



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis comparativo de la
deformación costera en Oaxaca
posterior al sismo del 23 de
junio de 2020 mediante
técnicas GPS e InSAR**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geomática

P R E S E N T A

Sinai Villalpando Mota

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Enrique Cabral Cano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DEFORMACION COSTERA EN OAXACA POSTERIOR AL SISMO DEL 23 DE JUNIO DE 2020 MEDIANTE TECNICAS GPS E INSAR que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

SINAI VILLALPANDO MOTA
Número de cuenta: 311293379

Agradecimientos

Quisiera comenzar expresando mi más sincero agradecimiento al Dr. Enrique Cabral Cano, mi director de tesis. Su paciencia, comprensión y vasta experiencia han sido fundamentales en la realización de este trabajo. Su constante guía, valiosos consejos y minuciosa revisión han sido el pilar de este proyecto. Este trabajo es el resultado de muchas horas de esfuerzo, y no habría sido posible sin su dirección intelectual y apoyo incondicional. No tengo palabras suficientes para expresar mi gratitud por su inmenso apoyo a lo largo de este proceso.

Mis más sinceros agradecimientos al Instituto de Geofísica, quien me ha dado los recursos necesarios para la realización de esta tesis.

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de avanzar en mi carrera profesional. Extiendo mi agradecimiento a la División de Ingenierías Civil y Geomática por su continuo respaldo. Mi gratitud también va dirigida a todos mis profesores, quienes han compartido sus conocimientos y han estado presentes siempre que los he necesitado.

Quisiera dedicar unas palabras especiales a ella, por su amor incondicional y apoyo moral. Su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles, ha sido el sostén de este logro. Su admiración y respeto me han mantenido enfocado y motivado, ayudándome a no perder el rumbo y esforzarme cada vez más.

Finalmente, agradezco con todo mi corazón a mi madre, por su apoyo y comprensión durante esta etapa. También a mi familia, quienes han estado a mi lado en los buenos y malos momentos. Su apoyo ha sido fundamental para alcanzar este objetivo.



Índice

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Alcances	4
Capítulo 1. Marco teórico	6
1.1. Localización geográfica	6
1.2. Planteamiento del problema	7
1.3. Tectónica de placas	15
1.3.1. Modelos de placas tectónicas	16
1.3.2. Movimientos de placas	18
1.3.3. Fuerzas tectónicas	18
1.3.4. Ciclo sísmico	19
1.4. Aspectos geológicos de Oaxaca	20
1.4.1. Marco geológico estructural de Oaxaca	20
1.4.2. Marco estructural de Oaxaca	20
1.4.3. Marco tectónico de Oaxaca	21
1.4.4. Historial sísmico en Oaxaca	22
Capítulo 2. Técnicas geoespaciales	23
2.1. GPS	23
2.1.1. Constitución del sistema GPS	24
2.1.2. Sistema de coordenadas GPS	27
2.1.3. Levantamientos	29
2.1.4. Fuentes de errores	31
2.1.5. Aplicaciones del GPS	33
2.2. Sistema de Radar de Apertura Sintética	34
2.2.1. Interferometría SAR (InSAR)	42
2.2.2. Interferometría Diferencial SAR (DInSAR)	49
2.2.3. Misión Sentinel-1	50
Capítulo 3. Metodología	55
3.1. Procesamiento de los datos GPS	56
3.1.1. Cambio de coordenadas de XYZ a ENU	57
3.1.2. Ajuste mediante offset en las series de tiempo GPS	59
3.1.3. Cálculo y aplicación de la Media Móvil Simple (SMA)	60
3.1.4. Cálculo de los desplazamientos	61
3.1.5. Desplazamiento en la geometría LOS	62
3.1.6. Resultados de las componentes de las series de tiempo continuas de las estaciones GPS	63



3.1.7. Resultados de SMA de las series de tiempo continuas de las estaciones GPS.	66
3.2. InSAR	68
3.2.1. Elección de productos para el caso de estudio	68
3.2.2. Flujo de trabajo ASF, haciendo uso de ESA's Sentinel-1 Toolbox	69
3.2.3. Productos interferométricos obtenidos mediante la aplicación de la técnica InSAR	73
3.2.4. Productos interferométricos obtenidos mediante procesamiento selectivo de subproductos SAR	77
3.2.5. Mapas de desplazamiento	85
Capítulo 4. Análisis de los resultados	88
Capítulo 5. Discusión y Conclusiones	90
5.1. Discusión	90
5.2. Conclusiones	91
Referencias	93
Anexo A	98



Lista de figuras

<i>Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.</i>	6
<i>Figura 2. Placas tectónicas que interactúan en la República Mexicana. Tomado de SSN (2019)</i>	7
<i>Figura 3. Histograma de frecuencia sísmica Estado de Oaxaca (2010 - 2023).</i>	8
<i>Figura 4. Mapa de densidad sísmica Oaxaca (2010 – 2023).</i>	8
<i>Figura 5. Placas tectónicas del mundo. Tomado de Atlas de Geografía del mundo p. 27</i>	15
<i>Figura 6. Plano nodal o auxiliar. Modificado de Calmus (2021)</i>	16
<i>Figura 7. Principales deformaciones de los límites de placa. Modificado de Maldonado Yandry (2020)</i>	17
<i>Figura 8. Movimientos de placas. Modificado de López Briceño E. et al (2014)</i>	18
<i>Figura 9. Placas tectónicas que interactúan en la República Mexicana. Tomado de (Montero Aguilar, 2010)</i>	21
<i>Figura 10. Mapa tectónico del estado de Oaxaca. Tomado de (Montero Aguilar, 2010)</i>	22
<i>Figura 11. Constelación satelital.</i>	25
<i>Figura 12. Esquema de operación segmento control del GPS. Modificado de Mancera Luis A., (2004)</i>	25
<i>Figura 13. Estaciones de control maestras en el mundo. Tomado de (Huerta & et. al, 2005)</i>	26
<i>Figura 14. Elipsoide de revolución, es una esfera aplanada o achatada sobre sus polos, el elipsoide elegido será aquel que mejor se ajuste a la forma de la Tierra, no es una superficie física, sino que es una superficie definida matemáticamente.</i>	27
<i>Figura 15. Coordenadas geodésicas del punto P, mediante coordenadas geodésicas y cartesianas. Tomado de (Huerta & et. al, 2005)</i>	28
<i>Figura 16. Relación entre los elipsoides y la superficie terrestre.</i>	28
<i>Figura 17. Relación entre la altura ortométrica y la altura elipsoidal. Mejorado de (Leica, 2015)</i>	29
<i>Figura 18. Absorción atmosférica en el espectro electromagnético. Modificado de ESA</i>	35
<i>Figura 19. Sensor de Radar de Apertura Sintética que emite microondas electromagnética y es retrodispersado.</i>	36
<i>Figura 20. Geometría SAR. Mejorado de Díaz Santana (2016)</i>	37
<i>Figura 21. Tipos de orbitas de los satélites con sensores SAR.</i>	38
<i>Figura 22. Tipos de polarización de los sensores de los sistemas SAR, en la dirección en la que oscilan los campos eléctricos de las ondas electromagnéticas idea y vuelta. Tomado de ESRI</i>	41
<i>Figura 23. Geometría de interferométrica satelital de un sistema SAR. Mejorado de ESA</i>	42
<i>Figura 24. Geometría de los parámetros del sistema de satélite interferométrico SAR. Mejorado de ESA</i>	44
<i>Figura 25. Esquema de la fase empaquetada y desempaquetada de un interferograma. Tomado de (Gómez , 2019)</i>	45
<i>Figura 26. Esquema del cálculo del movimiento en la superficie de imagen maestra y esclava sobre un punto. Mejorado de Sillerico et al., 2010</i>	48
<i>Figura 27. Cobertura de la franja de adquisición de Sentinel-1. Tomado de ESA</i>	51
<i>Figura 28. Adquisición de subfranjas de TOPSAR. Tomado de ESA</i>	52
<i>Figura 29. Convención de nomenclatura para los datos Sentinel-1. Tomado de DAAC</i>	54
<i>Figura 30. Mapa de localización de las estaciones GPS en la costa de Oaxaca.</i>	55
<i>Figura 31. Componentes de las series de tiempo continuas; estación HUAM</i>	63
<i>Figura 32. Componentes de las series de tiempo continuas; estación OXPE.</i>	64
<i>Figura 33. Componentes de las series de tiempo continuas; estación OXUM.</i>	65
<i>Figura 34. Media móvil simple cada 15 minutos para cada componente; estación HUAM.</i>	66
<i>Figura 35. Media móvil simple cada 15 minutos para cada componente; estación OXPE.</i>	67
<i>Figura 36. Visualización general de la web Alaska Vertex para descarga de datos. Tomado de (ASF, 2016)</i>	68
<i>Figura 37. Pasos para procesamiento de imágenes SAR. Tomando en cuenta que el paso 2.4.1 Merged se aplica cuando la zona de interés abarca dos subproductos y 2.3.1 Subset solo aplica cuando la zona de interés es puntual.</i>	69



Figura 38. Vistas de la CMD para desenvolvimiento de la fase y su ejecución.

72

Figura 39. Interferograma SAR en fase envuelta. Esta imagen representa el producto final de la primera etapa del procesamiento interferométrico, que abarca desde la preparación de los datos hasta la formación y filtrado inicial del interferograma. Su obtención es el resultado secuencial de los pasos metodológicos; **1. Preparación de las imágenes:** Las imágenes SAR de origen fueron preparadas mediante la división de subproductos IW1, IW2, IW3 (**1.1 Split**) y la aplicación de orbitas precisas (**1.2 Apply Orbits**) para corregir a geometría de la plataforma. **2 Co-registro y creación del interferograma:** Las imágenes maestra y esclava se co-registran con alta precisión, usando **2.1 Back Geocoding** y **2.2 Enhanced Spectral Diversity**. Posteriormente, se formó el interferograma complejo (**2.3 Interferogram formation**) y se realiza la eliminación de las franjas negras entre las distintas tomas del sensor (**2.4 Deburst**), así como la fusión de los subproductos (**2.4.1 Merged**). **3 Eliminación de la fase topográfica:** Se eliminó la contribución topográfica utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (**3.1 Topographic Phase Removal**). Luego, se mejoró la relación señal ruido media el promediado de píxeles (**3.2 Multilooking**) y la aplicación de un filtro adaptativo (**3.3 Phase Filtering**) en la zona de estudio. Por lo tanto, el resultado de este interferograma de fase envuelta, donde las franjas de color cíclicas codifican la diferencia de fase medidas en radianes, confinada al rango de $[-\pi, \pi]$. Cada ciclo completo de color representa un cambio de fase de 2π radianes. Esta fase contiene la señal combinada del desplazamiento del terreno, efectos atmosféricos y ruido. Este producto es el insumo fundamental para la siguiente etapa (**Paso 4 Desenrollamiento de la fase**).

73

Figura 40. Interferograma SAR en fase desenuelta. Esta imagen representa la fase interferométrica después del proceso de desarrollo (unwrapping), que constituye el paso 4 (**4. Desarrollo de la fase / Desenvolvimiento de fase**), del flujo del procesamiento. La obtención de este producto fundamental involucró los siguientes subpasos específicos: La fase envuelta del interferograma fue exportada en un formato compatible para el software Snaphu (**4.1 Snaphu Export**), al exportarse en formato compatible, se aplicó el algoritmo para llamar a Snaphu, para resolver las ambigüedades de 2π presentes en la fase envuelta, reconstruyendo la fase absoluta mediante técnicas de optimización global (**4.2 Phase Unwrapping**). La fase ya desarrollada fue reimportada al flujo de procesamiento principal para su posterior análisis (**4.3 Snaphu Import**). El resultado, mostrado en esta imagen, es un campo de fase continuo donde los valores (en radianes) son proporcionales al desplazamiento real del terreno a lo largo de la línea de visión del sensor, combinando con posibles efectos atmosféricos residuales. A diferencia de la fase envuelta, aquí la variación espacial de la fase es suave y continua, lo que permite una conversión directa a desplazamiento en la etapa siguiente (**Paso 5 Desplazamiento**). Este producto es esencial para la generación de mapas de desplazamiento. El proceso completo de desarrollo de fase se detalla en el **Anexo A** de esta tesis.

74

Figura 41. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS). Este resultado constituye el producto final del procesamiento interferométrico y se obtuvo mediante los siguientes pasos: Fase de desplazamiento (**5.1 Phase Displacement**) permitió que la fase desarrollada se convirtiera a desplazamiento lineal en la línea de visión del sensor mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) * \Delta\phi_d$, donde λ es la longitud de onda del radar y ϕ la fase desarrollada en radianes. Para obtener un mapa de desplazamiento confiable se usó un par interferométrico (interferograma en fase envuelta e interferograma de fase desenuelta), donde se apilan (**5.2 Create Stack**) para reducir el ruido y obtener una señal más confiable, este paso utiliza las bandas de coherencia del interferograma en fase envuelta y el desplazamiento (interferograma en fase desenuelta). El mapa de desplazamiento fue transformado desde la geometría de radar (range – Doppler) a un sistema de coordenadas geográficas, permitiendo su localización espacial precisa y su integración con otros datos georreferenciados (**5.3 Geocoding**). Este mapa cuantifica el desplazamiento del terreno (en metros) ocurrido entre las dos adquisiciones SAR, donde los valores positivos indican movimiento hacia el sensor y los negativos representan alejamiento de este. El proceso completo de derivación de desplazamiento se detalla en el **Anexo A** de esta tesis.

75



Figura 42. Desplazamiento con coherencia enmascarada. Esta imagen representa el grado de similitud temporal entre las dos adquisiciones SAR, obtenida mediante los procesos finales del flujo de procesamiento, se generó este mapa de coherencia donde los valores (entre 0 y 1) indican la calidad y confiabilidad de la medida interferométrica en cada píxel (**5.4 Coherence Mask**). Los valores cercanos a 1 representan áreas de alta coherencia (superficies estables), mientras que valores cercanos a 0 indican baja coherencia (zonas con cambios temporales o vegetación). Este mapa de coherencia fue exportado (**5.5 Export Image**) en formato raster para su análisis cuantitativo. Los valores numéricos mostrados (entre 0.35 y -0.18) corresponden a representaciones específicas de la coherencia procesada, donde los valores negativos indican áreas de muy baja coherencia. Este producto se utilizó para enmascarar las zonas menos confiables del mapa de desplazamiento final, mejorando la calidad interpretativa de los resultados. La aplicación de la máscara de coherencia y el proceso de exportación se detallan en el **Anexo A** de esta tesis. 76

Figura 43. Interferograma SAR en fase envuelta en la estación HUAM (IW1). Este producto fue generado mediante procesamiento directo de subproductos **SLC** individuales (**bursts TOPS**), omitiendo la fusión de múltiples subproductos (paso **2.4.1 Merged**) ya que el área de estudio se encontraba dentro de un único burst (**IW1**), por lo cual no se necesitó del paso adicional **3.3.1 Subset**. Esta aproximación preserva la resolución espacial original. El interferograma muestra la diferencia de fase envuelta entre las dos adquisiciones SAR, donde las franjas cíclicas de color representan la diferencia de fase medida en radianes confinada al rango $[-\pi, \pi]$. Cada ciclo completo de color representa un cambio de fase de 2π radianes, conteniendo la señal combinada del desplazamiento de terreno y efectos topográficos residuales. 77

Figura 44. Interferograma SAR en fase desenvuelta en la estación HUAM (IW1). Obtenido mediante el procesamiento adaptado de **bursts** individuales (metodología detallada en Figura 43). La fase desarrollada se obtuvo mediante el algoritmo para el software de **Snaphu**, siguiendo los pasos de exportación (**4.1 Snaphu Export**), desarrollo de fase (**4.2 Phase Unwrapping**) e importación (**4.3 Snaphu Import**). Este producto representa la fase absoluta y continua, donde los valores en radianes son proporcionales al desplazamiento real del terreno a lo largo de la línea de visión del sensor, permitiendo la conversión directa a desplazamiento lineal en la etapa siguiente. 78

Figura 45. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS) en la estación HUAM (IW1). Resultado del flujo de procesamiento optimizado para subproductos individuales. La fase desarrollada se convirtió a desplazamiento lineal (**5.1 Phase Displacement**) mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) \cdot \Delta\phi_d$ y fue geocodificado (**5.3 Geocoding**) a un sistema de coordenadas geográficas. Este producto cuantifica el desplazamiento del terreno en metros, donde valores positivos/negativos indican movimiento hacia/desde el sensor. 79

Figura 46. Desplazamiento con coherencia enmascarada en la estación HUAM (IW1). Este producto fue obtenido mediante el procesamiento directo de subproductos **SLC** individuales. Este producto de coherencia calcula el grado de similitud temporal entre las dos adquisiciones SAR, donde los valores típicamente oscilan entre 0 (sin coherencia) y 1 (coherencia perfecta). Los valores mostrados en escala específica (entre 0.35 y -0.02) representan una transformación de la coherencia original para resaltar variaciones espaciales, donde los valores más altos (menos negativos, ej. 0.02) indican áreas estables en las medidas interferométricas, y los valores más bajos (más negativos, ej. -0.35) corresponden a zonas con cambios temporales o vegetación. Este producto se utilizó como máscara de calidad (paso **5.4 Coherence Mask**) para filtrar las áreas de baja confiabilidad en el de desplazamiento con coherencia enmascarada. 80

Figura 47. Interferograma SAR en fase envuelta en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Este interferograma fue generado mediante procesamiento directo del subproducto IW3, omitiendo los pasos de fusión (**2.4.1**) y submuestreo (**3.3.1**) al tratarse de una zona de estudio específica. El producto resulta de los pasos 1-2.4: preparación de imágenes (1.1 Split, 1.2 Apply Orbits), co-registro (**2.1 Back Geocoding**, **2.2 Enhanced Spectral Diversity**), formación del interferograma (**2.3 Interferogram Formation**) y **2.4 Deburst**. Las franjas cíclicas representan la diferencia de fase envuelta entre las adquisiciones SAR, confinada al rango $[-\pi, \pi]$ radianes, conteniendo la señal combinada de desplazamiento y topografía. 81



Figura 48. Interferograma SAR en fase desenvuelta en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Obtenido mediante el procesamiento completo del subproducto IW3, aplicando los pasos 4.1-4.3: exportación Snaphu (4.1), desarrollo de fase (4.2) e importación (4.3). La fase desarrollada representa la diferencia de fase absoluta y continua entre las adquisiciones, donde los valores en radianes son proporcionales al desplazamiento real del terreno. Este producto elimina las ambigüedades de 2π presentes en la fase envuelta, permitiendo la conversión directa a desplazamiento lineal. 82

Figura 49. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS) en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Producto final obtenido mediante la aplicación de los pasos 5.1-5.3 al subproducto IW3: cálculo de desplazamiento (5.1) mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) * \Delta\phi_d$, y geocodificación (5.3) a coordenadas geográficas. Los valores representan el desplazamiento en la línea de visión del sensor, donde valores negativos indican alejamiento y positivos acercamientos. El procesamiento individual del IW3 permitió optimizar el análisis para esta zona específica. 83

Figura 50. Desplazamiento con coherencia enmascarada en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Generado mediante los pasos 5.4-5.5 aplicados al subproducto IW3: máscara de coherencia (5.4) y exportación (5.5). Los valores representan el grado de similitud temporal entre adquisiciones, donde valores altos indican áreas estables con alta confiabilidad, y valores bajos corresponden a zonas con cambios temporales. Este producto se utilizó como máscara de calidad para el mapa de desplazamiento final. 84

Figura 51. Mapa de desplazamiento regional exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de las estaciones GPS. 85

Figura 52. Mapa de desplazamiento exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de la estación GPS HUAM. 86

Figura 53. Mapa de desplazamiento exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de las estaciones GPS OXPE y OXUM. 87

Figura 54. Comparación de los valores de desplazamiento GPS e InSAR por estación ubicadas en la costa de Oaxaca después del sismo. 90

Figura A1. Visualización general de la web Alaska Vertex para descarga de datos. Tomado de (ASF, 2016) 99

Figura A2. Sección de filtros de búsqueda. Tomado de (ASF, 2016) 100

Figura A3. Muestra de todas las escenas disponibles, en el área de interés. Tomado de (ASF, 2016) 100

Figura A4. Detalles de escena, después de haber seleccionado Línea base, donde se visualiza los criterios de referencia de forma gráfica. Tomado de (ASF, 2016). 101

Figura A5. Detalles de la escena 22 de junio de 2020 (pre-sismo). Tomado de (ASF, 2016). 101

Figura A6. Detalles de la escena 28 de junio de 2020 (post-sismo). Tomado de (ASF, 2016) 101

Figura A7. Diagrama de flujo que describe el proceso sistemático para la preparación de datos interferométricos, que incluye las etapas necesarias para el procesamiento y análisis de imágenes SAR. (fase I). 102

Figura A8. Lectura de los productos en el software SNAP. 103

Figura A9. Información de las bandas de valores complejos en los productos. 103

Figura A10. Operador Split. 104

Figura A11. Parámetros de procesamiento de Operador Split. 105

Figura A12. Operador Apply Orbit File. 105

Figura A13. Procesamiento de los parámetros del operador Apply Orbit File. 106

Figura A14. Operador Back Geocoding. 106

Figura A15. Lectura del set de imágenes divididas para la organización de maestra y esclava dentro del operador Back Geocoding. 107

Figura A16. Unión de los productos en función de los parámetros del DEM y sus métodos de interpolación. 107

Figura A17. Nombre del producto de salida del operador Back Geocoding. 108

Figura A18. Operador Enhanced Spectral Diversity. 109



<i>Figura A19. Parámetros del operador Enhanced Spectral Diversity.</i>	109
<i>Figura A20. Operador Interferogram Formation.</i>	112
<i>Figura A21. Parámetros del operador Interferogram Formation.</i>	112
<i>Figura A22. Procesamiento de los parámetros del operador Interferogram Formation.</i>	113
<i>Figura A23. Parte del interferograma bruto formado por el procesamiento de los parámetros del operador Interferogram Formation.</i>	115
<i>Figura A24. Operador TOPS Debrust.</i>	116
<i>Figura A25. Parámetros de procesamiento del operador TOPS Debrust.</i>	117
<i>Figura A26. Diagrama del flujo de trabajo para la creación de un mapa de desplazamiento (fase II).</i>	117
<i>Figura A27. Operador TopS-Merge.</i>	118
<i>Figura A28. Set de productos IW1, IW2 e IW3 para la fusión, operador TOPS-Merge.</i>	118
<i>Figura A29. Polarización de las subfranjas IW1 e IW2 para la fusión, operador TopS-Merge.</i>	119
<i>Figura A30. Operador Topographic Phase Removal.</i>	119
<i>Figura A31. Parámetros o productos al cual se aplica el operador Topographic Phase Removal.</i>	120
<i>Figura A32. Procesamiento de los parámetros del operador Topographic Phase Removal.</i>	120
<i>Figura A33. Operador Multilooking.</i>	122
<i>Figura A34. Procesamiento de los parámetros del operador Multilooking.</i>	122
<i>Figura A35. Operador Golden Phase Filtering.</i>	123
<i>Figura A36. Procesamiento de los parámetros del operador Golden Phase Filtering.</i>	124
<i>Figura A37. Operador Subset desde la vista de la imagen del interferograma.</i>	125
<i>Figura A38. Zona espacial en donde desea que el operador Subset extraiga o corte en la imagen del interferograma.</i>	126
<i>Figura A39. Bandas y la cuadrícula de puntos en la que se realizara el enlace para extraer en el Subset de la imagen del interferograma.</i>	126
<i>Figura A40. Subset de forma temporal de la imagen del interferograma.</i>	127
<i>Figura A41. Advertencia al momento de guardar el producto Subset se convertirá en un producto de BEAM-DIMAP.</i>	127
<i>Figura A42. Operador Shaphu Export.</i>	128
<i>Figura A43. Producto de lectura para el operador Shaphu Export.</i>	128
<i>Figura A44. Parámetros del producto para exportar dentro del operador Shaphu Export.</i>	129
<i>Figura A45. Ubicación de la herramienta de los complementos (plugins).</i>	130
<i>Figura A46. Complementos disponibles (available plugins).</i>	131
<i>Figura A47. Instalación del complemento SNAPHU Unwrapping.</i>	131
<i>Figura A48. Administrador de complementos externos.</i>	132
<i>Figura A49. Herramientas externas.</i>	132
<i>Figura A50. Instalación de la carpeta o ruta de destino para la instalación de Shaphu.</i>	133
<i>Figura A51. Carpeta bin proveniente de la instalación de Shaphu.</i>	133
<i>Figura A52. Carpeta en donde se exporto el producto con terminación ..._flt_sub.</i>	134
<i>Figura A53. Archivo de configuración seleccionado para su modificación.</i>	134
<i>Figura A54. Modificación del archivo de configuración snaphu, vista desde un bloc de notas.</i>	135
<i>Figura A55. Barra de dirección para ejecución de la CMD.</i>	136
<i>Figura A56. Vista de la CMD para ejecución de snaphu.</i>	136
<i>Figura A57. Vista de la CMD para ejecución de la línea de configuración.</i>	137
<i>Figura A58. Vista de la CMD ejecutándose la línea de configuración de snaphu.</i>	137
<i>Figura A59. Operador Snaphu Import.</i>	138
<i>Figura A60. Lectura de fase no desenvuelta para el operador Snaphu Import.</i>	138
<i>Figura A61. Selección del producto de fase desenvuelta para el operador Snaphu Import.</i>	139
<i>Figura A62. Interferograma desenvuelto.</i>	139
<i>Figura A63. Operador Phase Displacement.</i>	140
<i>Figura A64. Parámetros de entrada para el operador Phase Displacement.</i>	140
<i>Figura A65. Parámetros de procesamiento para el operador Phase Displacement.</i>	141



<i>Figura A66. Parte de la fase de desplazamiento.</i>	141
<i>Figura A67. Operador Create Stack.</i>	142
<i>Figura A68. Set de productos para el Operador Create Stack.</i>	142
<i>Figura A69. Parámetros para la creación de la pila.</i>	143
<i>Figura A70. Operador Terrain Correction.</i>	144
<i>Figura A71. Parámetros de procesamiento del operador Terrain Correction mediante el método de Range Doppler Terrain Correction.</i>	145
<i>Figura A72. Cambio de proyección de mapa dentro del operador Map Projection.</i>	146
<i>Figura A73. Mapa de desplazamiento geocodificado y corregido.</i>	147
<i>Figura A74. Operación de Band Math.</i>	147
<i>Figura A75. Creación de Band Math.</i>	148
<i>Figura A76. Creación de la expresión para enmascarar el desplazamiento mediante Band Math.</i>	148
<i>Figura A77. Expresión para enmascarar el desplazamiento mediante Band Math.</i>	149
<i>Figura A78. Mascara del desplazamiento 0.4 a partir de la matemática de bandas.</i>	149
<i>Figura A79. Importación de todos los puntos GPS, mediante Pin Manager.</i>	150
<i>Figura A80. Selección de archivo, tomando el tipo de archivo .txt, .pnf.</i>	150
<i>Figura A81. Filtrar los valores de desplazamiento en el píxel, que se mostrará en la tabla.</i>	151
<i>Figura A82. Ejemplo de los valores de desplazamiento en la estación OXPE, GPS.</i>	151



Lista de tablas

<i>Tabla 1. Frecuencia sísmica de acuerdo con los datos del SSN Oaxaca (2010 -2023).</i>	8
<i>Tabla 2. Archivos de solución obtenidos después de ejecutarse el software, para cada una de las estaciones y fechas.</i>	56
<i>Tabla 3. Descripción de los encabezados en los archivos de solución. Tomado de (Geng & Ge, 2019)</i>	57
<i>Tabla 4. Tabla de desplazamientos en sus coordenadas ENU para cada estación utilizada.</i>	62
<i>Tabla 5. Valores únicos de GPS en geometría LOS para comparar directamente con lo que mediría un píxel en InSAR para el mismo lugar e intervalo de tiempo.</i>	62
<i>Tabla 6. Aplicación del operador Split en las subfranjas IW1, IW2, IW3 y las ráfagas tomadas en el par de imágenes.</i>	70
<i>Tabla 7. Desplazamiento acumulado previo al evento sísmico en cada una de las estaciones GPS.</i>	88
<i>Tabla 8. Desplazamiento después del evento co-sísmico en cada una de las estaciones GPS con la técnica InSAR.</i>	89



Resumen

Esta investigación aborda el uso de técnicas geoespaciales avanzadas, como el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) y el INSAR (Interferometría Radar de Apertura Sintética), para determinar los desplazamientos co-sísmicos en la zona costera de Oaxaca, generados por el sismo del 23 de junio de 2020. Mediante el análisis de datos de estaciones permanentes de GPS y escenas de Radar de Apertura Sintética, se evaluó el comportamiento de la deformación terrestre y los desplazamientos inducidos por este sismo.

Los resultados obtenidos revelan una notable consistencia entre ambas metodologías. Las mediciones InSAR para el 28 de junio de 2020 registraron un desplazamiento positivo significativo de 0.3368 m en la estación HUAM, mientras que las estaciones OXUM y OXPE se observaron movimientos menores de -0.01214 m y -0.00179 m, respectivamente. Por su parte, los datos GPS procesados para el día 24 de junio de 2020 mostraron un valor muy similar en la estación HUAM (0.3351 m), corroborando la magnitud del desplazamiento co-sísmico, y un desplazamiento de -0.09043 m en la estación OXUM.

El estudio concluye que, mientras el GPS permite una evaluación rápida y puntual de los desplazamientos, la integración con InSAR proporciona una cobertura espacial densa y continua. Esta sinergia constituye una herramienta robusta para el monitoreo temporal y el análisis de procesos de deformación post- sísmica a gran escala, aportando información crítica para la gestión del riesgo sísmico en regiones vulnerables.



Abstract

This research addresses the use of advanced geospatial techniques, such as GPS (Global Positioning System) and InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar), to determine co-seismic displacements in the coastal zone of Oaxaca, generated by the earthquake of June 23, 2020. By analyzing data from permanent GPS stations and Synthetic Aperture Radar scenes, the behavior of ground deformation and the displacements induced by this earthquake were evaluated.

The obtained results reveal a notable consistency between both methodologies. InSAR measurements for June 28, 2020, recorded a significant positive displacement of 0.3368 m at the HUAM station, while the OXUM and OXPE stations showed minor movements of -0.01214 m and -0.00179 m, respectively. For its part, the processed GPS data for June 24, 2020, showed a very similar value at the HUAM station (0.3351 m), corroborating the magnitude of the co-seismic displacement, and a displacement of -0.09043 m at the OXUM station**.

The study concludes that, while GPS allows for a rapid and point-specific evaluation of displacements, integration with InSAR provides dense and continuous spatial coverage. This synergy constitutes a robust tool for the temporal monitoring and analysis of large-scale post-seismic deformation processes, providing critical information for seismic risk management in vulnerable regions.



Introducción

En las últimas décadas, el monitoreo de desplazamientos en la corteza terrestre ha ganado una relevancia significativa debido a su impacto en la comprensión de fenómenos geológicos y en la gestión de riesgos asociados. La región de Oaxaca, México, presenta una compleja configuración geológica y tectónica que la convierte en un área de particular interés para el análisis de la geodinámica regional.

El estado de Oaxaca, debido a su entorno geológico y actividad tectónica, es vulnerable a fenómenos tales como sismos y consecuentemente deformaciones corticales. La caracterización precisa de estos desplazamientos es esencial para la evaluación de riesgos y, por lo tanto, la formulación de estrategias efectivas de mitigación. La integración de datos obtenidos mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y la Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR), proporciona una visión integral del desplazamiento cortical, GPS se complementa eficazmente con la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), una técnica que permite generar mapas detallados de deformación superficiales a través del análisis de escenas satelitales antes y después de un evento sísmico.

Para el presente estudio se utilizaron dos técnicas geodésicas: GPS, que permitió la adquisición de datos precisos sobre desplazamientos superficiales, e InSAR, que ofrece información sobre deformaciones a gran escala con alta resolución espacial. La combinación de ambas metodologías permitirá un análisis exhaustivo de los patrones de desplazamiento y una caracterización detallada de la deformación superficial, mejorando la precisión de los modelos de deformación en la región.

El objetivo principal de esta investigación es analizar los desplazamientos en la región de Oaxaca mediante la integración de datos de GPS a partir de la red de estaciones OXPE, OXUM y HUAM e imágenes InSAR. Los objetivos específicos incluyen la caracterización de la deformación superficial, la identificación de patrones de desplazamiento y la generación de un mapa detallado de desplazamientos.

Este estudio proporciona información valiosa para la gestión de riesgos geológicos en Oaxaca, contribuyendo al avance en las técnicas de análisis de desplazamientos mediante el uso de tecnologías avanzadas. Los resultados obtenidos facilitarán una mejor planificación y respuesta ante eventos geológicos, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones informadas en la región.



Objetivos

Objetivo general

1. Analizar la deformación co-sísmica mediante el uso de la geodesia espacial.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la deformación superficial en estaciones mareográficas utilizando técnicas de interferometría SAR (InSAR) y Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).
2. Aplicar técnicas de geodesia espacial para estudiar los movimientos de la corteza terrestre a través de imágenes satelitales de radar de las misiones Sentinel-1A y Sentinel-1B, con el fin de realizar un análisis detallado del sismo ocurrido el día 23 de junio de 2020, cercano a la localidad La Crucecita, Oaxaca.

Alcances

El trabajo presente tiene como un alcance comparativo y descriptivo. Su objetivo principal es analizar y contrastar las mediciones de deformación costera (desplazamiento co-sísmico) asociadas al sismo del 23 de junio de 2020 en el estado de Oaxaca, empleando para ello dos técnicas geodésicas: GPS (Sistema de Posicionamiento Global) e InSAR (Interferometría de Radar de Apertura Sintética). El estudio se centra exclusivamente en comparar el desempeño y los resultados de ambas técnicas para cuantificar la deformación, evaluando la magnitud, el patrón espacial del desplazamiento detectado por cada método, así como identificar sus similitudes, discrepancias y complementariedades para este evento en particular.

Geográficamente, el estudio se circunscribió a la zona costera del estado de Oaxaca, México, específicamente al segmento de la brecha sísmica donde se localizó el epicentro del sismo. Para el análisis InSAR se utilizarán imágenes del satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea, correspondientes a órbitas ascendentes y descendentes disponibles para la fecha del evento. En el ámbito temporal, la investigación abarcó el periodo co-sísmico inmediato, analizando los datos GPS y las imágenes satelitales correspondientes al instante del sismo y los días necesarios para la formación de los interferogramas, sin incluir análisis de deformación pre-sísmica o post-sísmica.



Es importante señalar que el alcance de esta tesis se limita estrictamente a la comparación de las técnicas GPS e InSAR para la medición del desplazamiento co-sísmico. Por lo tanto, quedan fuera del alcance de este estudio:

1. La modelación de la fuente sísmica o la inversión de los datos para obtener parámetros de la falla geológica.
2. La interpretación geofísica o geológica de las causas del sismo
3. Los resultados y conclusiones son válidos únicamente para el área geográfica delimitada por las estaciones del GPS para el evento sísmico del 23 de junio de 2020 y las imágenes Sentinel-1 empleadas, sin pretender ser generalizables a otros sismos o regiones sin el debido análisis contextual.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. Localización geográfica

El estado de Oaxaca está situado en el suroeste de México, con coordenadas geográficas extremas al norte $18^{\circ}39'$, al sur $15^{\circ}39'$ de latitud norte; al este $93^{\circ}52'$, al oeste $98^{\circ}32'$ de longitud oeste, ver Figura 1. Limita al norte con los estados de Puebla y Veracruz, al sur con el océano Pacífico, al este con el estado de Chiapas y al oeste con Guerrero. Oaxaca tiene una superficie de $11,351 \text{ km}^2$ y se encuentra a una altitud promedio de $1,558$ metros sobre el nivel del mar.



Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio.

1.2. Planteamiento del problema

La República Mexicana se encuentra en una zona sísmica debido a su ubicación en la convergencia de varias placas tectónicas: la Placa Norteamericana, la Placa de Cocos, la Placa del Pacífico, la Placa de Rivera y la Placa del Caribe, ver Figura 2.

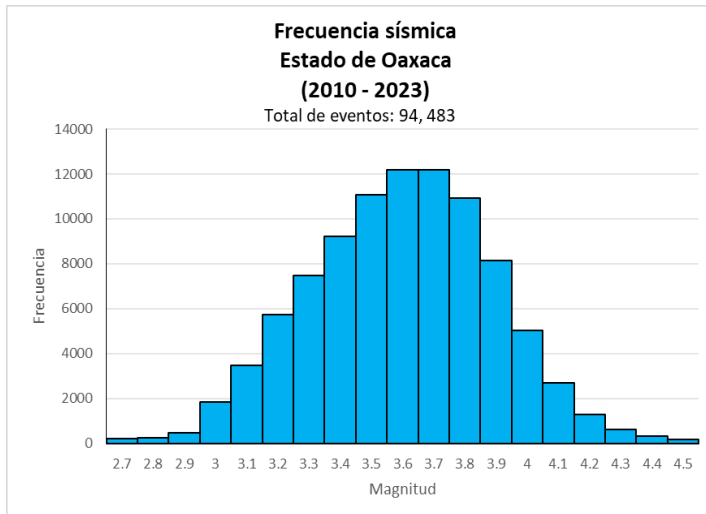


Figura 2. Placas tectónicas que interactúan en la República Mexicana. Tomado de SSN (2019)

Esta interacción entre placas resulta en una sismicidad, siendo la provincia occidental del país especialmente propensa a eventos sísmicos debido al contacto entre las placas convergentes.

En este contexto, Oaxaca destaca como una de las regiones con mayor actividad sísmica en México. Según los registros del Servicio Sismológico Nacional (SSN), Oaxaca ocupa uno de los diez primeros lugares en términos de sismicidad, con una frecuencia de eventos sísmicos de magnitud igual o mayor a 3.5 (Figura 3.) durante el periodo de 2010 a 2023.

En este período, se han registrado un total de 94,483 eventos sísmicos, como se detalla en la Tabla 1.



Oaxaca	
Magnitud	Frecuencia sísmica
1.0 - 1.9	66
2.0 - 2.9	1575
3.0 - 3.9	82278
4.0 - 4.9	10435
5.0 - 5.9	122
6.0 - 6.9	5
7.0 - 7.9	2
Total de eventos	94483

Tabla 1. Frecuencia sísmica de acuerdo con los datos del SSN Oaxaca (2010 -2023).

Figura 3. Histograma de frecuencia sísmica Estado de Oaxaca (2010 - 2023).

Aunque la mayoría de estos eventos son clasificados por el Servicio Geológico Mexicano como de daños menores (SGM, 2017), la alta densidad de sismos en la región (Figura 4.) indica una actividad sísmica significativa, con al menos dos eventos sísmicos cada 10 km².

