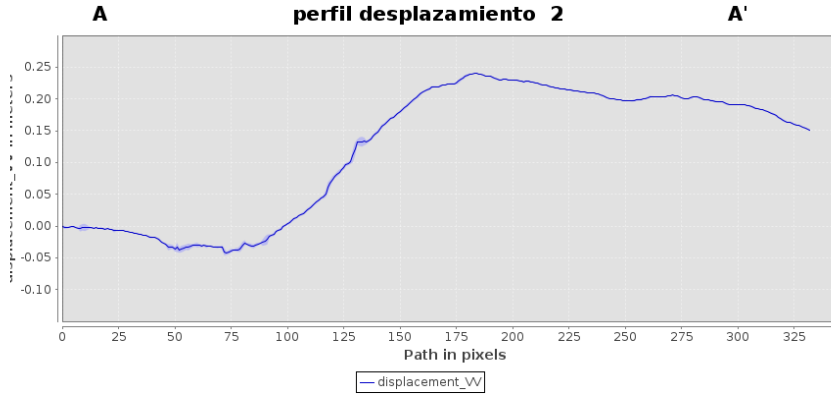


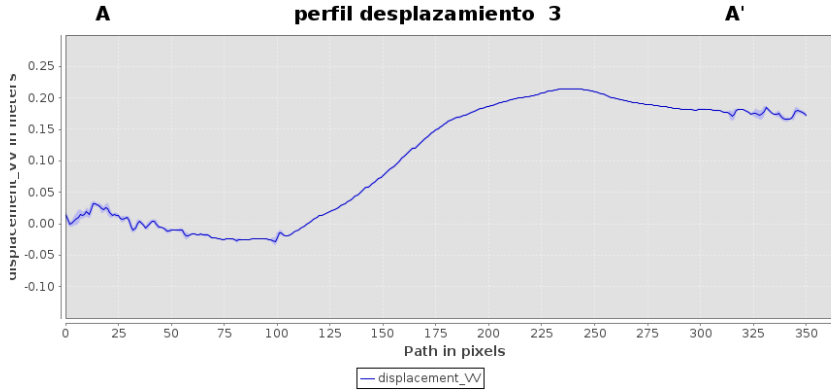


Resultado 18-07-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

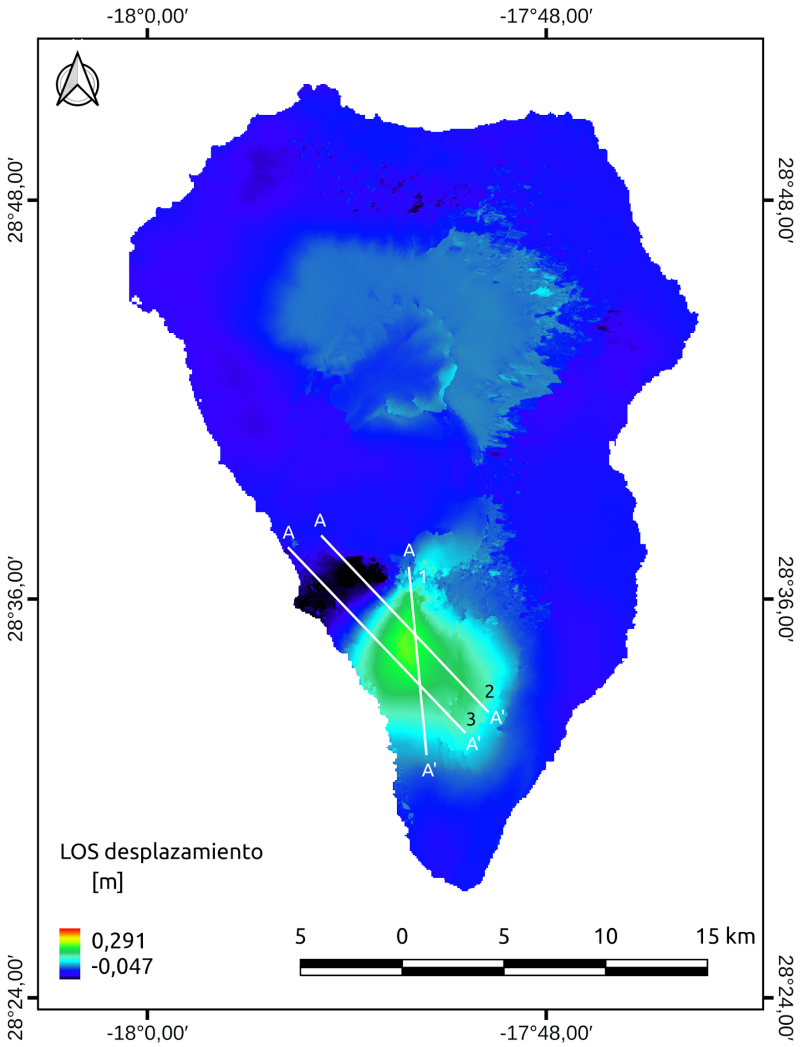


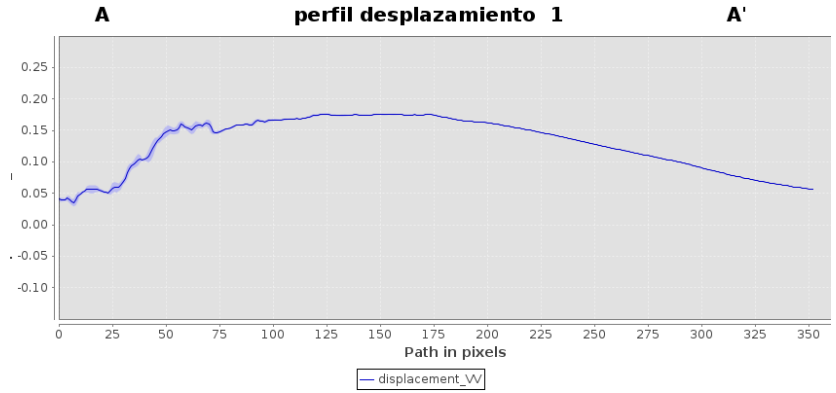


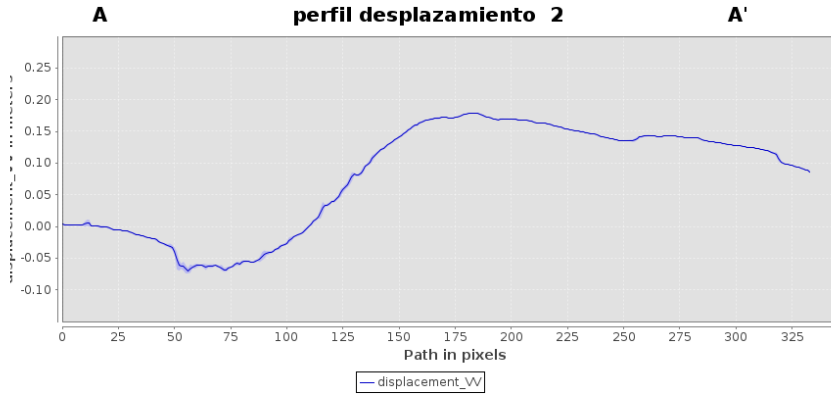


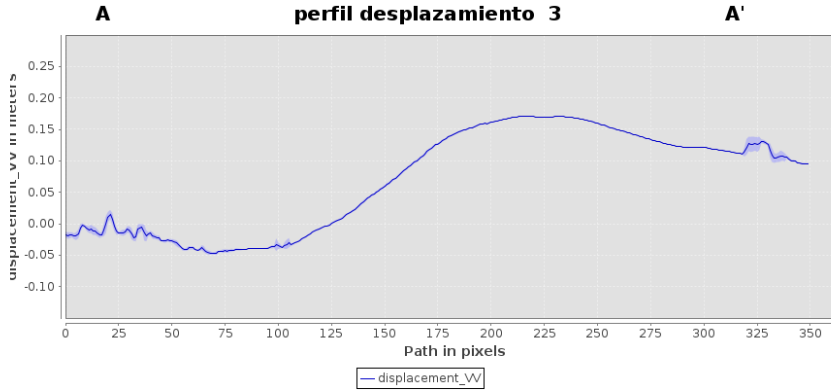


Resultado 24-07-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

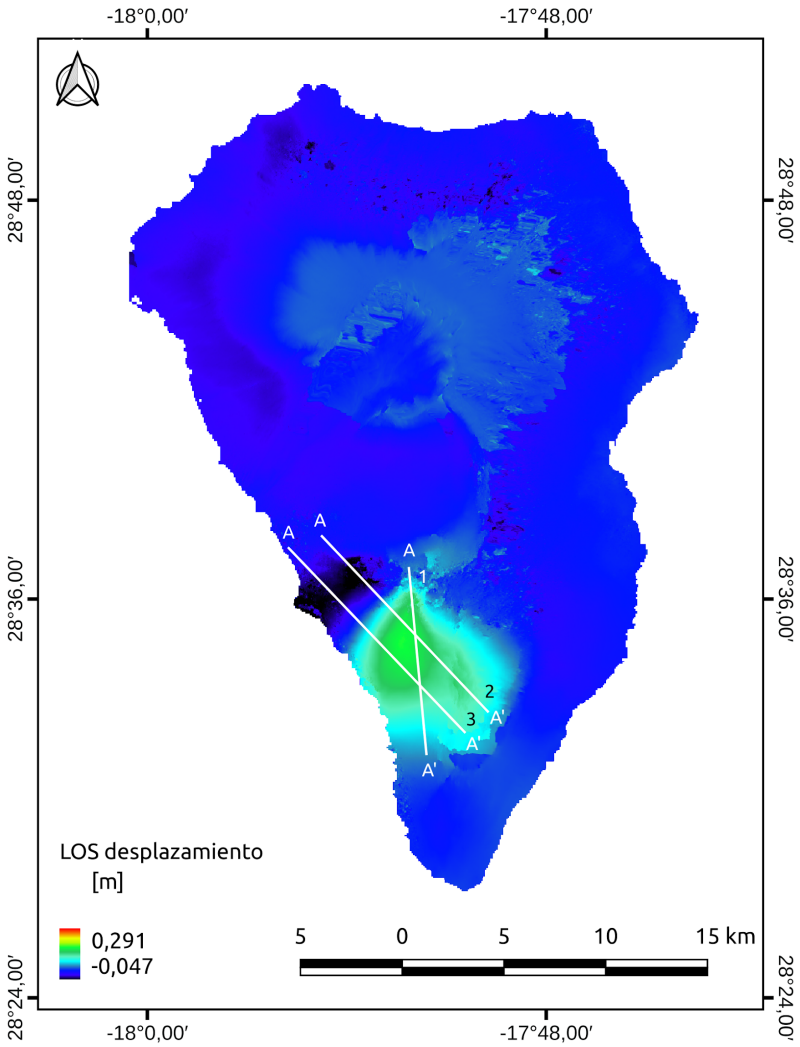


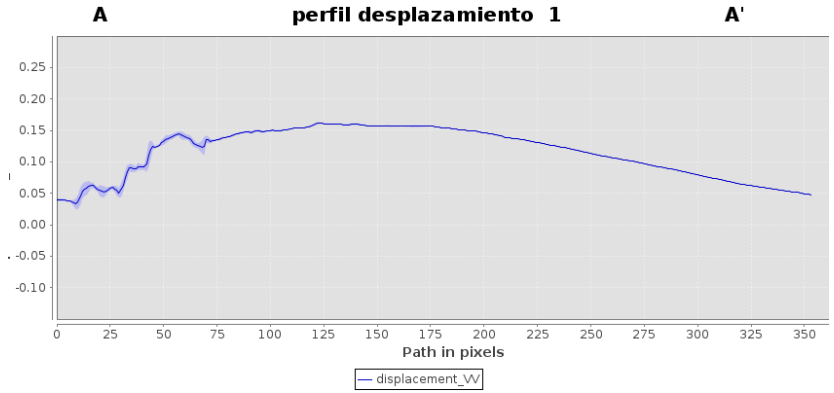


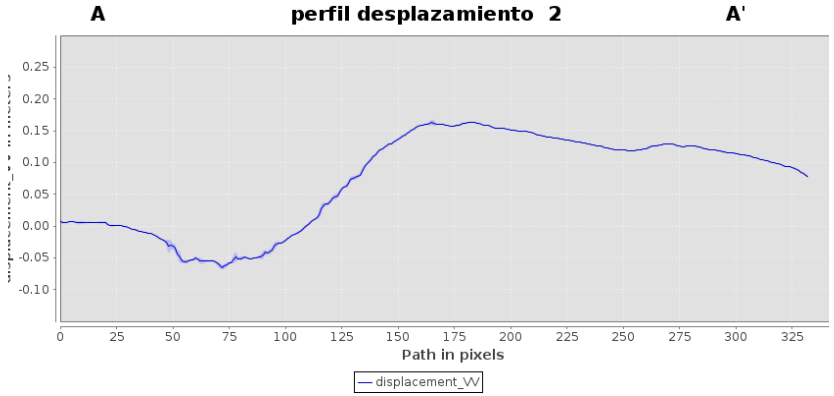




Resultado 30-07-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

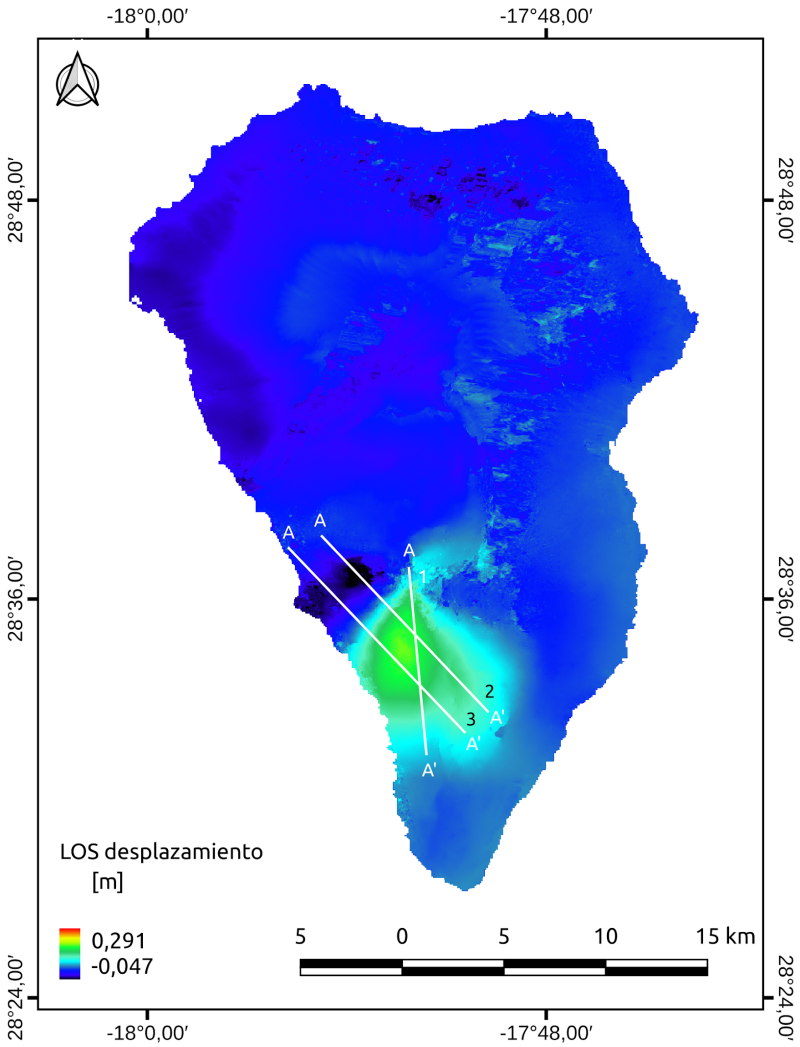


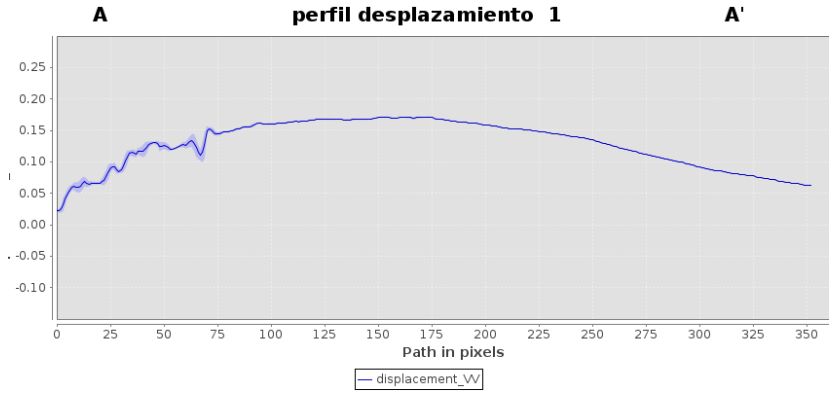


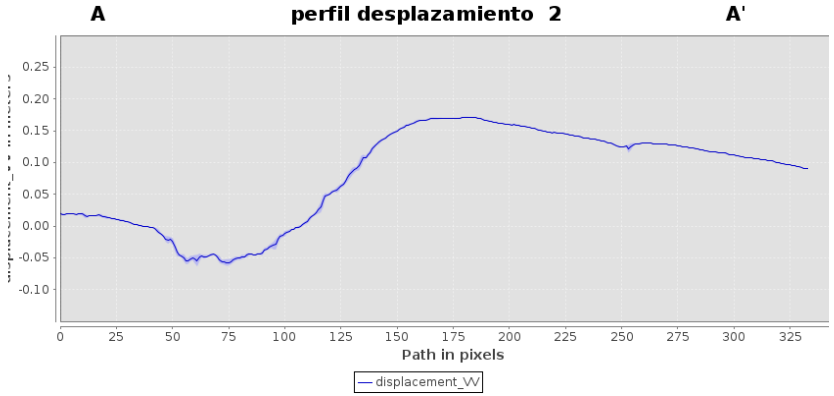