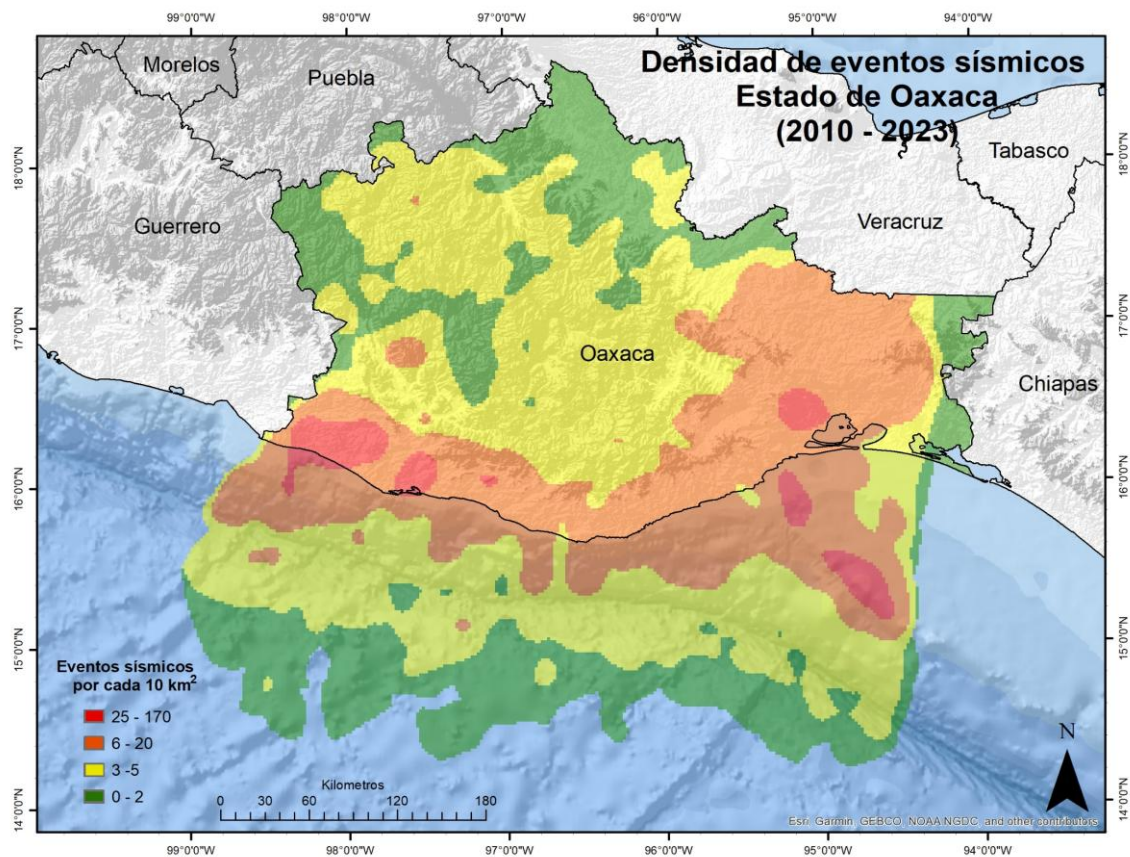


Figura 4. Mapa de densidad sísmica Oaxaca (2010 – 2023).



Analizar los movimientos sísmicos en la interacción entre la Placa Norteamericana y la Placa de Cocos en la costa de Oaxaca es crucial para caracterizar la deformación superficial resultante y comprender mejor los impactos de los eventos sísmicos en esta región.

Limitaciones en la aplicabilidad en otras zonas de estudio

El área de estudio se encuentra situada en la región costera de Oaxaca, específicamente entre los límites de la Placa Norteamericana y la Placa de Cocos. Esta ubicación presenta potenciales limitaciones para replicar este estudio en otras regiones.

Limitaciones:

1. **Cobertura geográfica restrictiva:** La zona de estudio se limita a una franja costera específica, lo que puede restringir la capacidad de generalizar los hallazgos a otras regiones con características tectónicas diferentes.
2. **Acceso a datos:** La disponibilidad y calidad de datos de GPS e imágenes SAR pueden variar según la localización. En áreas remotas o menos monitoreadas, los registros pueden ser incompletos o menos precisos, afectando la precisión del análisis.
3. **Variabilidad tectónica local:** La interacción entre las placas Norteamericana y Cocos puede generar una alta variabilidad en los tipos y magnitudes de eventos sísmicos. Esto puede complicar la caracterización de la deformación superficial y la interpretación de los resultados.

1.3. Tectónica de placas

La tectónica de placas describe la dinámica de la litosfera terrestre, la capa rígida que se divide en grandes fragmentos llamados placas tectónicas. Estas placas flotan sobre el manto superior, que es una capa semiplástica del manto terrestre. La litosfera se compone principalmente de dos tipos de corteza: la corteza oceánica y la corteza continental.

La corteza oceánica, formada por rocas basálticas, es más densa $\sim 3.0 [g/cm^3]$ y más delgada, con un grosor promedio de unos ~ 7 kilómetros. En contraste, la corteza continental, compuesta predominantemente por rocas graníticas, es menos densa $\sim 2.7 [g/cm^3]$ y más gruesa, alcanzando un grosor de ~ 35 kilómetros. Tarbuck y Lutgens (2005) indican que la corteza continental, al ser más gruesa y menos densa, flota sobre la astenosfera a una altitud mayor que la corteza oceánica (p. 21).

La litosfera está dividida, como se muestra en la Figura 5.

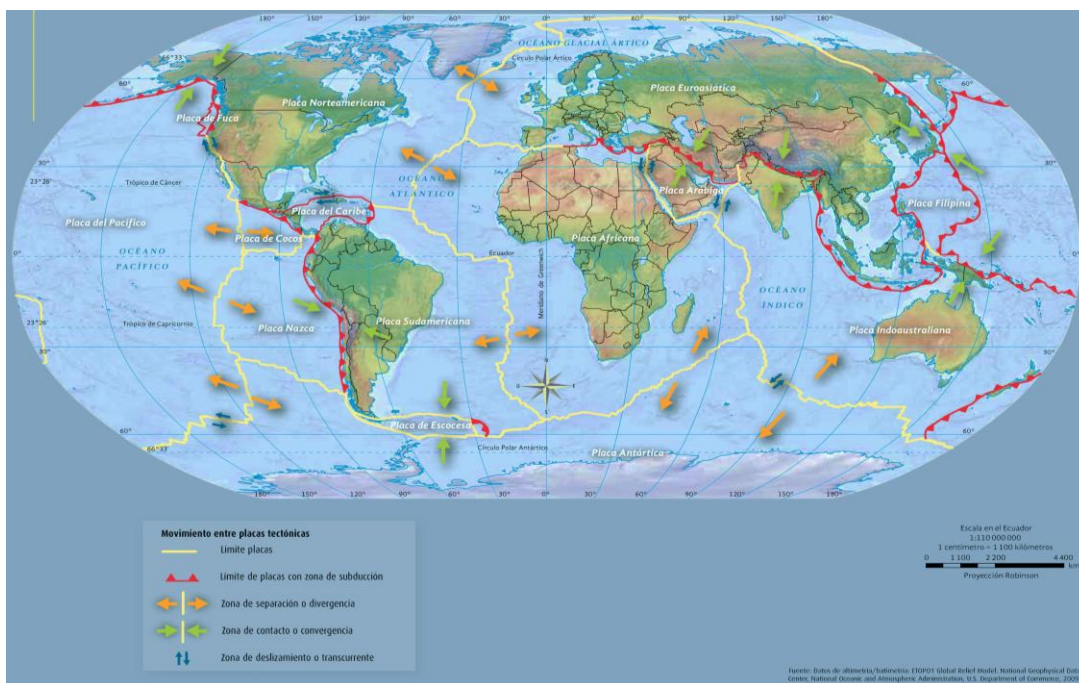


Figura 5. Placas tectónicas del mundo. Tomado de Atlas de Geografía del mundo p. 27

Estas placas no necesariamente coinciden con la distribución de continentes y océanos, por lo tanto, varias de ellas incluyen corteza oceánica, así como continental. La teoría de la tectónica de placas postula que estas placas se mueven sobre la astenosfera debido a procesos térmicos y se mueven de forma rígida, sin deformación interna, sobre una astenosfera más caliente y débil. (Wicander & Monroe, 2007)

1.3.1. Modelos de placas tectónicas

Los primeros modelos de una descripción global de las placas tectónicas fueron propuestos por Xavier Le Pichón y William Jason Morgan en 1968 (Harrison, 2016). Le Pichón presentó un modelo con seis placas, mientras que Morgan desarrolló un modelo con quince placas, que incluía algunas adicionales en comparación con el modelo de Le Pichón. En los años 90, el modelo de Nuvel-1A de DeMets, Argus, y Gordon (1994), es ampliamente utilizado, incluyó doce placas principales y doce adicionales, integrando datos sobre expansión oceánica, fallas transformantes y mecanismos focales de sismos, así como datos paleomagnéticos recientes. Posteriormente, Bird (2003) propuso el Modelo PB, que amplía el modelo de Nuvel con treinta y ocho microplacas adicionales, especialmente en el suroeste del Pacífico, reconociendo zonas difíciles de cuantificar, pero proporcionando un modelo más detallado.

Procesos tectónicos y sismología

Los procesos geológicos asociados con la tectónica de placas incluyen la formación de montañas, actividad sísmica y vulcanismo. La sismología ha permitido entender el mecanismo focal de los sismos, la geometría de las fallas y los procesos de ruptura asociados. El análisis de las ondas sísmicas revela la naturaleza de las deformaciones en las placas (Calmus, 2021), como se ilustra en la Figura 6.

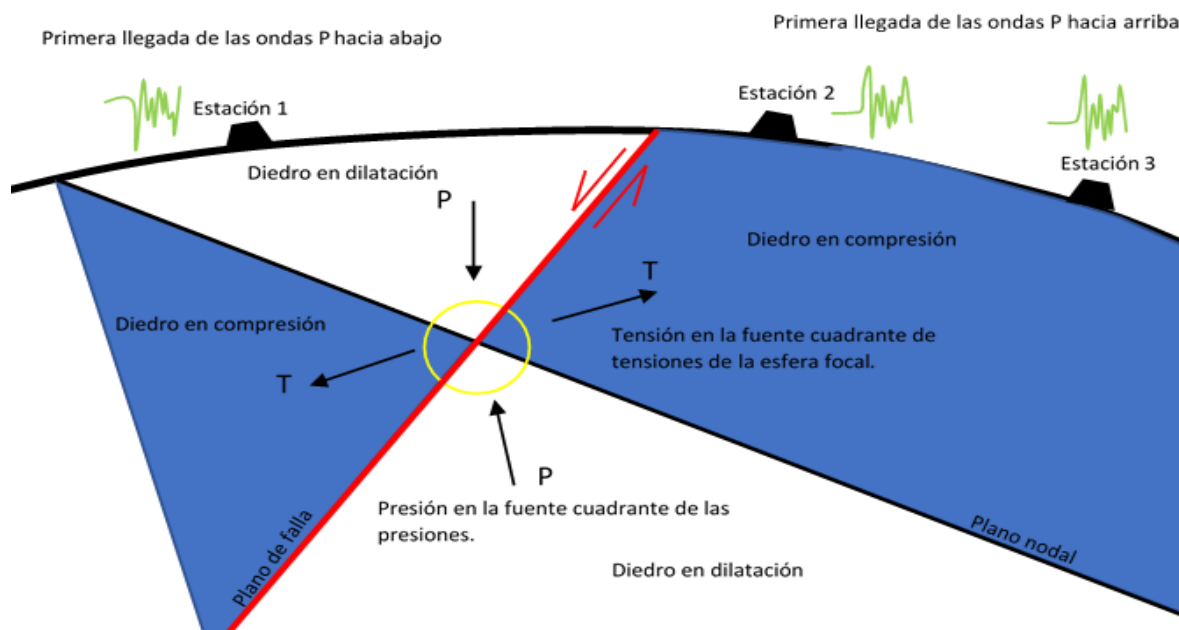


Figura 6. Plano nodal o auxiliar. Modificado de Calmus (2021)

El mecanismo focal de un sismo se representa en un plano nodal, donde se definen cuatro diedros: dos en dilatación y dos en compresión. La dirección de la onda P al llegar a una estación sismológica indica el tipo de deformación. Esto permite identificar el régimen tectónico y el estilo de deformación asociado con el sismo. Los mecanismos focales pueden ser fallas normales (en extensión), fallas inversas (en compresión) y desplazamientos laterales (Calmus, 2021), como se muestra en la Figura 7.

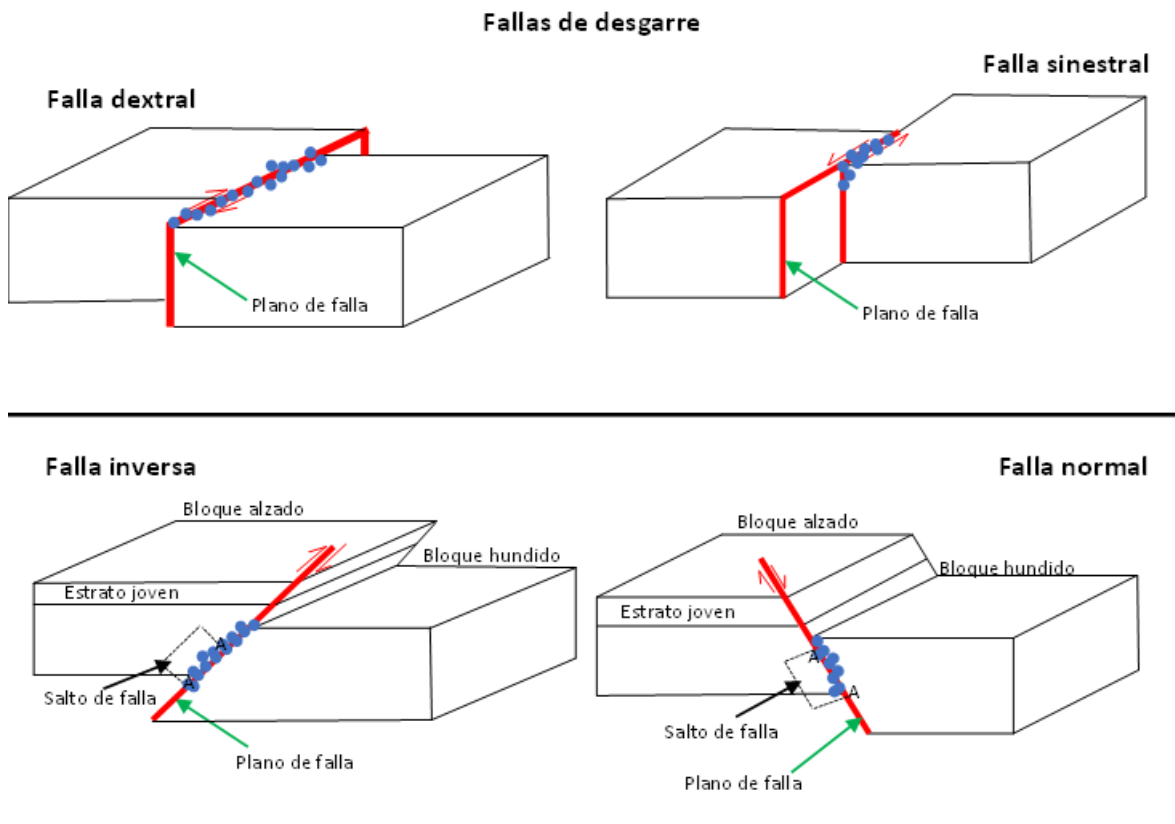


Figura 7. Principales deformaciones de los límites de placa. Modificado de Maldonado Yandry (2020)

1.3.2. Movimientos de placas

Tenemos tres tipos principales de movimientos de placas (Figura 8.) son:

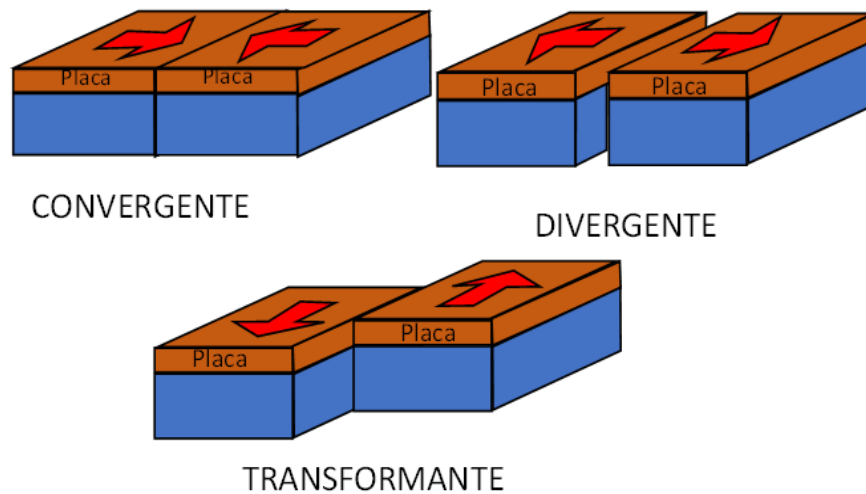


Figura 8. Movimientos de placas. Modificado de López Briceño E. et al (2014)

1. Divergencia:

Las placas se alejan, formando dorsales oceánicas y rifts. Este proceso genera nueva corteza oceánica y está asociado con magmatismo en las dorsales (Calmus, 2021).

2. Convergencia:

Las placas se acercan, y una placa se hunde debajo de la otra en zonas de subducción. Esto puede ocurrir entre una placa oceánica y una continental (generalmente con ángulo de subducción menor) o entre dos placas oceánicas (con ángulo de subducción que puede ser más pronunciado). La subducción induce magmatismo y puede formar arcos magmáticos sobre los continentes o arcos insulares (Calmus, 2021).

3. Desplazamiento lateral o transformante:

Las placas se deslizan horizontalmente a lo largo de fallas transformantes, con desplazamientos que pueden ser derechos o izquierdos. Esto puede crear cuencas y movimientos de compresión o transpresión (Calmus, 2021).

1.3.3. Fuerzas tectónicas

El sistema tectónico está impulsado por diversas fuerzas, entre las cuales destaca la fuerza potencial asociada con la topografía y el peso de las placas oceánicas. En las zonas de subducción, el peso de la placa subducida y el crecimiento de la densidad de la litosfera oceánica juegan un papel crucial en el movimiento de las placas y la formación de dorsales y zonas de subducción (Calmus, 2021).



1.3.4. Ciclo sísmico

De acuerdo con Scholz, C. H., (2002), el ciclo sísmico describe la secuencia de eventos sísmicos y deformaciones en una región a lo largo del tiempo. Este ciclo incluye varias fases:

1. Acumulación de esfuerzo:

Las placas tectónicas se mueven lentamente, acumulando esfuerzo en las fallas. Este esfuerzo se acumula debido a las interacciones entre placas, como la convergencia, divergencia o desplazamiento lateral.

2. Ruptura y sismo:

Cuando el esfuerzo acumulado supera la fuerza de fricción de la falla, se produce una ruptura, liberando energía en forma de ondas sísmicas. Este evento se manifiesta como un sismo.

3. Liberación de energía:

La ruptura de la falla libera la energía acumulada, provocando el sismo. La liberación de energía también provoca la redistribución de esfuerzos en la región afectada y deformación en la superficie terrestre.

4. Relajación y recuperación:

Después del sismo, la región comienza a relajarse y recuperarse. El terreno puede experimentar ajustes menores y la acumulación de esfuerzo se reinicia, comenzando un nuevo ciclo sísmico.

5. Ciclo continuo:

Este proceso se repite continuamente, con los eventos sísmicos y la acumulación de estrés conformando el ciclo sísmico, (p. 89-110).

El estudio de estos ciclos ayuda a comprender la dinámica de las placas tectónicas y los patrones de actividad sísmica en una región.



1.4. Aspectos geológicos de Oaxaca

La región costera de Oaxaca se encuentra en la convergencia de dos placas tectónicas, la Placa Norteamericana, la Placa de Cocos. Esta región es conocida por su alta actividad sísmica. Este proceso genera una acumulación de tensiones y deformación en la corteza terrestre, creando un entorno propenso a la generación de sismos.

1.4.1. Marco geológico estructural de Oaxaca

Se sitúa en la Provincia Sierra Madre del Sur, una unidad fisiográfica compuesta por diversas subprovincias. Al noreste, limita con las Sierras Plegadas y presenta una pequeña porción en la frontera con la Provincia Llanura Costera del Golfo y la subprovincia Llanura Costera Veracruzana (González Ramos & Arceo y Cabrilla, 2019).

1.4.2. Marco estructural de Oaxaca

Oaxaca muestra características geológicas complejas, resultado de eventos tectónicos superpuestos a lo largo del tiempo. Estos eventos han generado una gran diversidad de unidades litológicas expuestas. Las estructuras geológicas emergidas en áreas continentales muestran un entorno mixto de depósitos continentales y marinos, resultado de plegamientos y movimientos verticales intensos causados por intrusiones.

Actualmente, la interacción entre la Placa oceánica de Cocos y la Placa Norteamericana da forma a la Trinchera Norteamericana, una zona de subducción donde la Placa de Cocos se introduce bajo la Placa Norteamericana. Esta interacción origina perturbaciones en la corteza terrestre, responsables de los movimientos sísmicos en Oaxaca, Guerrero y Michoacán (SGM, 2004; SSN, 2019)

El Servicio Geológico Mexicano (1997), divide la corteza continental de Oaxaca en cinco sectores cada uno con sus estructuras características:

1. Sector Tonalá, localizada en el extremo occidental.
2. Sector Teposcolula – Achuitla, ubicada en la porción centro – occidental.
3. Sector Tecomavaca – Cuicatlán, localizada en la porción norte.
4. Sector Etla – Telixtlahuaca, ubicado en la porción centro – sur.
5. Sector Valle Nacional, localizado en el extremo nororiental.

1.4.3. Marco tectónico de Oaxaca

Oaxaca se encuentra en una región tectónicamente activa del sur de México, sobre varias placas tectónicas, entre las que destacan la Placa Norteamericana, la Placa de Cocos, la Placa de Rivera, la Placa del Caribe y la Placa del Pacífico, ver Figura 9.



Figura 9. Placas tectónicas que interactúan en la República Mexicana. Tomado de (Montero Aguilar, 2010)

La interacción entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana genera importantes procesos tectónicos en Oaxaca, incluyendo fallas y pliegues. Este proceso contribuye al incremento de material en la corteza continental y a la formación de un talud continental prominente. (SISPLADE, 2022)

Unidades tectónicas en Oaxaca

De acuerdo con Montero (2010), Oaxaca está dividido en varias unidades tectónicas, cada una con características y formaciones geológicas distintas, como se muestra en la Figura 10:

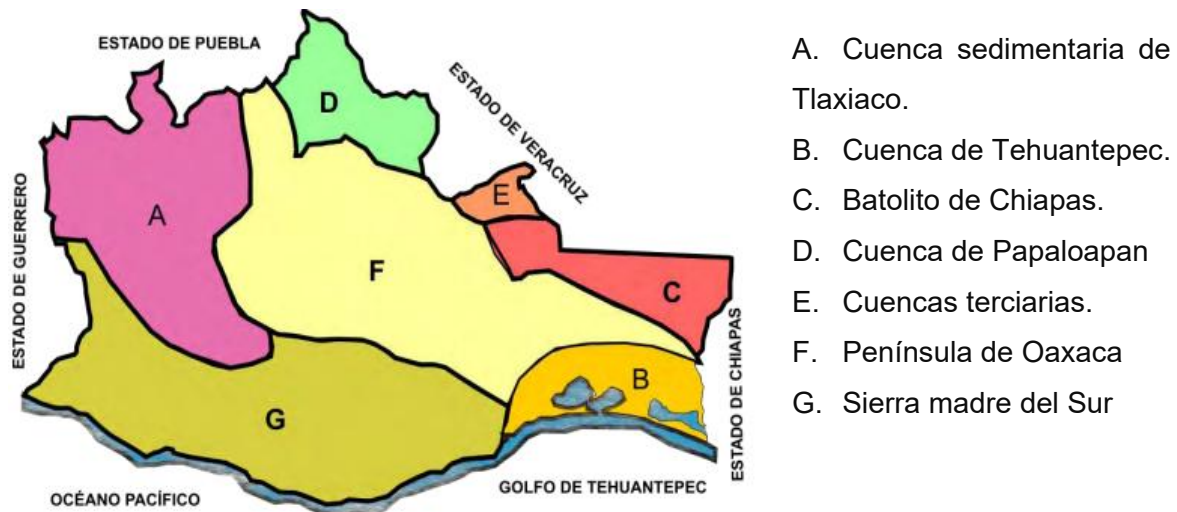


Figura 10. Mapa tectónico del estado de Oaxaca. Tomado de (Montero Aguilar, 2010)

Estas unidades representan una combinación de cuencas sedimentarias, batolitos y formaciones estructurales que reflejan la compleja historia tectónica de la región.

1.4.4. Historial sísmico en Oaxaca

Oaxaca ha sido escenario de varios eventos sísmicos significativos recientes:

- Terremoto de 1978: Un evento sísmico importante que afectó al estado de Oaxaca, provocando daños en infraestructuras y alteraciones en el terreno.
- Terremoto de 1999: Otro evento relevante en la región, con impacto en la población y en las estructuras locales.
- Eventos Recientes: En años recientes, Oaxaca ha seguido experimentando actividad sísmica, con temblores y terremotos que reflejan la continua interacción entre las placas tectónicas

La relación entre la actividad sísmica y la tectónica de placas en Oaxaca es fundamental para comprender el patrón de deformación y la configuración del relieve en la región. Esta interacción contribuye a la dinámica de la corteza terrestre, con consecuencias significativas para la sismicidad.



Aplicación de técnicas GPS e InSAR para el análisis de desplazamiento tectónico co- sísmico en La Crucecita, Oaxaca, México

Durante eventos co-sísmicos importantes, como el terremoto ocurrido en La Crucecita, Oaxaca, México del 23 de junio 2020 con magnitud de 7.4 Mw, Hacer uso combinado de GPS e InSAR ofrece una mayor comprensión de la deformación del terreno. Mientras el GPS permite un monitoreo continuo y detallado en puntos discretos, InSAR proporciona un panorama sinóptico del desplazamiento co-sísmico, permitiendo identificar patrones de deformación que podrían pasar desapercibidos solo con el GPS. La capacidad de las técnicas InSAR para generar mapas de desplazamientos facilita la visualización de los efectos del terremoto en áreas extensas, brindando información clave para el análisis del ciclo sísmico.

Capítulo 2. Técnicas geoespaciales

2.1. GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, se encuentra operativo desde 1993, está diseñado para determinar con alta precisión las coordenadas espaciales dentro con un sistema de referencia global y geocéntrico. Este sistema permite la localización en tiempo real, sin verse afectado por las condiciones atmosféricas.

El GPS se basa en una constelación de por lo menos 24 satélites. Para calcular la ubicación, el sistema requiere la medición simultánea de distancias de al menos cuatro satélites, cuyas posiciones son previamente conocidas. Estas distancias se obtienen a partir de las señales emitidas por los satélites y recibidas por receptores especializados. Las posiciones de los satélites son suministradas al receptor por el propio sistema GPS.

El tiempo del sistema GPS está definido por relojes atómicos de cesio, que se sincronizan con el Tiempo Universal Coordinado (UTC). La unidad de tiempo utilizada es el segundo atómico.



2.1.1. Constitución del sistema GPS

El método GPS está compuesto por tres segmentos fundamentales:

1. Segmento espacial:

El segmento espacial está compuesto por una constelación de 24 satélites distribuido en seis planos orbitales (cuatro satélites por plano), con orbitas elípticas a unos 20, 180 km de altitud (ver Figura 11.). Cada satélite completa una órbita alrededor de la tierra en aproximadamente 11 horas y 58 minutos, lo que garantiza que al menos 4 satélites sean visibles simultáneamente desde cualquier punto del planeta.

Desde la perspectiva de un receptor de la tierra, un satélite individual puede permanecer observable durante 4 horas y 15 minutos por pasada.

Estos satélites transmiten señales unidireccionales en la banda L (entre 1000 MHz y 3000 MHz), utilizando tres frecuencias principales:

- L1 (1575.42 MHz): Modulada con los códigos C/A (civil) y P (militar), además del mensaje de navegación.
- L2 (1227.60 MHz): Originalmente solo con código P, pero modernizada con L2C (para uso civil con mayor precisión).
- L5 (1176.45 MHz): Introducida en satélites más recientes para aplicaciones críticas (aviación, emergencias), con mayor ancho de banda y resistencia a interferencias.

Cada satélite se identifica mediante un código PRN (Pseudo Random Noise) único, que permite a los receptores distinguir entre las señales de múltiples satélites. Adicionalmente todas las portadoras (L1, L2/L2C y L5) incluyen un mensaje de navegación con efemérides, correcciones de reloj y estado de la constelación.

Las estaciones de monitoreo se encuentran estratégicamente distribuidas en ubicaciones de alta precisión alrededor del mundo. Cada una cuenta con receptores GPS de doble frecuencia (L1/L2) y relojes atómicos de cesio, lo cual les permite medir con exactitud las distancias a todos los satélites visibles. Además, recopilan datos meteorológicos locales.

Toda esta información se transmite a la Estación de Control Maestra, ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Schriever (Colorado, EE. UU.) que centraliza las operaciones del sistema. Esta estación (que integra datos de 10 estaciones remotas, ver Figura 13.) procesa las mediciones para calcular:

1. Los parámetros orbitales actualizados de los satélites.
2. Los ajustes necesarios para sincronizar sus relojes atómicos.

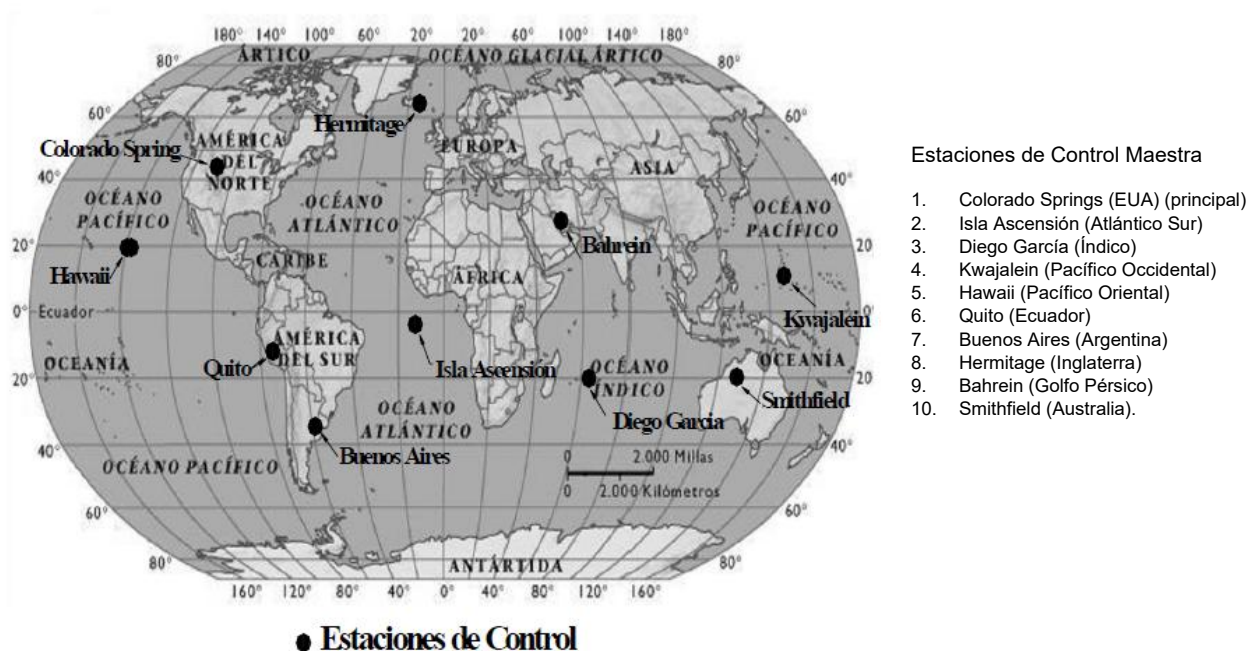


Figura 13. Estaciones de control maestras en el mundo. Tomado de (Huerta & et. al, 2005)

Finalmente, los parámetros corregidos se envían a las antenas terrestres mediante un enlace en banda S, considerando una Δt (diferencia de emisión y recepción de las señales) para garantizar la precisión en la corrección del tiempo.

➤ Infraestructura relacionada con el segmento de control en México

1. Estaciones de monitoreo GPS

México alberga estaciones de referencia que forman parte de redes globales o nacionales, como:



- La red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas): Incluye múltiples estaciones GPS de alta precisión en territorio mexicano (ej. estaciones del INEGI o UNAM).
- Servicio de Corrección Diferencial (SBAS): México participa en sistemas como WAAS (EE. UU.), que usa estaciones terrestres para corregir errores del GPS en aviación.

3. **Segmento del Usuario:**

Comprende los equipos que reciben y procesan las señales de los satélites del GPS para calcular la posición y/o la hora precisa. Este segmento está constituido por una antena y un receptor, con equipos complementarios para la transferencia de datos entre receptores. La antena, conectada al receptor por cable o en una sola unidad, calcula las coordenadas en el centro de fase de la antena.

El receptor, permite la recepción y procesamiento simultáneo de señales de cada satélite.

Aspectos geodésicos

El GPS es esencial en geodesia para crear y mantener redes de control geodésico tridimensionales a nivel nacional y global. Además, el GPS permite observar fenómenos geológicos como el desplazamiento de los polos, las mareas terrestres y los movimientos de la corteza terrestre.

2.1.2. Sistema de coordenadas GPS

El sistema de Posicionamiento Global (GPS) utiliza un sistema de coordenadas geodésicas basado en un elipsoide de revolución (utilizado para aproximar la forma de la Tierra, ver Figura 14.) para representar puntos sobre la superficie de la Tierra. (Lichtenegger, Hofmann-Wellenhof, & Wasle, 2008)

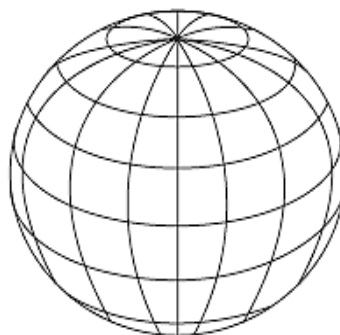


Figura 14. Elipsoide de revolución, es una esfera aplanada o achatada sobre sus polos, el elipsoide elegido será aquel que mejor se ajuste a la forma de la Tierra, no es una superficie física. sino que es una superficie definida matemáticamente.

Este elipsoide coincide con el origen del sistema cartesiano y el semieje menor con el eje Z. Por tanto, es posible obtener las coordenadas geodésicas, φ , λ y h (Figura 15.) (Huerta & et. al, 2005)

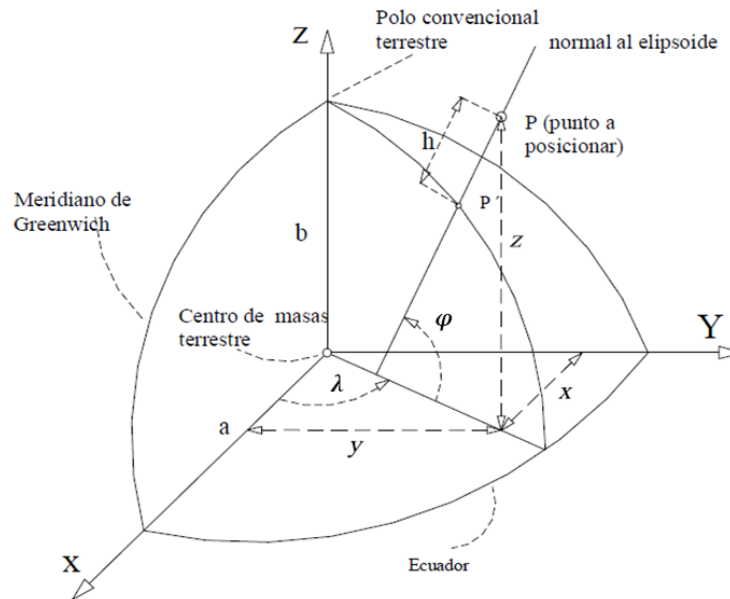


Figura 15. Coordenadas geodésicas del punto P, mediante coordenadas geodésicas y cartesianas. Tomado de (Huerta & et. al, 2005)

De esta manera tenemos que cada sistema de referencia geodésico tendrá asociado un elipsoide de revolución (Figura 16.).

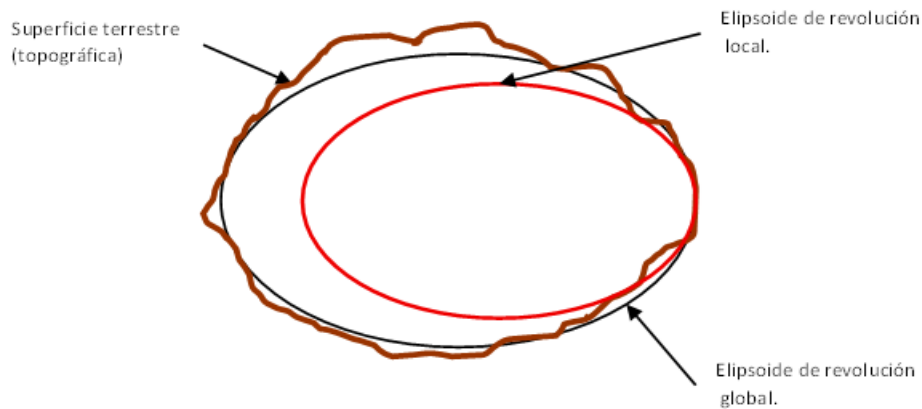


Figura 16. Relación entre los elipsoides y la superficie terrestre.

Por lo tanto, para las coordenadas geodésicas de la posición de un punto P en la superficie terrestre se define mediante su latitud, longitud y altura elipsoidal. Alternativamente, la posición puede determinarse utilizando un sistema de coordenadas cartesianas basado en las distancias a los ejes X, Y, Z, método básico empleado por el GPS para definir la ubicación de un punto en el espacio.

Altura

Las alturas medidas con GPS se expresan con relación al sistema de referencia WGS84 y se conocen como alturas elipsoidales. Las alturas ortométricas, por otro lado, se miden con relación al nivel medio del mar, que corresponde a la superficie del geoide. El geoide, una superficie equipotencial del campo gravitacional constante, presenta una forma irregular que no coincide con el elipsoide, ver Figura 17.

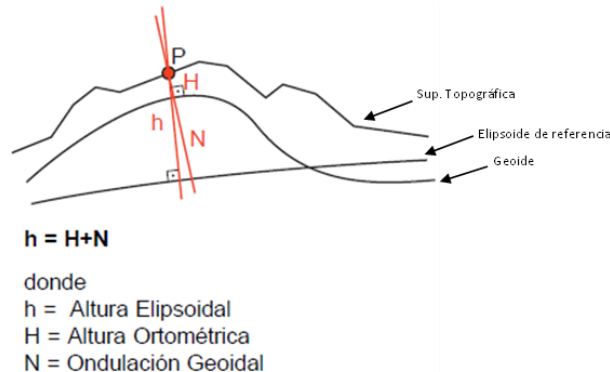


Figura 17. Relación entre la altura ortométrica y la altura elipsoidal. Mejorado de (Leica, 2015)

La mayoría de los mapas muestran alturas ortométricas, por lo que al usar GPS a menudo se requieren alturas ortométricas también. Esto se resuelve mediante modelos geoidales que convierten alturas elipsoidales en alturas ortométricas, utilizando técnicas de interpolación en áreas relativamente planas donde el geoide puede considerarse constante.

2.1.3. Levantamientos

Existen diversas técnicas para realizar levantamientos utilizando GPS, cada una adaptada a diferentes necesidades de precisión. A continuación, se describen las principales técnicas empleadas a levantamientos diferenciales:

1. Levantamiento Estático

Esta técnica se utiliza para medir distancias largas, como en redes geodésicas. Ofrece una alta precisión, pero requiere más tiempo en comparación con otros métodos. El procedimiento implica colocar un receptor en un punto conocido (Receptor de Referencia) y otro en el extremo de la línea (Receptor Móvil). Los datos se registran simultáneamente en ambos puntos con intervalos que pueden ser de 15, 30 o 60 segundos.