Resultado 05-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

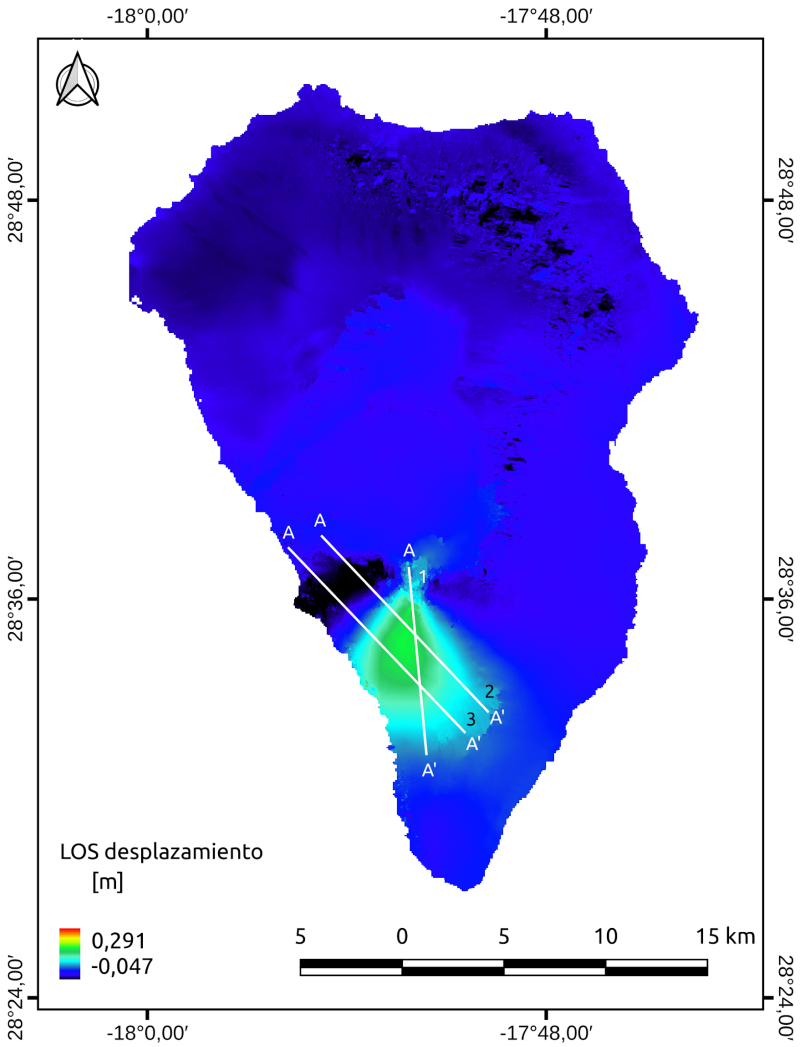


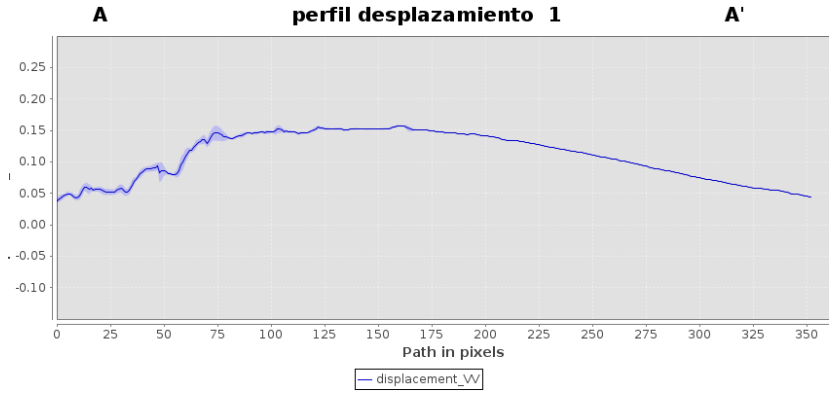


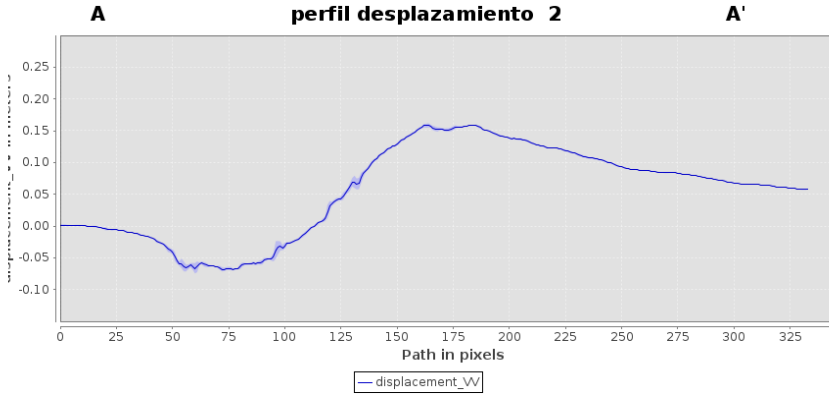


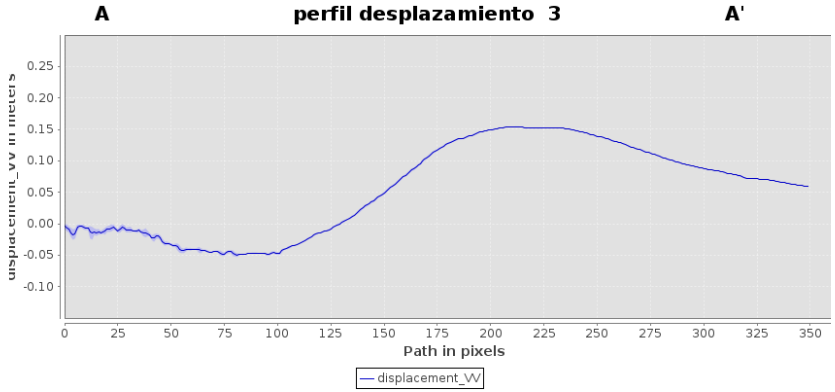


Resultado 11-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

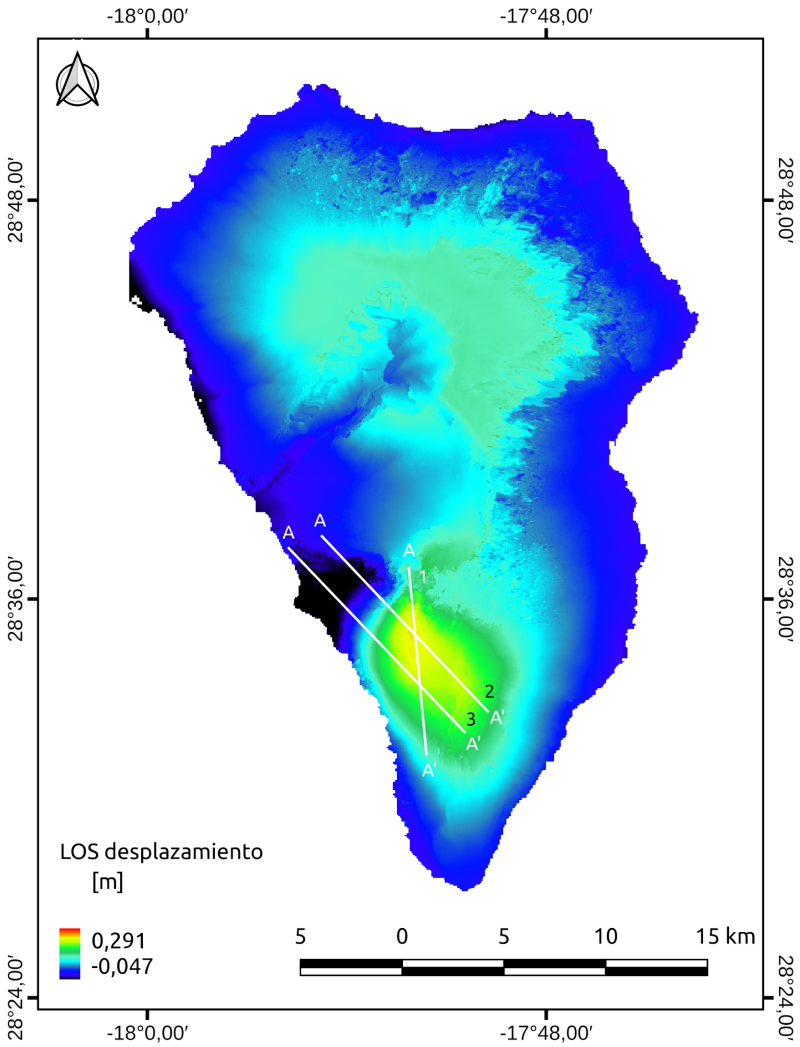


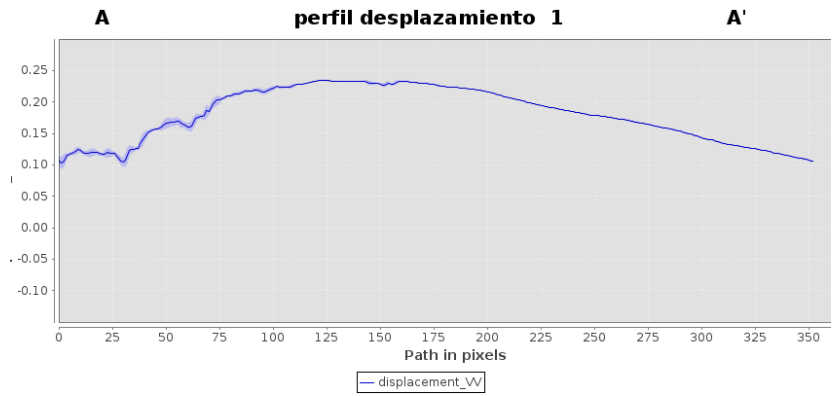


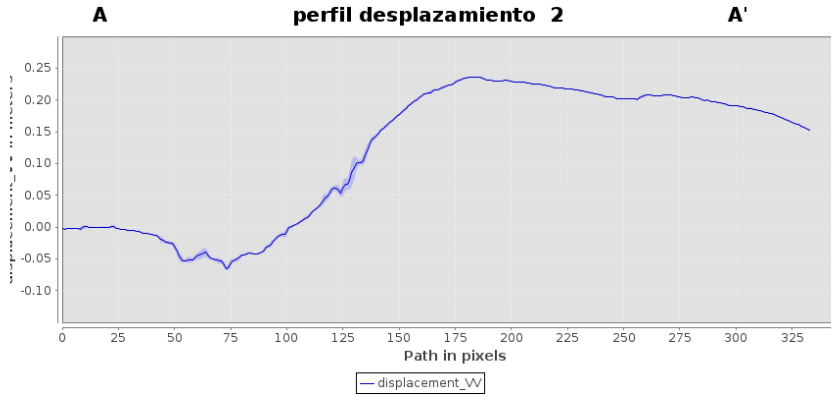


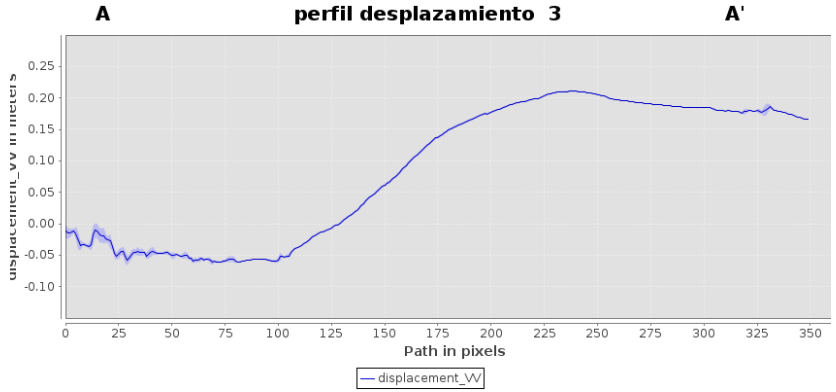


Resultado 17-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

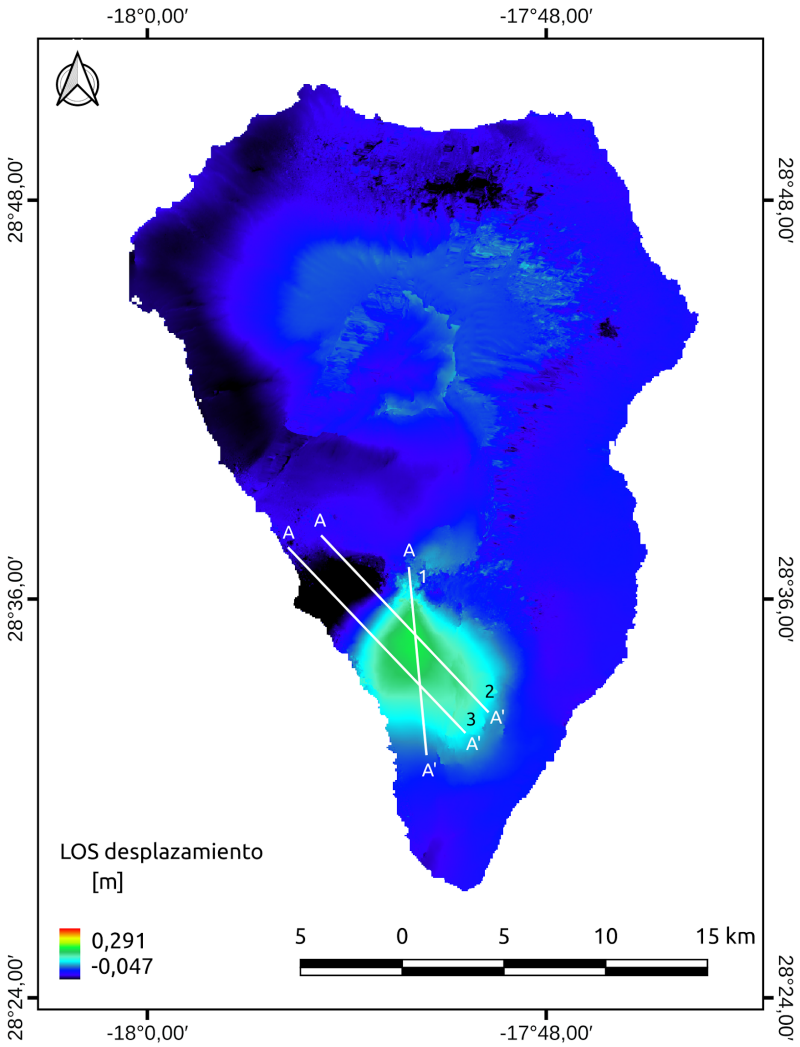


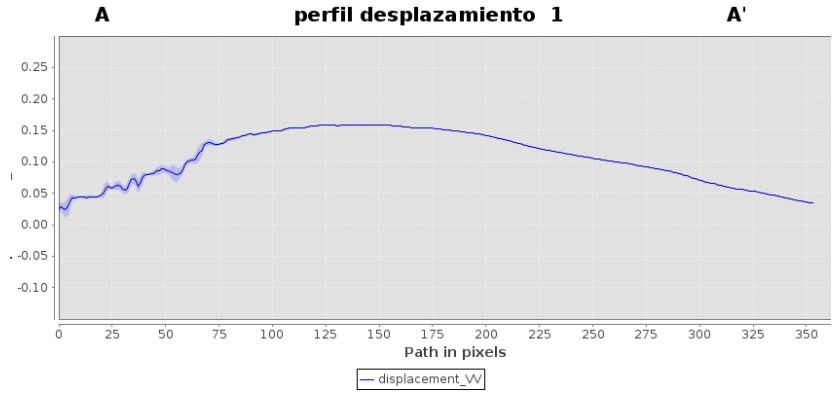


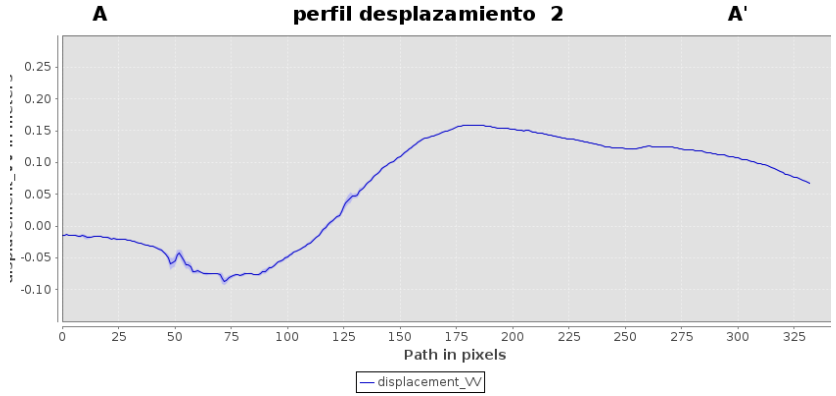


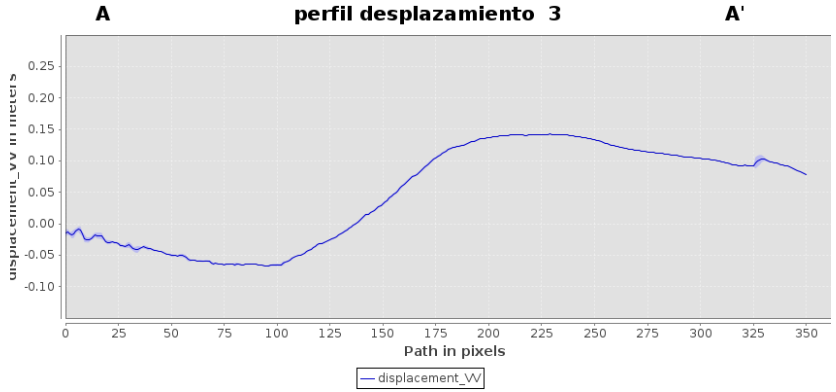


Resultado 23-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