2. Levantamiento Estático Rápido

Este método es ideal para establecer redes de control locales o densificar redes geodésicas existentes, ofreciendo alta precisión en distancias más cortas, ya que requiere menos tiempo de observación que el levantamiento estático. Al igual que en el método estático, se utilizan un Receptor de Referencia y uno o varios Receptores Móviles, pero con intervalos de registro y tiempos de observación más cortos.

3. Levantamiento Cinemático

El levantamiento cinemático es un método utilizado para capturar un gran número de puntos de manera rápida, siendo ideal para mediciones en áreas donde los puntos están cercanos entre sí. Este método implica el uso de un equipo móvil cuya posición se determina en relación con una estación de referencia.

El proceso inicia con una fase de "iniciación", similar al levantamiento estático rápido, donde tanto el equipo móvil como la estación de referencia deben permanecer estáticos durante 5 a 20 minutos, dependiendo de la distancia a la estación y el número de satélites disponibles. Esta fase es crucial para resolver ambigüedades en el procesamiento de datos. Una vez completada la iniciación, el equipo móvil puede moverse libremente y registrar posiciones de manera continua o a intervalos predefinidos, conocido como "cadena cinemática".

4. RTK (Real Time Kinematic)

El método RTK (Cinemático en Tiempo Real) utiliza un enlace de radio para transmitir datos desde la estación de referencia al equipo móvil, permitiendo calcular y mostrar coordenadas en tiempo real durante el levantamiento.

La estación de referencia retransmite los datos satelitales al receptor móvil, que recibe tanto la señal de referencia como la señal directa de los satélites. Al combinar estos datos, se resuelven las ambigüedades y se obtienen posiciones con una precisión de 1 a 5 cm respecto a la estación de referencia. Una vez que el receptor móvil está activo y conectado a la estación de referencia, inicia el proceso de inicialización en tiempo real, similar al levantamiento cinemático. Después de esta fase, el equipo móvil puede registrar puntos con alta precisión. Es crucial mantener la conexión con la estación de referencia, ya que cualquier pérdida de esta conexión puede reducir significativamente la precisión de las mediciones, especialmente en áreas con obstrucciones como edificios altos o árboles.



2.1.4. Fuentes de errores

1. Retrasos ionosféricos y atmosféricos

Cuando las señales GPS atraviesan la ionosfera, su velocidad de transmisión se retarda. Estos retrasos pueden introducir errores en las mediciones de distancia debido a la variabilidad en la velocidad de propagación. Dos factores influyen en estos retrasos:

a. Elevación del satélite

Las señales de satélites con ángulos de elevación bajos experimentan mayores retrasos, ya que recorren una mayor distancia a través de la atmósfera.

b. Influencia solar

El contenido de electrones libre en la ionosfera varía con la actividad solar, siendo mínima durante la noche y máxima durante el día. Además, eventos como llamaradas solares pueden causar variaciones súbitas.

- Mitigación de errores ionosféricos

1. Método de corrección promediada

Aplica un promedio del efecto ionosférico en las señales, aunque tiene limitaciones.

2. Método de doble frecuencia

Utiliza receptores GPS que captan señales L1 y L2, permitiendo estimar con mayor precisión el retraso causado por la ionosfera.

2. Retraso troposférico

a. Retraso húmedo (Wet delay)

Causado por el vapor de agua en la atmósfera puede afectar las señales GPS, depende de la humedad relativa y la temperatura, la principal fuente de incertidumbre en la corrección troposférica es más variable y difícil de predecir.

b. Retraso seco (Dry delay)

Causado por los gases atmosféricos principales (nitrógeno, oxígeno, argón, CO₂), este es predecible porque depende de la presión atmosférica y la temperatura, se puede modelar con mayor precisión usando datos meteorológicos.

3. Errores en el reloj del satélite y del receptor

Los relojes atómicos en los satélites son altamente precisos, pero pueden experimentar variaciones que introducen errores en la determinación de posiciones. El Departamento de Defensa de Estados Unidos monitorea continuamente estos relojes para corregir cualquier desviación. Los receptores, que tienen relojes menos precisos, también



contribuyen a los errores debido a factores como hardware y software. Es crucial implementar modelos específicos y filtros de navegación para mitigar estos efectos.

4. Efecto Multi-trayectoria

Este error ocurre cuando un receptor GPS está cerca de superficies reflectantes, como cuerpos de agua o edificios. En este caso, la señal del satélite se refleja antes de llegar al receptor, lo que genera mediciones erróneas. Para mitigar este efecto, se pueden usar antenas GPS especializadas con un plano de supresión o antenas de bobina anular (choke ring antennas), que eliminan señales reflejadas y minimizan el impacto del multi-trayectoria.

5. Dilución de la Precisión (DOP)

La Dilución de la Precisión (DOP) es un indicador que refleja la calidad de la geometría de los satélites en relación con la posición del receptor. Este parámetro está relacionado con la disposición espacial y la distancia entre los satélites. Un DOP elevado puede amplificar el impacto de los errores en la medición de distancias a los satélites.

La precisión en la localización depende de cómo están distribuidos los satélites. Si están óptimamente posicionados, el receptor puede determinar su ubicación con un margen de error mínimo. Sin embargo, si los satélites están agrupados, el área de incertidumbre se amplía, aumentando la dificultad para localizar con precisión.

Existen diferentes tipos de DOP que se pueden calcular según la dimensión:

a. VDOP (Dilución Vertical de la Precisión).

Indica la degradación de la exactitud en la dirección vertical.

b. HDOP (Dilución Horizontal de la Precisión).

Refleja la degradación de la exactitud en la dirección horizontal.

c. PDOP (Dilución de la Precisión en Posición.)

Mide la degradación de la exactitud en la posición tridimensional.

d. GDOP (Dilución de la Precisión Geométrica).

Proporciona una evaluación de la degradación de la exactitud en la posición tridimensional y en el tiempo.

El GDOP es el más relevante, ya que combina todos estos factores. Sin embargo, algunos receptores solo calculan el PDOP o el HDOP, que no consideran el componente temporal. Para minimizar el efecto del GDOP, se recomienda observar el mayor número posible de satélites. Es importante tener en cuenta que las señales de satélites con baja elevación son más susceptibles a errores.



2.1.5. Aplicaciones del GPS

El GPS tiene una amplia variedad de aplicaciones en diversos campos, especialmente en ingeniería. Algunas de las principales aplicaciones son:

1. Geodesia y redes de control:

- Establecimiento y mantenimiento de redes geodésicas a nivel nacional y continental.
- Seguimiento de movimientos tectónicos y deformaciones de la corteza terrestre.
- Determinación precisa de la forma y dimensiones de la Tierra (geoide).
- Monitoreo de estructuras para detectar movimientos y deformaciones en puentes, presas, edificios y otras construcciones.
- Seguimiento de deslizamientos de tierra, hundimientos, evaluación de riesgos sísmicos y otros fenómenos geológicos.

2. Levantamientos topográficos y cartografía:

- Realización de levantamientos topográficos de alta precisión para la creación de mapas y modelos digitales del terreno.
- Cartografía de carreteras, ferrocarriles, edificios, redes de servicios públicos y otros elementos.
- Levantamientos hidrográficos para la elaboración de cartas náuticas.

3. Agricultura de precisión:

- Guiado automático de maquinaria agrícola para optimizar labores de siembra, aplicación de insumos y cosecha.
- Mapeo de rendimientos y variabilidad de suelos para una gestión más eficiente.

4. Minería y exploración:

- Localización precisa de yacimientos minerales, pozos de petróleo y gas.
- Seguimiento de maquinaria y personal en minas a cielo abierto y subterráneas.

5. Gestión de recursos naturales:

- Mapeo de bosques, humedales y otros ecosistemas para fines de inventario y conservación.

6. Monitoreo de cambios en la cobertura y uso del suelo.



2.2. Sistema de Radar de Apertura Sintética

Fundamentos de Percepción Remota con el sistema de radar

La Percepción Remota es una ciencia y técnica que se enfoca en adquirir, procesar e interpretar la información sobre objetos o áreas a distancia mediante el uso de sensores. Esta metodología se fundamenta en la detección y medición de la radiación electromagnética que interactúa con la superficie observada, lo que permite obtener información sin necesidad de contacto directo con el objeto o área en estudio.

La recopilación de información mediante Percepción Remota puede llevarse a cabo utilizando una variedad de métodos y tipos de sensores, dependiendo de la aplicación específica. Aunque las imágenes fotográficas son un recurso común, existen sistemas más avanzados que permiten la obtención de datos desde plataformas terrestres, aéreas o satelitales.

Díaz Santana (2016) menciona que los elementos clave de la Percepción Remota son:

1. **Sensor:** Es el dispositivo encargado de medir la energía reflejada por el objeto o área observada. Los sensores pueden estar instalados en plataformas satelitales, aéreas o terrestres.
2. **Fuente de energía:** Proporciona la radiación que ilumina el objetivo, generalmente en forma de microondas electromagnéticas en los sistemas activos.
3. **Área, escena u objetivo:** Corresponde a la porción de la superficie terrestre observada por el sensor. El tamaño del área observada depende de la resolución del sensor y de la plataforma donde esté montado, abarcando desde metros hasta kilómetros.

Sensores

- **Sensores pasivos:**
Son aquellos que captan la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre, la cual proviene de una fuente natural de energía, como el Sol. Estos sensores permiten analizar la información contenida en la radiación reflejada para inferir las características de los objetos en la superficie. Ejemplos de sensores pasivos incluyen los sistemas ópticos como los satélites Landsat y meteorológicos como Meteosat.

- Sensores activos:

Son aquellos que generan su propia fuente de energía, generalmente en forma de ondas de microondas, para iluminar los objetos observados. Estos sensores miden la señal retrodispersada por los objetos, proporcionando información detallada sobre sus características físicas. Entre los sensores activos se encuentran los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR), como los satélites Sentinel-1 y RADARSAT, y los sistemas LiDAR.

Características del SAR

Una característica que contiene el Radar de Apertura Sintética es la frecuencia de operación en la que los sensores detectan las ondas electromagnéticas, siendo estas en las bandas de microondas. Estas longitudes de onda son más largas que la luz visible, lo cual a los radares SAR les permite superar las limitaciones atmosféricas como nubosidad u oscuridad, asegurando su funcionamiento continuo en cualquier condición climática.

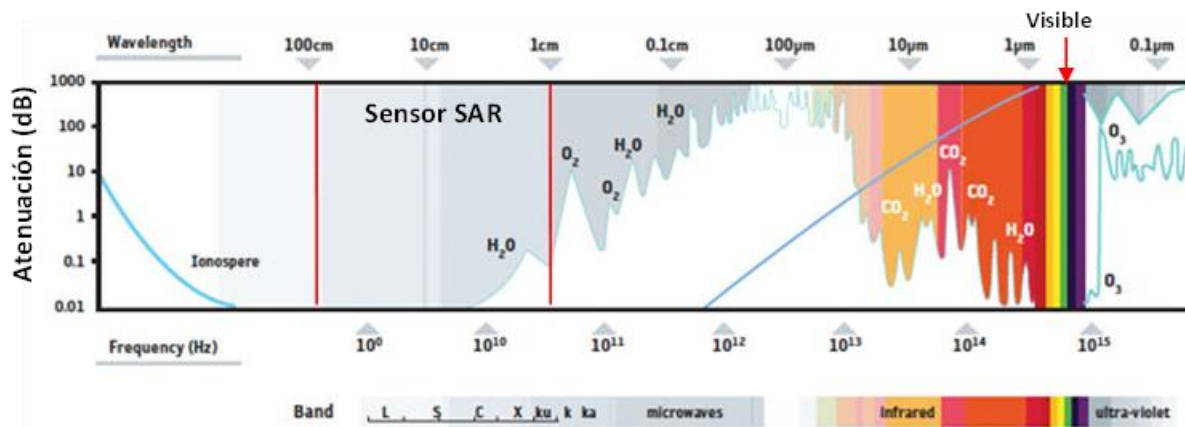


Figura 18. Absorción atmosférica en el espectro electromagnético. Modificado de ESA.

Como se muestra en la Figura 18, la atmósfera terrestre por su composición atenúa en diferente intensidad la radiación electromagnética que interactúa con la superficie terrestre. Estas ondas al atravesar la superficie presentan una pérdida de energía mínima en un rango de longitud de onda que va desde un metro a un milímetro (en rango de frecuencia de 300 MHz a 300 GHz). Por lo tanto, esta mínima atenuación garantiza que los sistemas radar SAR mantengan un alto rendimiento incluso en condiciones atmosféricas desfavorables.

La interpretación de cada banda del espectro revela diferentes propiedades de la superficie terrestre, similar a cómo se utilizan las firmas espectrales en el espectro óptico (Shorth, 2007).

La penetración de las longitudes de onda en la banda C del sistema radar más simple genera un mapa 2D de reflectividad del área analizada. Por lo tanto, los objetos que reflejan señales retrodispersadas con alta intensidad se identifican como puntos brillantes en las imágenes radar SAR, mientras que las superficies lisas y planas aparecen como áreas oscuras.

Geometría SAR

El sistema SAR es una evolución del sistema RADAR (Radio Detection and Ranging). En la geometría de adquisición de datos del Radar de Apertura Sintética, el sensor activo emite un pulso lateral de microondas electromagnéticas. Este pulso interactúa con la superficie terrestre, y solo una parte de la señal se retrodispersa hacia la antena receptora. Gracias a esta interacción, es posible determinar la distancia a los objetos al calcular el tiempo de retardo entre las señales emitidas y las reflejadas, como se muestra en la Figura 19.

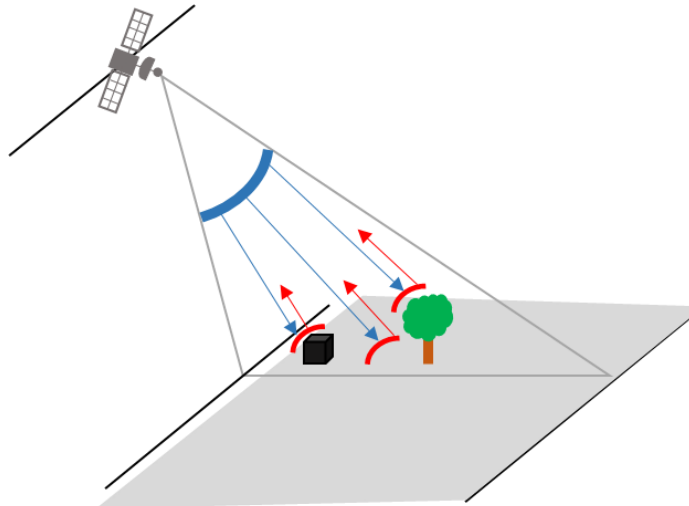


Figura 19. Sensor de Radar de Apertura Sintética que emite microondas electromagnética y es retrodispersado.

Una característica de esta geometría es la orientación de la mira del sensor, conocida como Side-Looking. Esto significa que el radar está montado de tal manera que "mira" hacia un lado en lugar de apuntar directamente hacia abajo (nadir), como se muestra en la Figura 20.

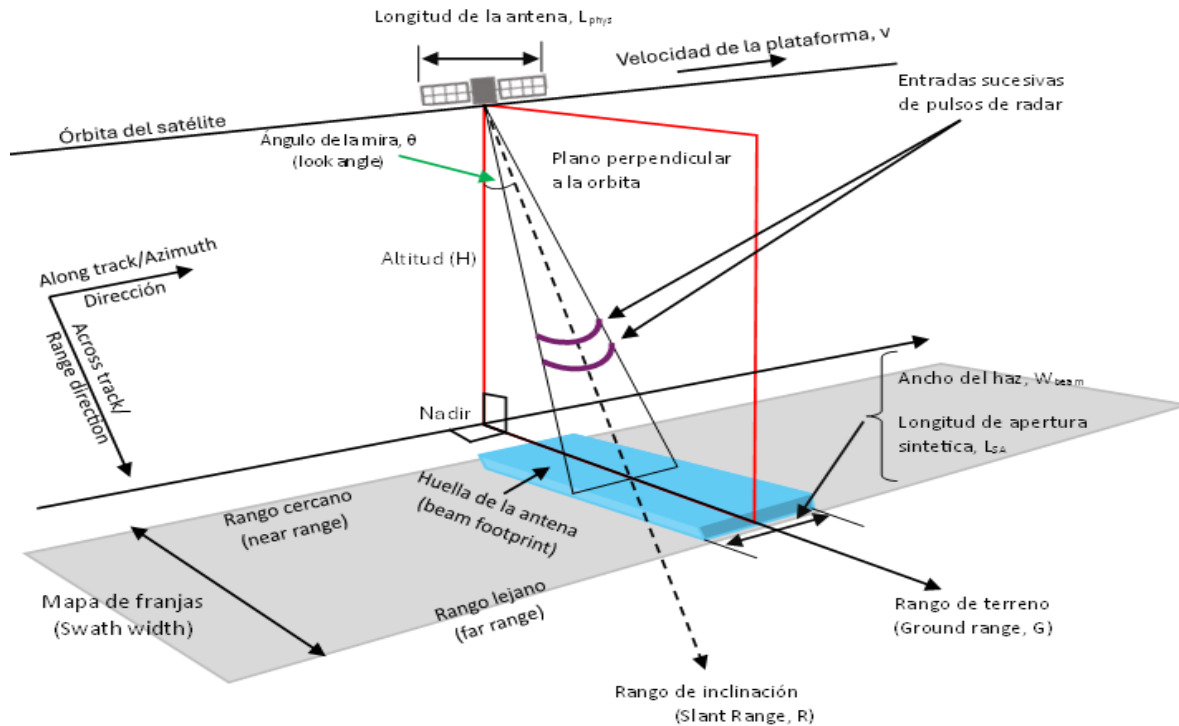


Figura 20. Geometría SAR. Mejorado de Díaz Santana (2016)

La geometría de adquisición del SAR que opera en modo side-looking se analiza en un escenario idealizado sobre un terreno plano a una altura H .

La dirección de desplazamiento de la plataforma se denomina azimuth (along track), mientras que la dirección perpendicular se conoce como rango (across-track). El nadir es el punto directamente bajo la plataforma, siguiendo la trayectoria del vuelo (ground track). El eje de slant range es fundamental para la adquisición de datos, ya que en este eje se envían y detectan los pulsos de radar. La distancia real entre la antena y la superficie terrestre se mide a lo largo de este eje y se designa como R . Mientras que para referenciar las imágenes se ubica en el plano del slant range, ya que este es indispensable para proyectar las imágenes sobre la superficie real del terreno (ground range).

El área detectada abarca desde el punto más cercano al nadir (near range) hasta el más alejado (far range), así como los puntos en el azimuth donde el sensor inicia y finaliza la adquisición.

Distorsiones geométricas

La geometría side-looking permite que las ondas emitidas interactúen con diversos objetos en el terreno, pero también introduce distorsiones en las imágenes debido a la variación en la distancia entre el sensor y los objetos. Las distorsiones más relevantes son:

- Foreshortening (Acortamiento): Las pendientes orientadas hacia el sensor parecen más cortas debido a la inclinación del terreno.
- Layover: Ocurre cuando el radar recibe primero la señal reflejada desde la parte superior de un objeto alto, lo que puede resultar en una representación incorrecta de su altura y forma.

Estas distorsiones deben ser consideradas cuidadosamente durante el procesamiento y análisis de las imágenes SAR para garantizar una interpretación precisa de los datos.

Deformación geométrica a partir de pasos ascendentes y descendentes

La observación de toda la superficie de la Tierra se logra mediante la combinación del movimiento orbital del satélite (Figura 21.) a lo largo de los meridianos (órbitas casi polares) y la rotación de la Tierra en el plano ecuatorial. Esta posibilidad proviene del hecho de que durante las órbitas que van de Sur a Norte (pasos ascendentes) y de Norte a Sur (pasos descendentes), la orientación de la antena del SAR suele estar fijada al mismo lado del plano orbital con respecto a la dirección de transporte. De esta manera, la misma escena sobre el terreno es observada por la antena SAR desde el Este durante los pasos descendentes y desde el Oeste durante los pasos ascendentes. Por lo tanto, la deformación del alcance terrestre de las imágenes SAR de los pasos ascendentes y descendentes es casi complementaria, se pueden aprovechar tanto los pasos ascendentes como los descendentes para obtener una mejor determinación de la deformación de la región observada.

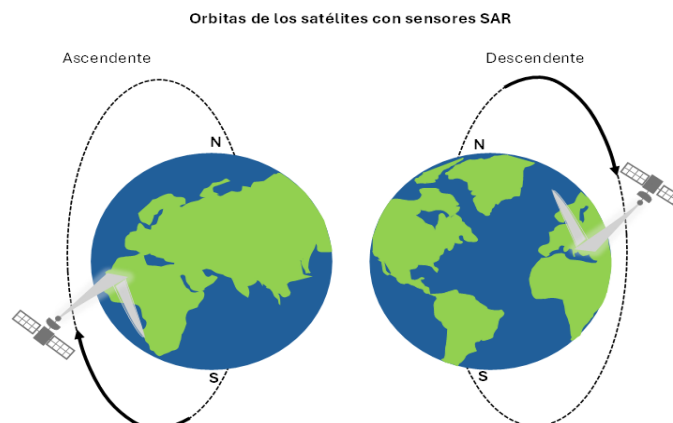


Figura 21. Tipos de orbitas de los satélites con sensores SAR.



Determinación de distancias

La orientación side-looking es importante, ya que sirve para estimar las distancias a los objetos observados. Al conocer el ángulo entre el radar y la superficie terrestre, permite procesar los datos para obtener información precisa sobre la ubicación y características del terreno. Esta estimación ayuda a corregir las distorsiones mencionadas y mejorar la calidad sobre las imágenes obtenidas.

Resolución de un sensor SAR

Como se mencionó anteriormente los sensores SAR, operan en diferentes bandas de frecuencia y que además estas contienen características específicas, lo cual las hace más aptas para diferentes aplicaciones. A continuación, se describen las principales bandas:

- Banda C: Funciona a una frecuencia de 5.3 GHz, utilizada por satélites como ERS y Envisat de la ESA, así como los canadienses RADARSAT.
- Banda L: Funciona a una frecuencia de 1.2 GHz, empleada en satélites japoneses como JERS y ALOS, ofreciendo alta penetración en la vegetación.
- Banda X: Funciona a 10 GHz, utilizada por sistemas como X-SAR (germano-italiano), proporcionando alta resolución, pero con baja penetración en la cubierta vegetal.

Imagen compleja SAR

Una imagen digital SAR, se visualizan generalmente a escala de grises, donde se puede ver como un mosaico bidimensional compuesto por píxeles, cada uno asociado a una celda de resolución que representa una pequeña área de la superficie terrestre. Estos píxeles contienen un número complejo que proporciona información sobre la amplitud y fase de las microondas retrodispersadas por dispersores como rocas, vegetación y edificios.

En la imagen SAR, las filas suelen corresponder a las posiciones en azimuth (dirección de vuelo del sensor), mientras que las columnas representan las posiciones en rango (distancia oblicua desde el sensor). La resolución espacial depende del sistema SAR específico:

- Resolución en azimuth: Determinada por el ancho del haz de la antena y el procesamiento Doppler (típicamente entre 1 y 10 metros en sistemas de apertura sintética).
- Resolución en rango: Relacionada con el ancho de pulso y el ángulo de incidencia (usualmente entre 1 y 30 metros).



La superposición entre celdas adyacentes puede ocurrir si el espaciado de muestreo es menor que la resolución nominal, pero esto varía según la configuración del sensor y el procesamiento aplicado.

La amplitud en la imagen es la intensidad de la señal reflejada que depende de la rugosidad, normalmente a rocas expuestas y las áreas urbanas, muestran amplitudes fuertes, mientras que las superficies planas y lisas (cuerpos de agua tranquilas) muestran amplitudes bajas, ya que la radiación se refleja principalmente en dirección opuesta al sensor del radar.

La fase se refiere a la radiación transmitida (ida y vuelta) en diferentes rangos de inclinación, donde se introducen retardos entre la transmisión y recepción de la señal durante su ciclo de oscilación. Este retardo resulta en un cambio de fase entre las señales transmitidas y recibidas. (ESA, 2007)

El cambio de fase en imágenes SAR se interpreta como la diferencia de camino recorrido por la radiación electromagnética (en su trayecto de ida y vuelta entre el sensor y el terreno) normalizada por la longitud de onda de la señal transmitida. Este cambio cuantifica la fracción de la longitud de onda que representa la diferencia de distancia entre dos adquisiciones SAR de la misma zona, capturadas desde posiciones ligeramente distintas (línea de base interferométrica). En el contexto de interferometría SAR (InSAR), este cambio de fase entre un par de imágenes permite medir deformaciones del terreno, elevaciones topográficas o incluso movimientos de objetivos con precisión submétrica.

Speckle

El efecto moteado o speckle es un fenómeno común en las imágenes de radar SAR y se presenta en todos los sistemas de imágenes coherentes. Este efecto se manifiesta cuando áreas homogéneas del terreno, que se extienden a lo largo de múltiples celdas de resolución, se visualizan con diferentes amplitudes en cada celda. Como resultado, se genera una apariencia visual similar al "sal y pimienta", que se superpone a una imagen de amplitud uniforme.

El moteado afecta negativamente la calidad y la utilidad de las imágenes SAR, dificultando la interpretación precisa de los datos. Para mitigar este efecto, una estrategia efectiva consiste en generar múltiples imágenes (multilook) promediando las variaciones en la amplitud y mejorando así la claridad de las imágenes resultantes. (ESA, 2007)

Polarización

La polarización en los sistemas de Radar de Apertura Sintética (SAR) proporciona una capa adicional de información en las imágenes de radar, mejorando la precisión en la interpretación de las características del terreno y los objetos observados. Dado que el SAR

es un sistema de detección activa, permite el control de la polarización de las ondas electromagnéticas tanto en la transmisión como en la recepción. Esto significa que la imagen SAR resultante puede resaltar diferentes entidades en la superficie terrestre según su retrodispersión.

La polarización se define por la dirección en la que oscilan los campos eléctricos de las ondas electromagnéticas (Figura 22.). La interpretación de las imágenes SAR se ve influenciada por esta polarización, ya que diferentes superficies y objetos reflejan las señales de radar de manera distinta.

La polarización de los datos SAR se indica mediante dos letras: la primera letra representa la polarización transmitida y la segunda letra corresponde a la polarización recibida.

Tipos de Polarización en Sistemas SAR:

1. Polarización Lineal: Las ondas electromagnéticas oscilan en una única dirección, ya sea horizontal o vertical.
 - **HH** (Horizontal-Horizontal): Tanto la transmisión como la recepción se realizan con ondas de polarización horizontal.
 - **VV** (Vertical-Vertical): Tanto la transmisión como la recepción se realizan con ondas de polarización vertical.
 - **HV** (Horizontal-Vertical): Se transmite una onda con polarización horizontal y se recibe con polarización vertical.
 - **VH** (Vertical-Horizontal): Se transmite una onda con polarización vertical y se recibe con polarización horizontal.

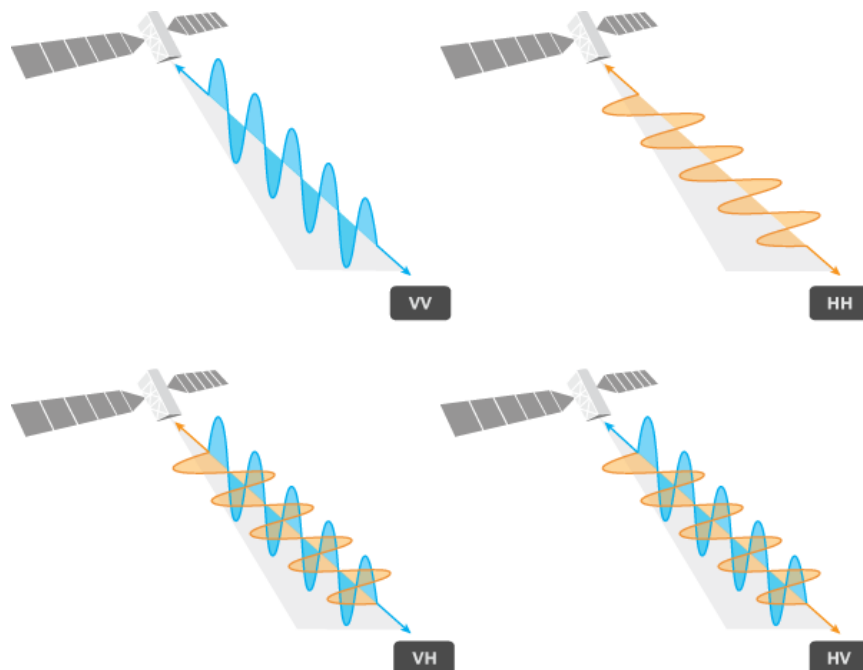


Figura 22. Tipos de polarización de los sensores de los sistemas SAR, en la dirección en la que oscilan los campos eléctricos de las ondas electromagnéticas idea y vuelta. Tomado de ESRI

Cuando las ondas transmitidas y recibidas comparten la misma polarización, los datos se describen como copolarizados. En cambio, si las ondas transmitidas y recibidas tienen diferentes polarizaciones, se considera que los datos presentan polarización cruzada.

2.2.1. Interferometría SAR (InSAR)

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica avanzada que utiliza la diferencia de fase entre dos observaciones complejas de SAR adquiridas desde posiciones ligeramente distintas del sensor. Esta técnica permite la extracción de información detallada sobre la superficie terrestre facilitando, la medición precisa de los parámetros, como el relieve y deformación de la superficie terrestre.

Línea base perpendicular

Las escenas SAR, se adquieren a partir de trayectorias de vuelo con sensores en diferentes posiciones entre sí o de una misma trayectoria de vuelo en momentos diferentes. Esto permite observar la misma zona desde ángulos de observación ligeramente distintos y desde la misma órbita del satélite.

Por lo tanto, el sensor SAR al encontrarse en posición ligeramente diferente tiene en su geometría (Figura 23.) dos tipos de línea de base:

1. Línea de base del interferómetro: Es la distancia entre los satélites en el plano perpendicular a su órbita.
2. Línea de base perpendicular: Es la proyección perpendicular a la dirección del rango oblicuo, siendo este un parámetro importante para la interferometría SAR.

Esta línea base perpendicular se conoce a partir de los datos orbitales precisos.

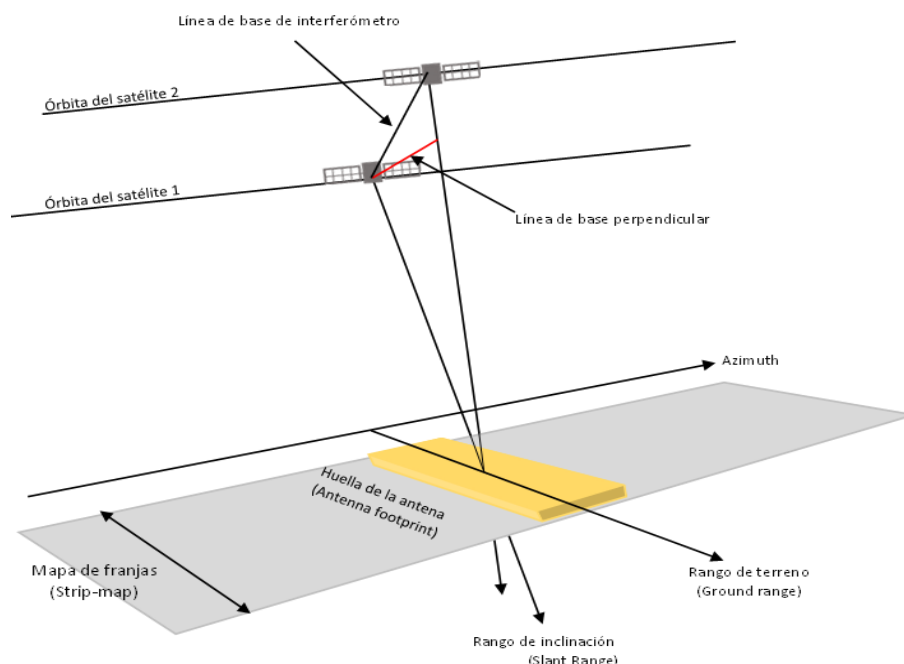


Figura 23. Geometría de interferometría satelital de un sistema SAR. Mejorado de ESA



Corregistro de imágenes SAR para interferometría

El corregistro es un paso fundamental previo para la formación de interferogramas puesto que esto garantiza la superposición de dos imágenes SAR para extraer información de fase. Un corregistro inadecuado introduce errores sistemáticos en el interferograma, puesto que esto afecta a la detección de cambios topográficos.

Este paso consiste en alinear geométricamente las dos imágenes SLC adquiridas en diferentes momentos, garantizando que cada píxel en la imagen secundaria (imagen esclava) corresponda en la misma posición geométrica en la imagen de referencia (imagen maestra), el alinear geométricamente las dos imágenes permite minimizar errores en la fase interferométrica y asegurar la calidad del interferograma. (Hanssen, 2001)

Para poder alinear geométricamente las dos imágenes, se tiene en cuenta lo siguiente:

- Selección de puntos de control:
Se identifican puntos homólogos (características distintivas) en ambas imágenes, mediante algoritmos como cross-correlation en ventanas o técnicas basadas en coherencia.
- Estimación de desplazamientos (offset Tracking):
Se calculan los desplazamientos relativos (offsets) en rangos y azimuth entre las imágenes, considerando deformaciones geométricas por ángulos de incidencia o diferencias orbitales.
- Transformación geométrica:
Se aplica una transformación (polinomios de 2do orden o modelos afines) para remuestrear la imagen esclava y alinearla con la maestra, utilizando interpolación (sinc kernel o bilineal).

Formación de interferograma

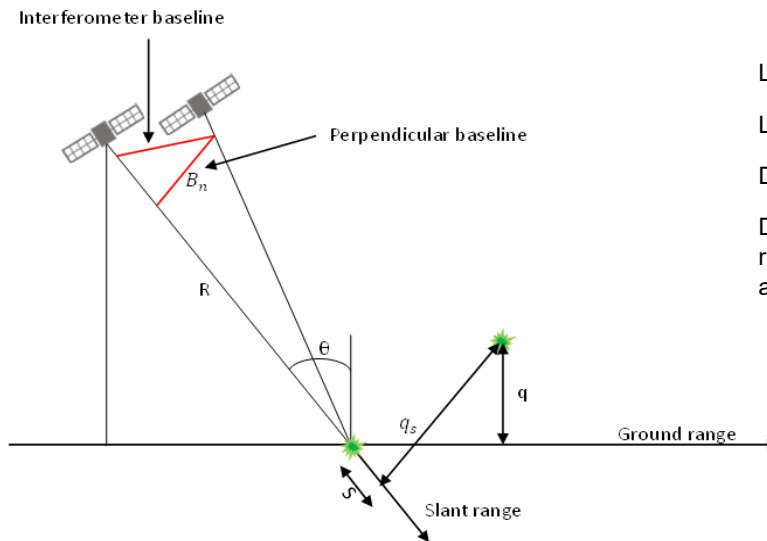
Para la generación de un Interferograma SAR (InSAR), se utilizan las dos imágenes complejas previamente corregistradas. Estas imágenes se multiplican píxel a píxel, tomando como referencia la imagen maestra por la imagen esclava.

La amplitud de un interferograma es el resultado de multiplicar las amplitudes de ambas imágenes, mientras que la fase (fase interferométrica) se calcula como la diferencia entre las imágenes.

Medición del relieve del terreno a través de la fase interferométrica

Se identifica un punto de referencia en la Tierra donde la diferencia de trayectoria de viaje (Δr) se genera al pasar de la celda de resolución de referencia a una celda contigua (ESA, 2007), todo esto depende de los parámetros geométricos del sistema SAR como se muestra en la Figura 24., pues es una aproximación válida para líneas de base pequeñas y celdas de resolución que no estén demasiado separadas, esto es calculado mediante la siguiente expresión, aproximada a Δr :

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R}$$



Los parámetros son:

Línea base perpendicular B_n

Distancia radar-objetivo R

Desplazamiento entre las celdas de resolución en dirección perpendicular al rango de inclinación q_s

Figura 24. Geometría de los parámetros del sistema de satélite interferométrico SAR. Mejorado de ESA

La variación de la fase interferométrica $\Delta\phi$ es proporcional a Δr dividido por la transmisión de la onda λ , por lo tanto, se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R}$$

Fase

La fase de cada píxel en una imagen SAR contiene información precisa del alcance entre el sensor y el objetivo, con una resolución equivalente a una fracción de la longitud de onda del radar. Esta sensibilidad permite detectar diferencias mínimas en la trayectoria de la señal entre dos adquisiciones, lo que permite formar el interferograma para medir las deformaciones en el terreno o cambios topográficos.

Al combinar la fase de dos imágenes después del corrección, se puede generar un interferograma cuya fase está altamente correlacionada con la topografía del terreno. En el caso de la interferometría diferencial (DInSAR), esta contribución de fase topográfica se elimina utilizando un modelo de elevación digital (DEM). La variación restante en el

interferograma se puede atribuir a cambios en la superficie que ocurrieron entre las dos fechas de adquisición de imágenes, así como a efectos atmosféricos no deseados. (Braun & Veci, 2021)

Un interferograma proporciona una medición ambigua de la altitud relativa al terreno, debido a su naturaleza cíclica de 2π de la fase interferométrica, por lo tanto, la variación de fase entre dos puntos nos dará una medición de la variación de altitud real, que al eliminarse se obtendrá un número entero dentro de sus ciclos de fase 2π . Estos valores están denominados como fase empaquetada (phase wrapping), que se ve representada como bandas concéntricas alrededor de la zona de deformación (fase aplanada), para DInSAR el número de franjas de color (fringes) están en función de la longitud de onda del radar y representa un desplazamiento relativo al satélite, dado que esta empaquetada en ciclos de 2π . Para poder calcular este desplazamiento relativo en el terreno en dirección LOS (Gómez, 2019), es necesario realizar la recuperación de la fase original de la señal en cada píxel del interferograma, a este procedimiento se le conoce como fase de desenvolvimiento (phase unwrapping) (Figura 25.).

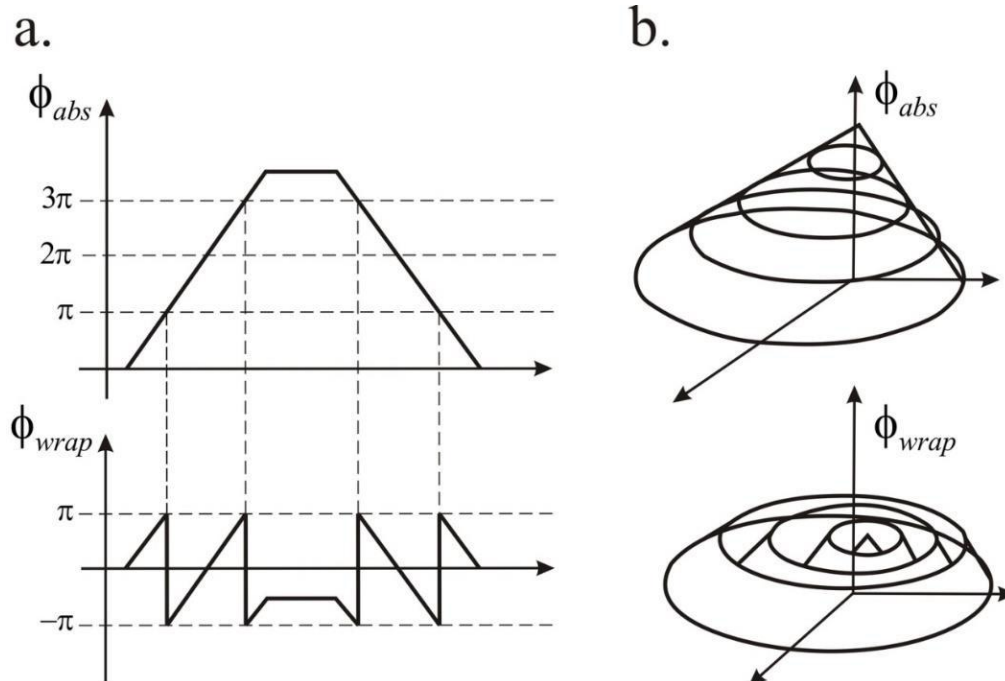


Figura 25. Esquema de la fase empaquetada y desempaquetada de un interferograma. Tomado de (Gómez, 2019)



Coherencia (γ)

La coherencia es un parámetro fundamental para evaluar la calidad de las mediciones de fase interferométrica. Además de complementar la información proporcionada por el coeficiente de retrodispersión (*backscatter*), lo cual permite realizar las propiedades del objetivo observado.

Calculo e interpretación.

La coherencia temporal cuantifica la estabilidad de la señal de retrodispersión radar de un píxel o área a lo largo del tiempo, indicando la consistencia de la respuesta de un objetivo entre dos o más adquisiciones SAR. Se calcula como la correlación compleja entre pares de imágenes SAR adquiridas en distintos momentos. Valores cercanos a 1 denotan una fase interferométrica libre de ruido, mientras que valores próximos a 0 reflejan pérdida total de coherencia (ruido dominante). (Hanssen, 2001)

Aplicaciones y filtrado.

Los dispersores persistentes (objetos que mantienen alta coherencia temporal) son esenciales para estudios de deformación del terreno, ya que permiten filtrar interferogramas y descartar áreas con baja coherencia (ej. Zonas cubiertas por vegetación o afectadas por cambios superficiales). Una caída abrupta en la coherencia puede indicar eventos como derrumbes, inundaciones o actividad agrícola, lo que ayuda a distinguir entre deformación real y artefactos.

Factores que afectan a la coherencia temporal:

- Cambios en la superficie:
Crecimiento de vegetación, variaciones en cuerpos de agua o nuevas construcciones.
- Condiciones atmosféricas:
Lluvia, nieve o humedad que alteran las propiedades de dispersión.
- Base temporal:
Intervalos largos entre adquisiciones reducen la coherencia.
- Base perpendicular (espacial):
Ángulos de adquisición muy distintos disminuyen la correlación entre imágenes.

La coherencia temporal es la clave para garantizar la fiabilidad de los resultados en InSAR, permitiendo diferenciar entre deformaciones reales y efectos causados por ruido o cambios en el terreno.



Factores contribuyentes a la decorrelación

La pérdida de coherencia o decorrelación reduce la calidad del interferograma y provoca pérdida de información en zonas de baja coherencia, afectando la precisión del desplazamiento superficial. Los principales factores son la decorrelación temporal y la geométrica (espacial).

- Decorrelación temporal:

Son los cambios de propiedades retodispersivas en la escena en el intervalo de tiempo. En este contexto, si se tienen áreas con vegetación abundante, el coeficiente de retrodispersión cambia según la estación del año, por otro lado, si se tiene zonas urbanas, la coherencia de la escena se mantiene constante en periodos largos de tiempo.

- Decorrelación geométrica:

Es cuando el ángulo de incidencia de ambas imágenes SAR no es el mismo, depende en gran medida de la longitud de la línea base perpendicular en los dos pasos del satélite (Gómez , 2019).

Errores de fase (ϕ)

La fase puede estar afectada por errores que generan incertidumbre a la interpretación, por lo cual se tiene: errores atmosféricos, topográficos, orbitales y de desenvolvimiento.

- Errores atmosféricos (ϕ_{atm}):

Es una fuente de error, debido a que las escenas SAR no son adquiridas al mismo tiempo. Como consecuencia, estas fueron tomadas bajo condiciones atmosféricas diferentes, lo que hace que se puedan generar nuevas franjas en los interferogramas, que no son debido a los movimientos del terreno.

- Errores topográficos (ϕ_{DEM}):

Relacionado con el MDE utilizado. El MDE necesita una precisión necesaria para estimar la continuación topográfica al interferograma, la cual es inversamente proporcional a la longitud de la línea base. Los interferogramas con línea de base pequeña son menos susceptibles a los errores del MDE. Su reconocimiento se basa en el hecho de que aparecen en la misma posición en cada interferograma de la escena, que no depende del periodo de tiempo que se cubre (Gómez , 2019).

- Errores orbitales:

Se deben a la inexactitud de las efemérides orbitales precisas. La precisión de las efemérides orbitales es del orden de ± 7 y ± 30 cm en las direcciones de acimut y rango, respectivamente (Gómez , 2019).

- Errores de desenvolvimiento:

Se producen por efectos de aliasing o estroboscópico durante el proceso de desempaque, dada la naturaleza ambigua de la fase (múltiplos enteros de 2π). Los errores de desempaque surgen cuando el área sufre una decorrelación temporal o espacial, o presenta un alto gradiente de deformación (múltiplos enteros de 2π). Dichos errores suelen afectar regiones aisladas del interferograma y son comparativamente mucho mayores que el ruido típico de fase interferométrica (Gómez , 2019).

Metodología del cálculo de interferograma

Como se mencionó anteriormente, el interferograma se ve afectado por la decorrelación. En el caso de movimientos o deformaciones en la superficie como se muestra en la Figura 26.

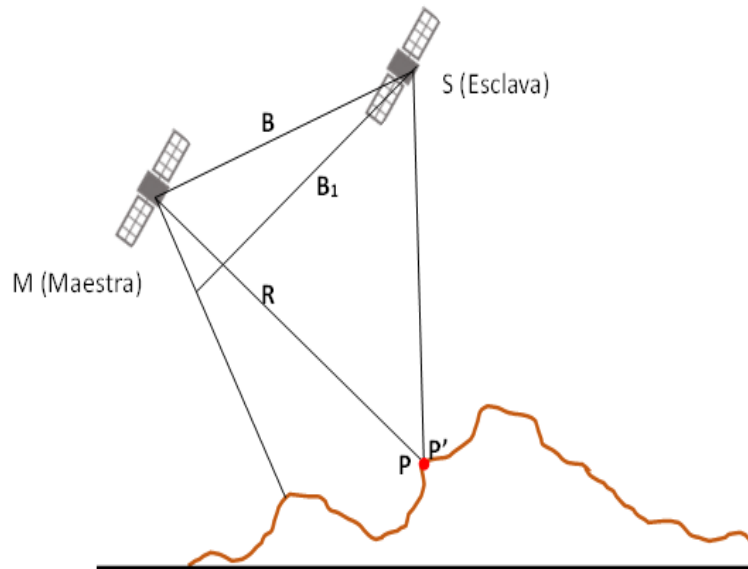


Figura 26. Esquema del cálculo del movimiento en la superficie de imagen maestra y esclava sobre un punto. Mejorado de Sillerico et al., 2010

Se tiene un punto P que se ha desplazado a un punto P' durante el tiempo de adquisición de imágenes entre una y otra, lo que conlleva a que la fase interferométrica se vea afectada. Esta se presenta en la siguiente ecuación: (Hanssen, 2001)

$$\begin{aligned}\phi_{Int} &= \phi_S - \phi_M \\ \phi_{Int} &= \frac{SP - Mp}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP' - Mp}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido} \\ \phi_{Int} &= \phi_{DEM} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido}\end{aligned}$$



Dónde

ϕ_S y ϕ_M son las fases interferométricas de la posición del satélite (esclava y maestra).

ϕ_{Atm} es la contribución atmosférica.

ϕ_{Ruido} componente debida al ruido (decorrelación del tiempo y ruido).

ϕ_{DEM} componente debida a la topografía del terreno.

ϕ_{Mov} componente debida al movimiento o deformación.

SP es la distancia del satélite esclava al punto P' (desplazado).

MP es la distancia del satélite maestra al punto P.

λ es la longitud de onda del radar.

Filtrado Goldstein

El filtro de Goldstein es un filtro adaptativo que se utiliza en el procesamiento de interferogramas, su función es reducir el ruido en estos, mejorando la calidad de los datos. Opera en el espacio de frecuencia enfocándose en las frecuencias predominantes de la fase interferométrica, al centrarse en estas frecuencias, el filtro mejora la relación señal-ruido, esto contribuye a una mayor precisión en la medición. (Goldstein & Werner, 1998) Cabe señalar que el filtro se ajusta a las características específicas del entorno, además, permite el fácil desenvolvimiento de la fase.

2.2.2. Interferometría Diferencial SAR (DInSAR)

La interferometría SAR diferencial (DInSAR, por sus siglas en inglés), es una variante de InSAR. Se trata de una técnica que permite la generación de mapas de desplazamiento del terreno y el cálculo de la coherencia relativa, a partir de dos adquisiciones del sensor SAR sobre la misma zona de estudio. (Sillerico et al., 2010)

El análisis mediante DInSAR es generalmente llevado a cabo de manera multitemporal, esto implica la adquisición de pares de escenas a lo largo del tiempo para el monitoreo de movimiento ocurridos durante esa ventana de tiempo. Con esta técnica se puede eliminar la fase topográfica, ya que la deformación se encuentra mezclada con esta. (Sillerico et al., 2010). Esta técnica, permite recuperar la proyección en la línea de visión del radar (LOS) de la deformación del suelo que se produce entre los tiempos de adquisición.

Esta técnica puede utilizarse para detección y medición de movimientos relativamente muy pequeños en la superficie, ya que al eliminar la fase topográfica y partiendo del desenvolvimiento de la fase se calcula la magnitud del movimiento. Debido a que la longitud de onda en la que se opera es pequeña se pueden detectar movimientos subcentimétricos.



2.2.3. Misión Sentinel-1

La Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) y la Comisión Europea, a través del programa Copernicus, han desarrollado una infraestructura satelital que constituye un elemento fundamental del Programa Espacial de la Unión Europea.

En el marco del programa Copernicus, se integran los satélites Sentinel. Estos satélites han sido desarrollados específicamente para cumplir con los requisitos de observación terrestre en diversos dominios. Actualmente, hay múltiples satélites Sentinel en órbita, cada uno optimizado para funciones específicas. Además, los datos recopilados por estos satélites son de acceso libre, lo que facilita su utilización por parte de investigadores, organismos públicos y entidades privadas.

La misión Sentinel-1 se compone de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B, los cuales orbitan de manera heliosíncrona en una órbita polar compartida, con una separación orbital de 180° . Estos satélites operan de forma continua, tanto de día como de noche, utilizando radar de apertura sintética de banda C (5.405 GHz) para la adquisición de imágenes, sin verse afectados por las condiciones meteorológicas. Sentinel-1A fue lanzado en 2014, seguido por Sentinel-1B en 2016. Sin embargo, Sentinel-1B dejó de estar operacional en diciembre de 2022 debido a una anomalía en su sistema de energía lo que redujo temporalmente la capacidad de observación de la misión. Para restaurar la cobertura completa, se planea el lanzamiento de Sentinel-1C en algún momento futuro, el cual ocupará el lugar de Sentinel-1B en la constelación. Originalmente, la constelación de estos satélites tiene un “tiempo de revisión de 12 días”; sin embargo, debido a que ambos comparten el mismo plano orbital, la frecuencia de repetición es de 6 días (importante para la coherencia), con orbitas ascendentes y descendentes.

Esta capacidad permite la provisión de datos casi en tiempo real, que son utilizados en aplicaciones críticas como la respuesta ante emergencias, monitoreo marino, vigilancia de capas de hielo, y análisis interferométrico para la detección procesos geológicos.

Los satélites Sentinel-1 utilizan un sistema de radar avanzado conocido como SAR (Synthetic Aperture Radar).

Al ser un sensor activo, el SAR utiliza técnicas establecidas como InSAR, DinSAR y Polarimetría, permitiendo así mediciones precisas en la propagación de ondas electromagnéticas con un alto nivel de coherencia.

Sus aplicaciones son la creación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y la detección de deformaciones en la superficie terrestre.

Los instrumentos SAR de banda C de Sentinel admiten el funcionamiento en polarización simple (HH o VV) y polarización dual (HH+HV o VV+VH), implementada a través de una cadena de transmisión (conmutable a H o V) y dos cadenas de recepción paralelas para polarización H y V, con tiempos de revisita cortos y una entrega rápida de los productos obtenidos. Para cada adquisición, se asegura una medición precisa de la posición y orientación del satélite.

Productos

Modos de adquisición de Sentinel-1

Un satélite SAR puede observar la misma zona desde ángulos de observación ligeramente diferentes. Esto puede hacerse simultáneamente (con dos sensores SAR montados en la misma plataforma) o en momentos diferentes aprovechando las órbitas repetidas del mismo satélite. Los satélites Sentinel-1 operan en cuatro modos exclusivos de obtención de escenas (ESA 2013, p. 20), que varían en cobertura desde 5 metros hasta 400 km (Figura 27.), siendo estos:

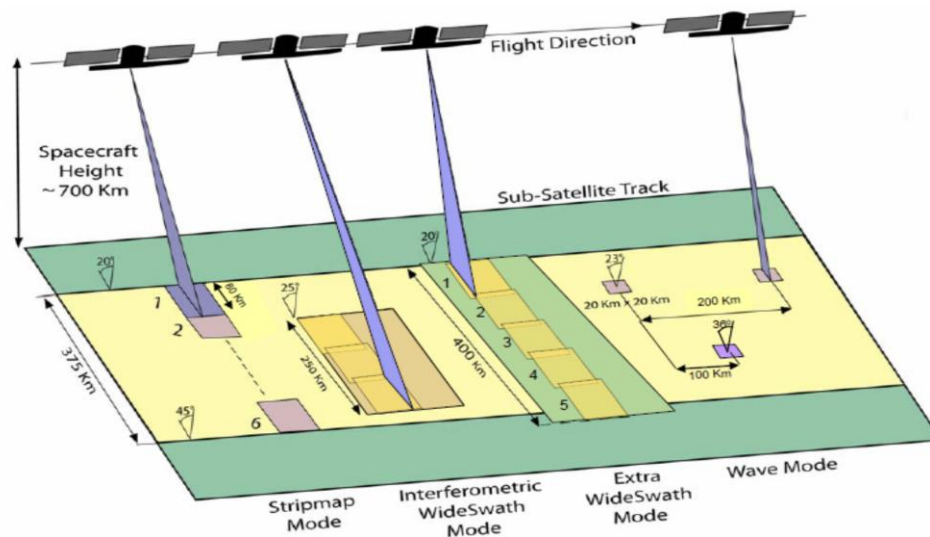


Figura 27. Cobertura de la franja de adquisición de Sentinel-1. Tomado de ESA

1. Stripmap (SM):

Resolución espacial de 5x5 [m] (vista única), con ancho de franja de 80 km, polarización dual (HH+HV, VV+VH) y simple (HH) y VV, utilizado para islas pequeñas y solo en casos excepcionales, para respaldar acciones de gestión de emergencias.

2. Interferometric Wide Swath (IW):

Resolución espacial de 5x20 [m], con un ancho de franja de 250 km, donde captura tres subfranjas de barrido (Figura 28.), empleando la técnica Terrain Observation with Progressive ScanSAR (TOPSAR), para obtener una imagen homogénea en toda la franja. La sincronización de ráfagas TOPS, respaldan la generación de interferogramas TOPS y mapas de coherencia, con polarización dual (HH+HV, VV+VH), simple (HH) y VV, utilizado principalmente en aplicaciones de la superficie terrestre.

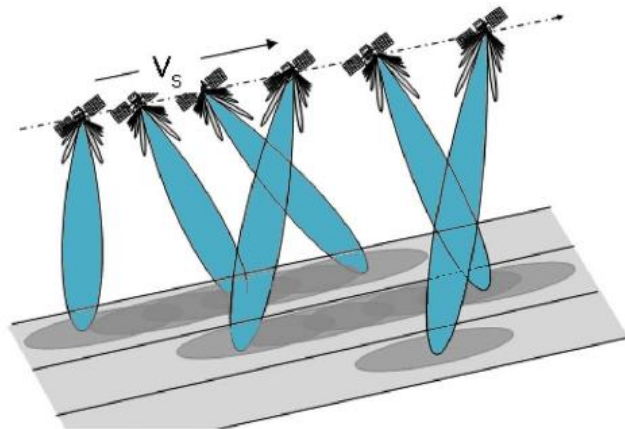


Figura 28. Adquisición de subfranjas de TOPSAR. Tomado de ESA

3. Extra-Wide Swath (EW):

Resolución espacial de 20x40 [m], con ancho de franja de 400 km, donde captura cinco subfranjas de barrido, emplea la técnica TOPSAR, con polarización doble (HH+HV, VV+VH), simple (HH) y VV, utilizado para control costero, tráfico marítimo, derrames petroleros y control de hielo marino.

4. Wave (WV):

Resolución espacial de 5x5 [m] cada 100 km, ancho de franja en viñeta de 20x20 km, con polarizaciones simples (HH individual y VV), utilizado generalmente en mar abierto.



Niveles de procesamiento

1. Level 0:

Datos comprimidos, sin procesar, constituyen la base para la generación de todos los productos SAR de niveles superiores, contiene fuentes de ruido, calibración, ecos y datos de órbita, que se almacenan a largo plazo para un procesamiento durante la misión hasta 25 años después. Está disponibles solo para los modos de adquisición SM, IW y EW.

2. Level 1:

Puede ser uno de los dos tipos siguientes:

- Single Look Complex (SLC):
Son escenas SAR que han sido georreferenciados utilizando información de órbita y exactitud del satélite, presentando una geometría de rango oblicuo, conservan información de amplitud y fase. Son útiles para el procesamiento interferométrico. Los datos calibrados básicos están proporcionados en imágenes complejas, como intensidad. Está disponible para los modos de adquisición IW y EW.
- Ground Range Detected (GRD):
Son escenas SAR que han sido detectadas y proyectadas utilizando el marco de referencia WGS84. Los productos son clasificados por resolución; completa, alta y media, con espaciado cuadrado de píxeles.

3. Level 2 (OCN):

Son productos geofísicos geolocalizados, derivados del nivel 1, para aplicaciones de viento, olas y corrientes, que pueden contener componentes geofísicos derivados de los datos SAR:

- Ocean Wind field (OWI): Metadatos que se derivan de un producto GRD, procesado internamente, para modos SM, IW o EW.
- Ocean Swell spectral (OSW): Metadatos que se derivan de un producto SLC procesado internamente, proporciona una medición de continuidad de los espectros de oleaje del SAR, solo para el modo SM y WV.
- Surface Radial Velocity (RVL): Metadatos que se derivan de un producto SLC procesado internamente, proporciona continuidad a la cuadrícula Doppler ASAR, solo para el modo SM y WV.

Convención de nomenclatura

Los datos entregados se empaquetan como un directorio SAFE que contiene un archivo de manifiesto en formato XML que enumera los metadatos generales del producto y los subdirectorios para los datos de medición, las anotaciones, las vistas previas y los archivos de soporte. El contenido no es el mismo para cada producto de Level; los detalles están disponibles en la sesión de cada nivel.

Esta sección define el estándar de nombres para la carpeta de productos Sentinel-1 de nivel superior (DAAC, 2022). El nombre de la carpeta de productos Sentinel-1 de nivel superior está compuesto por caracteres alfanuméricos en mayúscula separados por un guion bajo “_” (Figura 29.), (Copernicus, Sentinel-1 products. SentiWiki, s.f.).

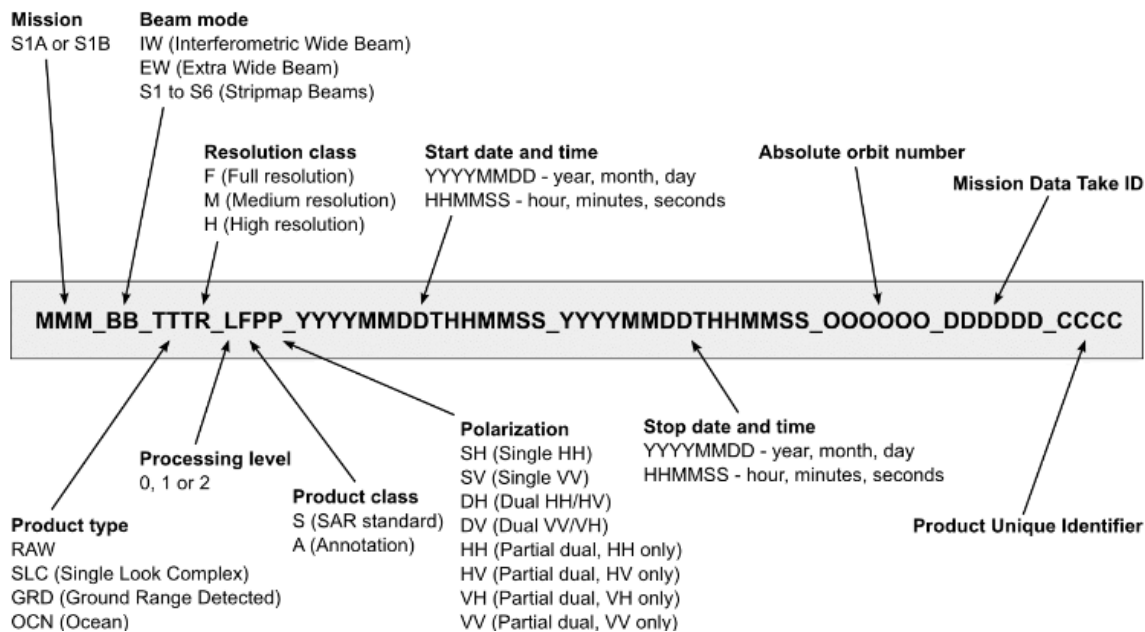


Figura 29. Convención de nomenclatura para los datos Sentinel-1. Tomado de DAAC

Capítulo 3. Metodología

Para llevar a cabo este análisis, se utilizarán datos GPS recolectados entre los días 22 al 24 de junio de 2020, proporcionados por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Estos datos provienen de las estaciones de medición ubicadas a lo largo de la costa de Oaxaca, que fueron nombradas como HUAM, OXPE y OXUM, ver Figura 30.

Además, se empleará un par de imágenes SAR de las misiones Sentinel-1A y Sentinel-1B, correspondientes a las fechas del 22 y del 28 de junio de 2020.

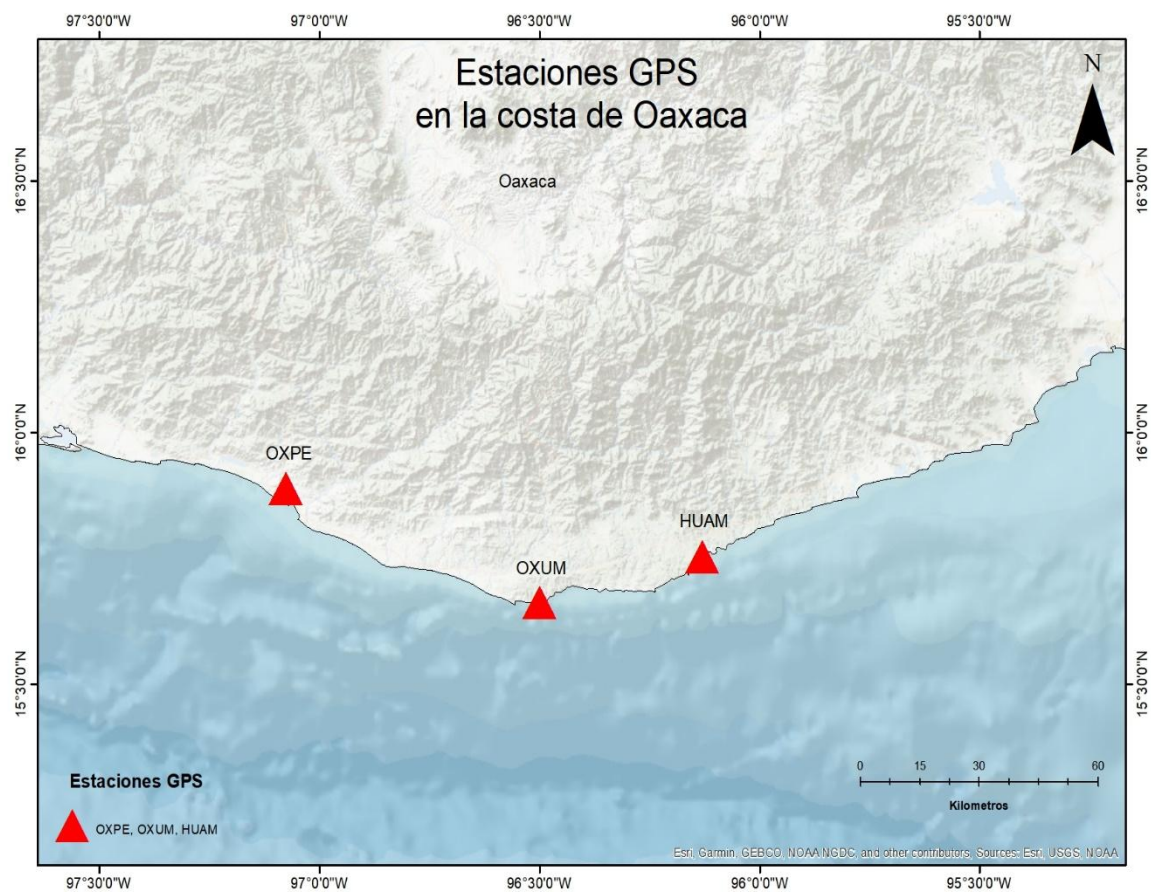


Figura 30. Mapa de localización de las estaciones GPS en la costa de Oaxaca.



3.1. Procesamiento de los datos GPS

Los datos de GPS fueron procesados utilizando el software PRIDE PPP-AR, desarrollado por el Dr. Jianghui Geng en la Universidad de Wuhan (Geng & Ge, 2019). Se centra en la técnica de Posicionamiento Preciso por Puntos (PPP) y su resolución de ambigüedades (PPP-AR), lo que permite obtener mediciones de alta precisión, especialmente útiles en estudios geodésicos y geofísicos.

Al procesar los datos, PRIDE-PPP-AR genera archivos de solución que contienen información sobre la posición (N, E, U) de los marcadores geodésicos (estaciones) a lo largo del tiempo. Estos archivos son fundamentales para el análisis posterior y la generación de series de tiempo que permiten evaluar los cambios en la posición de la corteza terrestre, como se detalla en la Tabla 2.

HUAM		
22/06/2020	23/06/2020	24/06/2020
amb_2020174_huam	amb_2020175_huam	amb_2020176_huam
config_2020174_huam	config_2020175_huam	config_2020176_huam
cst_2020174_huam	cst_2020175_huam	cst_2020176_huam
htg_2020174_huam	htg_2020175_huam	htg_2020176_huam
kin_2020174_huam	kin_2020175_huam	kin_2020176_huam
log_2020174_huam	log_2020175_huam	log_2020176_huam
rck_2020174_huam	rck_2020175_huam	rck_2020176_huam
res_2020174_huam	res_2020175_huam	res_2020176_huam
stt_2020174_huam	stt_2020175_huam	stt_2020176_huam
ztd_2020174_huam	ztd_2020175_huam	ztd_2020176_huam
OXPE		
22/06/2020	23/06/2020	24/06/2020
amb_2020174_oxpe	amb_2020175_oxpe	amb_2020176_oxpe
config_2020174_oxpe	config_2020175_oxpe	config_2020176_oxpe
cst_2020174_oxpe	cst_2020175_oxpe	cst_2020176_oxpe
htg_2020174_oxpe	htg_2020175_oxpe	htg_2020176_oxpe
kin_2020174_oxpe	kin_2020175_oxpe	kin_2020176_oxpe
log_2020174_oxpe	log_2020175_oxpe	log_2020176_oxpe
rck_2020174_oxpe	rck_2020175_oxpe	rck_2020176_oxpe
res_2020174_oxpe	res_2020175_oxpe	res_2020176_oxpe
stt_2020174_oxpe	stt_2020175_oxpe	stt_2020176_oxpe
ztd_2020174_oxpe	ztd_2020175_oxpe	ztd_2020176_oxpe
OXUM		
22/06/2020	23/06/2020	24/06/2020
amb_2020174_oxum	amb_2020175_oxum	amb_2020176_oxum
config_2020174_oxum	config_2020175_oxum	config_2020176_oxum
cst_2020174_oxum	cst_2020175_oxum	cst_2020176_oxum
htg_2020174_oxum	htg_2020175_oxum	htg_2020176_oxum
kin_2020174_oxum	kin_2020175_oxum	kin_2020176_oxum
log_2020174_oxum	log_2020175_oxum	log_2020176_oxum
rck_2020174_oxum	rck_2020175_oxum	rck_2020176_oxum
res_2020174_oxum	res_2020175_oxum	res_2020176_oxum
stt_2020174_oxum	stt_2020175_oxum	stt_2020176_oxum
ztd_2020174_oxum	ztd_2020175_oxum	ztd_2020176_oxum

Tabla 2. Archivos de solución obtenidos después de ejecutarse el software, para cada una de las estaciones y fechas.



Cada encabezado de estos archivos registró la configuración básica y el contenido correspondiente a su descripción (Tabla 3.)

Encabezado	Descripción
amb	Valores de las ambigüedades flotantes.
config	Plantilla de configuración para PRIDE PPP-AR 2.1
cst	Restricciones entre ambigüedades (solo en solución fija).
htg	Gradiente de troposfera horizontal.
kin	Resultados de la posición cinemática.
log	Diagnóstico de salud RINEX.
rck	Corrección de compensación del reloj del receptor.
res	Residuos para observación.
stt	Fase residual de un solo satélite.
ztd	Retraso troposférico Zenith.

Tabla 3. Descripción de los encabezados en los archivos de solución. Tomado de (Geng & Ge, 2019)

En este caso, se utilizó el archivo de solución con encabezado "kin" (ver Tabla 3.), puesto que son de interés para la generación de series de tiempo, para cada estación y día.

3.1.1. Cambio de coordenadas de XYZ a ENU

Después de procesar los datos GPS con PRIDE PP- AR es necesario hacer el cambio de coordenadas de XYZ a ENU, debido a que con las coordenadas XYZ, son coordenadas abstractas, mientras que las coordenadas ENU, son coordenadas más fácil de interpretar , así como muestra movimientos relativos en términos de desplazamiento lateral (E), desplazamiento longitudinal (N) y movimiento vertical (U), también ayuda a detección de patrones geofísicos, siendo estos la tectónica, subsidencia o deformación, por otra parte, XYZ incluyen movimiento de placas tectónicas, rotación terrestre, efectos de marea, etc., pero ENU ayuda a aislar el movimiento local relativo a un punto de referencia, que es el objetivo de este trabajo, por lo tanto, el cálculo para el cambio de coordenadas es el siguiente:

1. Se calcula un punto de referencia, para ver el movimiento relativo para ello se usara un promedio de cada componente XYZ, Latitud (ϕ), longitud (λ) usando la siguiente formula:

$$X_{Ref} = \frac{\sum X}{n}$$

Donde

$\sum X$: Suma de la coordenada X

n : Numero de datos



2. Los ángulos de latitud promedio (ϕ) y longitud promedio (λ), se convierten de grados a radianes, mediante la relación:

$$\theta_{rad} = \theta_{deg} * \frac{\pi}{180}$$

Donde

θ_{deg} : Ángulo en grados decimales

π : Constante pi

Teniendo así:

$$X_{Ref}, Y_{Ref}, Z_{Ref}, \phi_{Ref}, \lambda_{Ref}$$

ϕ latitud promedio en radianes, λ longitud promedio en radianes

3. Se calcula la traslación, restando las coordenadas del punto de referencia, para aislar el movimiento relativo, dejando $X_{Ref}, Y_{Ref}, Z_{Ref}$, fijos:

$$\Delta = \begin{bmatrix} X_n - X_{Ref} \\ Y_n - Y_{Ref} \\ Z_n - Z_{Ref} \end{bmatrix}$$

4. La transformación de coordenadas XYZ a ENU se realizó mediante la matriz de rotación definida por Leick et al. (2015, Ec. 4.2.6) en el capítulo 4.2.:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} X_n - X_{Ref} \\ Y_n - Y_{Ref} \\ Z_n - Z_{Ref} \end{bmatrix}$$

Donde

$$R = \begin{bmatrix} -\sin \lambda_0 & \cos \lambda_0 & 0 \\ -\sin \phi_0 \cos \lambda_0 & -\sin \phi_0 \sin \lambda_0 & \cos \phi_0 \\ -\cos \phi_0 \cos \lambda_0 & -\cos \phi_0 \sin \lambda_0 & \sin \phi_0 \end{bmatrix}$$

λ_0 : Longitud promedio en radianes

ϕ_0 : Latitud promedio en radianes



Por lo tanto, aplicando la matriz tenemos:

$$E = \Delta X * (-\sin \lambda_0) + \Delta Y * (\cos \lambda_0) + \Delta Z * 0$$

$$N = \Delta X * (-\sin \phi_0) * (\cos \lambda_0) + \Delta Y * (\cos \phi_0) (\sin \lambda_0) + \Delta Z * (\cos \phi_0)$$

$$U = \Delta X * (\cos \phi_0) * (\cos \lambda_0) + \Delta Y * (\cos \phi_0) (\sin \lambda_0) + \Delta Z * (\sin \phi_0)$$

3.1.2. Ajuste mediante offset en las series de tiempo GPS

Se identificaron discrepancias temporales y residuales sistemáticas entre las series de tiempo obtenidas. Para alinear las series y garantizar coherencia temporal, el cálculo del offset se determinó mediante la diferencia entre las series, tomando la última observación del día anterior y la primera observación del día posterior, este proceso se aplica para cada componente de posición (ver formulas 1-6).

$$\Delta N = N_{23-06(primer\ obs)} - N_{22-06(ultima\ obs)} \quad (1)$$

$$\Delta E = E_{23-06(primer\ obs)} - E_{22-06(ultima\ obs)} \quad (2)$$

$$\Delta U = U_{23-06(primer\ obs)} - U_{22-06(ultima\ obs)} \quad (3)$$

$$\Delta N = N_{24-06(primer\ obs)} - N_{23-06(ultima\ obs)} \quad (4)$$

$$\Delta E = E_{24-06(primer\ obs)} - E_{23-06(ultima\ obs)} \quad (5)$$

$$\Delta U = U_{24-06(primer\ obs)} - U_{23-06(ultima\ obs)} \quad (6)$$

Al obtener el valor del offset de cada componen se restó (o sumó) a toda la serie de tiempo original en sus componentes correspondientes para alinearla con la referencia (22 de junio 2020) eliminando así el sesgo sistemático como se muestra en las formulas 7-9.

$$N_{Ajustado} = N_i \pm Offset \quad (7)$$

$$E_{Ajustado} = E_i \pm Offset \quad (8)$$

$$U_{Ajustado} = U_i \pm Offset \quad (9)$$

Donde

N_i, E_i, U_i : Serie original a ajustar (23-06 y 24-06)

Tras la aplicación del offset, se generan gráficos de las series de tiempo. Este ajuste no solo facilita la identificación de algún cambio o perturbación, sino que también busca crear



una serie de datos continua, lo que permite una mejor representación gráfica del comportamiento de las componentes a lo largo del tiempo, ver Figura 31. Figura 32. y Figura 33.

3.1.3. Cálculo y aplicación de la Media Móvil Simple (SMA)

La Media Móvil Simple (Simple Moving Average), es el promedio aritmético de un conjunto de datos en un período específico. Cada nuevo cálculo elimina el dato más antiguo y añade el más reciente, lo que permite que la media se "mueva" con el tiempo, esta herramienta estadística es utilizada en el análisis de datos GPS para poder suavizar las series de tiempo y facilitar la identificación de tendencias y patrones.

Para poder calcular la SMA, se define un período de 15 minutos, para cada una de las estaciones en sus respectivas coordenadas. Para cada intervalo de 15 minutos, se calcula el promedio de las coordenadas dentro de este período (ver fórmula 1), donde se va desplazando la ventana de cálculo un período hacia adelante en cada iteración.

$$\hat{X}_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_{t-i}}{n} \quad (1)$$

Donde:

$\hat{X}_t$: Promedio de posición en cada caso en el periodo t (N, E, U)

Σ : Sumatoria de datos

x_{t-i} : Posición real en unidades de los periodos anteriores a t

n : Número de datos

Sacar un promedio cada 15 minutos es una manera de suavizar los datos y visualizar mejor las tendencias de desplazamiento a lo largo del tiempo, ver Figura 34. y Figura 35.



3.1.4. Cálculo de los desplazamientos

Con el fin de detectar el desplazamiento del terreno, se realiza el cálculo de este, donde se utiliza los datos SMA, previamente calculados para cada coordenada (ENU), de las tres estaciones, se utilizan dichos datos ya que se vuelve más preciso y no se trabajan con las coordenadas ENU crudas, si no con los componentes modelizados, puesto que este modelo suaviza las series temporales para reducir el “ruido” (errores aleatorios de medición del GPS) y poder visualizar más claramente la tendencia subyacente de desplazamiento, de tal manera que se procede a lo siguiente:

1. Sacando un promedio simple de la SMA de las coordenadas ENU, para cada estación y época.
2. Eligiendo una época de referencia, donde se considere aparentemente estable, para este caso utilizamos el día 22 de junio de 2020, el desplazamiento de la época inicial t_0 se calcula así:

Desplazamiento en E (en t): $\Delta E(t) = SMA_E(t) - SMA_E(t_0)$

Desplazamiento en N (en t): $\Delta N(t) = SMA_N(t) - SMA_N(t_0)$

Desplazamiento en U (en t): $\Delta U(t) = SMA_U(t) - SMA_U(t_0)$

Donde

$SMA_E(t)$ es el valor promedio suavizado de la coordenada Este en tiempo t

$SMA_E(t_0)$ es el valor suavizado de la coordenada Este, en el tiempo de referencia inicial t_0

Si al calcular los desplazamientos tenemos:

Signo positivo (+) en ΔU : El punto se elevó respecto a su posición pre-sismo.

Signo negativo (–) en ΔU : El punto se hundió (subsistencia) respecto a su posición pre-sismo.

Los desplazamientos para cada estación se muestran en la Tabla 4.

Estación	Coordenada	Desplazamiento
HUAM	E (ΔE)	-0.121778974 [m]
	N (ΔN)	-0.283889869 [m]
	U (ΔU)	0.345225454 [m]
OXUM	E (ΔE)	-0.100455338 [m]
	N (ΔN)	-0.052293061 [m]
	U (ΔU)	0.023206558 [m]

Tabla 4. Tabla de desplazamientos en sus coordenadas ENU para cada estación utilizada.

3.1.5. Desplazamiento en la geometría LOS

Para poder comparar los puntos GPS, es necesario sintetizar los resultados del análisis y así poder hacer directamente comparable con un píxel de InSAR.

Se necesita proyectar las componentes ENU calculados en la “misma geometría de visión de satélite” o geometría LOS, para poder integrar las diferentes técnicas (GPS+InSAR).

El desplazamiento en la línea de vista (LOS) del satélite se calculó a partir de los tres componentes de desplazamiento del terreno (ENU), mediante la ecuación de proyección geometría estándar (Massonnet and Feigl 1998 Hanssen, 2001):

$$\Delta LOS = [\Delta U * \cos(\theta)] - \left[\Delta E * \sin(\theta) * \cos\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \right] - \left[\Delta N * \sin(\theta) * \sin\left(\alpha - \frac{3\pi}{2}\right) \right]$$

Donde

θ es el ángulo de incidencia de las imágenes.