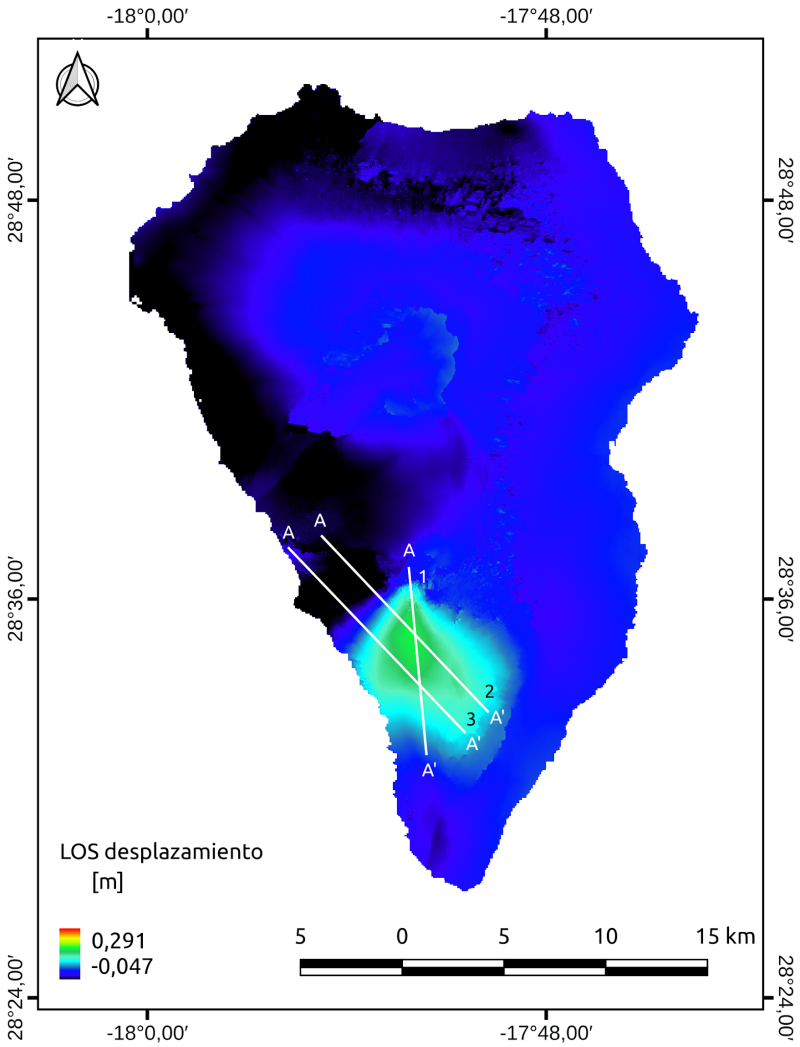


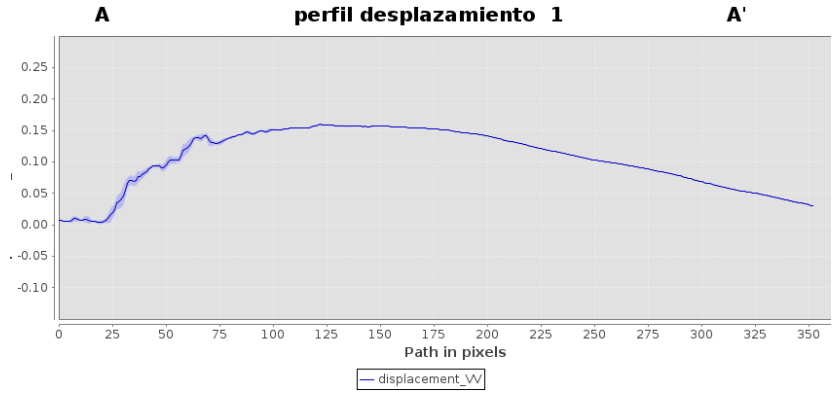


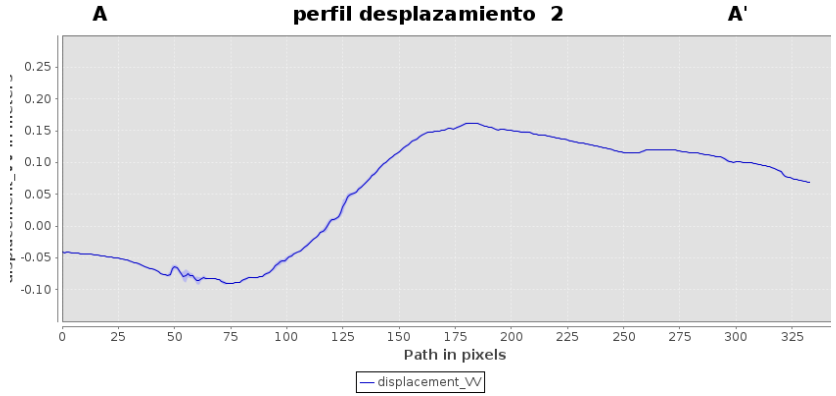


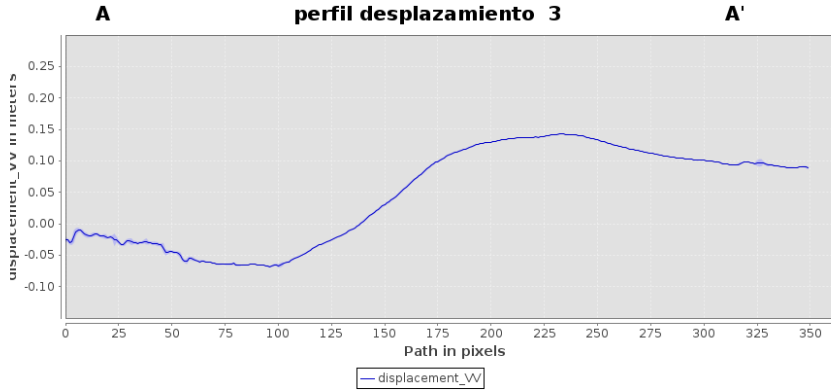


Resultado 29-08-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

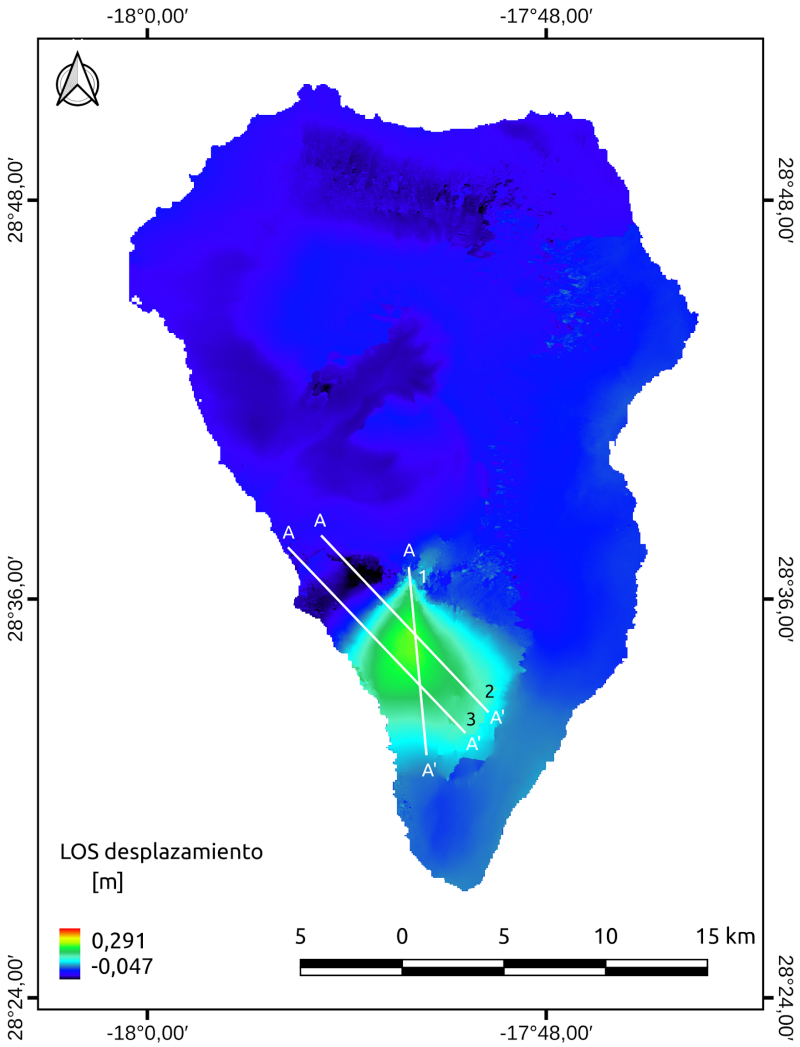


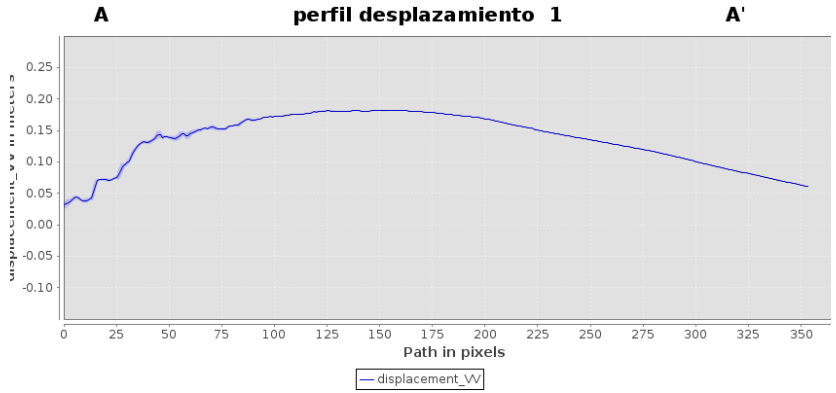


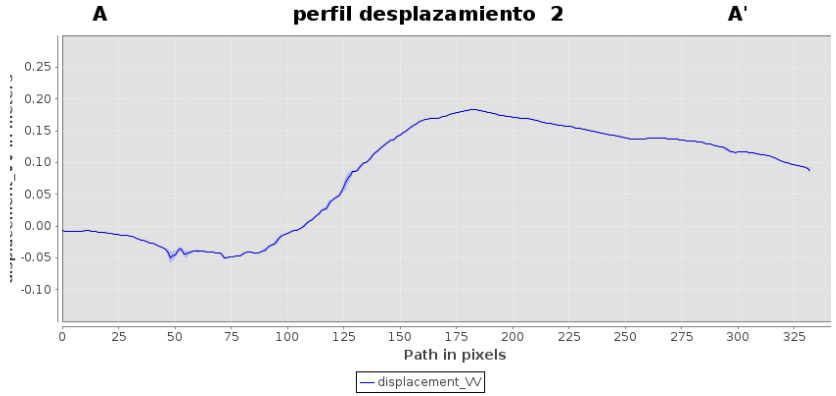


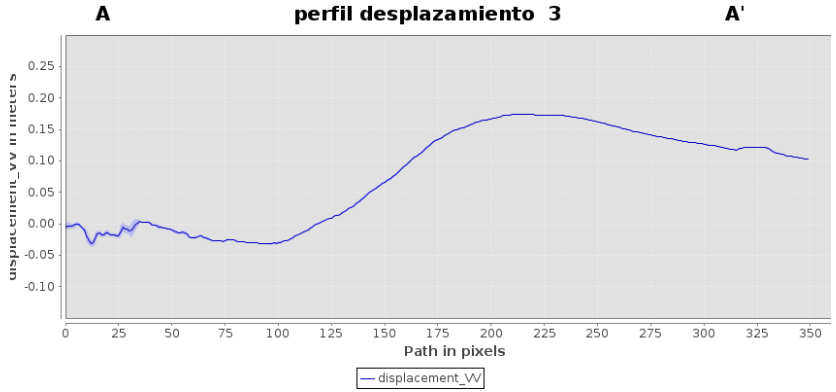


Resultado 04-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

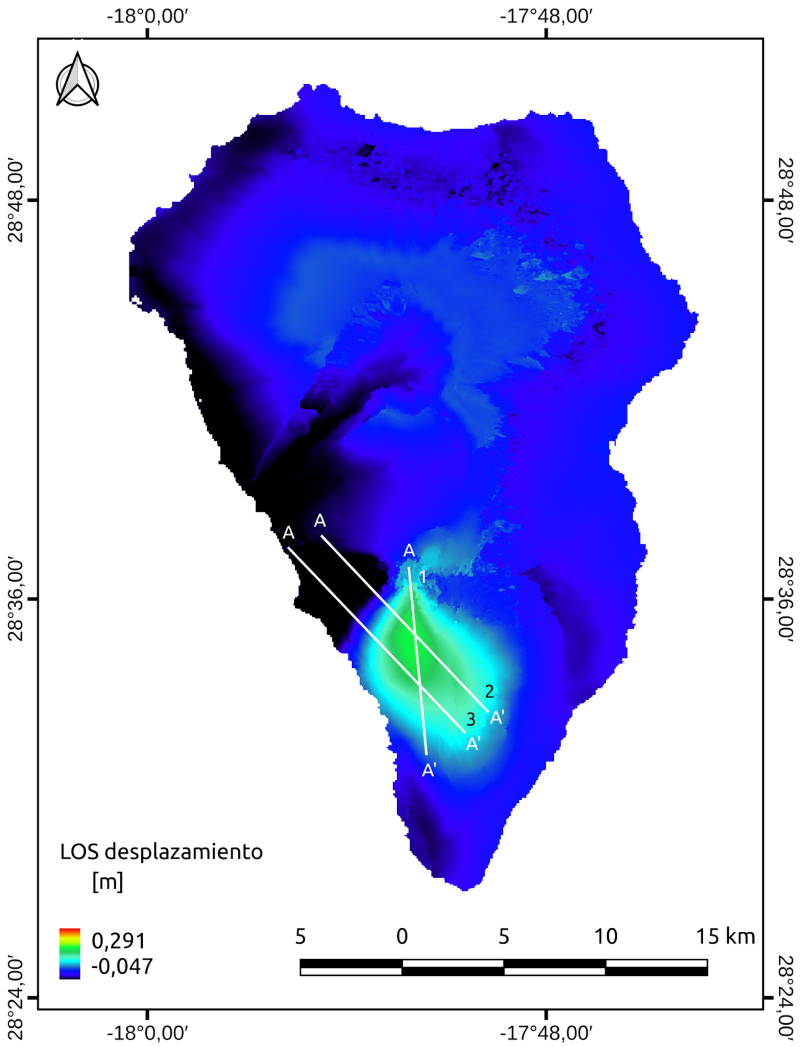


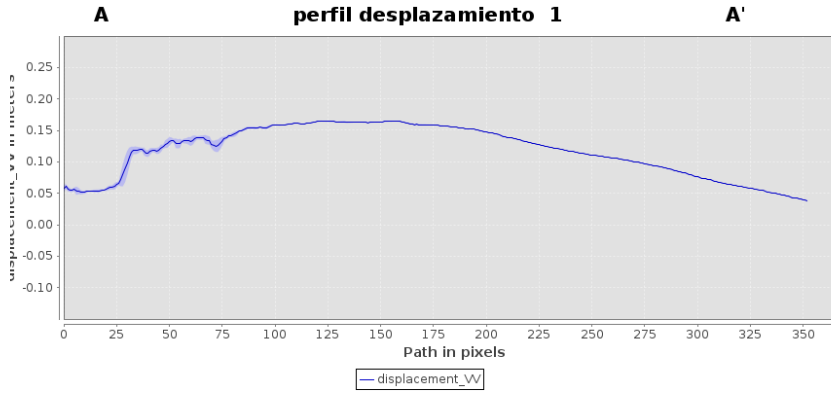


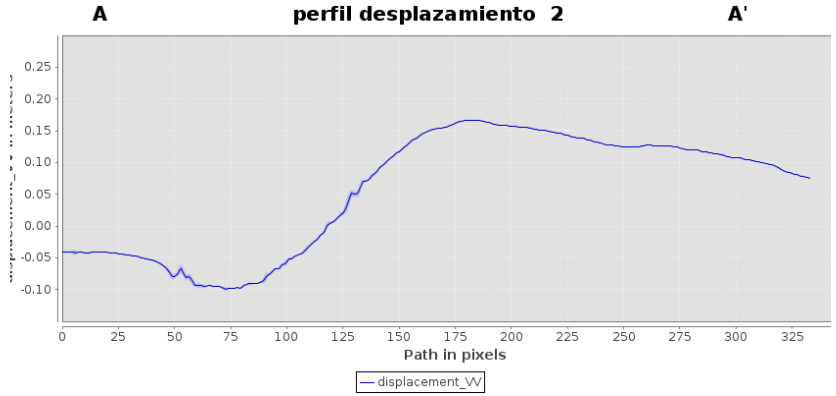


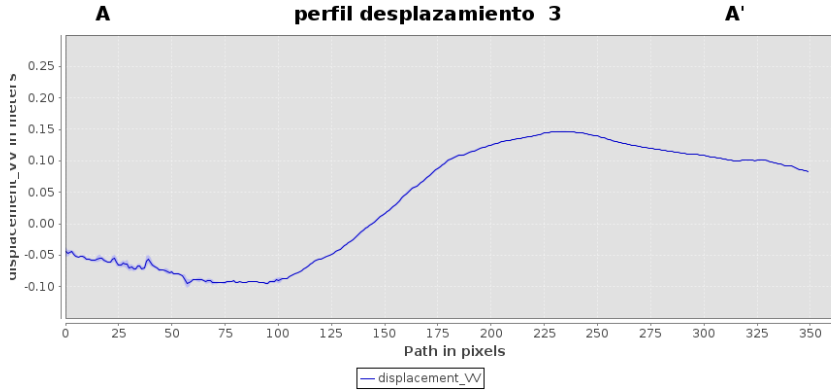


Resultado 10-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