α es el ángulo de acimut de la órbita de las imágenes.

$\Delta E, \Delta N$ son las componentes horizontales.

ΔU es la componente vertical.

Los valores de desplazamiento tipo InSAR para GPS son los que se muestran en la Tabla 5.

Estación	ΔLOS
HUAM	0.335144 [m]
OXUM	-0.090431 [m]

Tabla 5. Valores únicos de GPS en geometría LOS para comparar directamente con lo que mediría un píxel en InSAR para el mismo lugar e intervalo de tiempo.



3.1.6. Resultados de las componentes de las series de tiempo continuas de las estaciones GPS

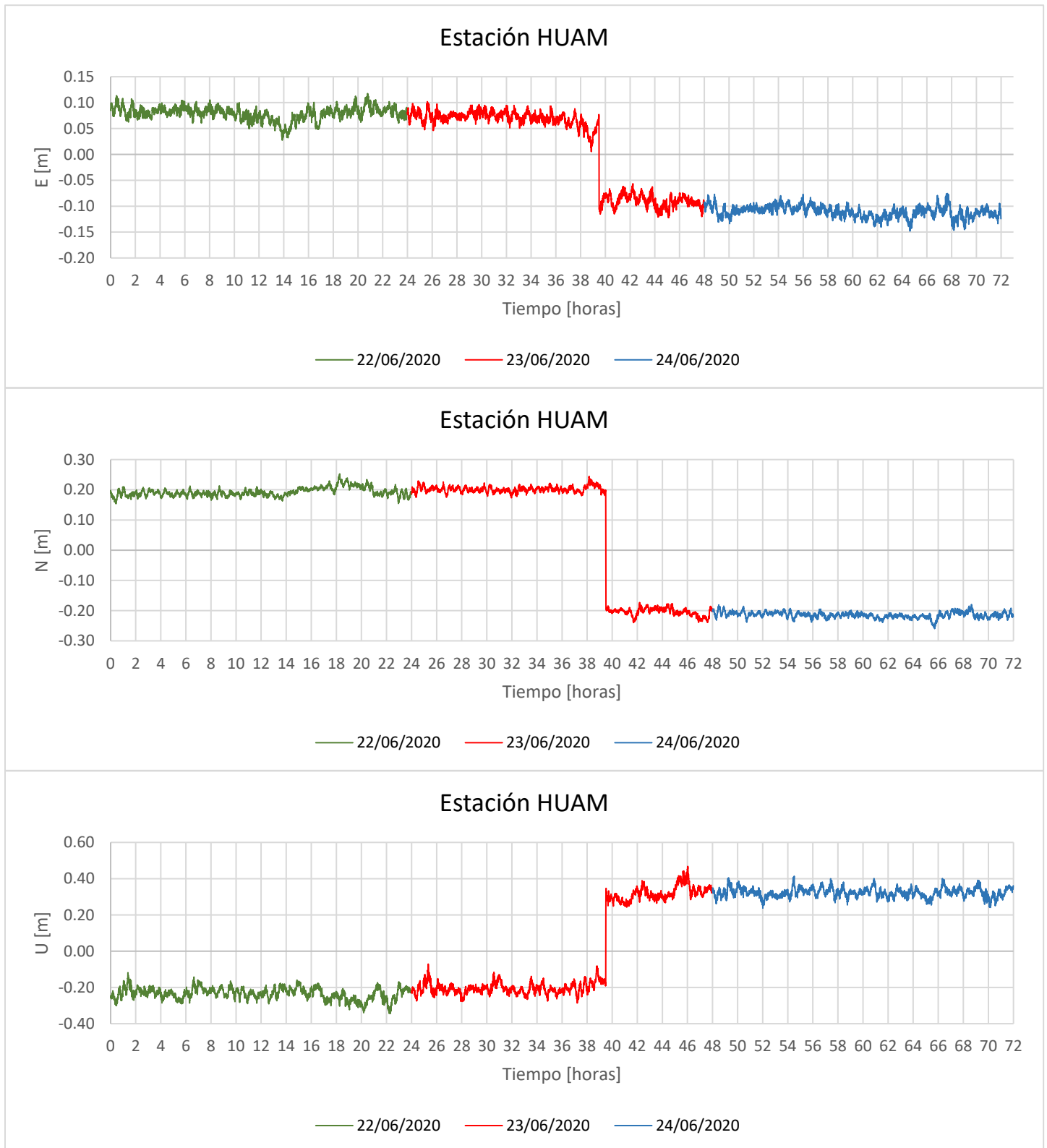
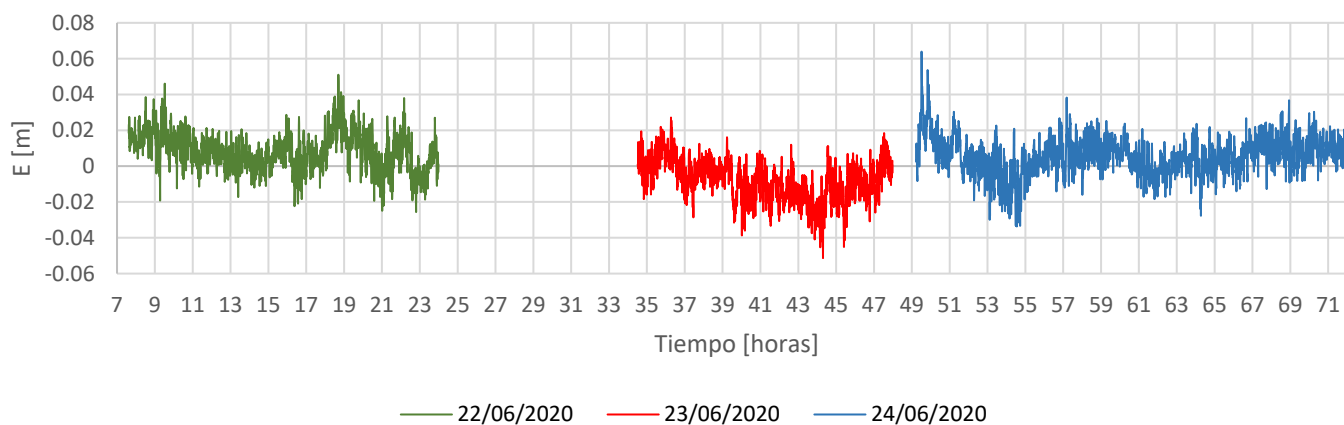


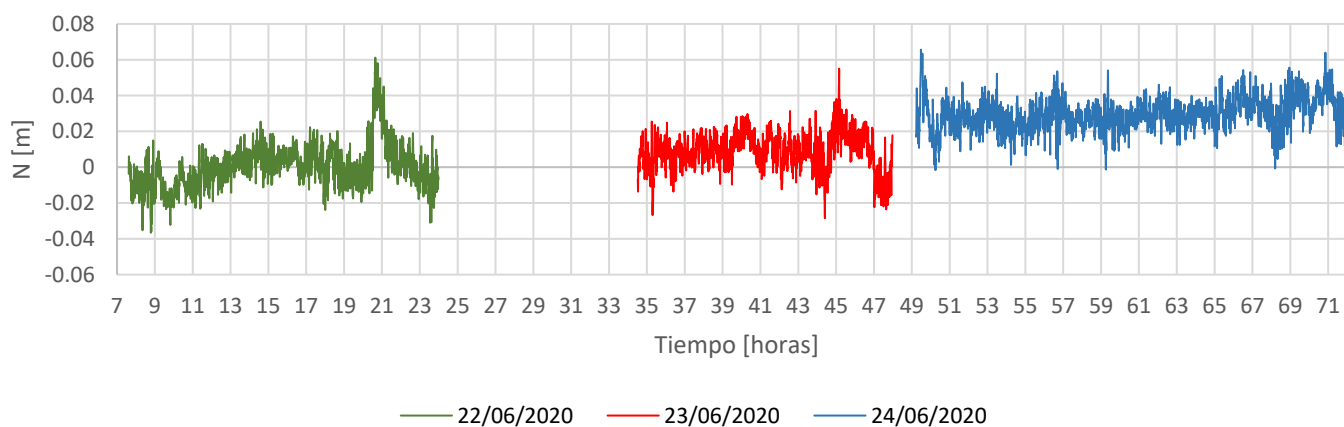
Figura 31. Componentes de las series de tiempo continuas; estación HUAM.



Estación OXPE



Estación OXPE



Estación OXPE

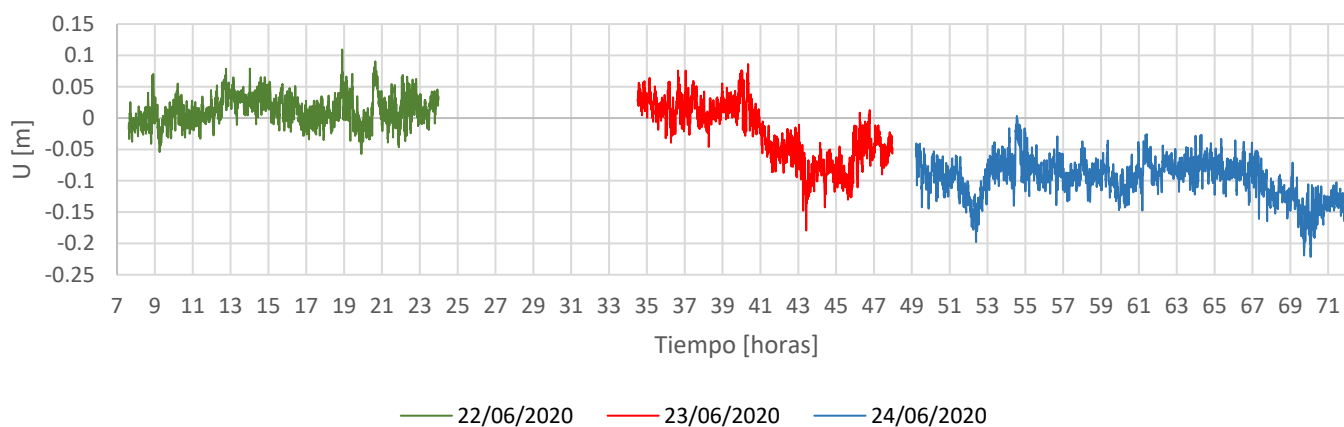
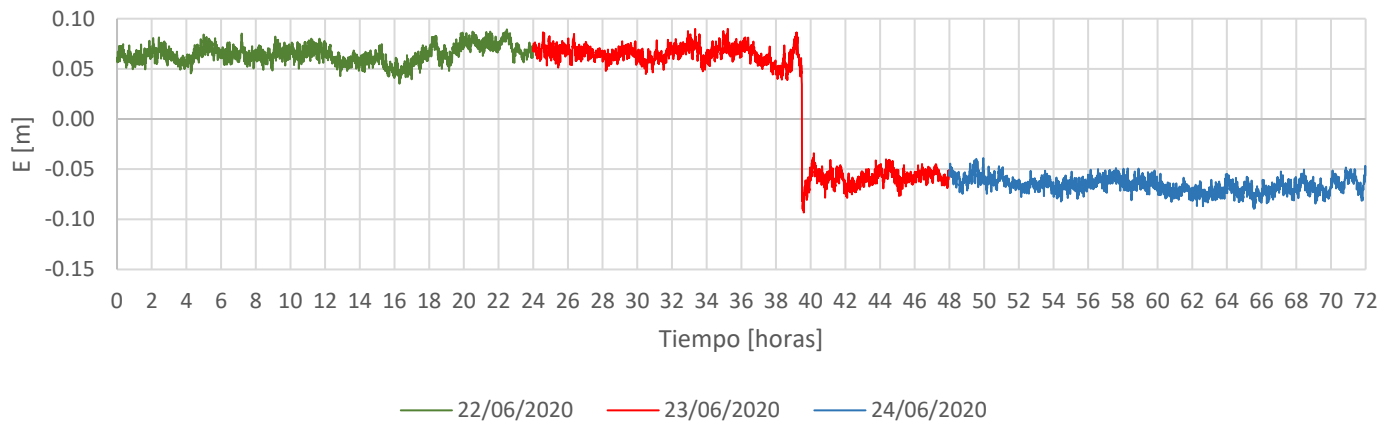


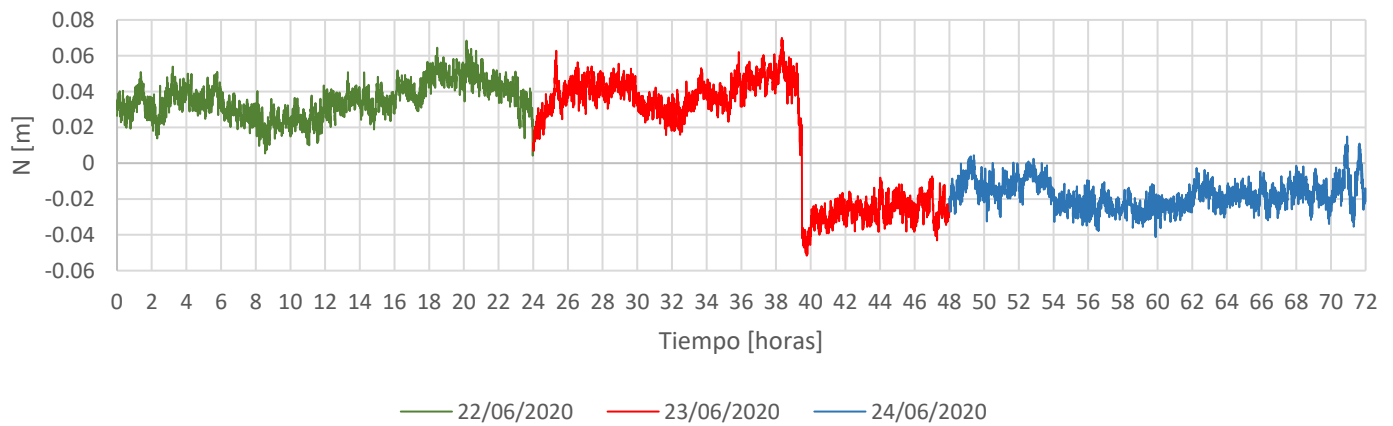
Figura 32. Componentes de las series de tiempo continuas; estación OXPE.



Estación OXUM



Estación OXUM



Estación OXUM

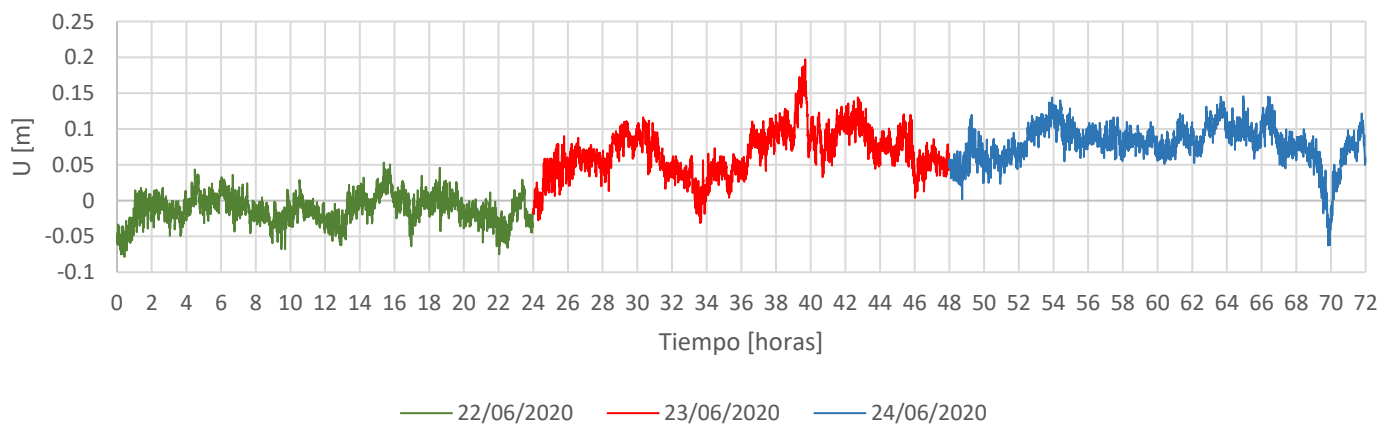
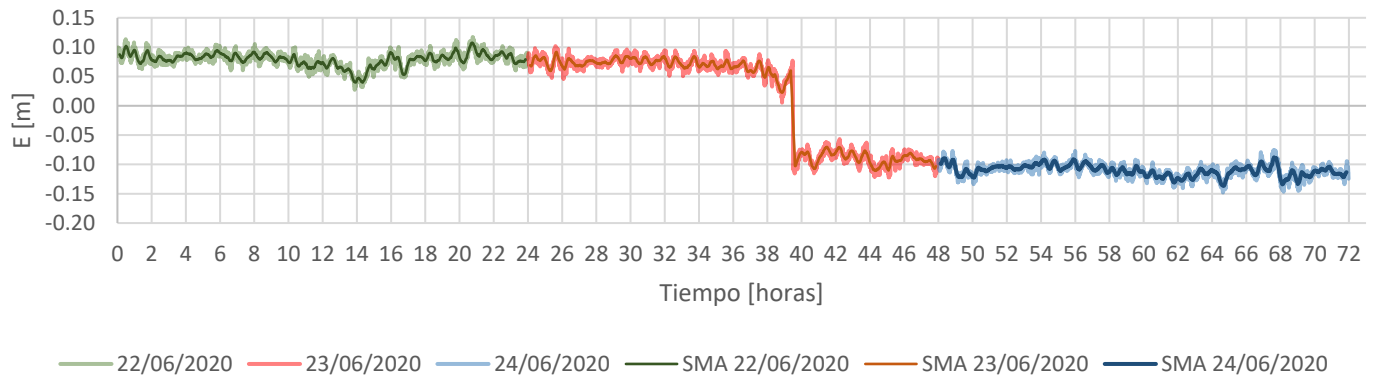


Figura 33. Componentes de las series de tiempo continuas; estación OXUM.

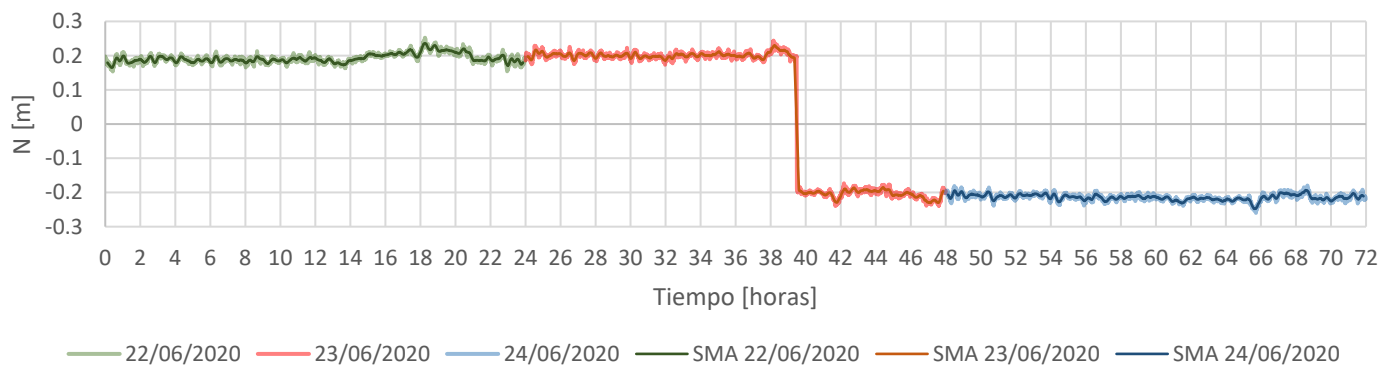


3.1.7. Resultados de SMA de las series de tiempo continuas de las estaciones GPS.

SMA cada 15 minutos Estación HUAM



SMA cada 15 minutos Estación HUAM



SMA cada 15 minutos Estación HUAM

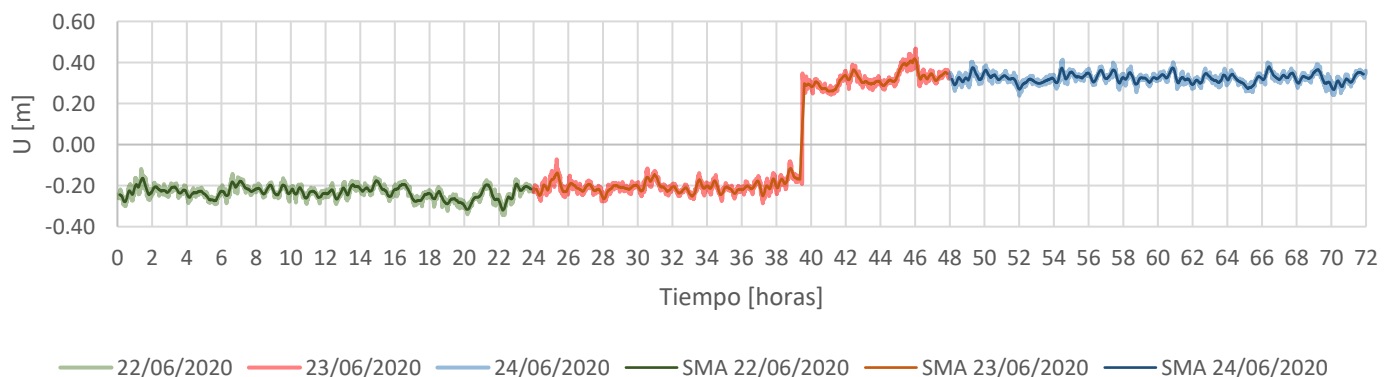
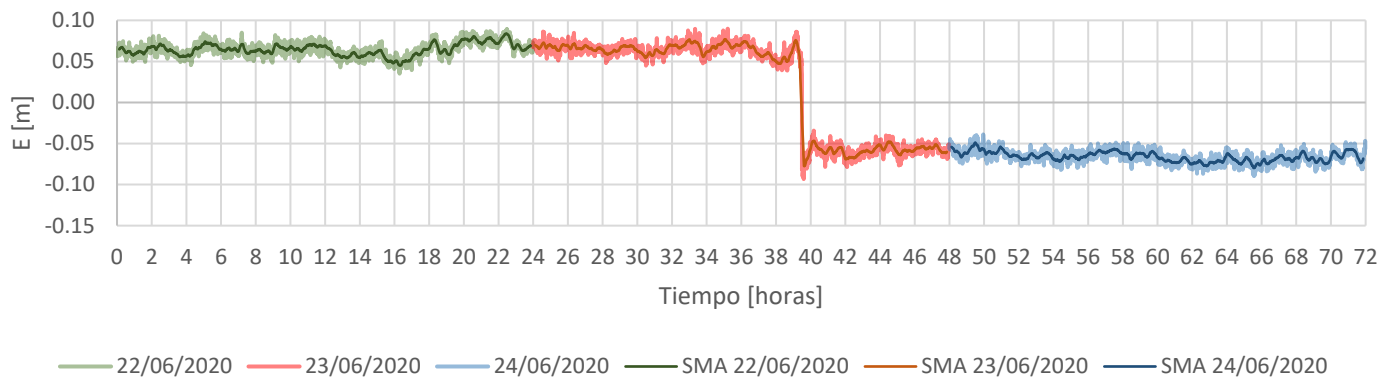


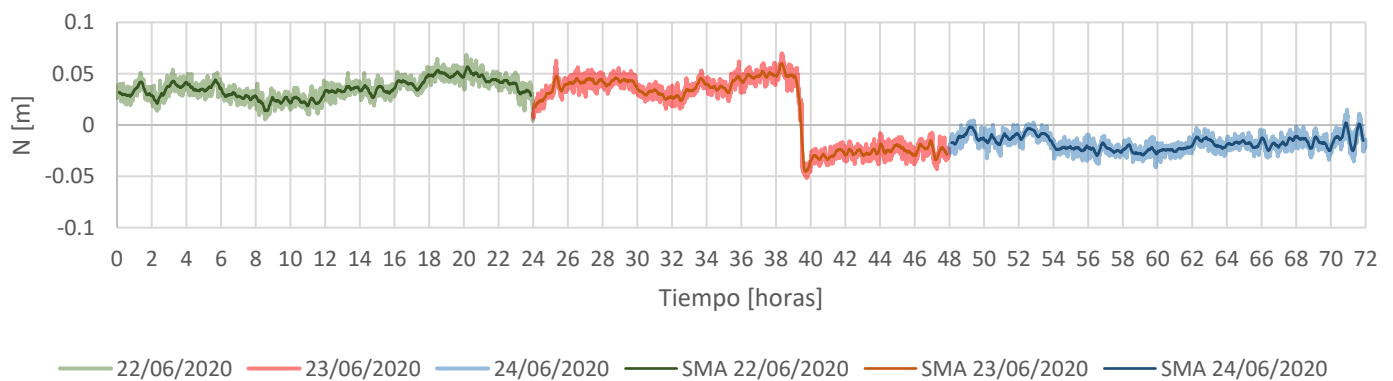
Figura 34. Media móvil simple cada 15 minutos para cada componente; estación HUAM.



SMA cada 15 minutos Estación OXUM



SMA cada 15 minutos Estación OXUM



SMA cada 15 minutos Estación OXUM

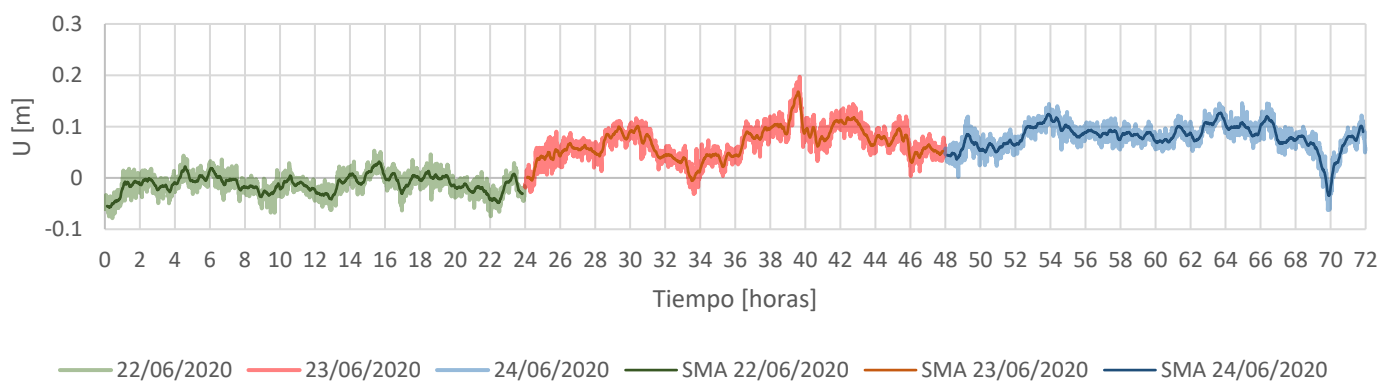


Figura 35. Media móvil simple cada 15 minutos para cada componente; estación OXPE.

3.2. InSAR

Esta metodología se utilizó para la generación de mapas de deslizamiento utilizando escenas SAR Sentinel-1. Este análisis se realizó en el sistema operativo Windows 10.

3.2.1. Elección de productos para el caso de estudio

Para obtener los productos nos dirigimos a la página de la ASF Vertex, (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), teniendo en cuenta que tenemos los siguientes criterios:

1. **Línea de base temporal:** Misma área de objetivo, pero adquiridas en diferentes momentos.
2. **Línea de base perpendicular:** Variabilidad en la posición de la órbita del satélite.

Para este caso la línea base temporal parte de una fecha de referencia que es el día 23 de junio de 2020 (día del sismo), por tanto, se buscará un par de imágenes pre- sismo y post-sismo, tomando en cuenta que los satélites con sensor de Radar de Apertura Sintética (SAR) a bordo de las misiones Sentinel-1A y Sentinel-1B que tienen un tiempo de revista de 12 días, o 6 días si se usan ambos satélites.

Fuente de datos

Una vez que registrados en Earthdata (Earthdata Login User Registration ([nasa.gov](https://earthdata.nasa.gov/))) e iniciado sesión en Vertex, procedemos a delimitar nuestra área de interés, ver Figura 36.

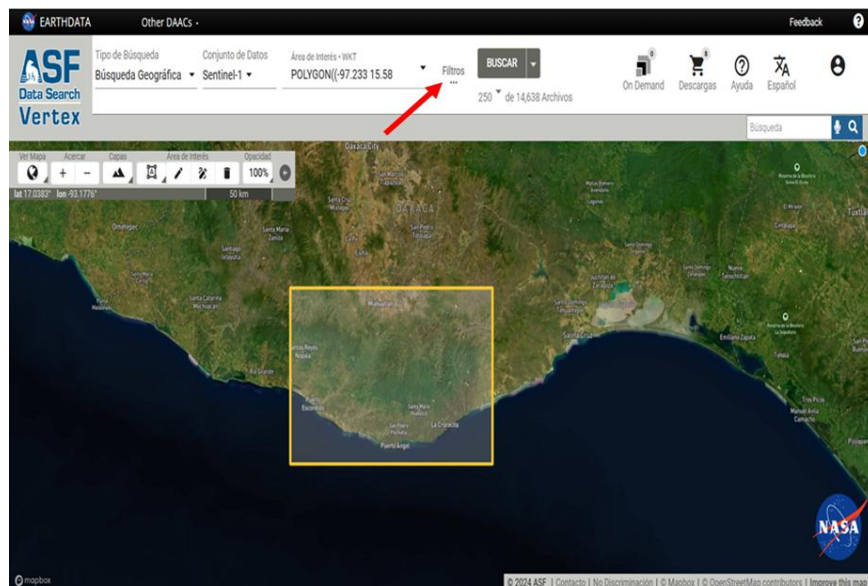


Figura 36. Visualización general de la web Alaska Vertex para descarga de datos. Tomado de (ASF, 2016).



Seleccionamos la sección de filtros (parte superior, flecha roja), en donde se debe tener en cuenta qué tipo de datos queremos adquirir, así como las fechas de la adquisición, en este caso:

- **Filtros de fechas**

01/06/2020 – 31/06/2020

- **Filtro del tipo de producto**

S1: Sentinel-1 (Mission)

L1: Nivel 1

SLC: Single Look Complex (Product type)

IW: Interferometric Wide Swath (Beam mode)

VV+VH: Polarización Vertical-Vertical/Vertical Horizontal

Ascending/Descending: Dirección de vuelo (Orbits)

SA: SAR estándar / Annotation

3.2.2. Flujo de trabajo ASF, haciendo uso de ESA's Sentinel-1 Toolbox

ID de los productos descargados:

S1B_IW_SLC__1SDV_20200622T121808_20200622T121826_022146_02A087_805A

S1A_IW_SLC__1SDV_20200628T121839_20200628T121905_033217_03D92A_3C3B

Sentinel-1 Toolbox maneja nativamente archivos zip, por lo que los archivos SLC deben permanecer comprimidos.

La técnica DInSAR se aplica utilizando el software SNAP, mediante un flujo de trabajo que se puede englobar en los siguientes pasos (Braun & Veci, 2021), como se muestra en la Figura 37:

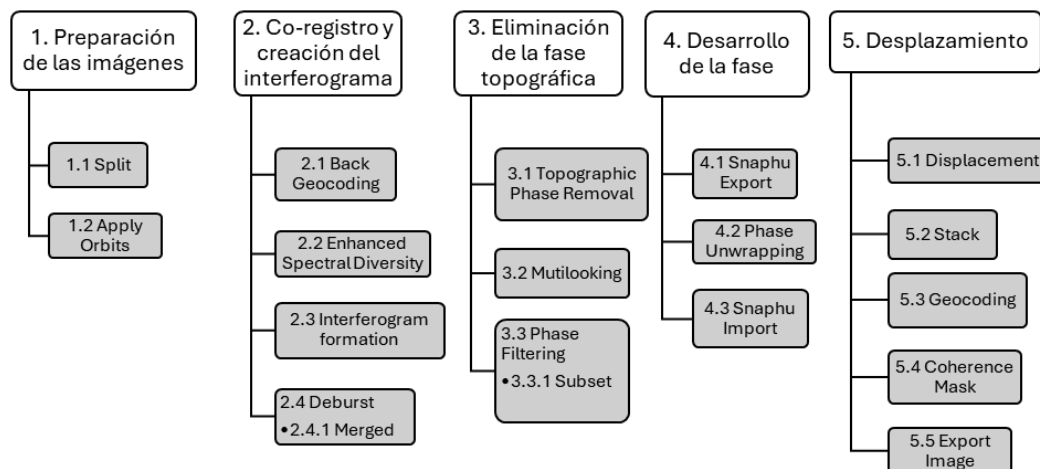


Figura 37. Pasos para procesamiento de imágenes SAR. Tomando en cuenta que el paso 2.4.1 Merged se aplica cuando la zona de interés abarca dos subproductos y 2.3.1 Subset solo aplica cuando la zona de interés es puntual.

Preparación de las imágenes en SNAP

1.1. *Split* (Dividir una subfranja del producto con Sentinel -1 TOPS, ver Tabla 5): Debido al método de adquisición por franjas (TOPS) del sensor y dependiendo del área de interés puede ser útil seleccionar únicamente para el análisis las subfranjas que engloban el área de estudio (ESA, 2007).

Seleccionamos para ambas imágenes, en que subfranjas se localiza tanto el epicentro del sismo como las estaciones GPS de operación continua HUAM, OXPE y OXUM, que se encuentran a lo largo de la costa de Oaxaca. También se seleccionarán los burst a utilizar. Debido a que cada subfranja en el par de imágenes presenta una cobertura distinta.

Con estos criterios se seleccionó la escena de la fecha 22/06/2020 como maestra y como escena esclava la adquirida en 28/06/2020.

Subfranja IW1	Subfranja IW2	Subfranja IW3
Burst de imagen maestra 1-4 Burst de imagen esclava 5-8	Burst de imagen maestra 2-5 Burst de imagen esclava 6-9	Burst de imagen maestra 1-5 Burst de imagen esclava 5-9
		

Tabla 6. Aplicación del operador *Split* en las subfranjas IW1, IW2, IW3 y las ráfagas tomadas en el par de imágenes.

1.2. *Apply Orbit File* (Aplicación de corrección de órbita de precisión): Se obtiene la información precisa de la posición y la velocidad del satélite, por lo tanto, al procesar las subfranjas, los vectores de estado de la órbita en los metadatos de estas se actualizan. Estas orbitas por lo general están disponibles unos días después de la adquisición de la escena.



2. Co-registro de las escenas y creación del interferograma

2.1. *Back-Geocoding* (Geocodificación inversa): Se co-registran los dos productos divididos (maestra y esclava) de la misma subfranja usando las orbitas de los productos y el Modelo de Elevación Digital (obtenido del producto SRTM 3Sec Auto Download).

2.2. *Enhanced Spectral Diversity* (Diversidad espectral mejorada): Explora los datos en el área superpuesta de las ráfagas, para después realizar las velocidades, así como la corrección del azimuth para cada ráfaga.

2.3. *Interferogram formation* (Formación del interferograma): Crea el interferograma en fase envuelta (enrollada) en unidades de 2π .

2.4. *Deburst* (Ráfagas): Remoción de líneas negras entre las ráfagas.

2.4.1. *Merge* (Fusión de subfranjas IW1, IW2, IW3): Fusión del producto dividido en diferentes subfranjas en un solo producto completo.

3. Eliminación de la fase topográfica

3.1. *Topographic Phase Removal* (Eliminación de la fase topográfica): Este operador remueve la contribución topográfica a partir del Modelo de Elevación Digital SRTM 3Sec (Auto Download), previamente utilizado en el *Back Geocoding*.

3.2. *Multilook* (Filtrado de múltiples vistas y fases): Debido al ruido moteado inherente en las imágenes SAR, se aplica este filtro para reducir el ruido, además de también obtener pixeles cuadrados, lo cual permite mejorar su postproceso en sistemas LOS y la interpretación de la imagen.

3.3. *Phase Filtering* (Filtrado de fase): Se utiliza el filtro adaptado de Goldstein para reducir el ruido de fase y se pueda realizar el desarrollo de fase.

3.3.1. *Subset* (Subconjunto): Recortamos la zona de interés, en donde se encuentra el área de estudio (para este caso no se aplicó)

4. Desenvolvimiento de fase

4.1. *Snaphu export* (Exportación a Snaphu): Exportamos el producto para usarse dentro del software Snaphu para poder desenvolver la fase.

4.2. *Phase unwrapping* (Desenvolver la fase): Este paso involucra usar un comando de línea para la cual se usa la terminal CMD de Windows 10 (ver Figura 38.) para el proceso del desenvolvimiento de la fase. Para este paso se manda a llamar a plugin Snaphu que previamente fue descargado e instalado.



```
C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\InSAR_P\Snaphu\IM_1M_2M_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_mrg_dinsar_ML_fit>snaphu
snaphu v2.0.4
usage: snaphu [options] infile linelength [options]
most common options:
-t use topography mode costs (default)
-d use deformation mode costs
-s use smooth-solution mode costs
-C <confstr> parse argument string as config line as from conf file
-f <filename> read configuration parameters from file
-o <filename> write output to file
-a <filename> read amplitude data from file
-c <filename> read correlation data from file
-m <filename> read byte mask data from file
-b <decimal> perpendicular baseline (meters)
-i do initialization and exit
-S single-tile reoptimization after multi-tile init
-l <filename> log runtime parameters to file
-u infile is already unwrapped; initialization not needed
-v give verbose output
-mst use MST algorithm for initialization (default)
-mcf use MCF algorithm for initialization
--tile <nrow> <ncol> <rowwrap> <colwrap> unwrap as nrow x ncol tiles
--nproc <integer> number of processors used in tile mode
type snaphu -h for a complete list of options

C:\InSAR_P\Snaphu\IM_1M_2M_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_mrg_dinsar_ML_fit>
C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\InSAR_P\Snaphu\IM_1M_2M_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_mrg_dinsar_ML_fit>snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_W_22Jun2020_203m2000.snaphu.log 11248
snaphu v2.0.4
25 parameters input from file snaphu.conf (84 lines total)
creating temporary directory snaphu_tiles_1250
unwrapping tile at row 0, column 0 (pid 1251)
unwrapping tile at row 0, column 1 (pid 1252)
unwrapping tile at row 0, column 2 (pid 1253)
unwrapping tile at row 0, column 3 (pid 1254)
unwrapping tile at row 0, column 4 (pid 1255)
unwrapping tile at row 0, column 5 (pid 1256)
unwrapping tile at row 0, column 6 (pid 1257)
unwrapping tile at row 0, column 7 (pid 1258)
unwrapping tile at row 0, column 8 (pid 1259)
unwrapping tile at row 0, column 9 (pid 1260)
unwrapping tile at row 1, column 0 (pid 1261)
unwrapping tile at row 1, column 1 (pid 1262)
unwrapping tile at row 1, column 2 (pid 1263)
unwrapping tile at row 1, column 3 (pid 1264)
unwrapping tile at row 1, column 4 (pid 1265)
unwrapping tile at row 1, column 5 (pid 1266)
unwrapping tile at row 1, column 6 (pid 1267)
unwrapping tile at row 1, column 7 (pid 1268)
unwrapping tile at row 1, column 8 (pid 1269)
unwrapping tile at row 1, column 9 (pid 1270)
unwrapping tile at row 2, column 0 (pid 1271)
unwrapping tile at row 2, column 1 (pid 1272)
unwrapping tile at row 2, column 2 (pid 1273)
unwrapping tile at row 2, column 3 (pid 1274)
unwrapping tile at row 2, column 4 (pid 1275)
unwrapping tile at row 2, column 5 (pid 1276)
```

Figura 38. Vistas de la CMD para desenvolvimiento de la fase y su ejecución.