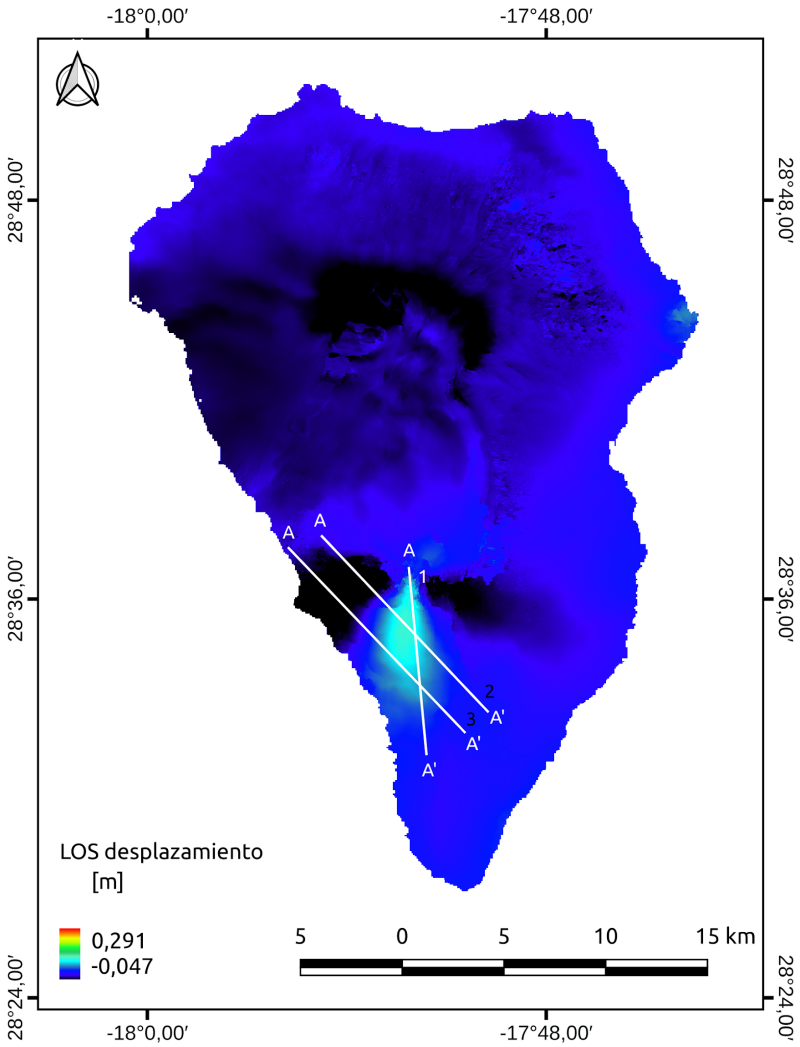


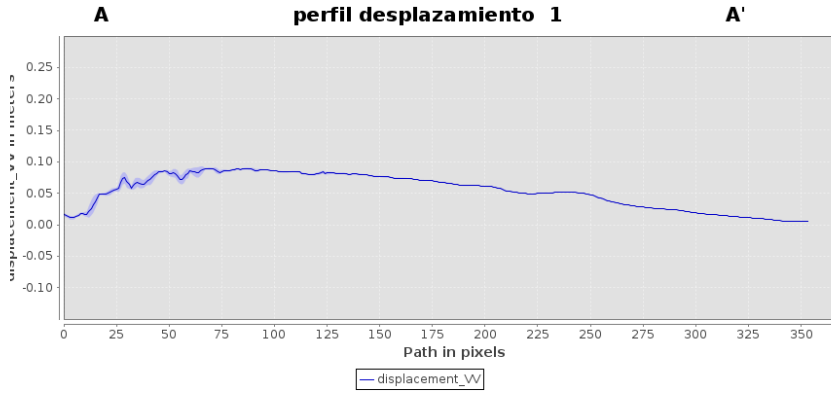


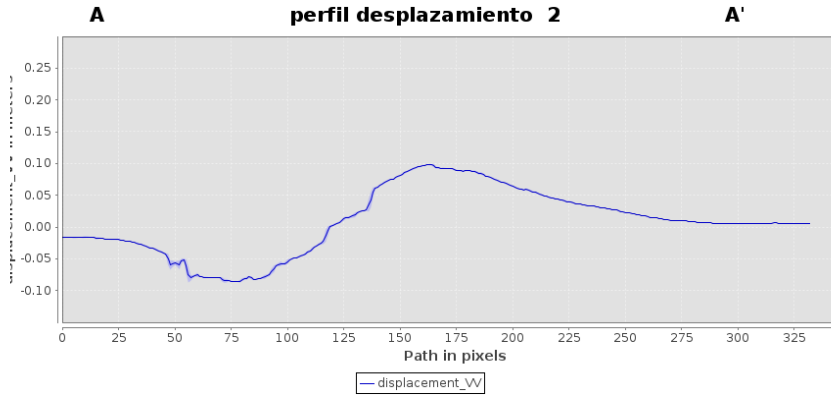


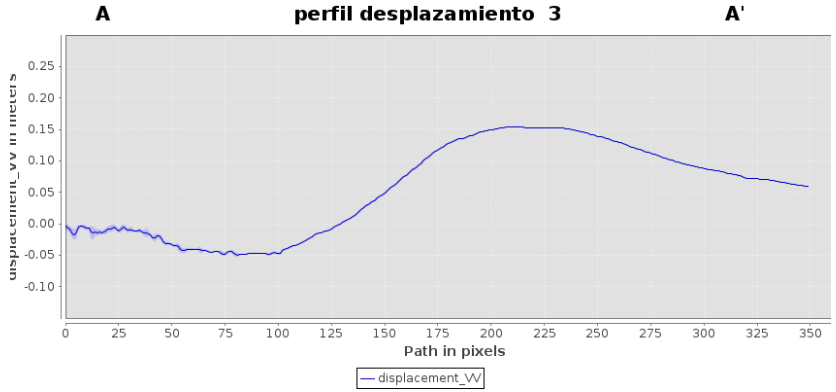


Resultado 16-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

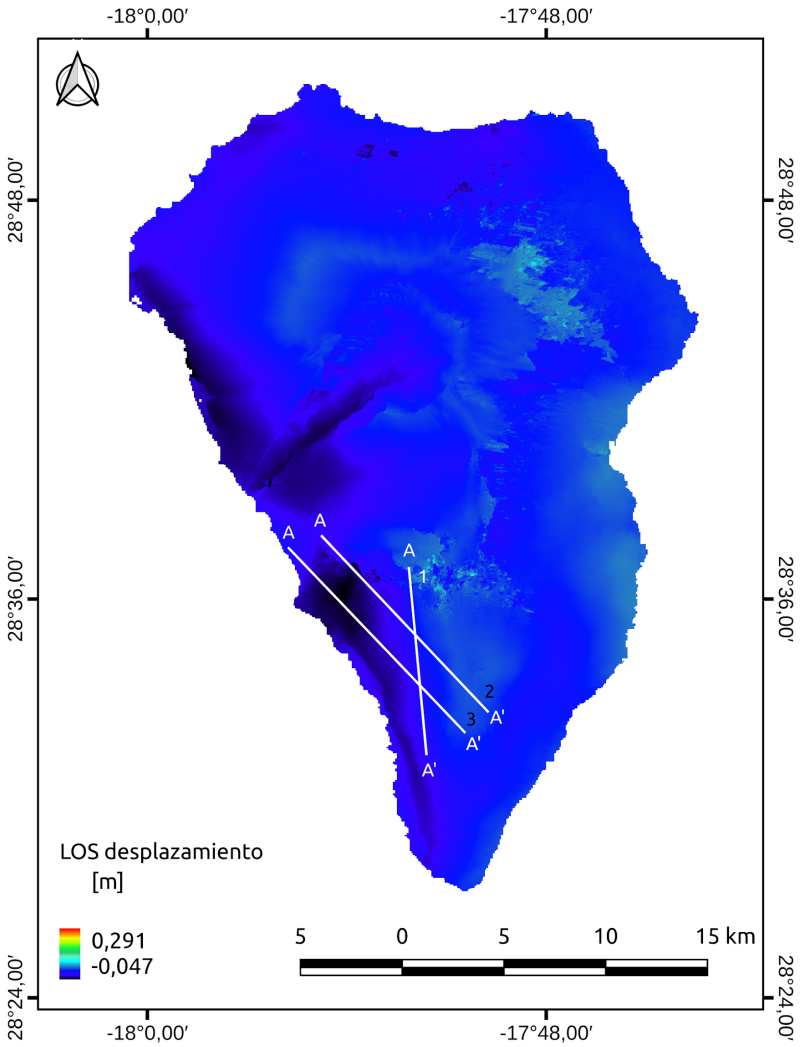


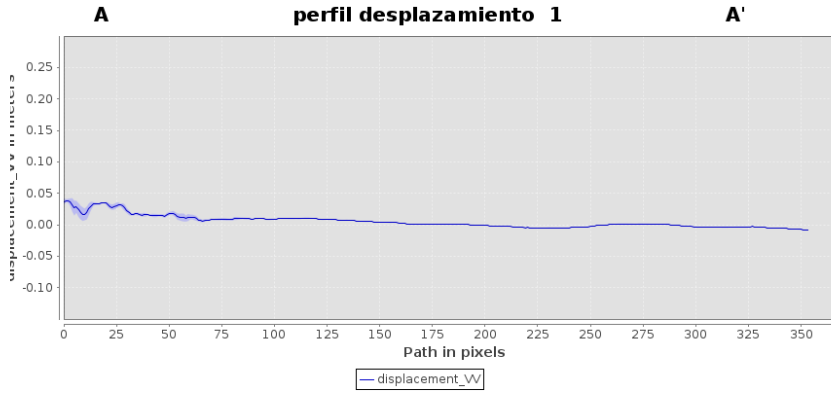


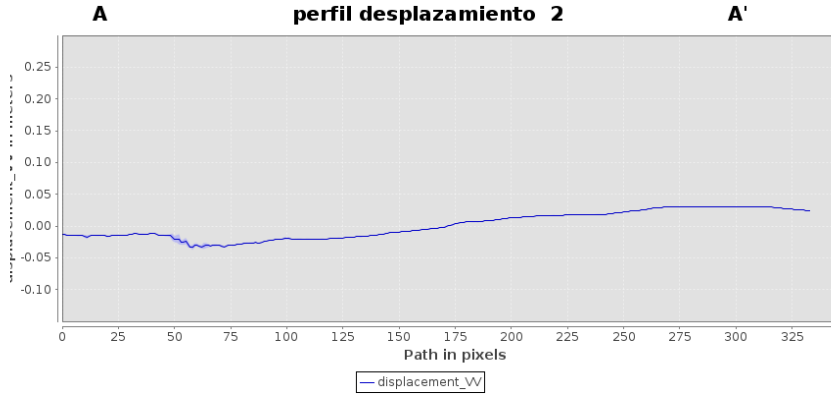


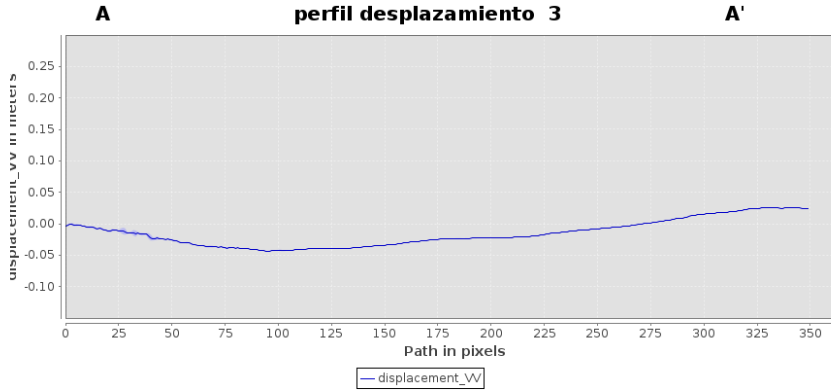


Resultado 28-09-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

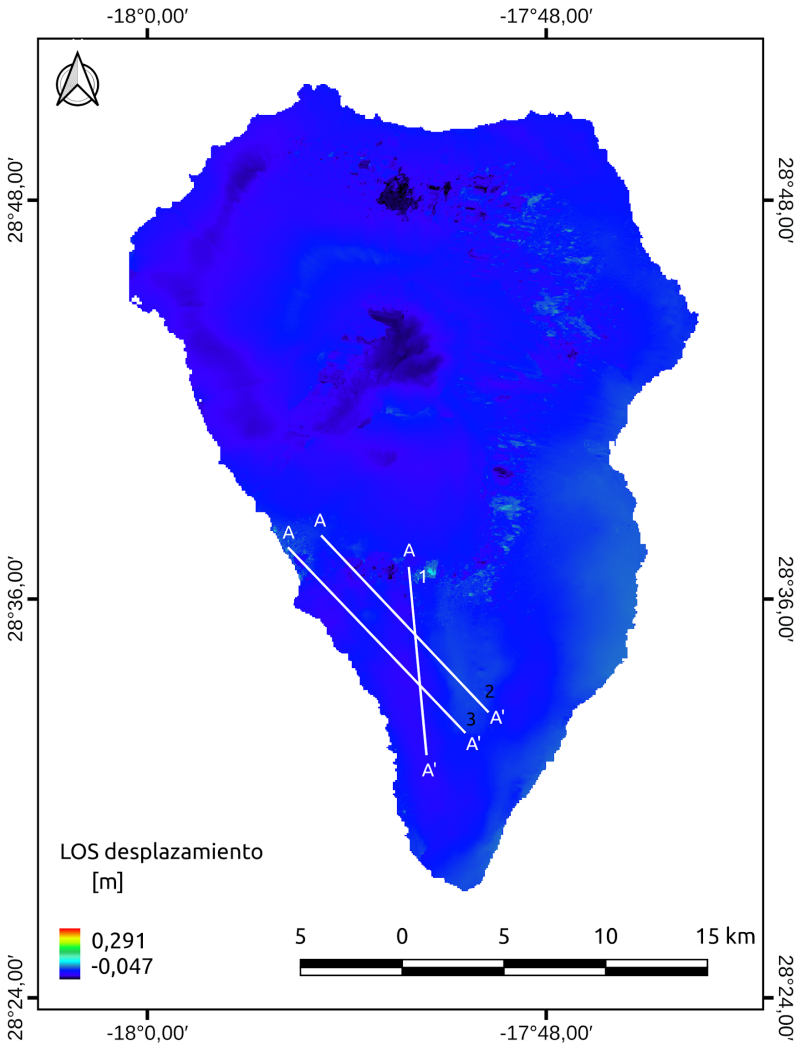


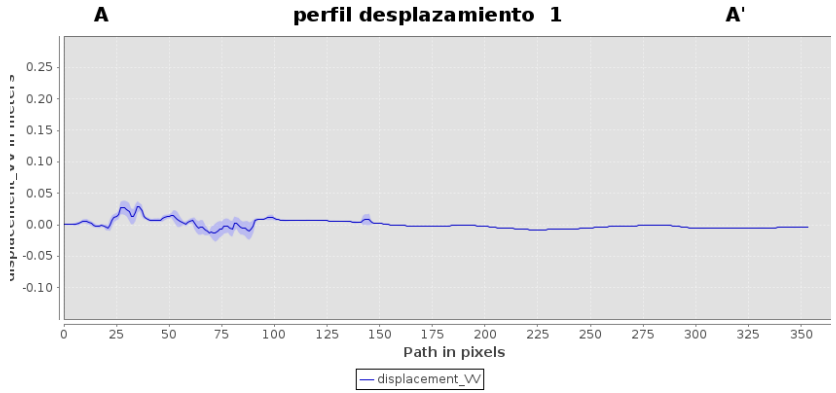




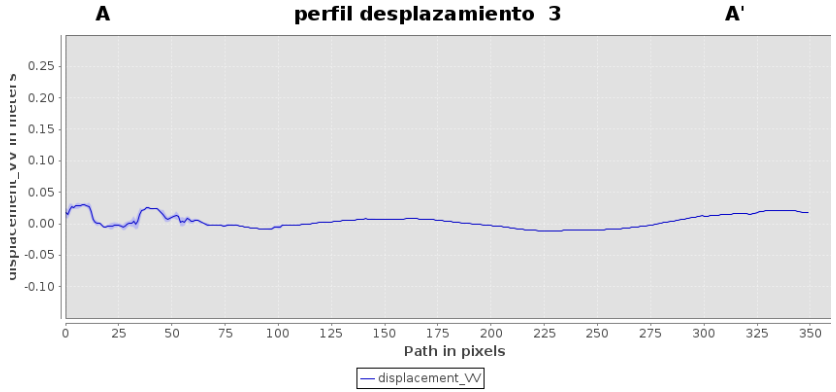


Resultado 04-10-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

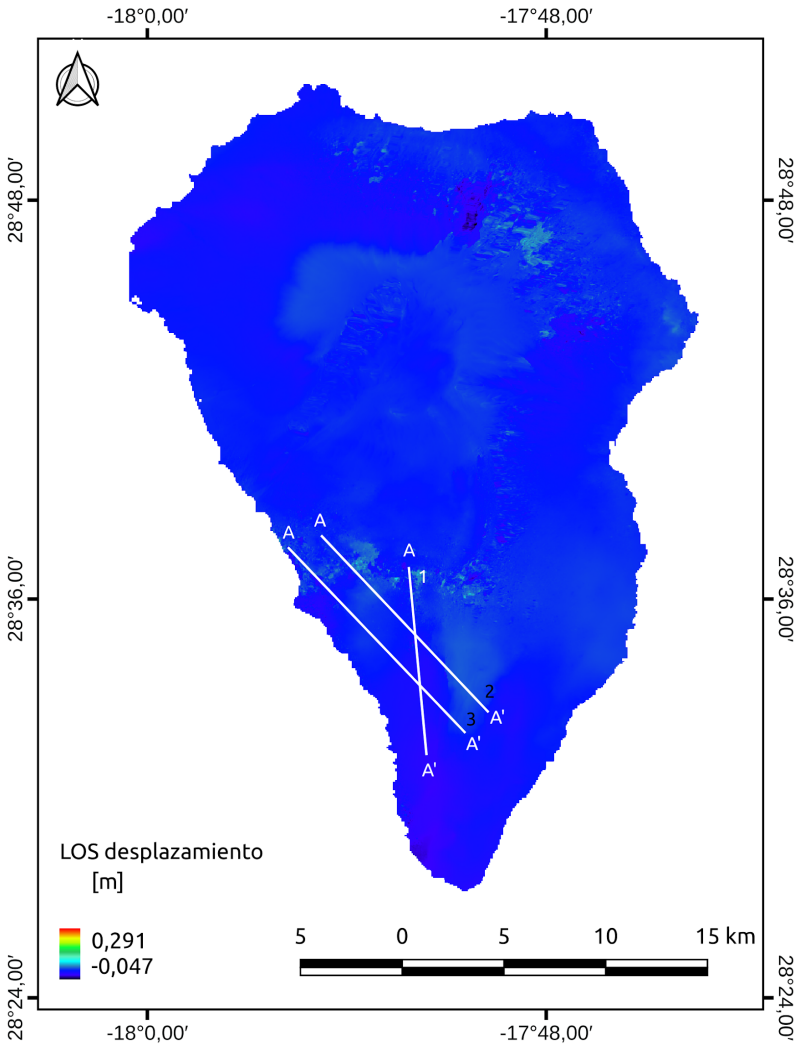