4.3. **Snaphu Import** (Importar de Snaphu): Importamos la imagen con la fase desenvuelta por Snaphu, identificada como UnwPhase_ifg_*.snaphu.hdr

5. Desplazamiento

5.1. **Phase Displacement** (Fase de desplazamiento): Convertir los valores de la fase diferencial desenrollados (expresados en radianes) a valores de desplazamiento (expresados en metros)

5.2. **Create Stack** (Unión de las bandas de coherencia y el desplazamiento): Para verificar la calidad de los datos se utiliza la banda de coherencia y se apila con la de desplazamiento.

5.3. **Geocoding** (Geocodificación): Es la corrección del terreno en su geometría, implementando el método de ortorectificación con *Range Doppler*.

5.4. **Coherence Mask** (Mascara de coherencia): Se enmascaran los valores bajos de coherencia.

5.5. **Export** (Exportar): Exportar el producto obtenido en formato KML para visualizar en Google Earth o TIFF para visualizar en un software GIS.

Ver el Anexo A para una descripción más detallada del flujo de trabajo descrito anteriormente.

3.2.3. Productos interferométricos obtenidos mediante la aplicación de la técnica InSAR

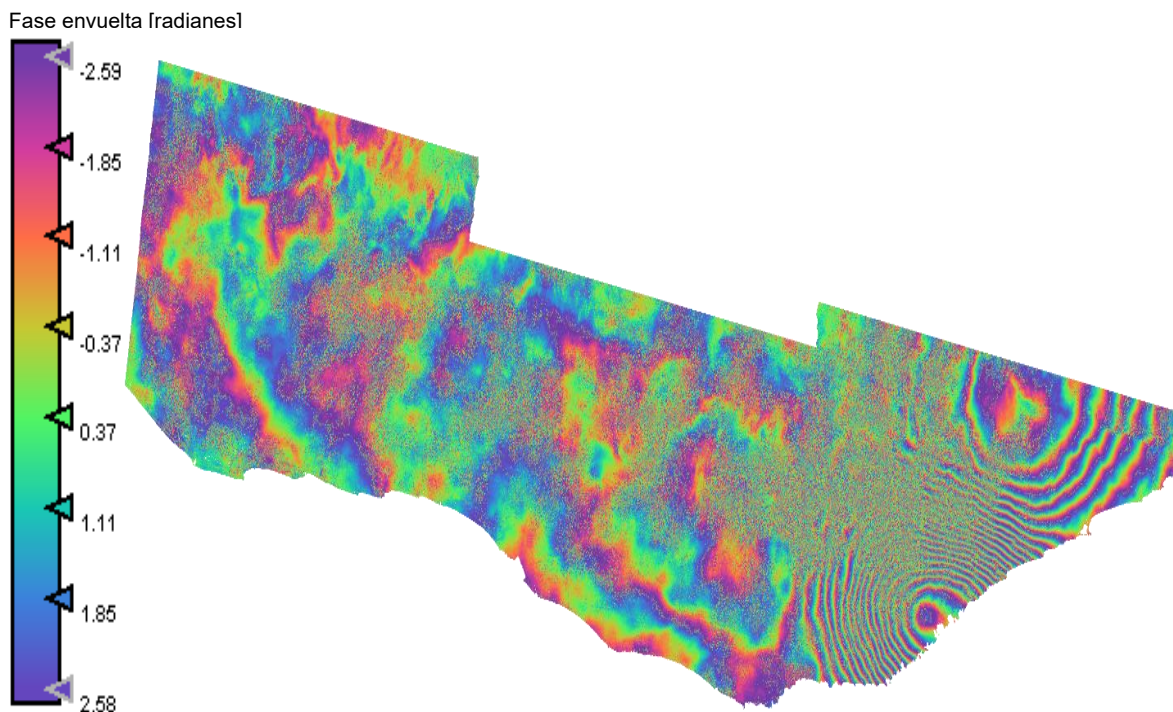


Figura 39. Interferograma SAR en fase envuelta. Esta imagen representa el producto final de la primera etapa del procesamiento interferométrico, que abarca desde la preparación de los datos hasta la formación y filtrado inicial del interferograma. Su obtención es el resultado secuencial de los pasos metodológicos; 1. Preparación de las imágenes: Las imágenes SAR de origen fueron preparadas mediante la división de subproductos IW1, IW2, IW3 (1.1 Split) y la aplicación de orbitas precisas (1.2 Apply Orbits) para corregir a geometría de la plataforma. 2 Co-registro y creación del interferograma: Las imágenes maestra y esclava se co-registran con alta precisión, usando 2.1 Back Geocoding y 2.2 Enhanced Spectral Diversity. Posteriormente, se formó el interferograma complejo (2.3 Interferogram formation) y se realiza la eliminación de las franjas negras entre las distintas tomas del sensor (2.4 Deburst), así como la fusión de los subproductos (2.4.1 Merged). 3 Eliminación de la fase topográfica: Se elimino la contribución topográfica utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (3.1 Topographic Phase Removal). Luego, se mejoró la relación señal ruido media el promediado de píxeles (3.2 Multilooking) y la aplicación de un filtro adaptativo (3.3 Phase Filtering) en la zona de estudio. Por lo tanto, el resultado de este interferograma de fase envuelta, donde las franjas de color cíclicas codifican la diferencia de fase medidas en radianes, confinada al rango de $[-\pi, \pi]$. Cada ciclo completo de color representa un cambio de fase de 2π radianes. Esta fase contiene la señal combinada del desplazamiento del terreno, efectos atmosféricos y ruido. Este producto es el insumo fundamental para la siguiente etapa (Paso 4 Desenrollamiento de la fase).

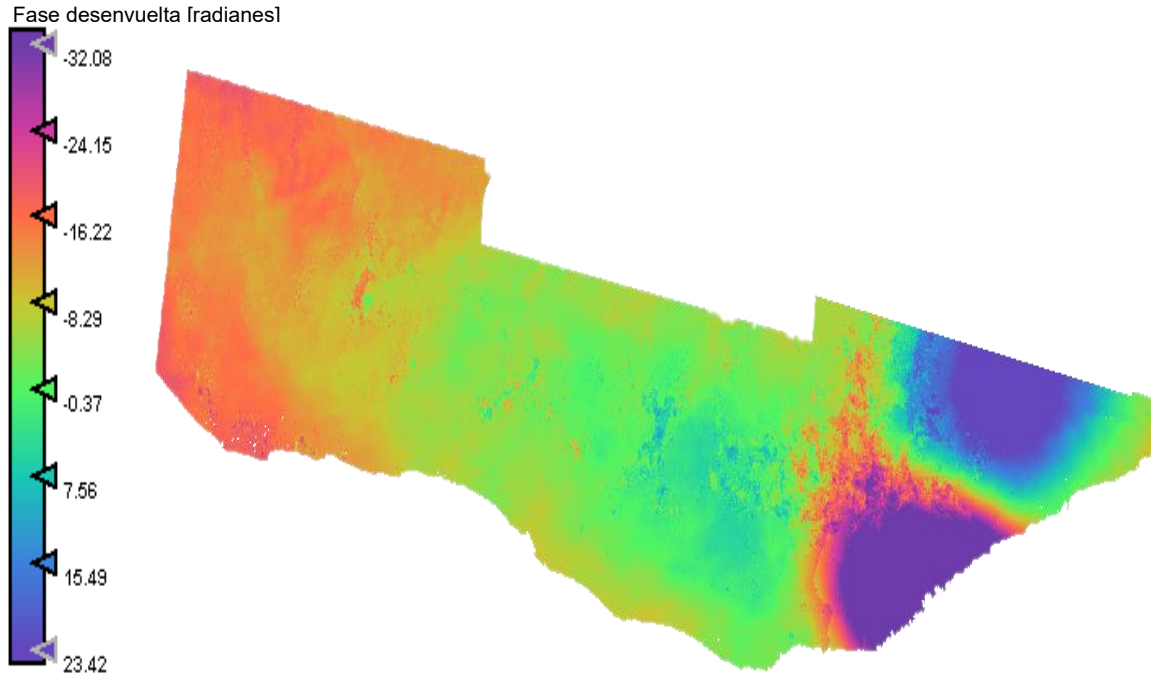


Figura 40. Interferograma SAR en fase desenvuelta. Esta imagen representa la fase interferométrica después del proceso de desarrollo (unwrapping), que constituye el paso 4 (4. Desarrollo de la fase / Desenvolvimiento de fase), del flujo del procesamiento. La obtención de este producto fundamental involucró los siguientes subpasos específicos: La fase envuelta del interferograma fue exportada en un formato compatible para el software Snaphu (4.1 Snaphu Export), al exportarse en formato compatible, se aplicó el algoritmo para llamar a Snaphu, para resolver las ambigüedades de 2π presentes en la fase envuelta, reconstruyendo la fase absoluta mediante técnicas de optimización global (4.2 Phase Unwrapping). La fase ya desarrollada fue reimportada al flujo de procesamiento principal para su posterior análisis (4.3 Snaphu Import). El resultado, mostrado en esta imagen, es un campo de fase continuo donde los valores (en radianes) son proporcionales al desplazamiento real del terreno a lo largo de la línea de visión del sensor, combinando con posibles efectos atmosféricos residuales. A diferencia de la fase envuelta, aquí la variación espacial de la fase es suave y continua, lo que permite una conversión directa a desplazamiento en la etapa siguiente (Paso 5 Desplazamiento). Este producto es esencial para la generación de mapas de desplazamiento. El proceso completo de desarrollo de fase se detalla en el Anexo A de esta tesis.

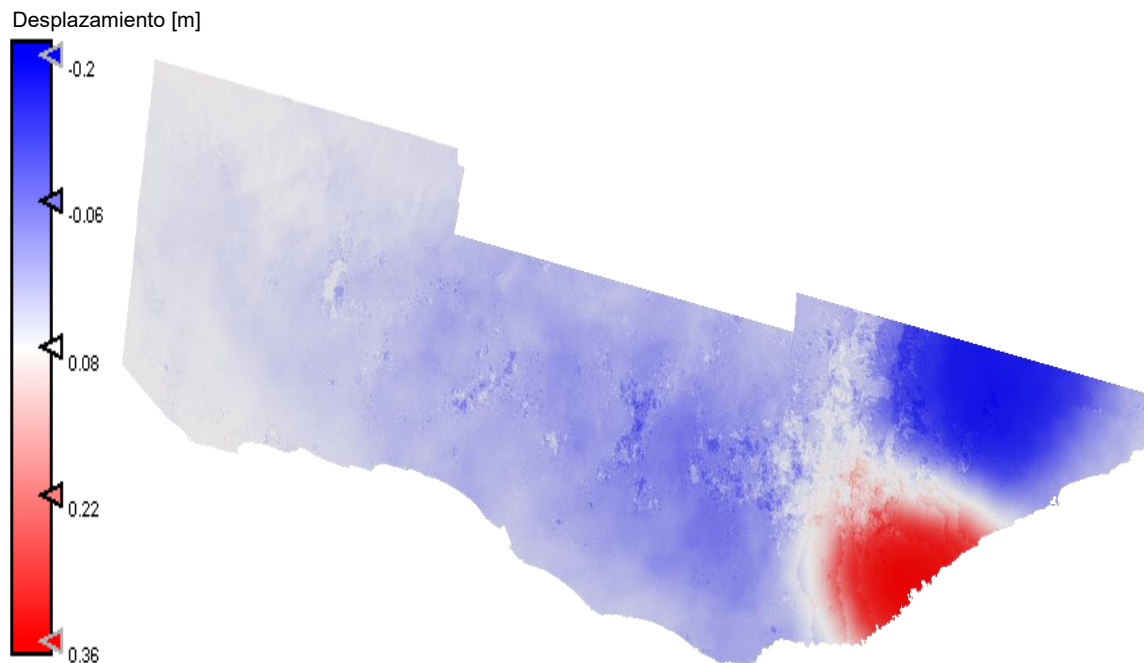


Figura 41. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS). Este resultado constituye el producto final del procesamiento interferométrico y se obtuvo mediante los siguientes pasos: Fase de desplazamiento (5.1 Phase Displacement) permitió que la fase desarrollada se convirtiera a desplazamiento lineal en la línea de visión del sensor mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) \cdot \Delta\phi$, donde λ es la longitud de onda del radar y ϕ la fase desarrollada en radianes. Para obtener un mapa de desplazamiento confiable se usó un par interferométrico (interferograma en fase envuelta e interferograma de fase desenvuelta), donde se apilan (5.2 Create Stack) para reducir el ruido y obtener una señal más confiable, este paso utiliza las bandas de coherencia del interferograma en fase envuelta y el desplazamiento (interferograma en fase desenvuelta). El mapa de desplazamiento fue transformado desde la geometría de radar (range – Doppler) a un sistema de coordenadas geográficas, permitiendo su localización espacial precisa y su integración con otros datos georreferenciados (5.3 Geocoding). Este mapa cuantifica el desplazamiento del terreno (en metros) ocurrido entre las dos adquisiciones SAR, donde los valores positivos indican movimiento hacia el sensor y los negativos representan alejamiento de este. El proceso completo de derivación de desplazamiento se detalla en el Anexo A de esta tesis.



Figura 42. Desplazamiento con coherencia enmascarada. Esta imagen representa el grado de similitud temporal entre las dos adquisiciones SAR, obtenida mediante los procesos finales del flujo de procesamiento, se generó este mapa de coherencia donde los valores (entre 0 y 1) indican la calidad y confiabilidad de la medida interferométrica en cada píxel (5.4 Coherence Mask). Los valores cercanos a 1 representan áreas de alta coherencia (superficies estables), mientras que valores cercanos a 0 indican baja coherencia (zonas con cambios temporales o vegetación). Este mapa de coherencia fue exportado (5.5 Export Image) en formato raster para su análisis cuantitativo. Los valores numéricos mostrados (entre 0.35 y -0.18) corresponden a representaciones específicas de la coherencia procesada, donde los valores negativos indican áreas de muy baja coherencia. Este producto se utilizó para enmascarar las zonas menos confiables del mapa de desplazamiento final, mejorando la calidad interpretativa de los resultados. La aplicación de la máscara de coherencia y el proceso de exportación se detallan en el Anexo A de esta tesis.

3.2.4. Productos interferométricos obtenidos mediante procesamiento selectivo de subproductos SAR

Se generaron los productos interferométricos aplicando una adaptación del flujo de procesamiento estándar, procesando directamente los subproductos individuales de las imágenes SAR individuales. Esta aproximación metodológica permitió optimizar el procesamiento para el área de estudio específica, omitiendo los pasos de fusión de subproductos (**2.4.1 Merge**) y sin recorte de la zona de interés (**3.3.1 Subset**) que no resultaban necesarios debido a la cobertura del área de estudio deseada. A continuación, se presentan los productos finales obtenidos:

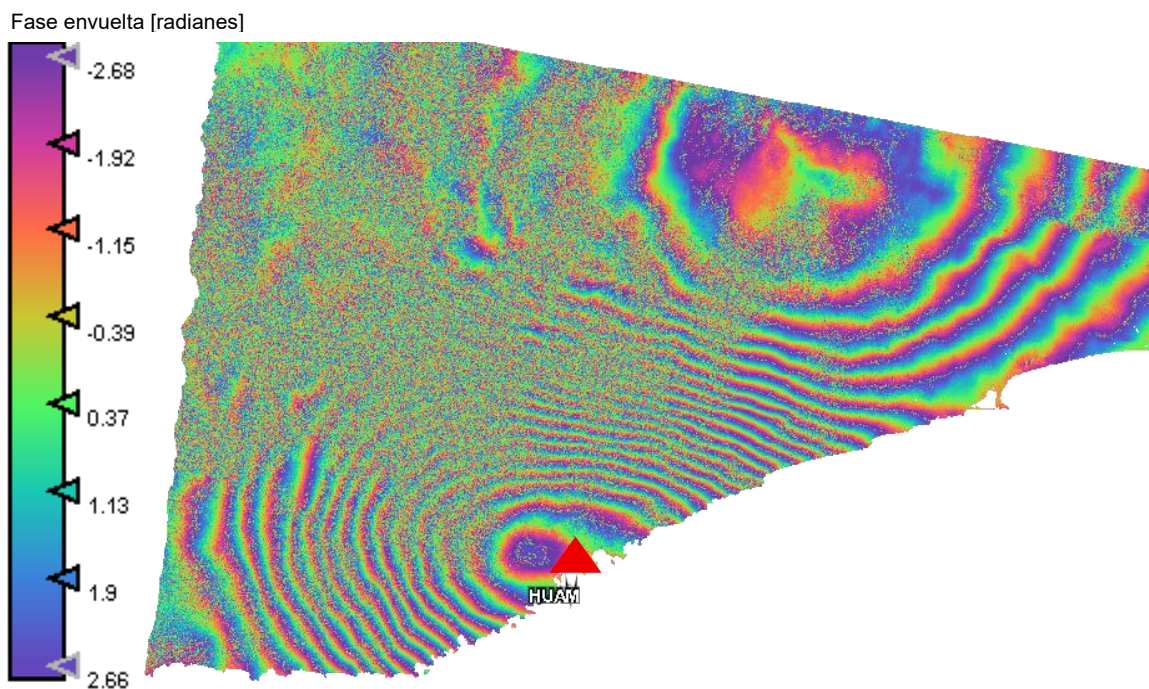


Figura 43. Interferograma SAR en fase envuelta en la estación HUAM (IW1). Este producto fue generado mediante procesamiento directo de subproductos SLC individuales (bursts TOPS), omitiendo la fusión de múltiples subproductos (paso 2.4.1 Merged) ya que el área de estudio se encontraba dentro de un único burst (IW1), por lo cual no se necesitó del paso adicional 3.3.1 Subset. Esta aproximación preserva la resolución espacial original. El interferograma muestra la diferencia de fase envuelta entre las dos adquisiciones SAR, donde las franjas cíclicas de color representan la diferencia de fase medida en radianes confinada al rango $[-\pi, \pi]$. Cada ciclo completo de color representa un cambio de fase de 2π radianes, conteniendo la señal combinada del desplazamiento de terreno y efectos topográficos residuales.

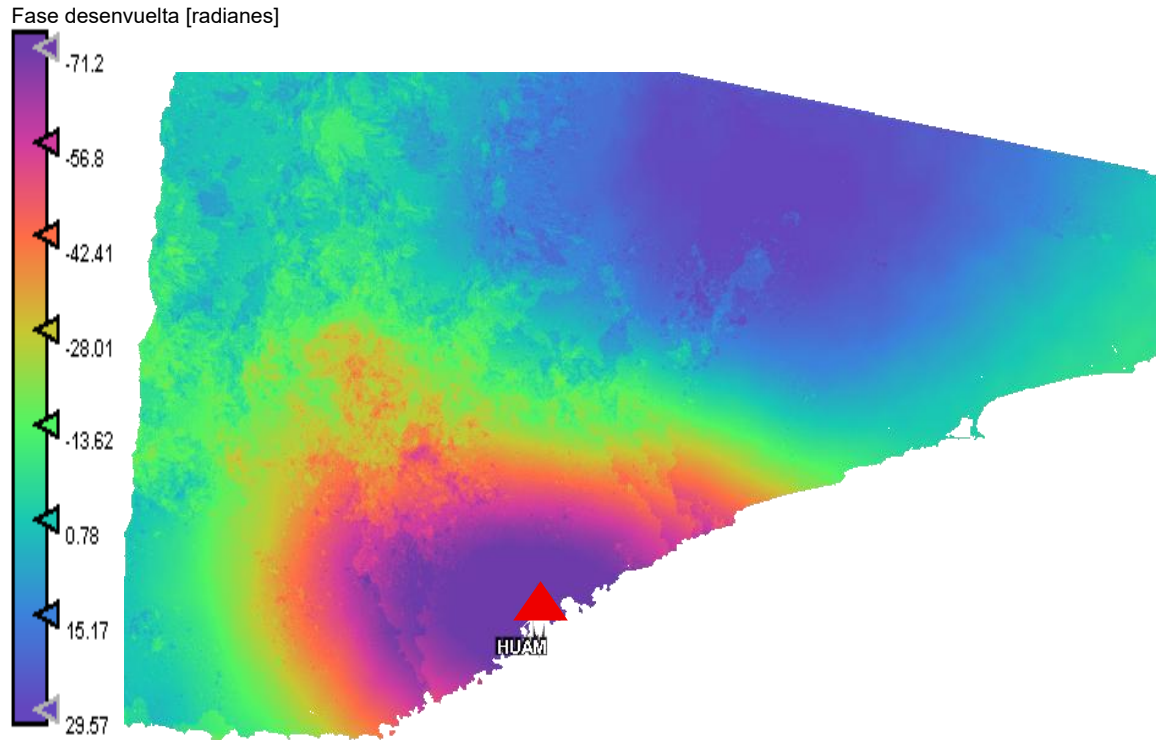


Figura 44. Interferograma SAR en fase desenvuelta en la estación HUAM (IW1). Obtenido mediante el procesamiento adaptado de bursts individuales (metodología detallada en Figura 43). La fase desarrollada se obtuvo mediante el algoritmo para el software de Snaphu, siguiendo los pasos de exportación (4.1 Snaphu Export), desarrollo de fase (4.2 Phase Unwrapping) e importación (4.3 Snaphu Import). Este producto representa la fase absoluta y continua, donde los valores en radianes son proporcionales al desplazamiento real del terreno a lo largo de la línea de visión del sensor, permitiendo la conversión directa a desplazamiento lineal en la etapa siguiente.

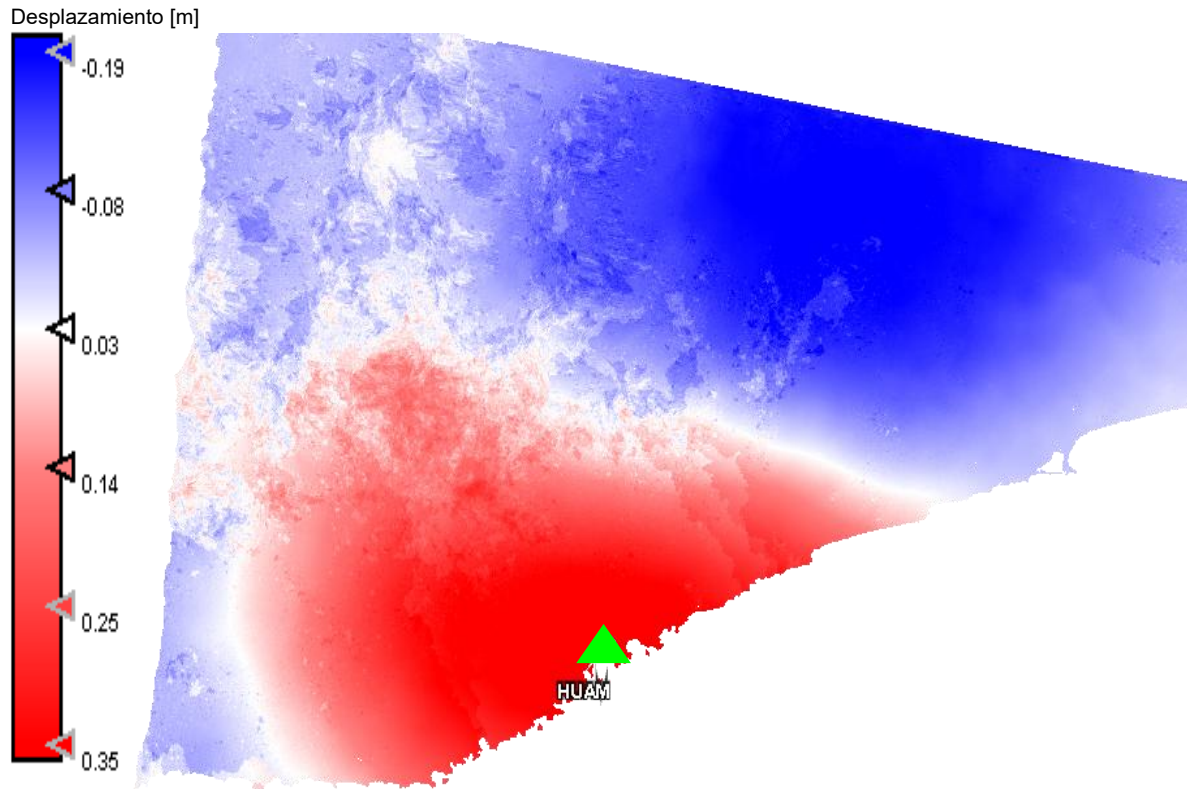


Figura 45. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS) en la estación HUAM (IW1). Resultado del flujo de procesamiento optimizado para subproductos individuales. La fase desarrollada se convirtió a desplazamiento lineal (5.1 Phase Displacement) mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) * \Delta\phi$ y fue geocodificado (5.3 Geocoding) a un sistema de coordenadas geográficas. Este producto cuantifica el desplazamiento del terreno en metros, donde valores positivos/negativos indican movimiento hacia/desde el sensor.

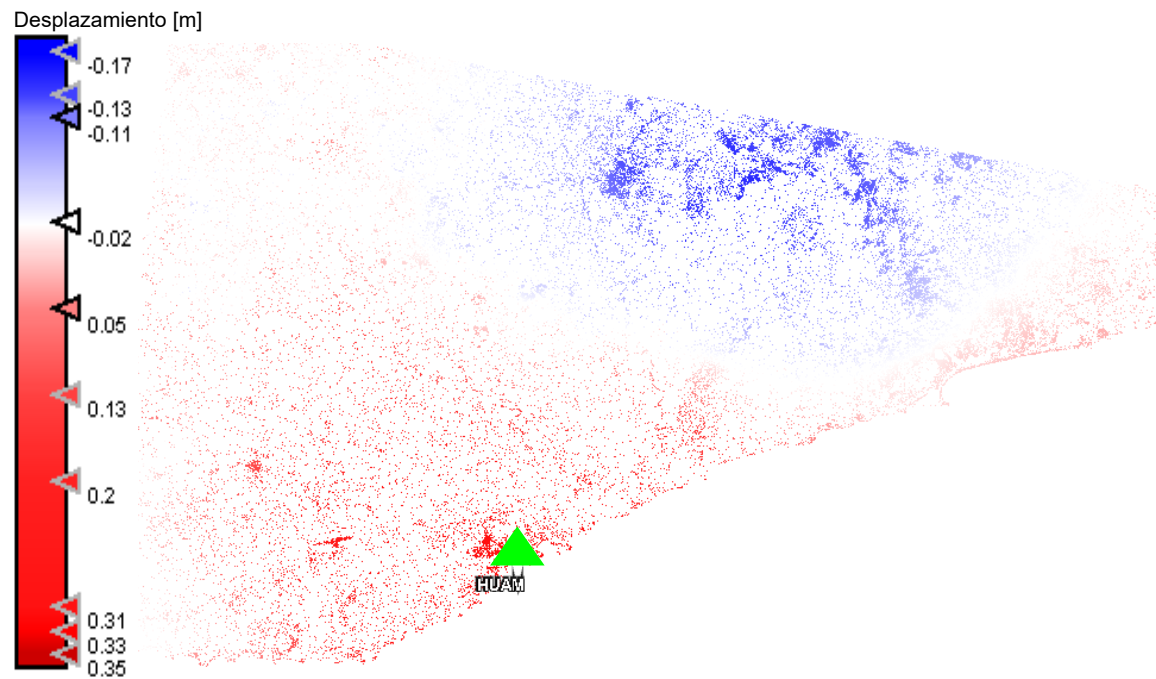


Figura 46. Desplazamiento con coherencia enmascarada en la estación HUAM (IW1). Este producto fue obtenido mediante el procesamiento directo de subproductos SLC individuales. Este producto de coherencia calcula el grado de similitud temporal entre las dos adquisiciones SAR, donde los valores típicamente oscilan entre 0 (sin coherencia) y 1 (coherencia perfecta). Los valores mostrados en escala específica (entre 0.35 y -0.02) representan una transformación de la coherencia original para resaltar variaciones espaciales, donde los valores más altos (menos negativos, ej. 0.02) indican áreas estables en las medidas interferométricas, y los valores más bajos (más negativos, ej. -0.35) corresponden a zonas con cambios temporales o vegetación. Este producto se utilizó como máscara de calidad (paso 5.4 Coherence Mask) para filtrar las áreas de baja confiabilidad en el de desplazamiento con coherencia enmascarada.

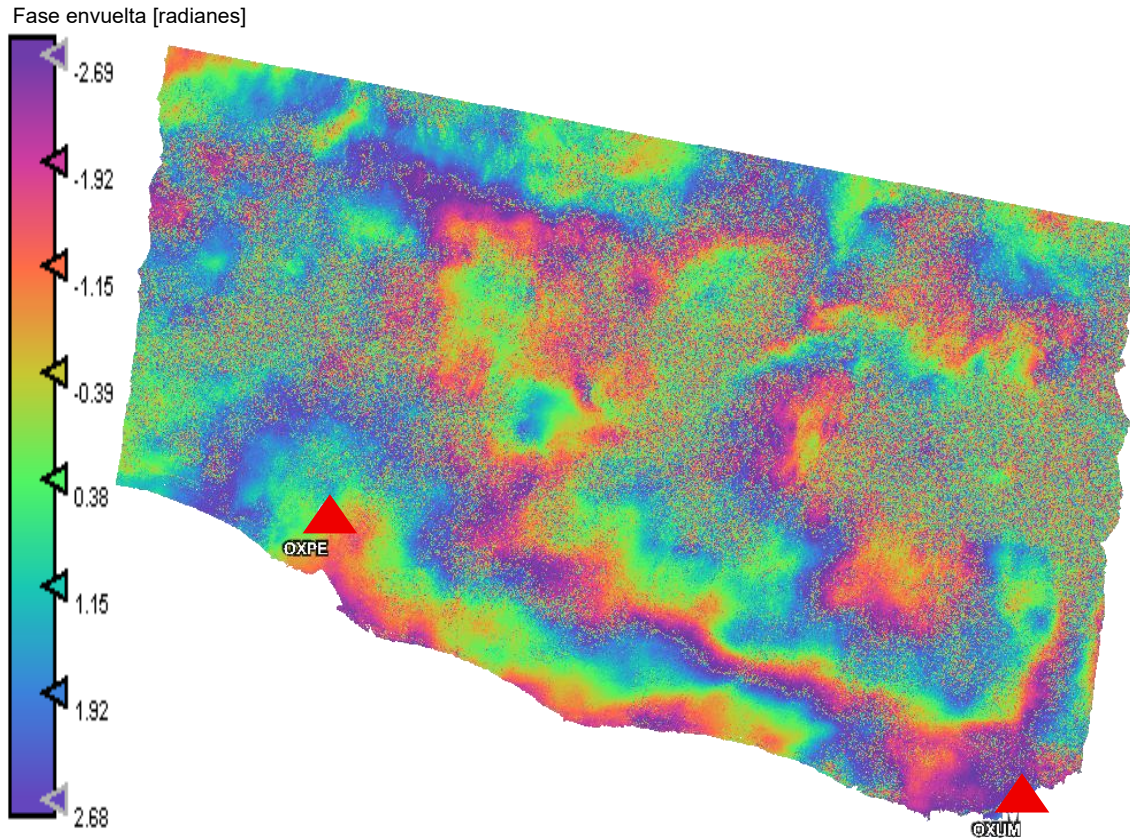


Figura 47. Interferograma SAR en fase envuelta en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Este interferograma fue generado mediante procesamiento directo del subproducto IW3, omitiendo los pasos de fusión (2.4.1) y submuestreo (3.3.1) al tratarse de una zona de estudio específica. El producto resulta de los pasos 1-2.4: preparación de imágenes (1.1 Split, 1.2 Apply Orbits), co-registro (2.1 Back Geocoding, 2.2 Enhanced Spectral Diversity), formación del interferograma (2.3 Interferogram Formation) y 2.4 Deburst. Las franjas cíclicas representan la diferencia de fase envuelta entre las adquisiciones SAR, confinada al rango $[-\pi, \pi]$ radianes, conteniendo la señal combinada de desplazamiento y topografía.

Fase desenvuelta [radianes]

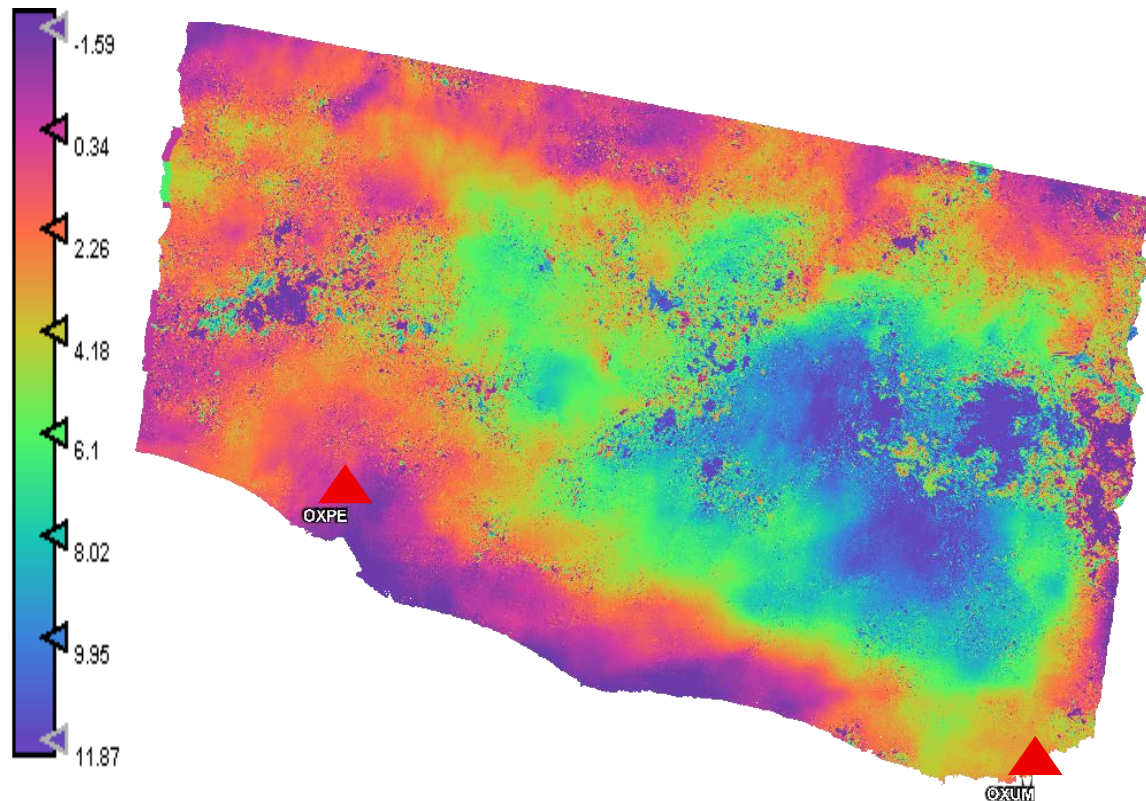


Figura 48. Interferograma SAR en fase desenvuelta en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Obtenido mediante el procesamiento completo del subproducto IW3, aplicando los pasos 4.1-4.3: exportación Snaphu (4.1), desarrollo de fase (4.2) e importación (4.3). La fase desarrollada representa la diferencia de fase absoluta y continua entre las adquisiciones, donde los valores en radianes son proporcionales al desplazamiento real del terreno. Este producto elimina las ambigüedades de 2π presentes en la fase envuelta, permitiendo la conversión directa a desplazamiento lineal.

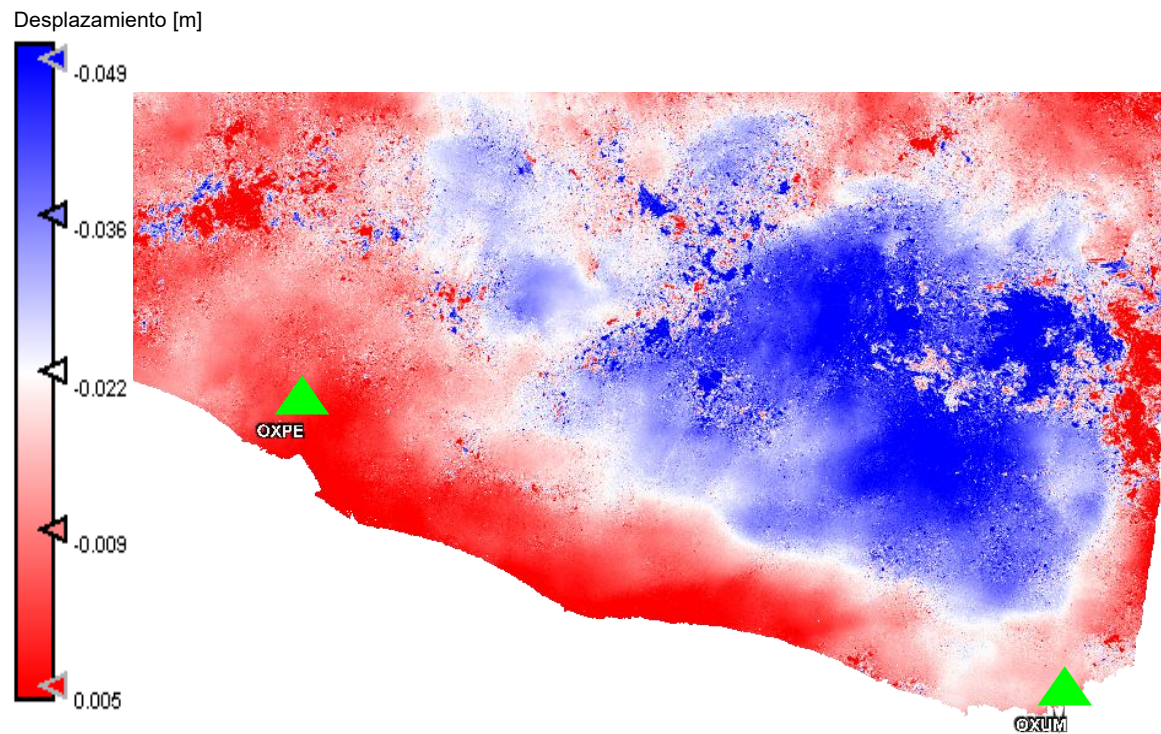


Figura 49. Desplazamiento superficial en la línea de visión del sensor (LOS) en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Producto final obtenido mediante la aplicación de los pasos 5.1-5.3 al subproducto IW3: cálculo de desplazamiento (5.1) mediante la relación $d = -(\lambda/4\pi) \cdot \Delta\phi$, y geocodificación (5.3) a coordenadas geográficas. Los valores representan el desplazamiento en la línea de visión del sensor, donde valores negativos indican alejamiento y positivos acercamientos. El procesamiento individual del IW3 permitió optimizar el análisis para esta zona específica.

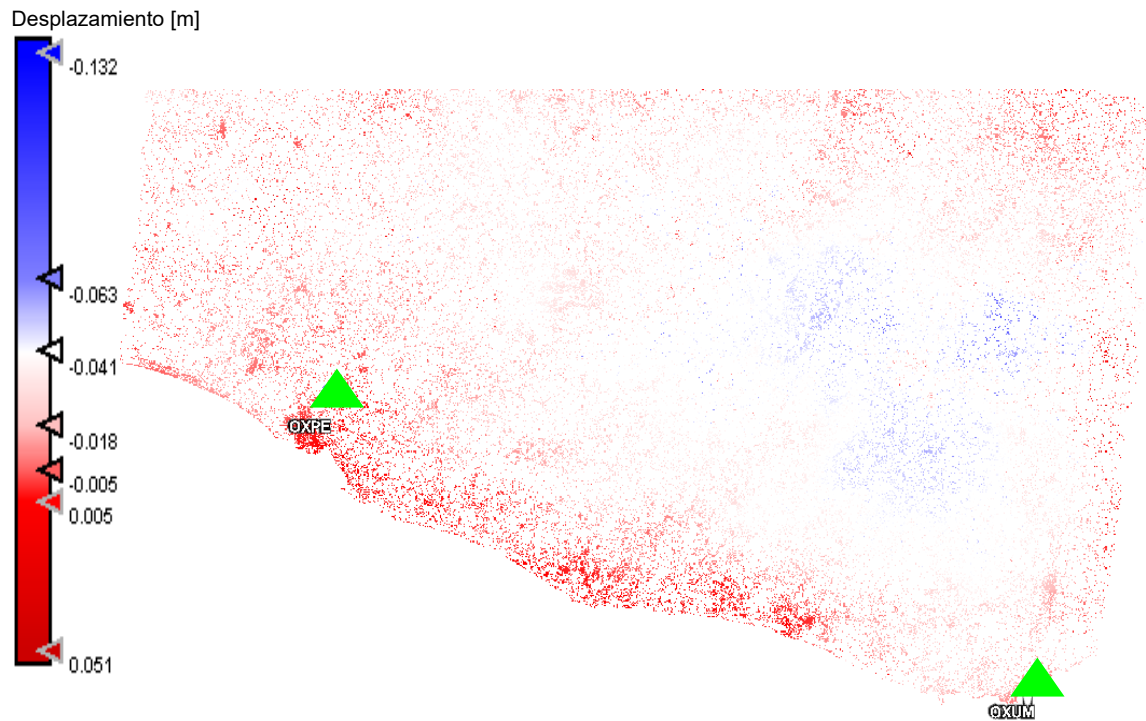


Figura 50. Desplazamiento con coherencia enmascarada en las estaciones OXPE y OXUM (IW3). Generado mediante los pasos 5.4-5.5 aplicados al subproducto IW3: máscara de coherencia (5.4) y exportación (5.5). Los valores representan el grado de similitud temporal entre adquisiciones, donde valores altos indican áreas estables con alta confiabilidad, y valores bajos corresponden a zonas con cambios temporales. Este producto se utilizó como máscara de calidad para el mapa de desplazamiento final.



3.2.5. Mapas de desplazamiento

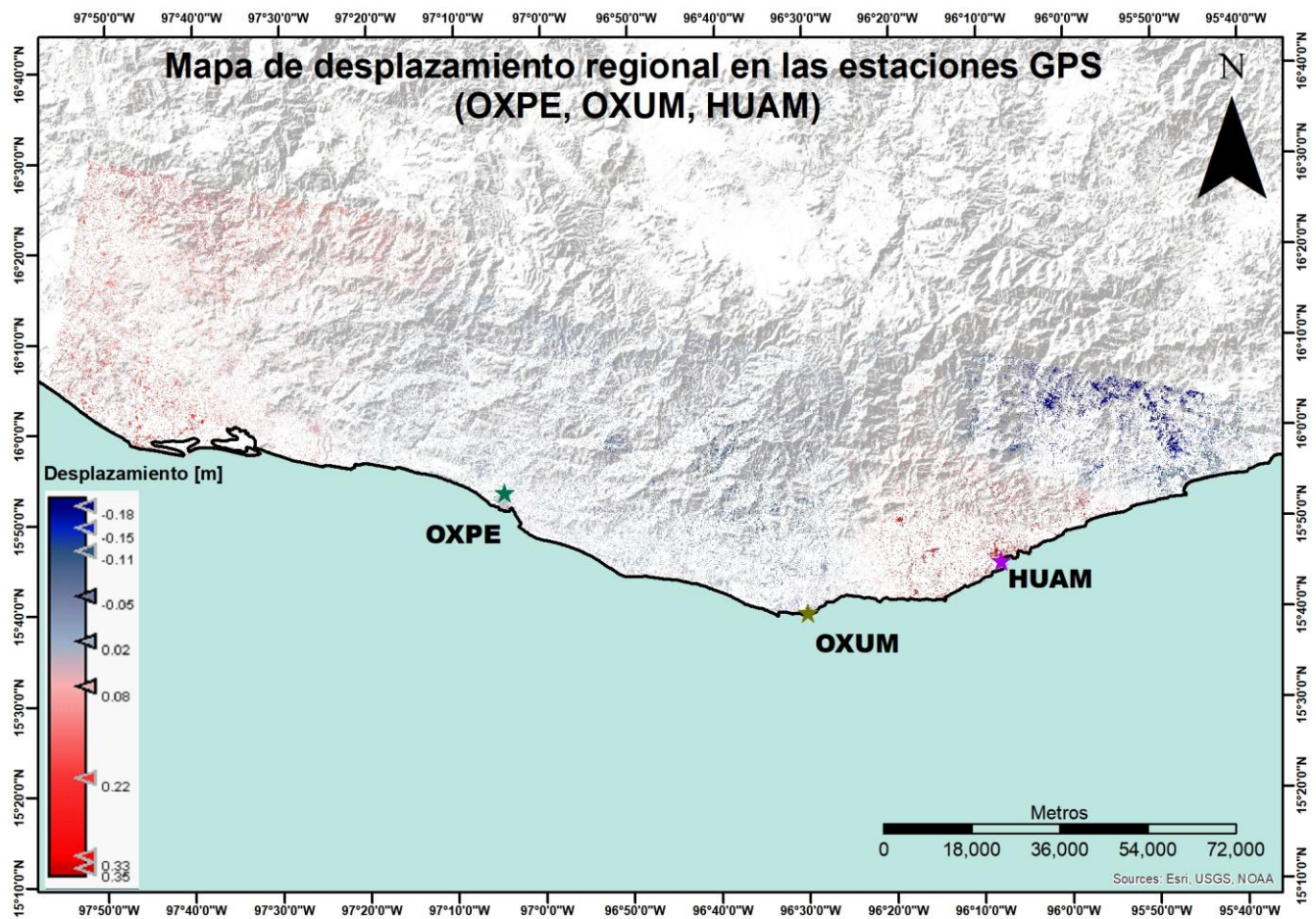


Figura 51. Mapa de desplazamiento regional exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de las estaciones GPS.

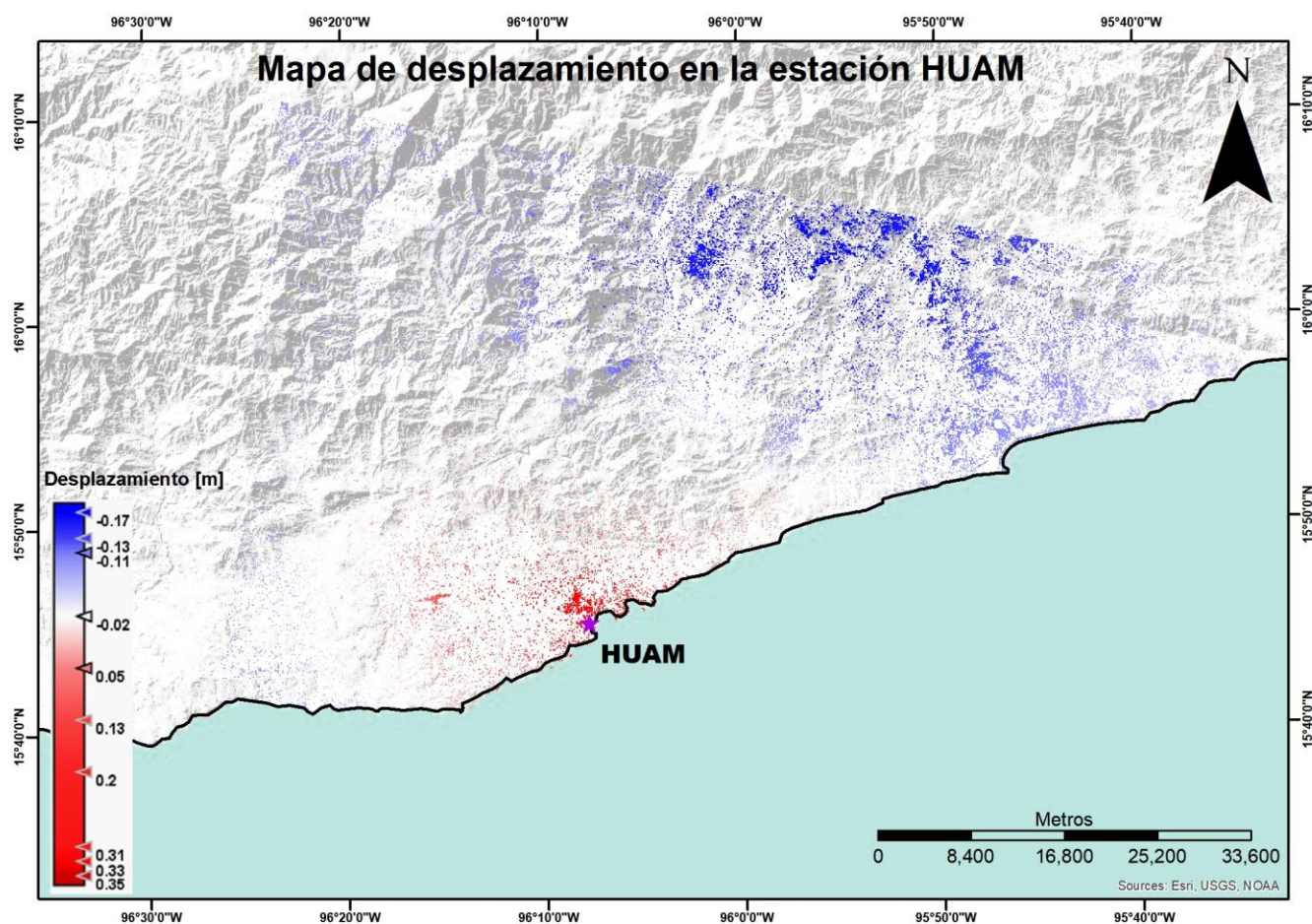


Figura 52. Mapa de desplazamiento exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de la estación GPS HUAM.

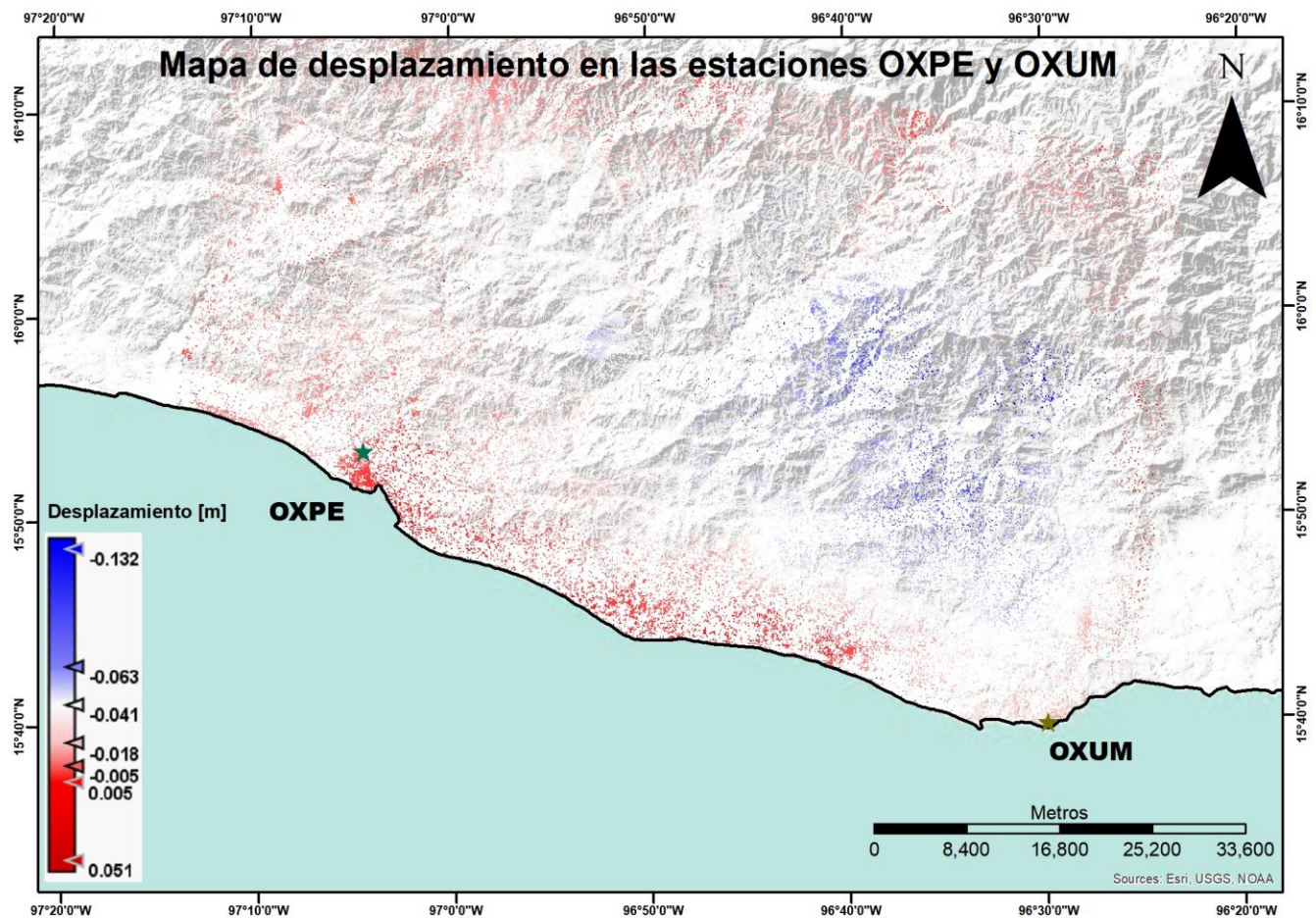


Figura 53. Mapa de desplazamiento exportado como imagen ráster en ArcGIS en la región de las estaciones GPS OXPE y OXUM.

Capítulo 4. Análisis de los resultados

El procesamiento de datos de las estaciones GPS HUAM y OXUM, ubicadas en la costa de Oaxaca, permitió cuantificar los desplazamientos acumulados en el periodo previo a un evento co-sísmico. Los resultados, detallados en la Tabla 7, muestran un patrón de movimiento asimétrico y significativo.

Estación	Desplazamiento acumulado previo al evento sísmico [m]
HUAM	0.35137[m]
OXUM	-0.08673 [m]

Tabla 7. Desplazamiento acumulado previo al evento sísmico en cada una de las estaciones GPS.

Se observa que la estación HUAM registra un desplazamiento positivo sustancial de 0.35 [m], mientras que la estación OXUM muestra un desplazamiento significativamente menor y de sentido opuesto, de -0.086 [m]. Esta diferencia cuantitativa y direccional es crítica para entender la dinámica regional.

El movimiento observado en la estación HUAM es consecuencia directa del sismo, ya que se produce tras la liberación de la energía acumulada en la interfaz de subducción. Este desplazamiento refleja la redistribución de esfuerzos en la corteza después del sismo, el cual tuvo lugar en la zona de contacto entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana. Durante el período previo de acoplamiento intersísmico, la deformación se había almacenado de manera elástica; una vez que se superó la resistencia de la falla, esa energía se liberó bruscamente, generando el sismo y, como resultado posterior, el desplazamiento medido.

El desplazamiento negativo en OXUM subraya que la acumulación de esfuerzos corticales no es homogénea en la región, si no que esta modulada por la complejidad estructural del sistema de subducción.

La relevancia de estos desplazamientos **pre-sísmicos** se corrobora con el comportamiento durante el evento del 23 de junio de 2020. La estación HUAM, ubicada cerca de la zona epicentral, registro esta acumulación pre-sísmica significativa (0.3513 m) lo que identifica como una zona de alta acumulación de esfuerzos. En contraste, la estación OXUM, situada a mayor distancia del epicentro, muestra un comportamiento diferente, lo que es consistente con un gradiente espacial en la deformación.



Como se mencionó anteriormente, tras el evento sísmico del 23 de junio, se observó que, para el 24 de junio de 2020 (ver Tabla 5), en la estación HUAM se obtuvo un desplazamiento acumulado de 0.335 [m], en comparación con la estación OXUM, presentó un desplazamiento de -0.0904 [m].

Al generar un interferograma para cada subproducto (ver Figura 52. y Figura 53.) a lo largo de la costa y emplear los datos de las estaciones de GPS, se logra obtener valores de desplazamiento sin pérdida de información, como se detalla en la Tabla 8. Este enfoque permite una representación más precisa de los desplazamientos, asegurando que se mantenga la integridad de los datos durante el análisis.

Estación	Desplazamiento [m]
HUAM	0.3368151 [m]
OXPE	-0.00179186 [m]
OXUM	-0.01214754 [m]

Tabla 8. Desplazamiento después del evento co-sísmico en cada una de las estaciones GPS con la técnica InSAR.

Al analizar los valores de desplazamiento, se observa que la estación HUAM presenta un desplazamiento positivo de 0.336 [m]. En contraste, la estación OXPE muestra un desplazamiento negativo de 0.0017 [m], mientras que la estación OXUM reporta un desplazamiento negativo de 0.012 [m].

Capítulo 5. Discusión y Conclusiones

5.1. Discusión

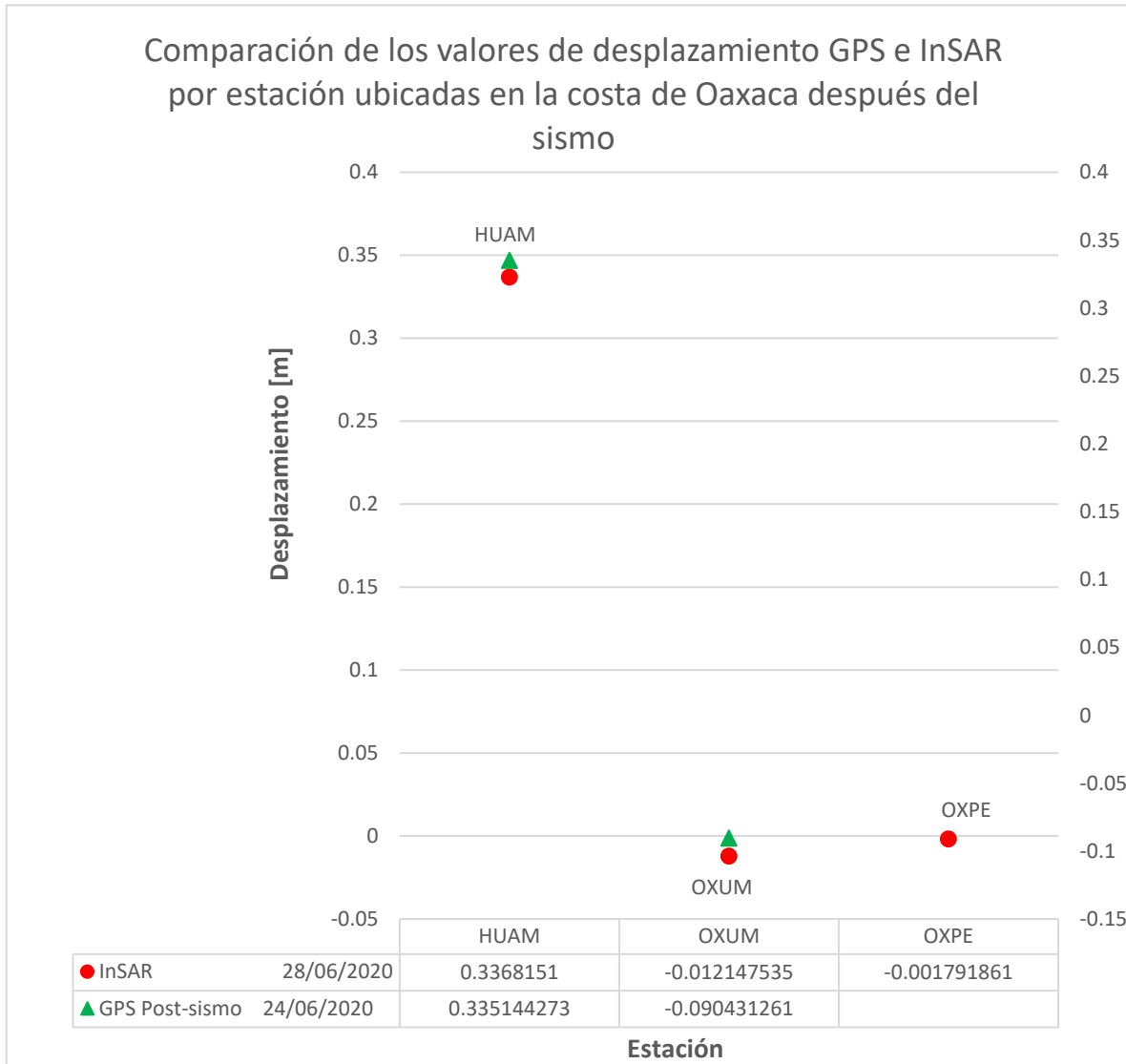


Figura 54. Comparación de los valores de desplazamiento GPS e InSAR por estación ubicadas en la costa de Oaxaca después del sismo.

De acuerdo con la Figura 54., la técnica de interferometría SAR (InSAR) ha permitido identificar un comportamiento de desplazamiento en la estación HUAM con una diferencia en GPS de 1.670 mm, lo cual al ser un valor de milímetros resulta no ser significativo. En contraste, la estación OXUM, al estar ubicada a mayor distancia de la zona afectada por el movimiento co-sísmico, presentan valores de desplazamiento con una diferencia de 7.828 cm, entre ellas.



Por otro lado, al aplicar la técnica de GPS, la estación HUAM reporta un desplazamiento similar al registrado por InSAR. Sin embargo, los datos obtenidos mediante GPS ofrecen un análisis con mayor resolución temporal, ya que se basan en mediciones continuas y con mayor tasa de muestreo comparado, sin embargo, son mediciones discretas en un solo sitio en contraste con InSAR. En comparación, la técnica InSAR utiliza un par de imágenes (fechas 22 de junio de 2020 y 28 de junio de 2020) que, para el análisis, están expresadas en diferentes componentes, por lo que se deben considerar correcciones correspondientes entre componentes LOS y ENU.

5.2. Conclusiones

El análisis de los desplazamientos generados por el sismo del 23 de junio de 2020 en La Crucecita, Oaxaca, se realizó mediante la integración de datos del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR). Esta metodología combinada permitió cuantificar y caracterizar los efectos del evento en la superficie terrestre con un alto grado de detalle.

La técnica GPS proporcionó un registro continuo de las variaciones en las posiciones de las estaciones antes y después del sismo, lo que es fundamental para analizar la evolución de los desplazamientos. Para optimizar la calidad de estas series temporales, se aplicó un suavizado mediante la media móvil simple (SMA), lo que permitió reducir el ruido y destacar las tendencias de desplazamiento. Cabe destacar que la estación OXPE fue excluida del análisis debido a una falla en el registro de datos, una limitación operativa atribuible a problemas comunes en los equipos.

Por su parte, la técnica InSAR generó un mapa sinóptico de desplazamiento en el terreno. La Figura 43. revela la presencia de anillos de interferencia en otra zona, los cuales indican la ocurrencia del evento de deformación cortical durante el periodo de estudio. Este patrón se corrobora con el perfil de desplazamiento de la Figura 46., que muestra una señal negativa, interpretada como una subsidencia aparente en la zona. Este hallazgo evidencia la utilidad de InSAR para ampliar la cobertura espacial del análisis y detectar fenómenos que podrían pasar desapercibidos con mediciones puntuales. Mientras InSAR ofrece una perspectiva sinóptica de la deformación aérea, el GPS proporciona una alta precisión temporal en ubicaciones específicas.

El contexto geológico del área de estudio, localizada en la Fosa de Tehuantepec una zona de subducción donde la placa de Cocos subduce bajo la placa Norteamericana resalta la



naturaleza dinámica y compleja de la región. Esta complejidad geodinámica introduce una variabilidad espacial en las mediciones. Por ello, la validación mutua entre técnicas geoespaciales es crucial para asegurar la fiabilidad de los datos en entornos tectónicamente activos.

En conclusión, la sinergia entre GPS e InSAR, respaldada por el conocimiento geológico estructural de Oaxaca, constituye una herramienta poderosa para el monitoreo de la deformación cortical. Los resultados obtenidos son de gran relevancia para la gestión del riesgo sísmico y la planificación urbana en zonas vulnerables, mejorando la capacidad de anticipación y respuesta ante futuros eventos.



Referencias

- Aguilera Martínez., M. A., Cureño Suriano, R., Zarate López, J., De La Calleja M., A., & López Gallardo, A. (1999). *CARTA GEOLÓGICO-MINERA MINATITLÁN E-15-7, ESCALA 1:250,000*. Informe técnico, Secretaría de Economía, Consejo de Recursos Minerales (RM). Recuperado el 05 de Marzo de 2024, de https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T301999AUMM0001_01.PDF
- ASF. (03 de Abril de 2016). *ASF DATA SEARCH VERTEX*. (NASA, Editor, E. S. Agency, Productor, & European Sapce Agency) Recuperado el 25 de julio de 2024, de ASF VERTEX: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Braun , A., & Veci, L. (2021). *TOPS Interferometry Tutorial*. (ESA, Ed.) SkyWatch Space Applications. Recuperado el 23 de septiembre de 2024, de https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf
- Calmus, T. (27 de mayo de 2021). La Tectónica de Placas: una teoría planetaria. *La Tectónica de Placas: una teoría planetaria*. Recuperado el 29 de junio de 2024, de <https://www.youtube.com/watch?v=SSFQHasYbIl&t=1524s>
- Cantos Figuerola, J. (1974). *Tratado de Geofísica aplicada* (2da ed.). (E. S. MINAS, Ed.) Madrid, España: Escuela de T.S. de I. de Minas. Recuperado el 07 de Febrero de 2024
- Conaliteg. (2022). *Atlas de geografía del mundo. Libro de educación primaria grado 5°*. (Conaliteg, Editor) Recuperado el 18 de abril de 2024 , de <https://libros.conaliteg.gob.mx/2022/P5AGA.htm>
- Copernicus. (s.f.). Precise Orbit Determination. Recuperado el 23 de agosto de 2024, de <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/precise-orbit-determination>
- Copernicus. (s.f.). *Sentinel-1 products*. SentiWiki. Recuperado el 28 de septiembre de 2023, de <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-products>
- DAAC, A. (22 de agosto de 2022). *ASF Alaska Satellite Facility - Distributed Active Archive Center*. Recuperado el 19 de agosto de 2024, de ASF - DAAC: <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/sentinel-1/>
- DeMets, C., Argus, D., & Gordon, R. G. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21(20). Recuperado el 23 de junio de 2024
- Díaz Santana, A. (2016). *Procesado de datos SAR del satélite Sentinel-1 para el estudio de zonas costeras*. Las Palmas de Gran Canaria, España: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Recuperado el 18 de septiembre de 2024, de <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/92185/1/Aridane%20D%C3%ADaz%20Santana.pdf>



- EROS Center. (30 de julio de 2018). USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. (USGS, Ed.) Recuperado el 17 de agosto de 2024, de <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1#overview>
- ESA. (19 de febrero de 2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, February 2007)*. (K. Fletcher, Ed.) Noordwijk, The Netherlands, Netherlands: ESA. Recuperado el 23 de agosto de 2024, de https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf
- ESA. (2016). Science Toolbox Exploitation Platform. Recuperado el 23 de agosto de 2024, de <https://step.esa.int/main/wp-content/help/?version=10.0.0&helpid=InterferogramOp>
- Esri. (s.f.). *Introducción al radar de apertura sintética*. (A. Pro, Editor) Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/image-analyst/introduction-to-synthetic-aperture-radar.htm>
- European Space Agency [ESA]. (2013). *ESA*. Recuperado el 23 de octubre de 2024, de https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/349449/S1_SP-1322_1.pdf
- Geng, J., & Ge, M. (06 de Junio de 2019). *GITHUB*. (C. Li, Ed.) Recuperado el 18 de Junio de 2024, de <https://github.com/PrideLab/PRIDE-PPPAR>
- Geofísica, I. d. (Noviembre de 2008). ¿VULCANOLOGÍA...? Y EL ROMPECABEZAS GEOLÓGICO MEXICANO: TERRENOS TECTONOESTRATIGRÁFICOS COMO UNA HERRAMIENTA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA GEOLÓGICA DE MÉXICO. (M. Caballero Miranda, A. M. Soler, & S. Zueck G., Edits.) (37), 02. Recuperado el 01 de Marzo de 2024, de <https://www.geofisica.unam.mx/assets/geofisicosas37.pdf>
- Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (01 de noviembre de 1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. 25(No. 21). Pasadena, California, EE. UU. AA.: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS. Recuperado el 23 de agosto de 2020, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1998GL900033>
- Gómez, P. D. (2019). *Aplicación de la interferometría SAR satelital para la detección y monitoreo de los deslizamientos en la carretera escénica Tijuana-Ensenada, BC*. Ensenada, Baja California, México: CICESE. Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2801/1/Tesis-DavidGomezPalacios_MaestriaCT_21_mayo_2019.pdf
- González Ramos, A., & Arceo y Cabrilla, F. A. (2019). *Carta Geológico-Minera Oaxaca E14-9 Escala 1:250, 000 Estado de Oaxaca*. Secretaría de Economía, Consejo de Recursos Minerales (RM). Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 22 de Febrero de 2024, de https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T201997GORA001_01.PDF



- Handbook, E. O. (2008). *Earth instruments*. Obtenido de https://eohandbook.com/eohb2008/earth_instruments.html
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer Netherlands. doi:10.1007/0-306-47633-9
- Harrison, C. (02 de marzo de 2016). The present-day number of tectonic plates. *Earth Planet and Speace*(37), 68. doi:<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0400-x>
- Huerta, E., & et. al. (2005). *GPS: Posicionamiento satelital* (1a. ed.). (U. N. Rosario, Ed.) Rosario, Argentina: UNR Editora. doi:ISBN 950-673-488-7
- INEGI. (2015). *El Geoide Gravimétrico Mexicano 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. doi:www.inegi.org.mx.
- Leica. (2015). *GPS Basics* (1a ed.). Suiza: Leica Geosystem AG. Recuperado el 4 de septiembre de 2024, de https://www.instop.es/gps/PDF/gpsbasics_es.pdf
- Leick, A., Rapoport, L., & Tatarnikov, D. (2015). *GPS Satellite Surveying* (4th Edition ed.). Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781119018612
- Lichtenegger, H., Hofmann-Wellenhof, B., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems*. Springer. Recuperado el 16 de agosto de 2024, de <https://nguyenduyliemgis.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/gnss-global-navigation-satellite-systems-gps-glonass-galileo-and-more-2008.pdf>
- Lopez Dinorín , R., & Tentle Jiménez, M. A. (2012). *ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES OBSERVADOS CON GPS EN EL OCCIDENTE DE LA CUENCA DE MÉXICO*. Cd. México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 12 de agosto de 2024, de https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000669552/3/0669552_A1.pdf
- Martínez Amador, H., Castro Rodríguez, M. G., Motolinia García, O., Salinas Rodríguez, J. M., Aranda Osorio, J. N., & Zarate Barradas, R. (2019). *CARTA GEOLOGICA-MINERA SALINA CRUZ E15-10, D15-1, ESCALA 1:250,000*. Informe técnico, Secretaría de Economía, Consejo de Recursos Minerales (RM). Recuperado el 01 de Marzo de 2024, de https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T201999MAAH0001_01.PDF
- Meyer, Franz J;. (17 de junio de 2019). Sentinel-1 InSAR Processing using Sentinel-1 Toolbox. (U. d. Faibanks, Ed.) ASF. Recuperado el 20 de agosto de 2024, de https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/05/generate_insar_with_s1tbx_v5.4.pdf
- Montero Aguilar, I. N. (2010). *Modelo neuronal artificial para estimar la aceleración máxima del terreno por sismos en el estado de Oaxca*. Tesis Ing. Civil. (M. Alcántara Nolasco, Ed.) Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 08 de Marzo de 2024, de https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000663725/3/0663725_A1.pdf



- Monterroso, F., Bonano, M., De Luca, C., & et, a. (29 de septiembre de 2020). A Global Archive of Coseismic DInSAR Products Obtained Through Unsupervised Sentinel-1 Data Processing. *remote sensing*, 21. Recuperado el 26 de septiembre de 2024, de https://www.researchgate.net/publication/345968707_A_Global_Archive_of_Coseismic_DInSAR_Products_Obtained_Through_Unsupervised_Sentinel-1_Data_Processing
- Montes de Oca, M. (2004). TOPOGRAFÍA. En M. Montes de Oca, & S. D. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR (Ed.), *TOPOGRAFÍA* (Cuarta edición revisada ed., pág. 344). México, México: Alfaomega. Recuperado el 01 de Febrero de 2024
- Natural Resources Ressources. (2018). *Fundamentals of Remote Sensing*. Canada: Canada. Recuperado el 8 de septiembre de 2024, de https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf
- Ortega Gutierrez, F. (1978). Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, estados de Puebla y Oaxaca. *Revista del Instituto de Geología*, Vol. 02, p. 112 -131. Recuperado el 4 de Marzo de 2024
- Scholz, C. H. (2002). *The mechanics of earthquakes and faulting* (Segunda edición ed.). Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511818516
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). (1997). *Carta Geológico-Minera Oaxaca, clave e 14-9*. Secretaría de Economía, Consejo de Recursos Minerales. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 05 de Marzo de 2024, de https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/CartografiaWeb/T201997GORA001_02.PDF
- SGM. (2004). Síntesis de información geográfica del Estado de Oaxaca. En INEGI, *Síntesis de información geográfica del Estado de Oaxaca* (págs. 59 - 64). Recuperado el 05 de Marzo de 2024, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvin/egi/productos/historicos/2104/702825224394/702825224394_10.pdf
- SGM. (15 de enero de 2017). *Gobierno de México, Museo Virtual, Servicio Geológico Mexicano*. (SGM, Editor) Recuperado el 2024 de junio de 16, de Gobierno de México, Museo Virtual, Servicio Geológico Mexicano: https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/Escalas-sismos.html
- Shorth, N. M. (2007). *The Remote Sensing Tutorial (An Online Handbook)*. NASA's Goddard Space Flight Center. Recuperado el 8 de septiembre de 2024, de https://www.grss-ieee.org/wp-content/uploads/2014/07/EN_TUTORIAL_COMPLETO.pdf
- Sillerico, E., Marchamalo, M., Rojas, J. G., & Martínez, R. (2010). *La técnica DInSAR: Bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción*. Informes de la construcción. Recuperado el 25 de septiembre de 2024, de <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1036/1158>



- SISPLADE. (2022). *Peligros de origen geológico y localización de zonas vulnerables* (1ra ed., Vol. 01). (I. d. bienestar, Ed.) Oaxaca, Oaxaca, México: Gobierno del Estado de Oaxaca . Recuperado el 08 de Marzo de 2024, de <http://sisplade.oaxaca.gob.mx/sisplade/PeligrosDocs/Tomo1/tomo1%20cap.1%20%20peligros%20de%20origen%20geologico%20y%20localizacion%20en%20zonas%20vulnerables.pdf>
- SSN. (2019). *Zona de subducción mexicana y su potencial para un sismo mayor*. Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional. México: UNAM. Recuperado el 06 de Marzo de 2024, de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf>
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física* (8va ed.). Madrid: Pearson Educación S. A. Recuperado el 07 de Febrero de 2024
- Tolson, G. (10 de Enero de 2005). VOLUMEN CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO GRANDES FRONTERAS TECTÓNICAS DE MÉXICO. (A. Camprubi, Ed.) *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(1), 111-122. doi:<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2005v57n1a6>
- Wicander, R., & Monroe, J. S. (2007). *Historical Geology* (5ta ed.). (Cengage Learnig, Ed.) Belmont, CA, U.S.A: Thomson Brook Cole. Recuperado el 18 de Febrero de 2024



Anexo A

La realización del mapa de desplazamientos mediante la técnica de interferometría SAR (InSAR) se llevó a cabo utilizando un par de imágenes del satélite Sentinel-1, empleando el software de código abierto SNAP en un sistema operativo Windows 10. Este análisis puede requerir un tiempo de maquina considerable, especialmente en sistemas con memoria RAM insuficiente. Para este proceso se debe tomar en cuenta las características mínimas que se deben tomar a consideración para realizar la formación de interferometría son las siguientes:

- Capacidad de almacenamiento de 256 GB (un disco externo de 1 Tb para imágenes originales)
- Disco sólido de 1Tb
- Sistema operativo Windows 10
- Memoria RAM de 16 GB (mínimo)
- Acceso a Internet

Este anexo pretende o tiene fin de especificar el uso de la herramienta geoespacial en el procesamiento de imágenes para análisis de eventos geofísicos, para este caso el sismo ocurrido en la zona de La Crucecita, Oaxaca, México, el día 23 de junio de 2020.

A continuación, se presenta una descripción detallada de los pasos seguidos para la obtención de los productos necesarios para el análisis de desplazamientos tras un evento sísmico.



Descarga de imágenes Satelitales Sentinel- 1

Una vez registrado en Earthdata ([Earthdata Login User Registration \(nasa.gov\)](https://earthdata.nasa.gov/login)) e iniciar sesión en Vertex, procedemos a dibujar nuestra área de interés.

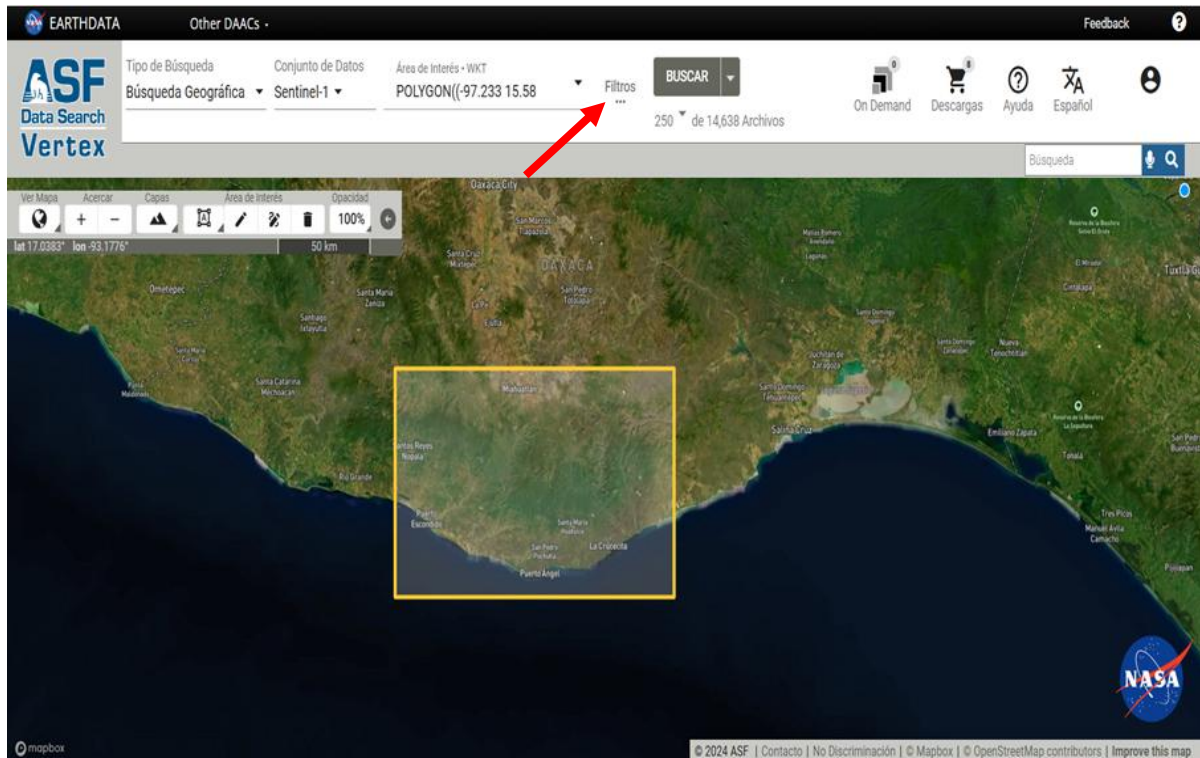


Figura A1. Visualización general de la web Alaska Vertex para descarga de datos. Tomado de (ASF, 2016)

Seleccionamos la sección de filtros (ver Figura A1. parte superior, flecha roja), en donde se debe tener en cuenta qué tipo de datos queremos adquirir, así como un margen de fechas para la adquisición, en este caso:

- **Filtros de fechas**
01/06/2020 – 31/06/2020
- **Filtro del tipo de producto**
S1: Sentinel-1 (Mission)
L1: Nivel 1
SLC: Single Look Complex (Product type)
IW: Interferometric Wide Swath (Beam mode)
VV+VH: Polarización Vertical-Vertical/Vertical Horizontal
Ascending/Descending: Dirección de vuelo (Orbits)
SA: SAR estándar / Annotation



Una vez que los parámetros de los filtros de búsqueda (ver Figura A2.) hayan sido ingresados, se procede a buscar las escenas que mejor se adapten a nuestra área de interés, que fue seleccionada previamente.