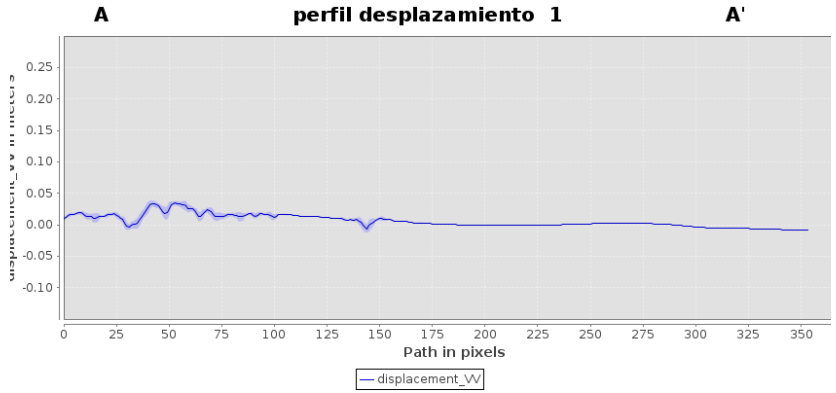


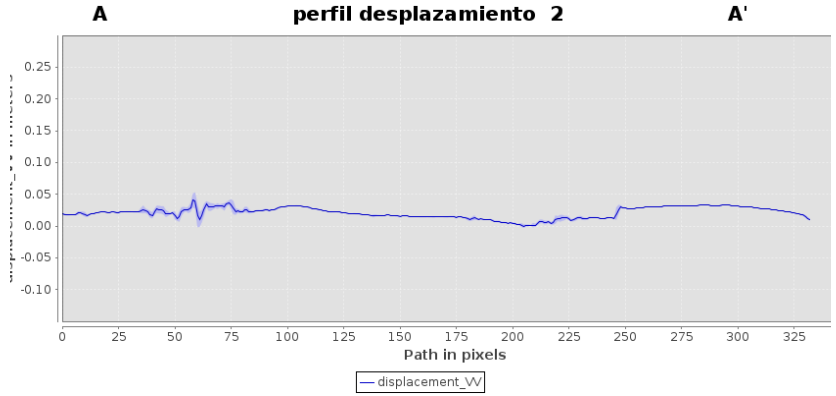


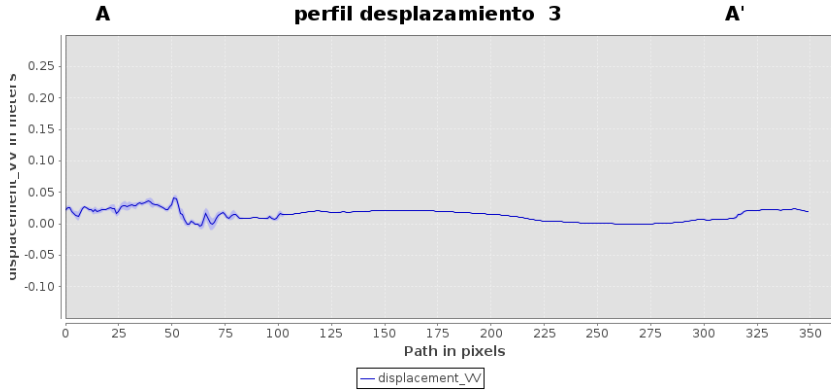


Resultado 10-10-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

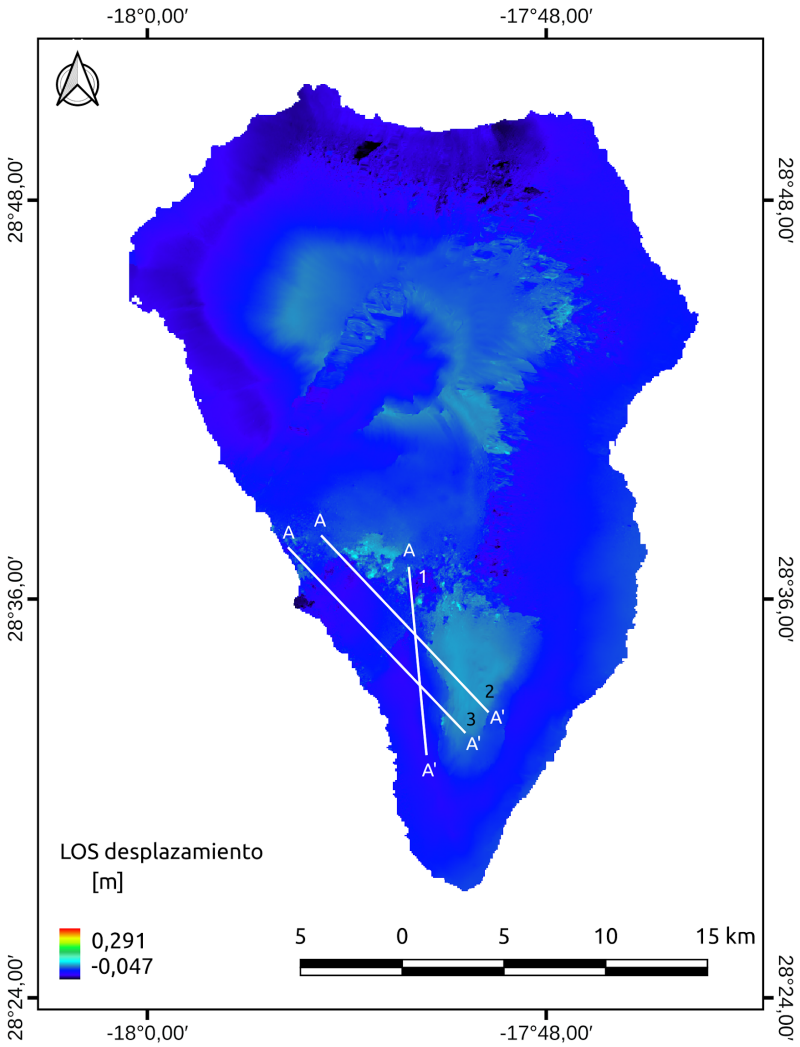


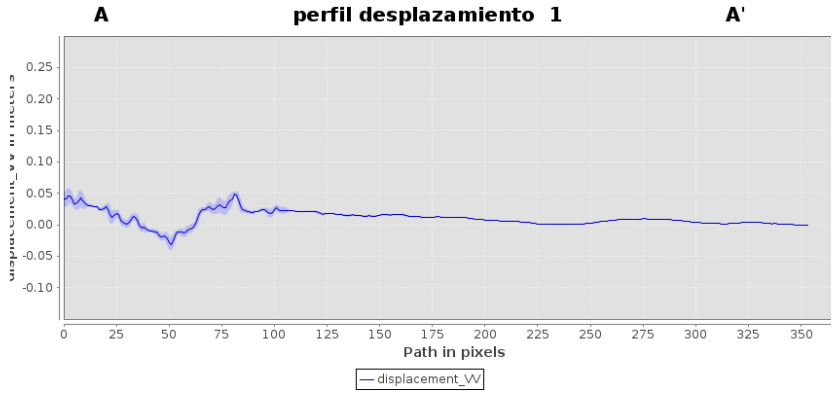


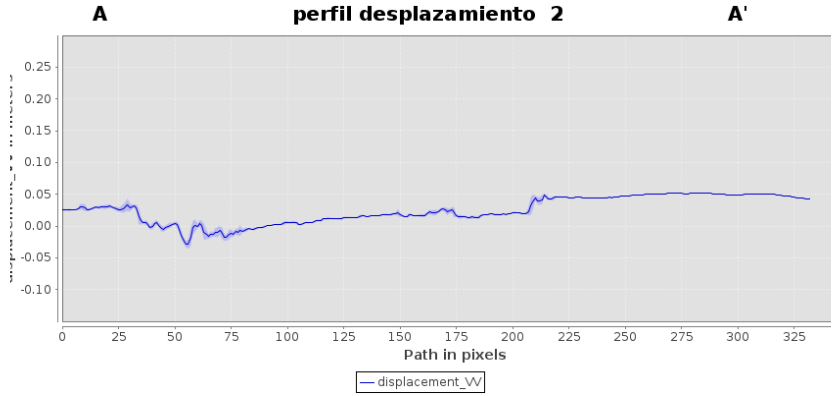




Resultado 16-10-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

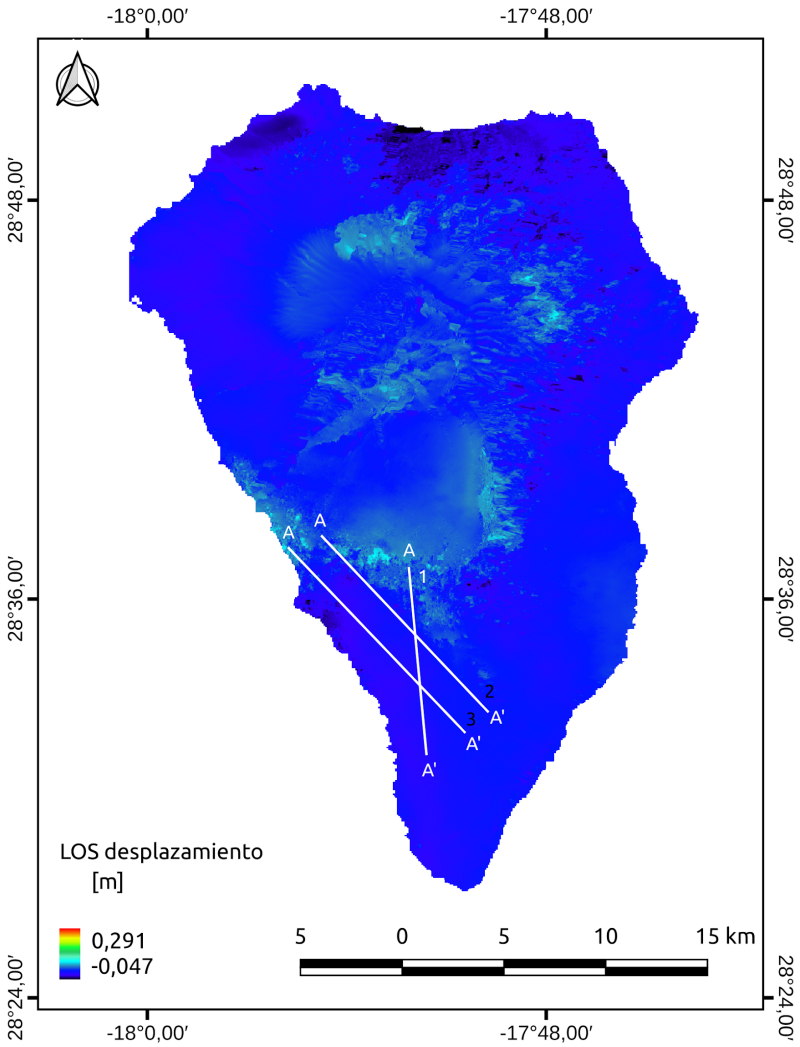


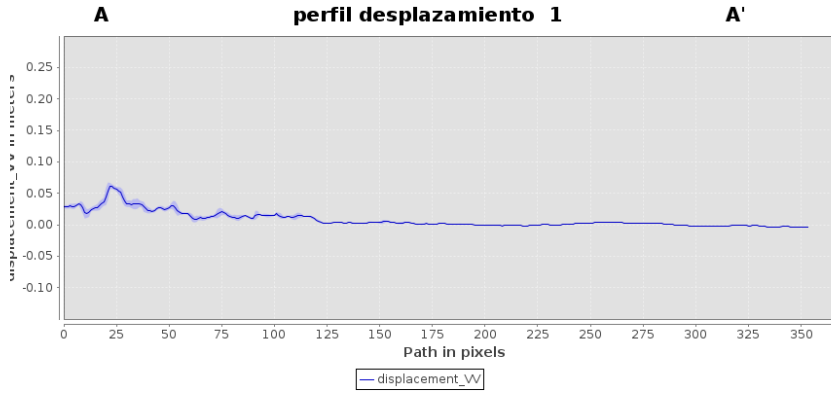


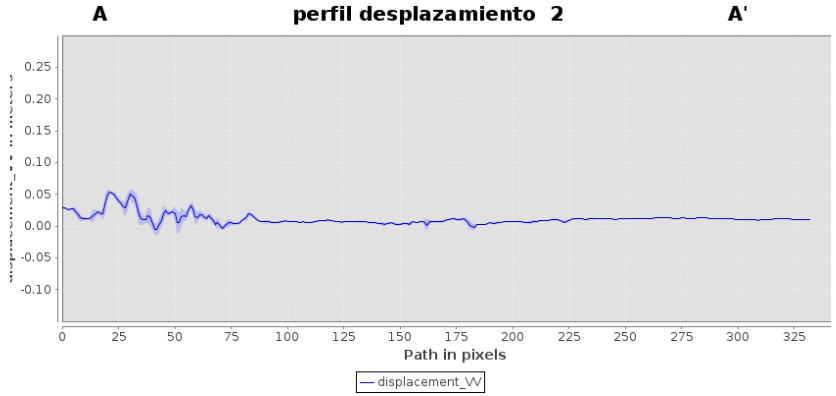


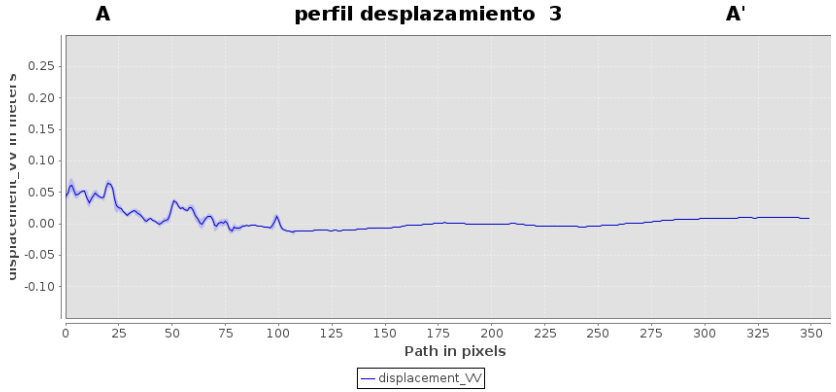


Resultado 22-10-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

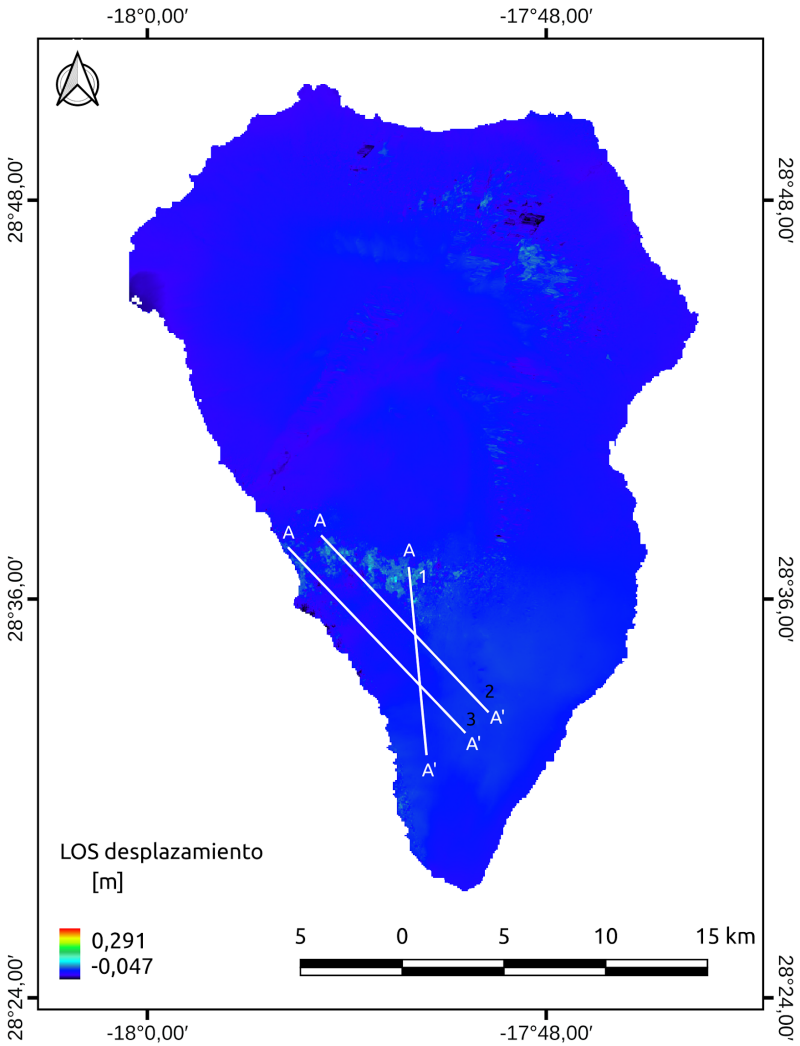


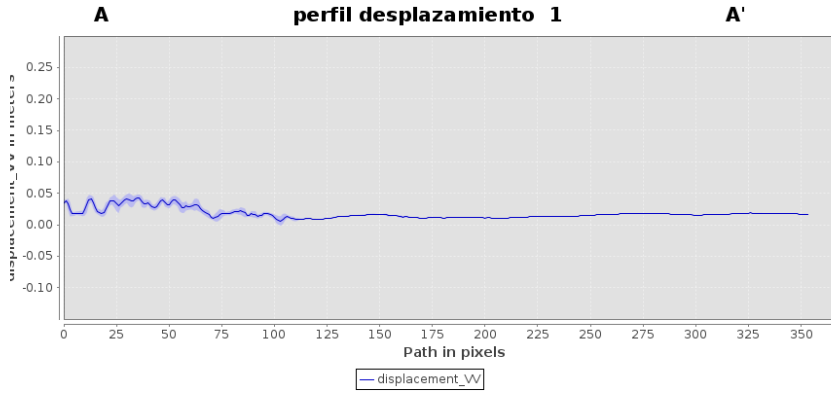


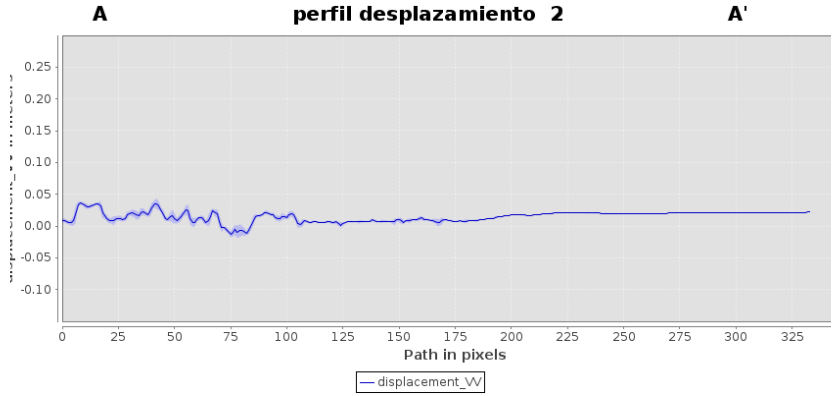


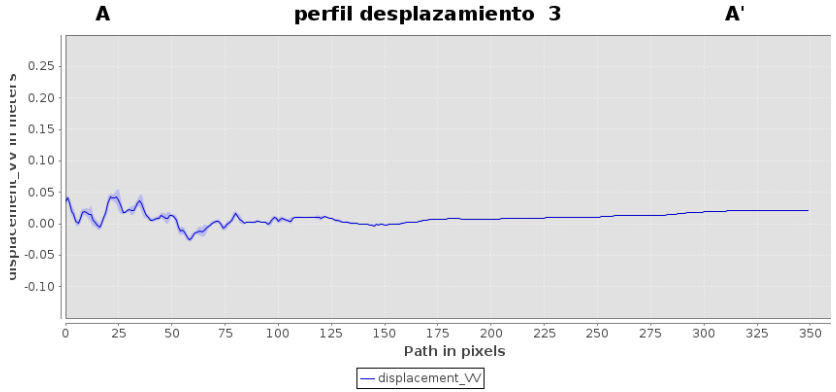


Resultado 28-10-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

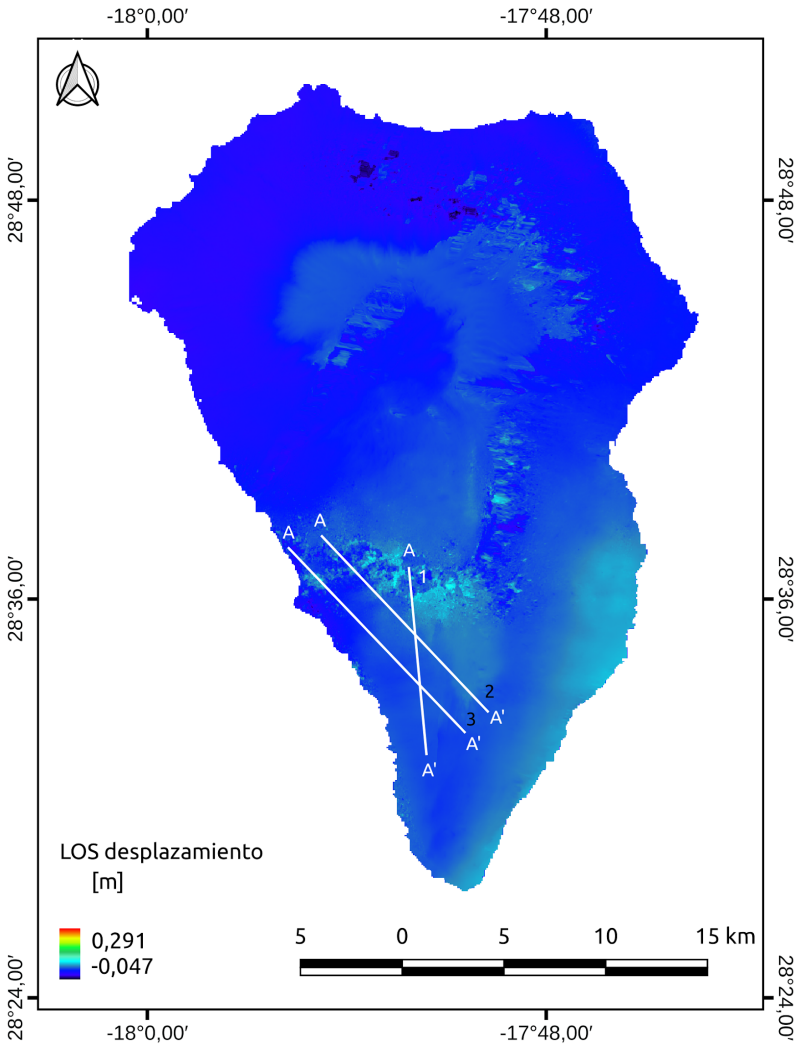


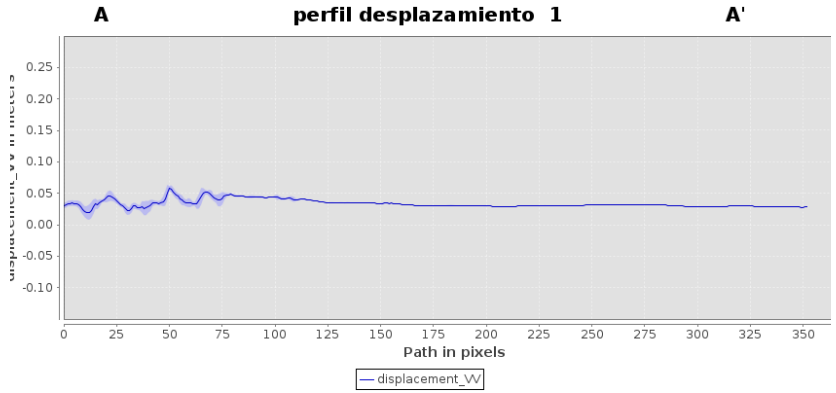


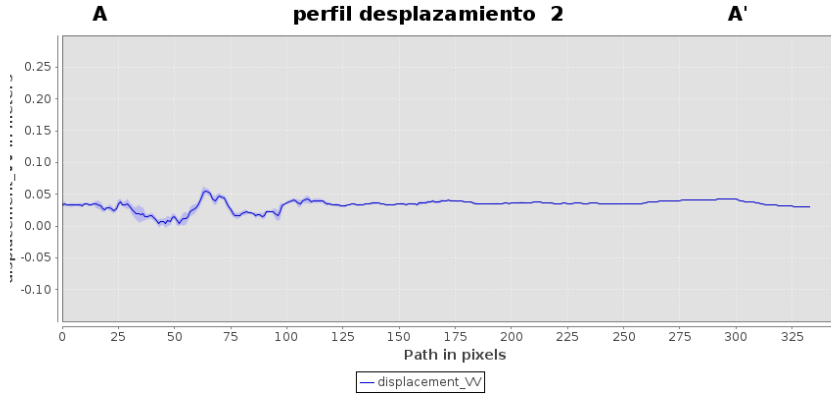


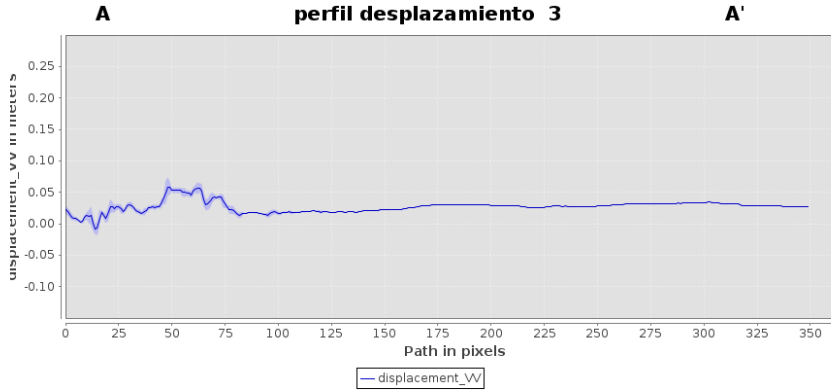


Resultado 03-11-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

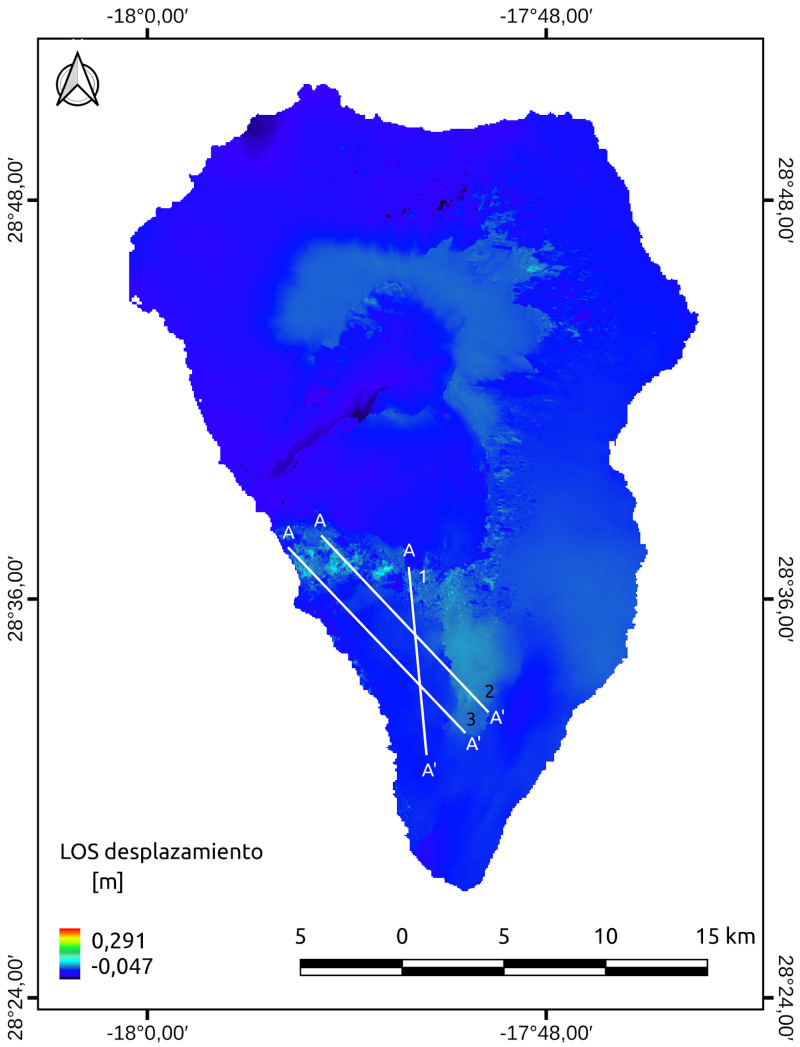


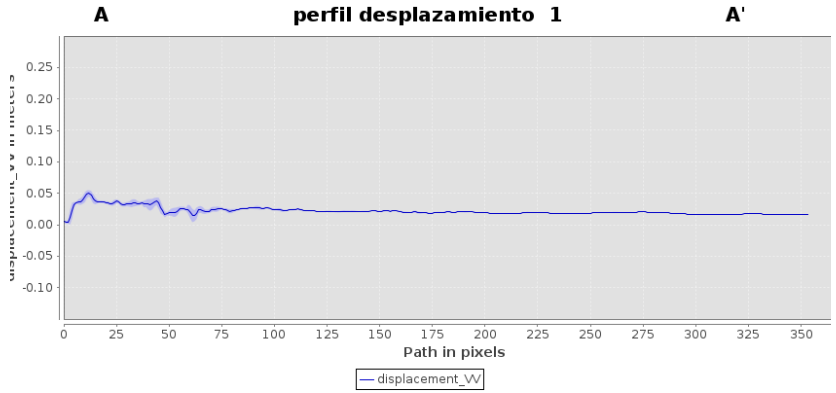


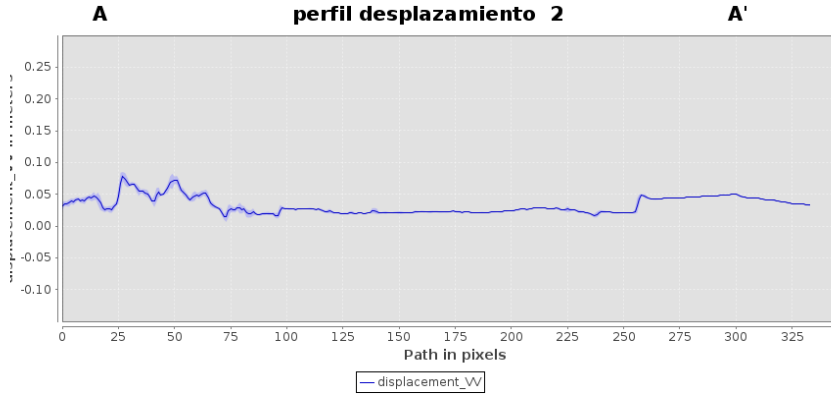


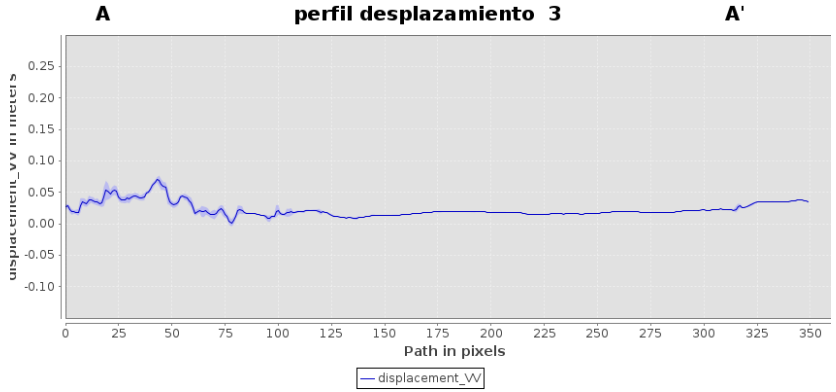


Resultado 09-11-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

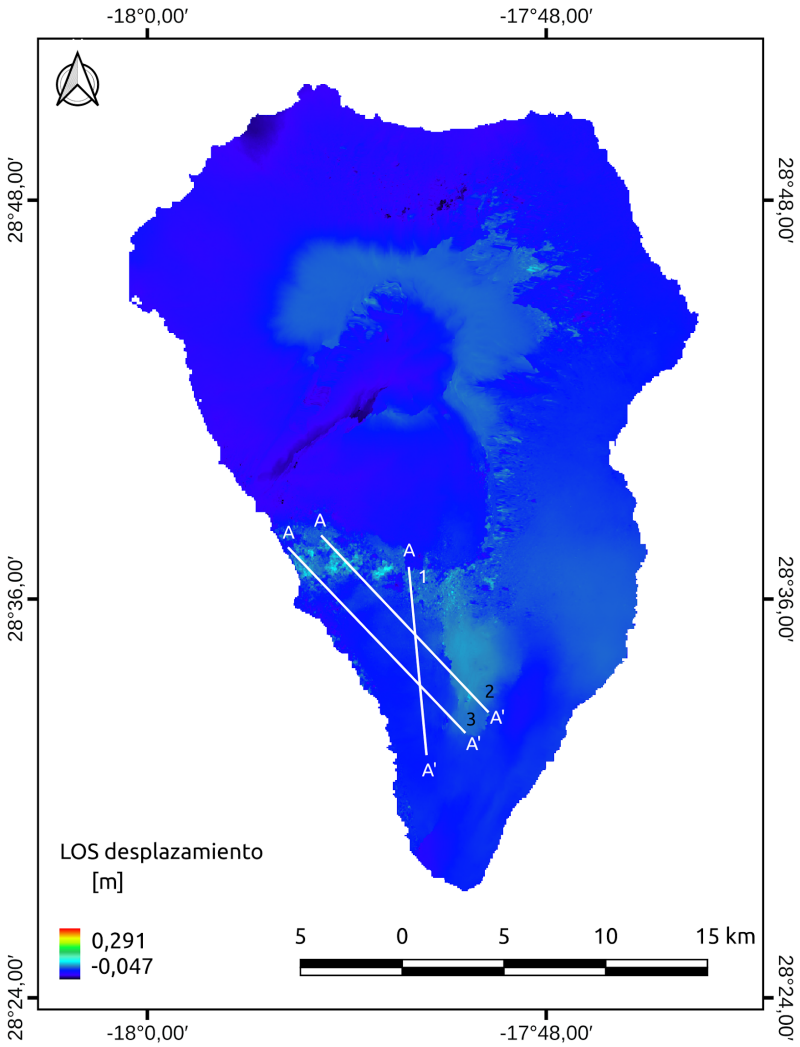


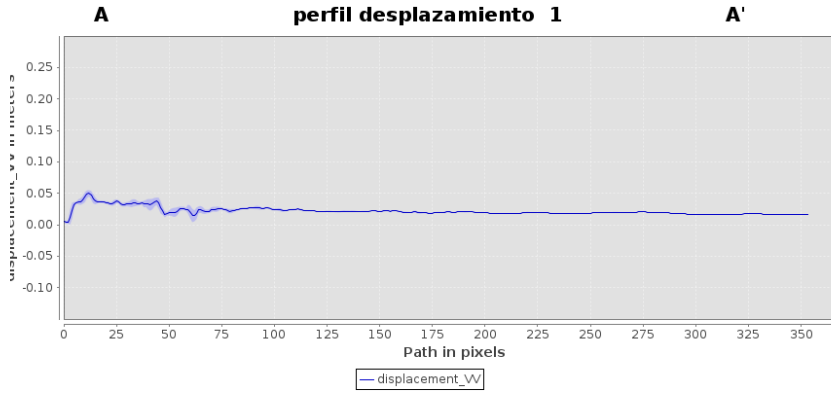


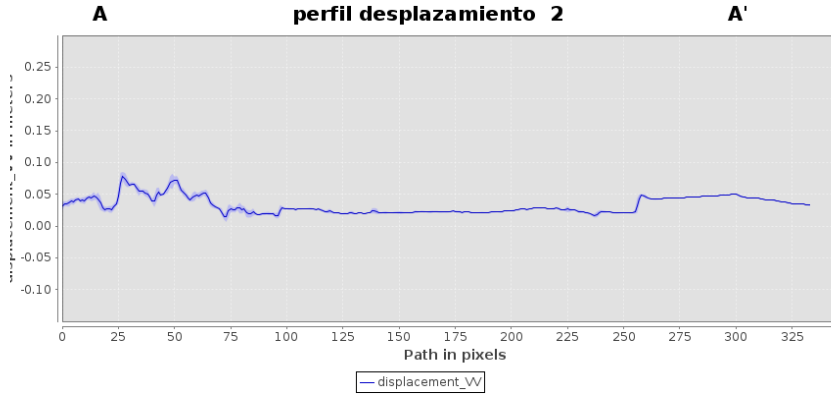


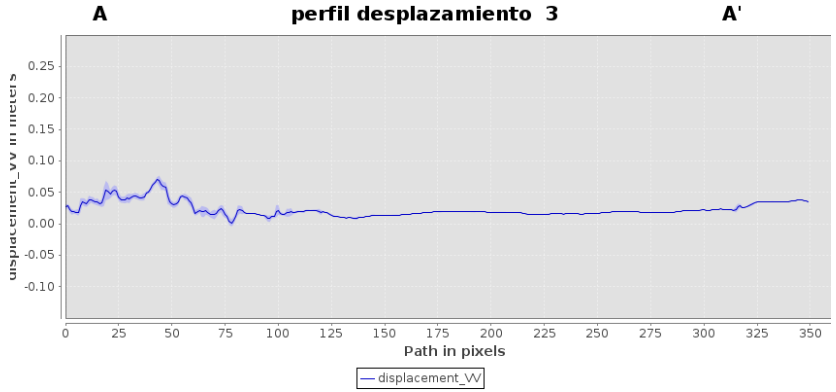


Resultado 15-11-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

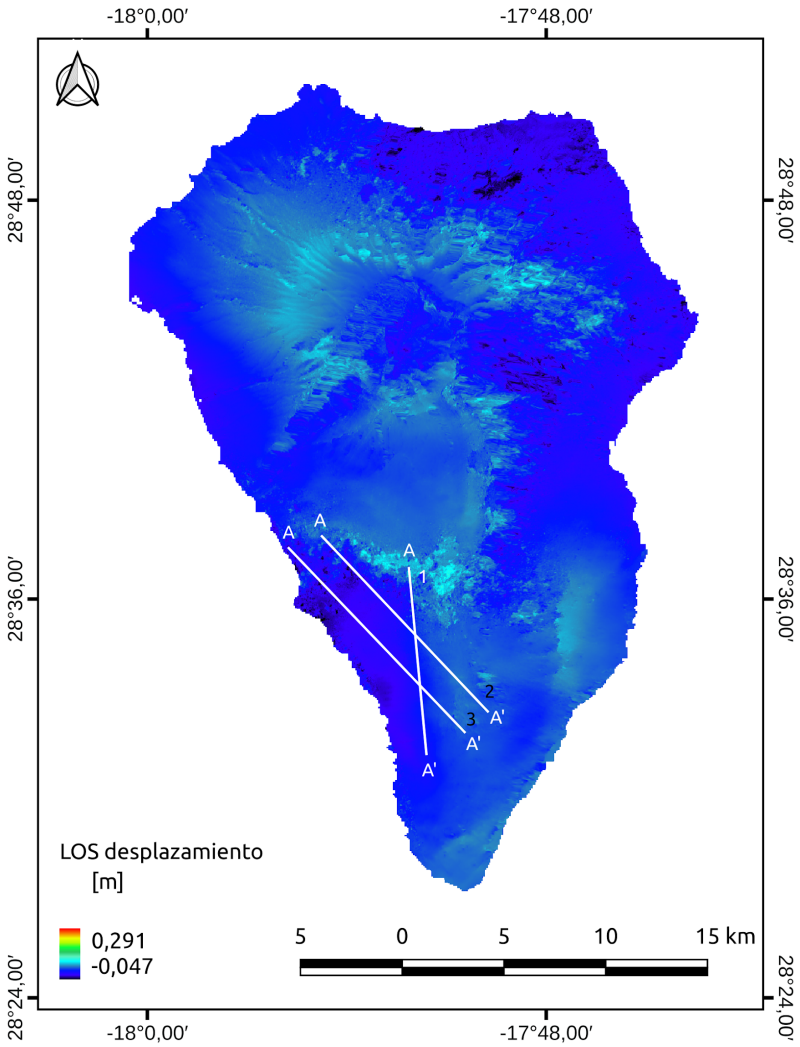


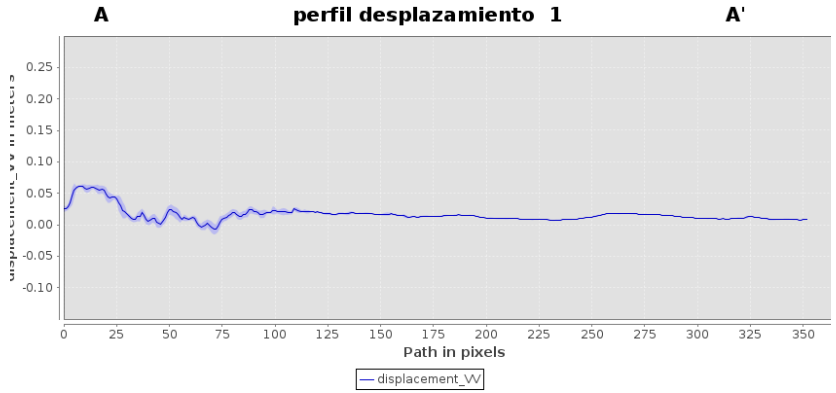


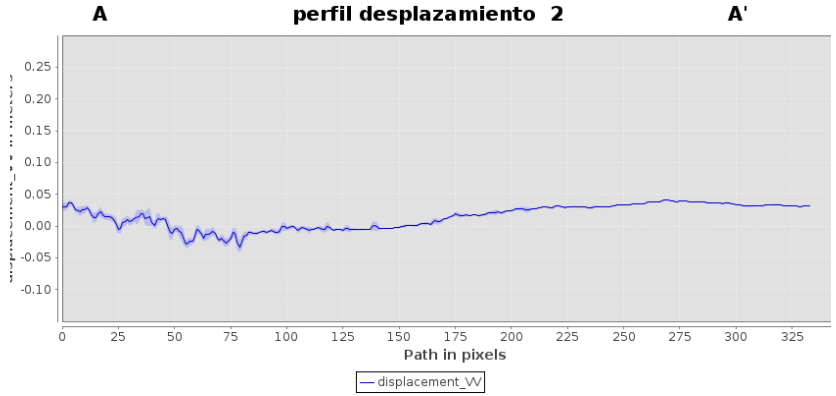


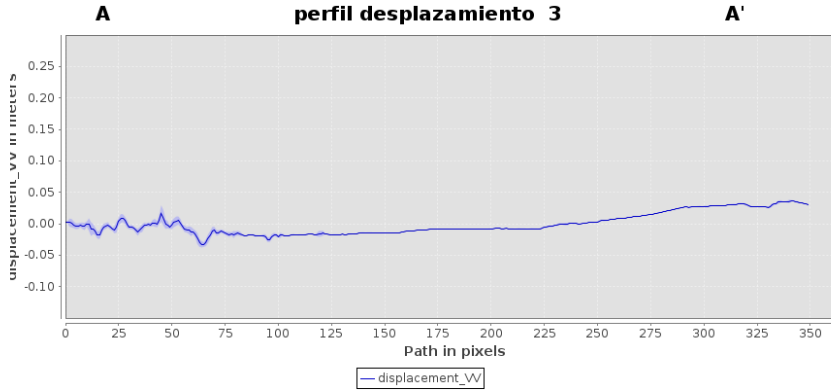


Resultado 21-11-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

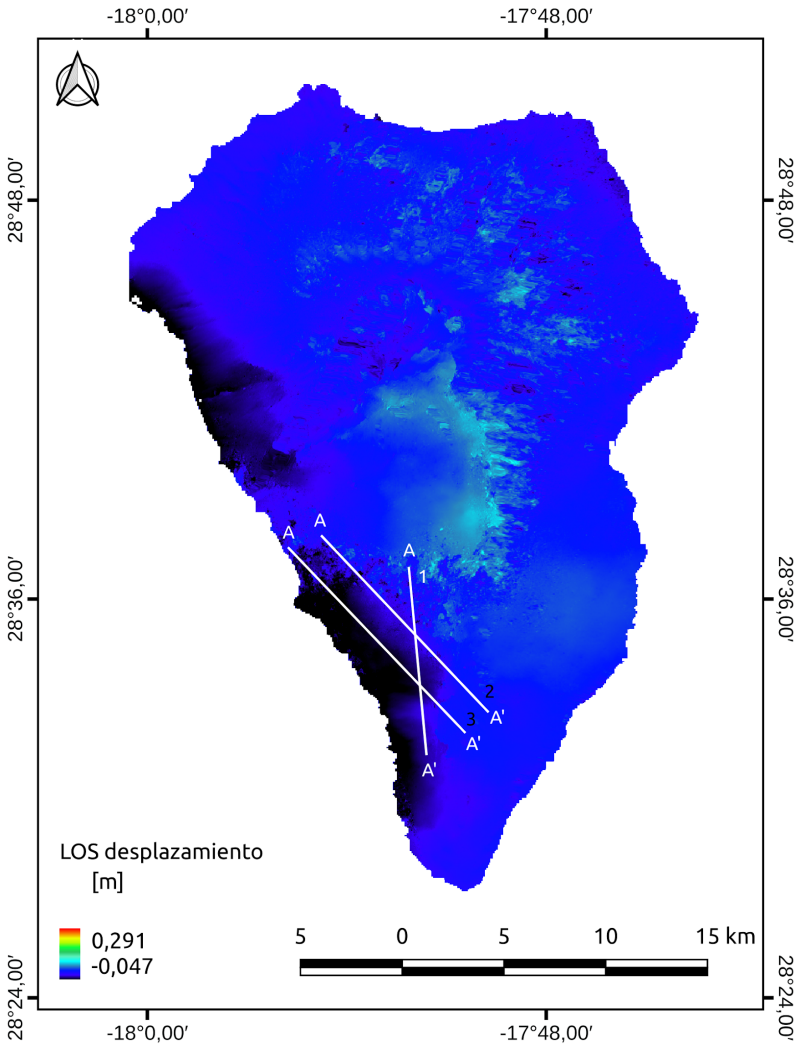


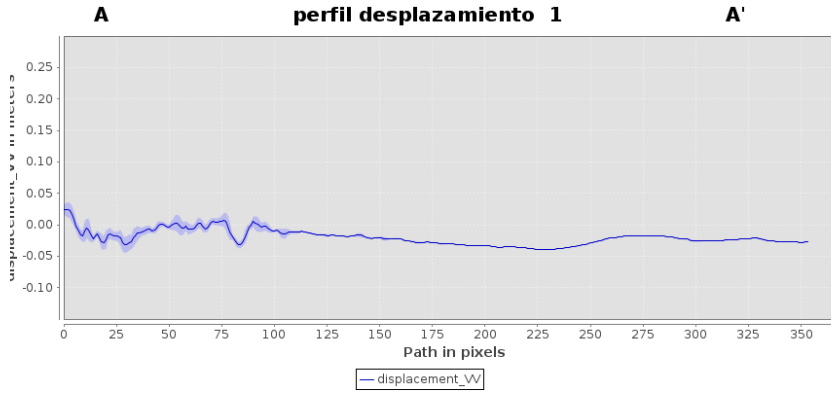


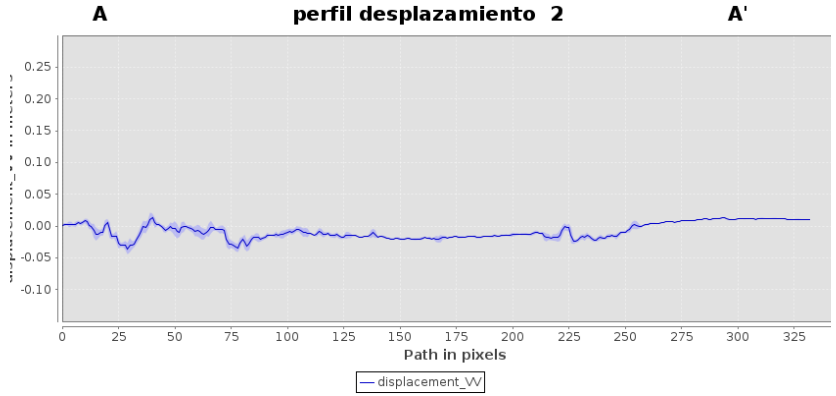




Resultado 27-11-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

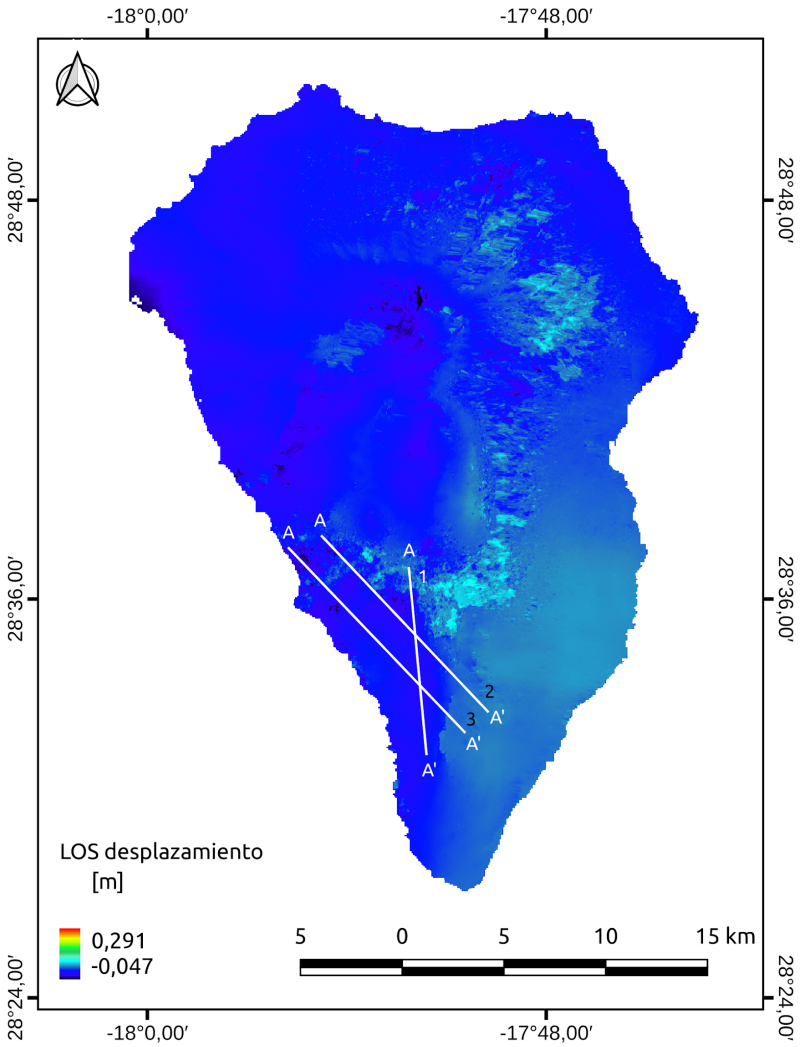


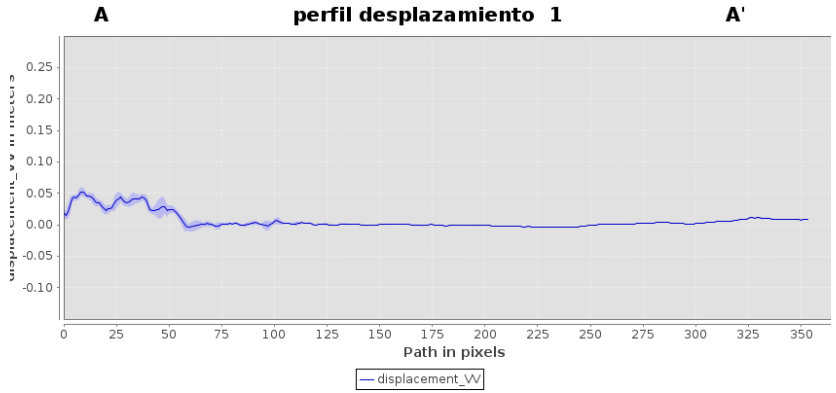


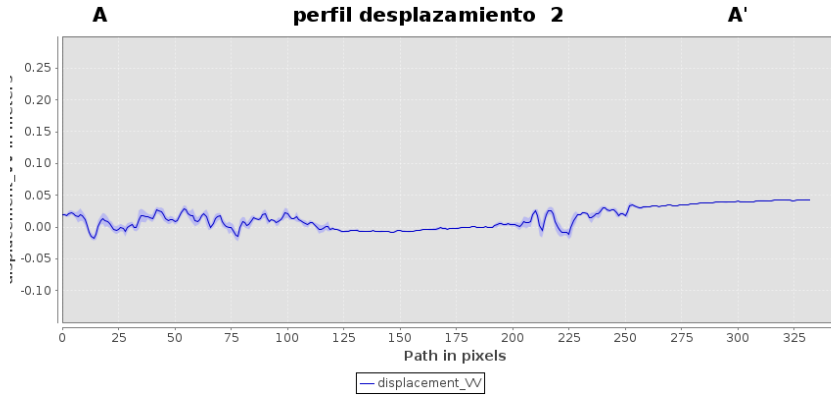


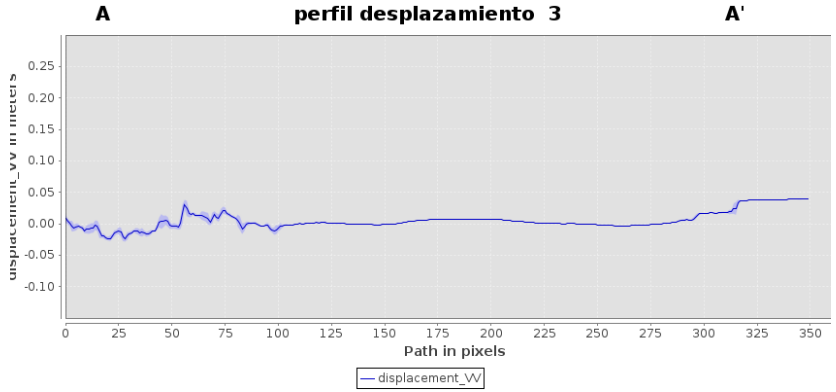


Resultado 03-12-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

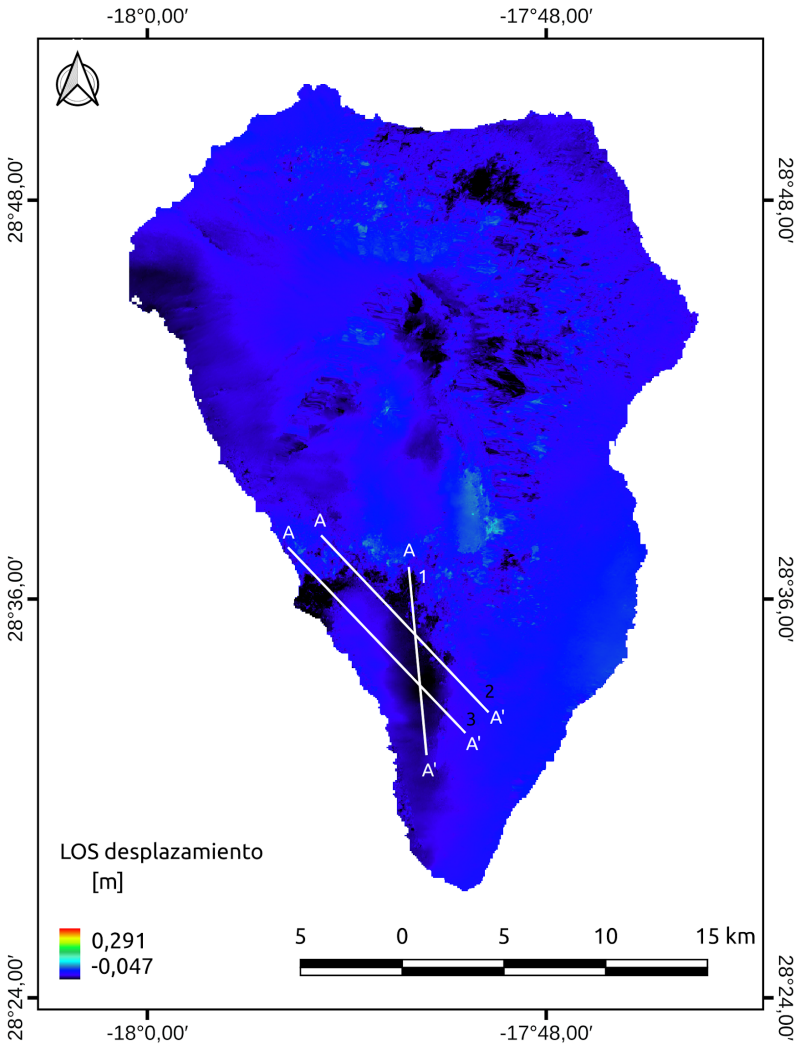


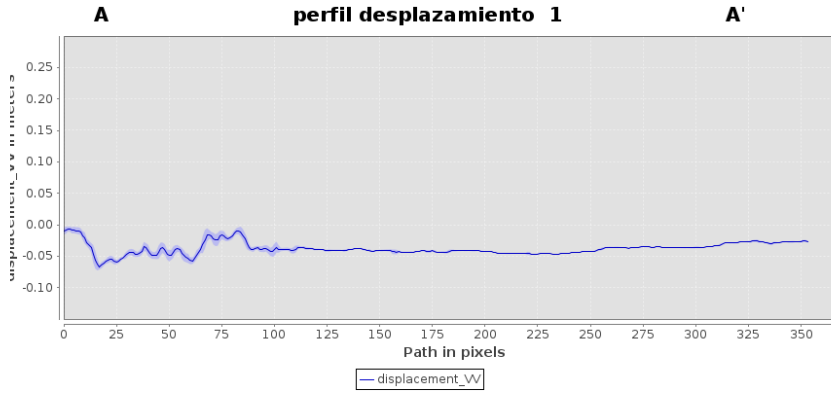


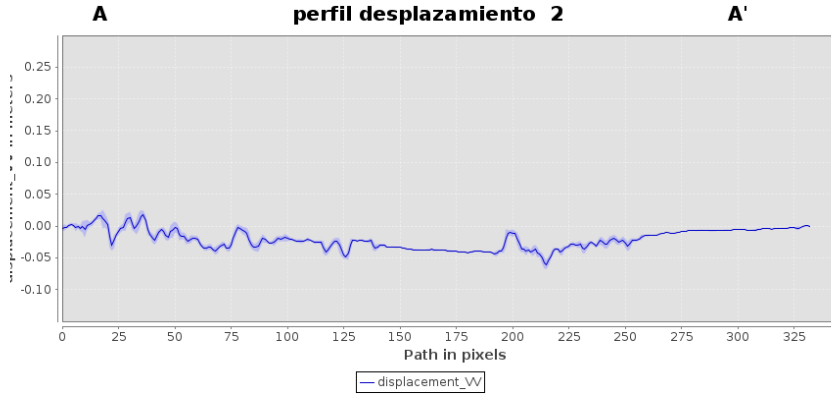


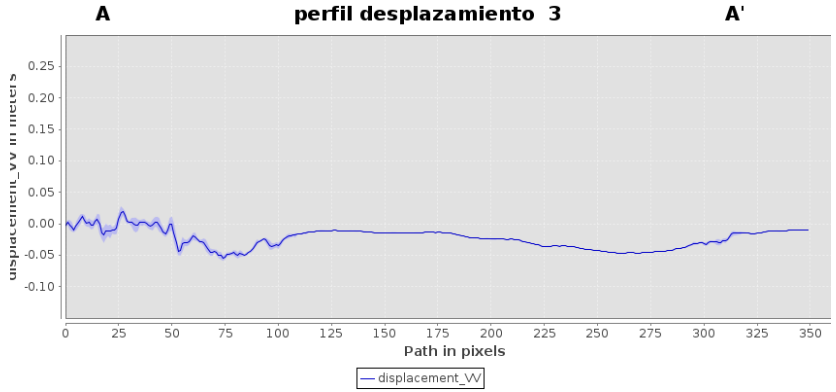


Resultado 09-12-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

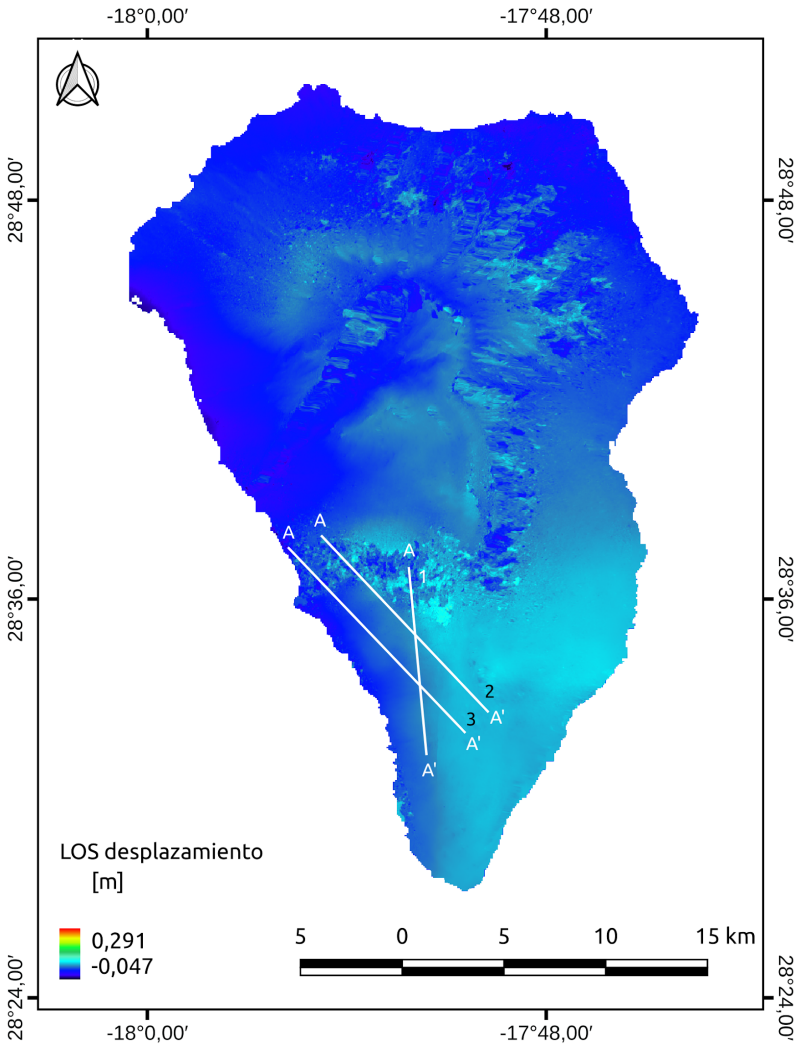


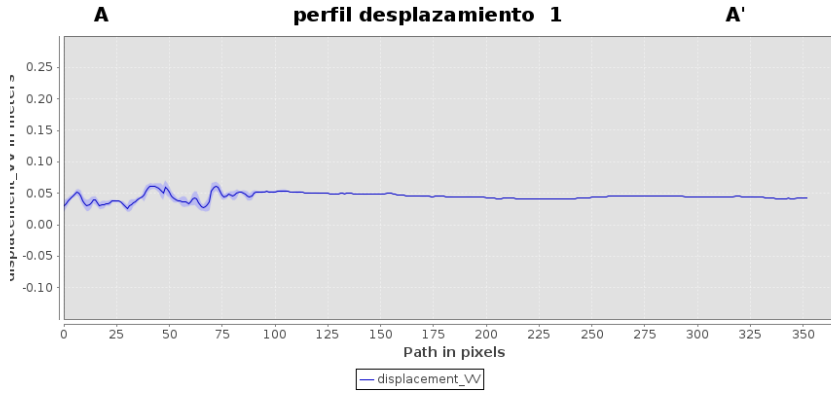




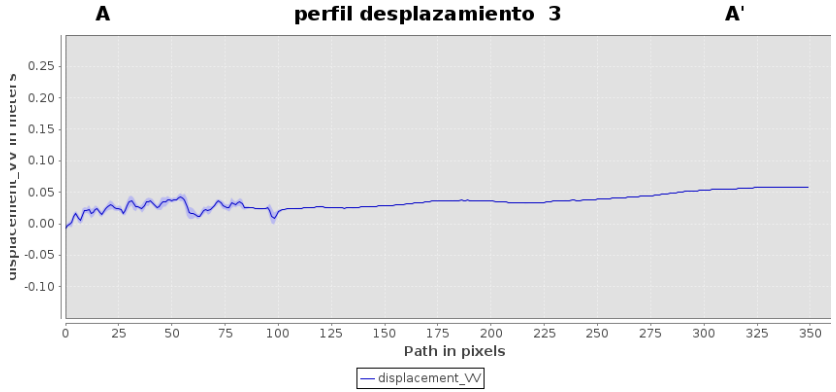


Resultado 15-12-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

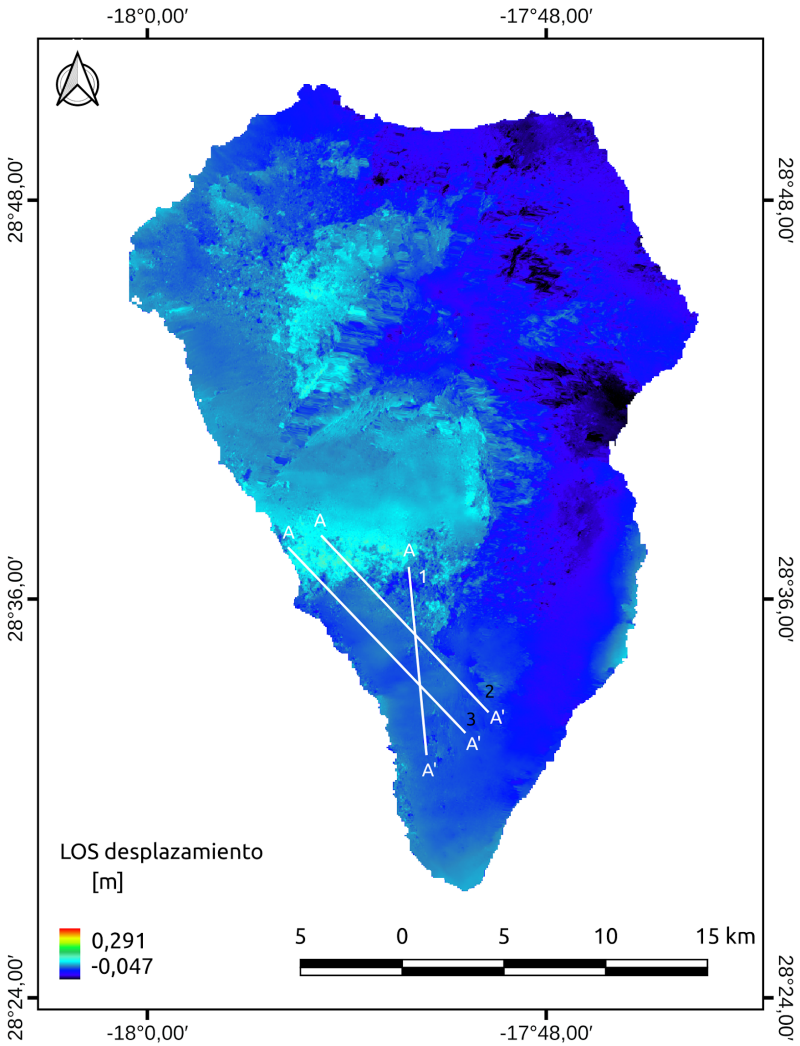


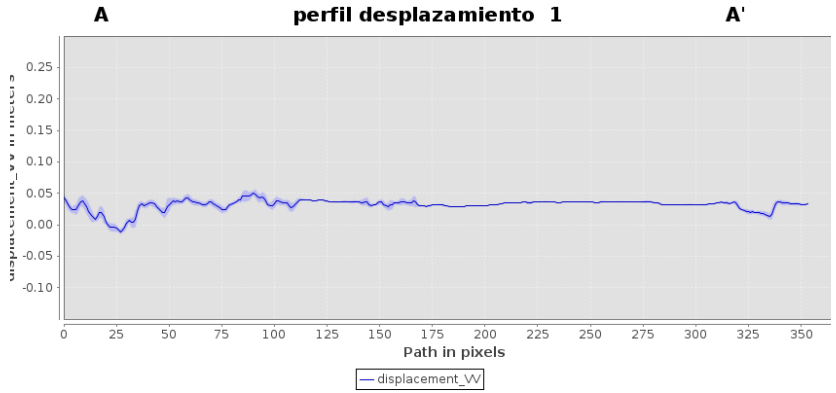




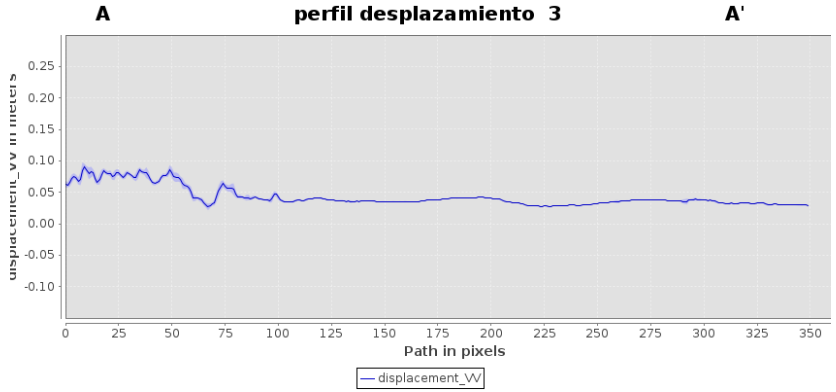


Resultado 21-12-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)









Resultado 27-12-2021 (slave) con 22-09-2021 (master)