Figura A2. Sección de filtros de búsqueda. Tomado de (ASF, 2016)

Cuando se procede a hacer la búsqueda (ver Figura A3.), el sistema muestra todas las escenas que se encuentren dentro del área de interés (marco amarillo). Al seleccionar una escena (marco rojo), para elegir la mejor escena es recomendable que el área de interés este centrada lo mejor posible, una vez seleccionada la escena en la parte inferior seleccionamos Línea Base (flecha roja), para que haga uso de esa escena para interferometría.

Figura A3. Muestra de todas las escenas disponibles, en el área de interés. Tomado de (ASF, 2016)



Esto nos ayudara a ver la línea base temporal, tomando el criterio de que Sentinel -1 tiene un tiempo de revisita de 12 días. En la parte gráfica (inferior derecha), se muestran los criterios de referencia (ver Figura A4. cuadro rojo), se observa que va de -12 a 12 días (flecha roja), lo cual nos permite elegir las escenas pre- sismo y post- sismo, con las fechas más cercanas, donde primero elegiremos la escena post- sismo, para este caso tomaremos la escena con fecha del 28 de junio de 2020 y como para este caso, está a disposición la fecha del 22 de junio de 2020 podemos obtener la escena pre-sismo, ambas escenas deben ser de la misma dirección de vuelo en su periodo orbital.

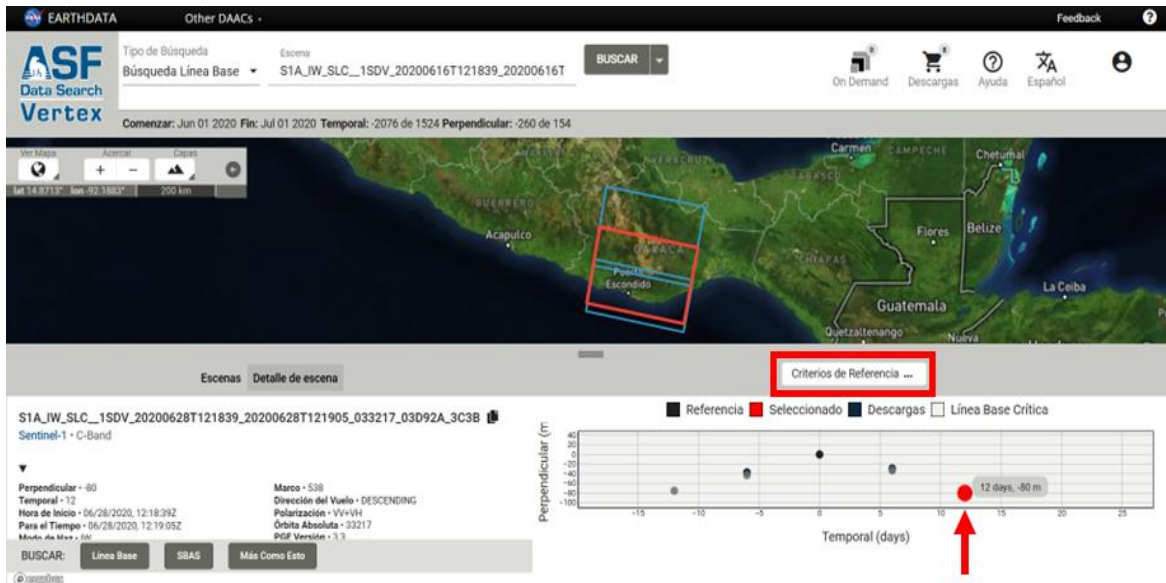


Figura A4. Detalles de escena, después de haber seleccionado Línea base, donde se visualiza los criterios de referencia de forma gráfica. Tomado de (ASF, 2016).

Por tanto, las dos escenas nos quedan de la siguiente manera:



Figura A6. Detalles de la escena 22 de junio de 2020 (pre-sismo). Tomado de (ASF, 2016).



Figura A6. Detalles de la escena 28 de junio de 2020 (post- sismo). Tomado de (ASF, 2016)



En la segunda escena (ver Figura A6.) vemos que la línea base perpendicular es distinta de cero, lo cual nos indica que su fase contiene tanto altitud como contribuciones de movimiento por lo cual se puede utilizar. Una vez que se hayan analizados los detalles de las escenas procedemos a descargarlas.

Flujo de trabajo ASF, haciendo uso de ESA's Sentinel-1 Toolbox

ID de los productos descargados

S1B IW SLC 1SDV 20200622T121808 20200622T121826 022146 02A087 805A

S1A IW SLC 1SDV 20200628T121839 20200628T121905 033217 03D92A 3C3B

Sentinel-1 Toolbox opera con archivos comprimidos zip, por lo que los archivos SLC deben permanecer comprimidos.

Como el caso de estudio es un área extensa, es necesario hacer uso de dos o más subfranjas, por lo que, el flujo de trabajo se dividirá en dos fases. El siguiente diagrama **fase I** (ver Figura A7.) nos ayuda a tener un mejor control de cada paso que se debe tener al procesar las escenas, puesto que en ocasiones pueden ocurrir errores, ya sea en la ejecución o en su defecto algún otro factor externo.

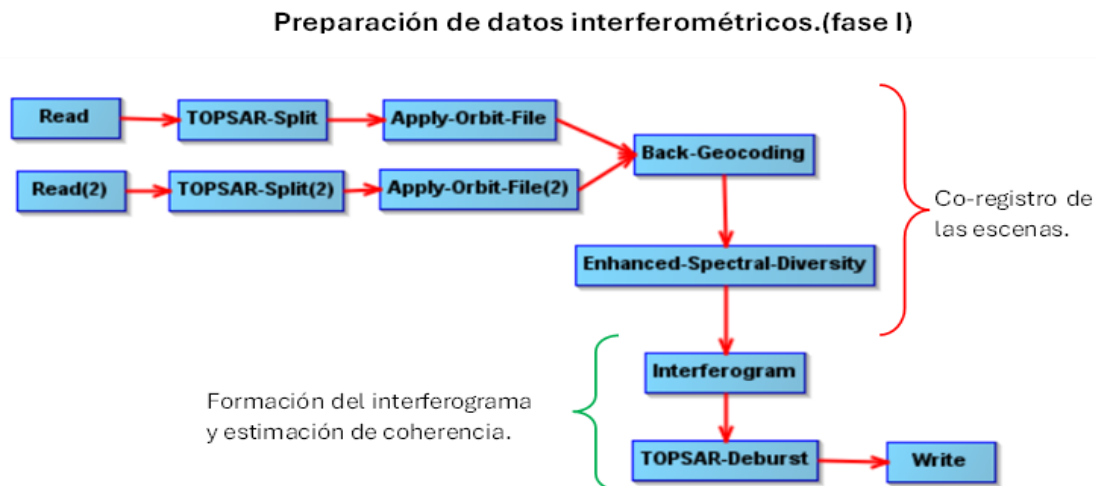


Figura A7. Diagrama de flujo que describe el proceso sistemático para la preparación de datos interferométricos, que incluye las etapas necesarias para el procesamiento y análisis de imágenes SAR. (fase I).

Esta Figura A7, se utiliza solo para una subfranja, por lo que este procedimiento se repite para las demás subfranjas que se van a utilizar, ya que para generar la unión de 2 o más subfranjas es necesario generar los interferogramas de manera individual, así como la eliminación de cada línea de ráfaga que se presentan, puesto que podía generar un ruido al momento de la aplicación del filtro para la unión.



Procesamiento de los productos para la preparación de datos interferométricos (fase I)

- Read.

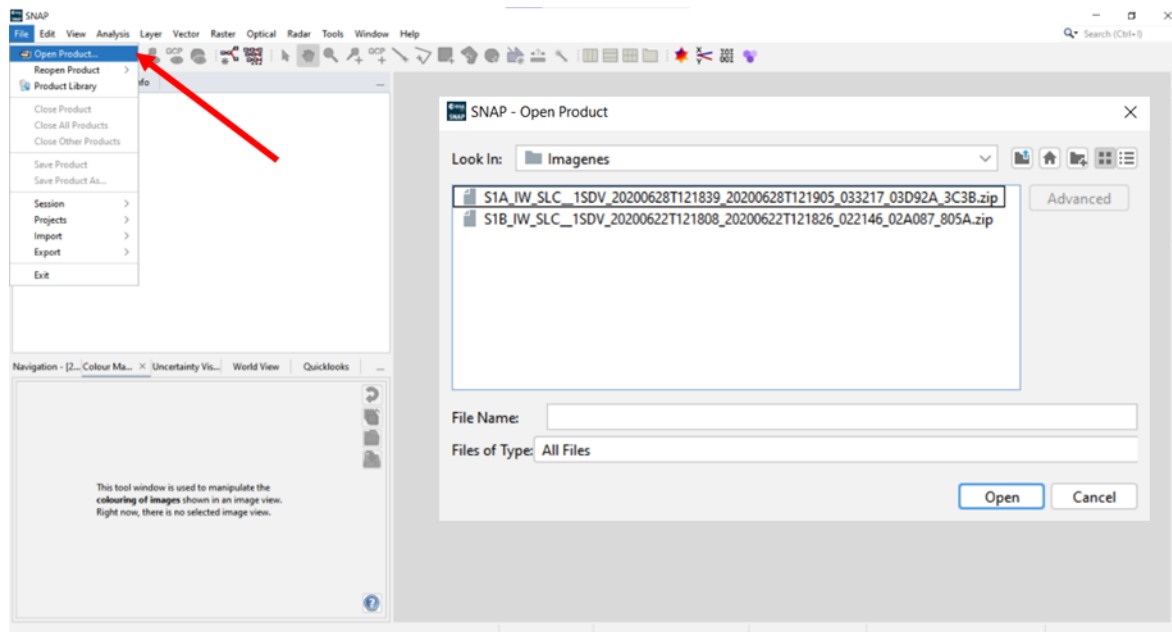


Figura A8. Lectura de los productos en el software SNAP.

Al abrir la carpeta en donde se encuentran nuestros productos, como se señala con la flecha roja (ver Figura A8.), seleccionamos los productos. Una vez cargados los productos, seleccionamos las escenas y desplegamos en la parte que dice Bands (ver Figura A9.), en donde cada subfranja contiene las bandas de valores complejos (cuadro verde) “i”, “q” e intensidad, siendo esta ultima una banda virtual que ayuda a trabajar con los datos complejos y permite visualizarlos.

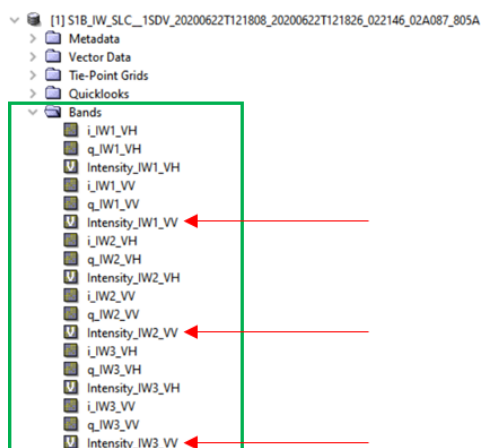


Figura A9. Información de las bandas de valores complejos en los productos.



Para este caso de estudio nos interesa la polarización VV, por lo que los datos que contengan las tres subfranjas con la siguiente nomenclatura, i_{IW1_VV} , q_{IW1_VV} , $Intensity_{IW1_VV}$, i_{IW2_VV} , q_{IW2_VV} , $Intensity_{IW2_VV}$, i_{IW3_VV} , q_{IW3_VV} , $Intensity_{IW3_VV}$, serán los datos para sustraer al momento de aplicar el Split, ya que se pretende realizar un mapa de deformación superficial.

Co- registro de las escenas

Como lo indica el Figura A7. necesitamos primero hacer un co- registro de las dos escenas SLC, eligiendo a una como la maestra y la otra como esclava, siendo esta ultima la que se moverá mediante sus pixeles, para alinearse con la imagen principal, con una precisión de subpíxeles.

Para garantizar que cada objetivo terrestre contribuya al mismo píxel en rango - azimuth, para ambas imágenes (maestra y esclava) se utiliza el co- registro S-1 TOPS (TOPSAR InSAR), siguiendo con el flujo de trabajo tenemos que hacer un Split. (ESA, 2007)

- Split (Dividir una subfranja del producto con Sentinel -1 TOPS (ver Figura A10. flecha roja)).

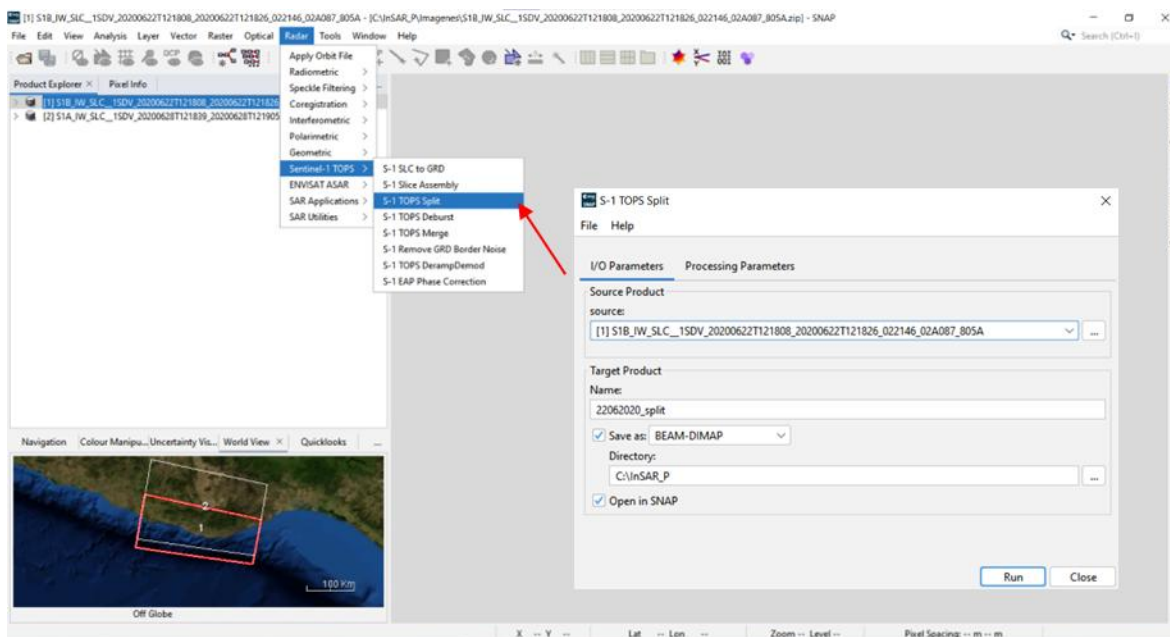


Figura A10. Operador Split.

➤ Parámetros de procesamiento.

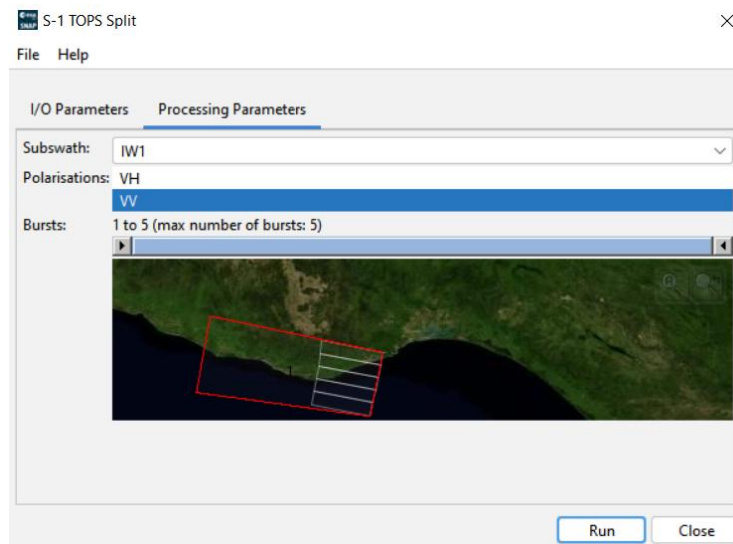


Figura A11. Parámetros de procesamiento de Operador Split.

Seleccionando la subfranja IW1 (ver Figura A11.), polarización VV, barridos 1-5, recordando que este paso se realiza para ambos productos, tanto el de referencia (maestra, 22062020) como el secundario (esclava, 28062020).

- Apply Orbit File (Aplicación de corrección de órbita de precisión, ver Figura A12. flecha roja).

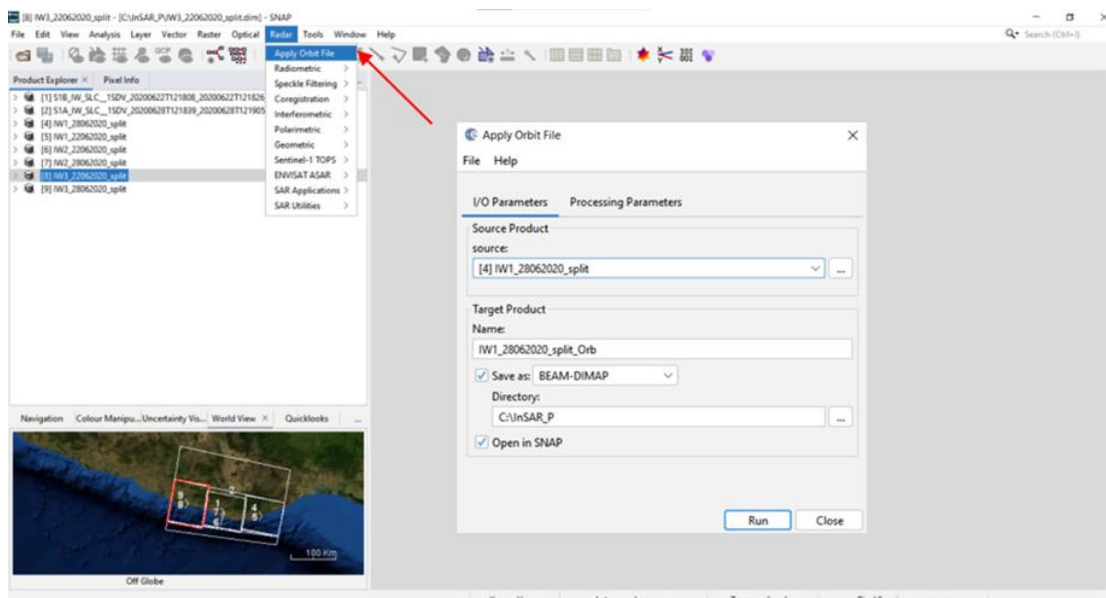


Figura A12. Operador Apply Orbit File.

La aplicación del archivo de órbita proporciona información precisa sobre la posición y velocidad del satélite, lo cual actualiza los vectores de estado de la órbita en los metadatos abstractos del producto.



- Procesamiento de los parámetros

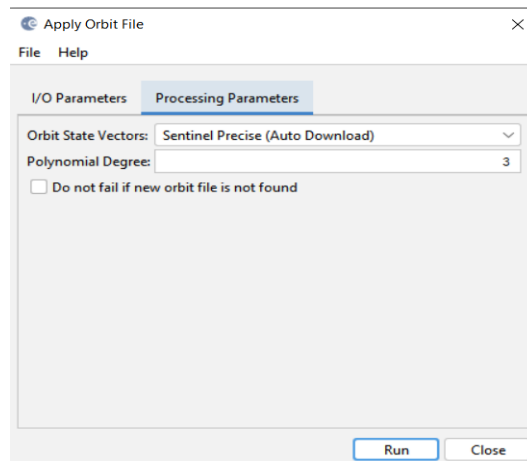


Figura A13. Procesamiento de los parámetros del operador Apply Orbit File.

Los datos auxiliares de órbita se descargan automáticamente mediante Sentinel-1 Toolbox, por lo que no es necesario realizar búsquedas manuales, ver Figura A13.

El servicio de determinación precisa de la órbita (POD) para Sentinel-1 proporciona archivos de órbita restituída y archivos de efemérides de órbita precisa (POE). Los archivos POE cubren aproximadamente 28 horas y contienen vectores de estado de órbita en intervalos de tiempo fijos de 10 segundos. Los archivos se generan por día y se entregan dentro de los 20 días posteriores a la adquisición de los datos. (Copernicus, POD in details)

- El grado del polinomio (Polynomial Degree): Es la función de interpolación para el vector de estado de la órbita (posición y velocidad del satélite en el momento de la adquisición de la imagen).
- Back Geocoding (Geocodificación inversa, ver Figura A14. flecha roja)

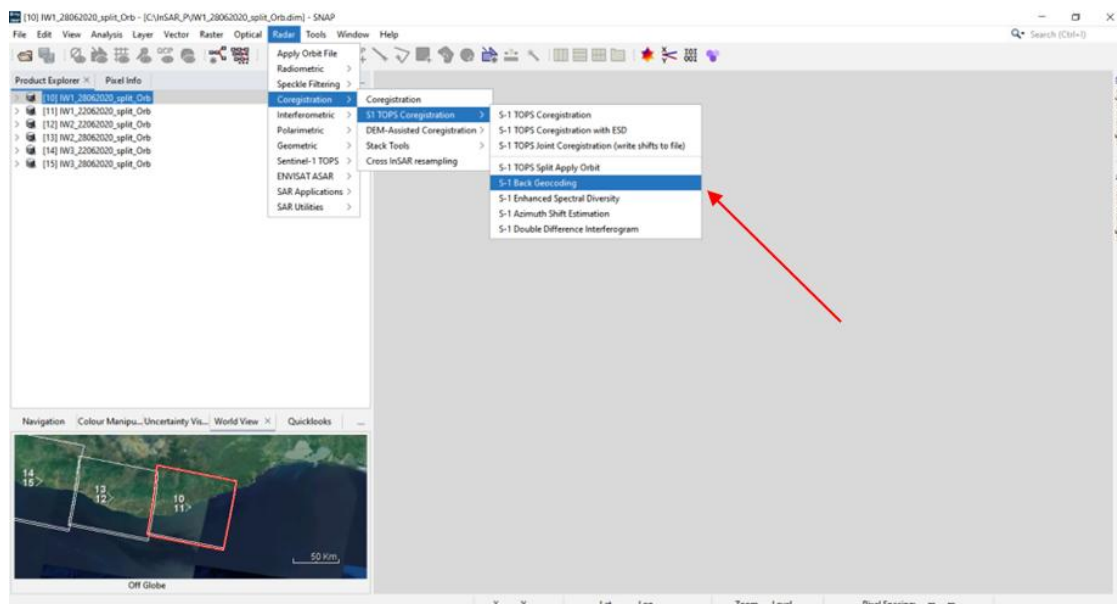


Figura A14. Operador Back Geocoding.



Este operador co-registra dos productos divididos S-1 SLC (maestra y esclava) de la misma subfranja, utilizando las órbitas de los productos y un Modelo de Elevación Digital (DEM por sus siglas en ingles), para su posterior unión.

- Producto Set- Reader

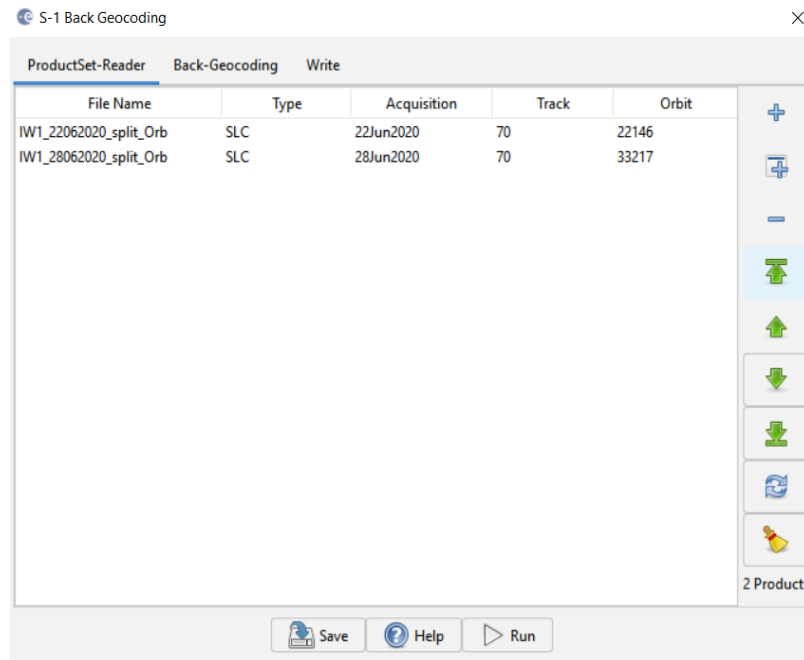


Figura A15. Lectura del set de imágenes divididas para la organización de maestra y esclava dentro del operador Back Geocoding.

Cargar las imágenes (ver Figura A15.), en donde se debe seleccionar como maestra (IW1_22062020_split_Orb) y esclava (IW1_28062020_split_Orb).

- Back-Geocoding (Figura A16.)

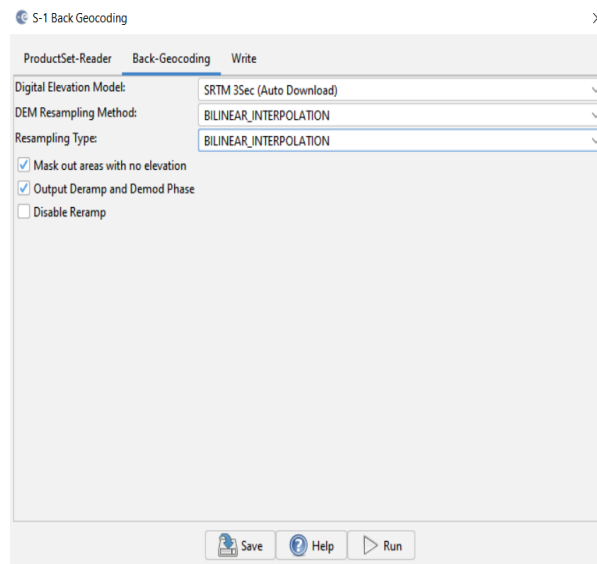


Figura A16. Unión de los productos en función de los parámetros del DEM y sus métodos de interpolación.



- Digital Elevation Model: **SRTM 3Sec (Auto Dowload)**
Con resolución espacial de ~ 90 metros. Contribuye especialmente a una calibración geométrica correcta durante la corrección del terreno por el efecto Doppler, además para InSAR con líneas de base pequeñas (S1), la elección del DEM para el co- registro es importante ya que tenemos un terreno muy accidentado. (EROS Center, 2018)
- DEM Resampling Method: **Bilinear _Interpolation**
- Método de interpolación para obtener valores de elevación a partir del archivo DEM original
- Resampling Type: **Bilinear _Interpolation**
Método de interpolación para obtener valores de píxeles de la imagen de origen.
- ☒ Mask out areas with no elevation
Esto para ocultar las áreas que no están cubiertas por el DEM o que se encuentran en el océano.
- ☒ Outpout Deramp y Demond Phase
Necesitamos la diversidad espectral mejorada y además mejorar el co- registro.
- Write (Figura A17.)

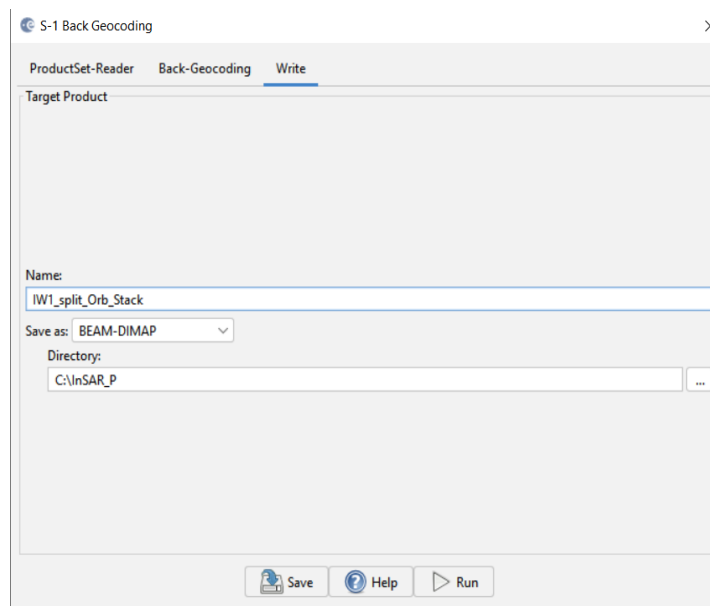


Figura A17. Nombre del producto de salida del operador Back Geocoding.

Se escribe el nombre del conjunto, en este caso es para la subfranja IW1, por lo que escribimos IW1_split_Orb_Stack.

- Enhanced Spectral Diversity (Diversidad espectral mejorada, ver Figura A18. flecha roja)

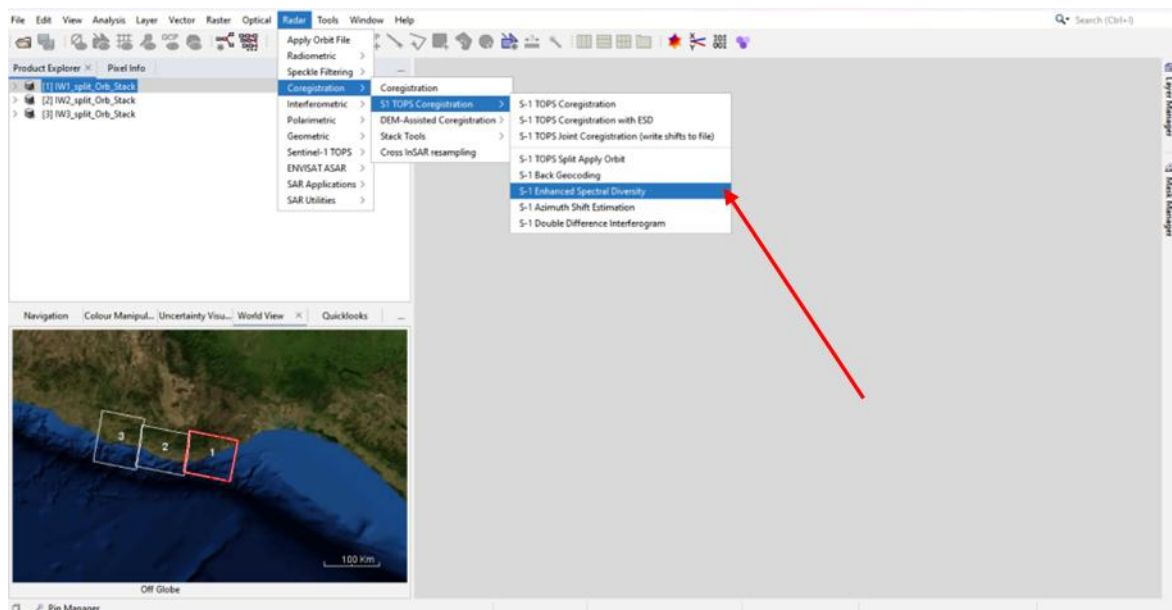


Figura A18. Operador Enhanced Spectral Diversity.

Este operador implementa la Diversidad Espectral Mejorada de la Red (NESD, por sus siglas en ingles), para un conjunto de pila Sentinel-1, mediante la creación de una red (grafico) de imágenes, para después estimar el desplazamiento en el rango y azimuth, mediante la solución de un problema de optimización. (ESA, 2016)

- Procesamiento de parámetros (Figura A19.)

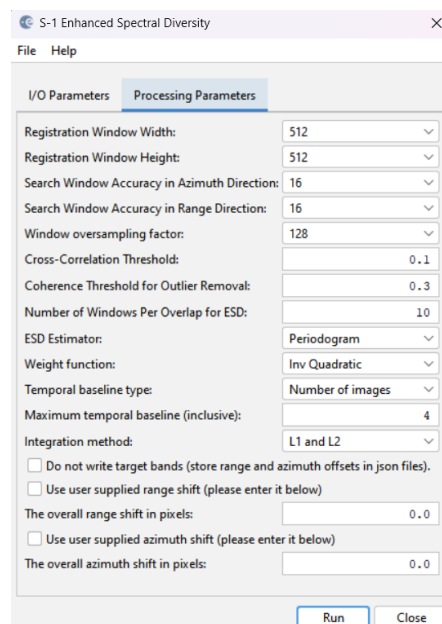


Figura A19. Parámetros del operador Enhanced Spectral Diversity.



Estimación del rango

- Registration Window Width: **512**
Es el ancho del subconjunto de imágenes utilizado para la correlación cruzada.
- Registration Window Height: **512**
Altura del subconjunto de imágenes utilizado para la correlación cruzada.
- Search Window Accuracy in Azimuth Direction: **16**
La precisión de búsqueda en dirección acimutal para la correlación máxima.
- Search Window Accuracy in Range Direction: **16**
La precisión de la búsqueda en la dirección del rango para la correlación máxima.
- Window oversampling factor: **128**
Factor de sobre muestreo para la ventana de búsqueda. Cuanto mayor sea el factor, mejor será la precisión alcanzable y mayor el costo de cálculo.
- Cross-Correlation Threshold: **0.1**
Umbral para el valor de correlación cruzada normalizado. Si el valor de correlación cruzada es mayor que el umbral, el desfase de rango estimado se considera válido; de lo contrario, no es válido.

Estimación del azimuth

- Coherence Threshold for Outlier Removal: **0.3**
Los píxeles con una coherencia superior al umbral se utilizan para la estimación del desplazamiento de azimuth.
- Number of Windows Per Overlap for ESD: **10**
La cantidad de ventanas para la estimación del desplazamiento de acimut utilizando ESD para cada área de superposición.
- ESD Estimator: **Periodogram**
Estimador de desplazamiento del azimuth.
- Weight function: **Inv. Quadratic**
Función de ponderación de la coherencia que se utilizará para la estimación del cambio de acimut. La ponderación de cada píxel se calcula como:

$weight_function(coherence_{px})$ if $coherence_{px} > coherence_threshold$, 0 otherwise.



Registro conjunto

- Temporal baseline type: **Number of images**
Tipo de línea base para construir la red de integración, número de imágenes (predeterminado) o número de días.
- Maximum temporal baseline (inclusive): **4**
Este parámetro controla qué arcos se consideran parte de la red. En particular, establece la cantidad máxima de días o imágenes permitidas entre pares de imágenes para construir la red. Cualquier número menor a 1 generará una red con todos los pares posibles.
- Integration method: **L1 and L2**
Es el procedimiento se utiliza para integrar los cambios.

Comportamiento del operador

- ☐ Do not write target bands (store range and azimuth offsets in json files).
Si la casilla de verificación está seleccionada, no se escribirá el producto de salida. Sin embargo, los cambios de rango y acimut se exportan a archivos json en el directorio.
- ☐ Use user supplied range shift (please enter it below).
Si la casilla de verificación está seleccionada, se utilizarán los cambios de acimut y rango, proporcionados por el usuario en la corrección.
- The overall range shift in pixels: **0.0**
Uno como usuario proporciona el cambio de rango en pixeles (si es necesario).
- ☐ Use user supplied azimuth shift (please enter it below)
- The overall azimuth shift in pixels: **0.0**
Uno como usuario proporciona el cambio de acimut en pixeles (si es necesario).



Formación del interferograma y estimación de coherencia

- Interferogram Formation (Formación del interferograma bruto, ver Figura A20. flecha roja).

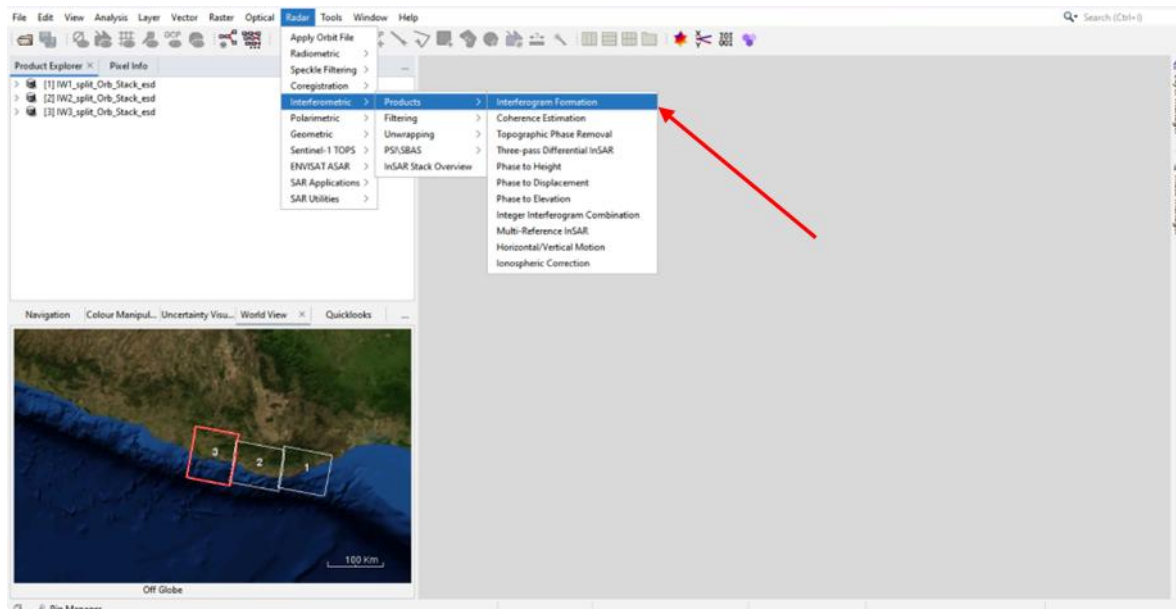


Figura A20. Operador Interferogram Formation.

A través del flujo de este procesamiento se pretende eliminar otras fuentes de error y así poder tener el contribuyente de interés, que normalmente es la deformación de la superficie relacionada con un evento. Este operador calcula un interferograma complejo, con o sin sustracción de la fase de referencia de la tierra plana, por lo que usando la fase de referencia lo sustrae utilizando un polinomio 2D (usando mínimos cuadrados).

➤ Parámetros (Figura A21.)

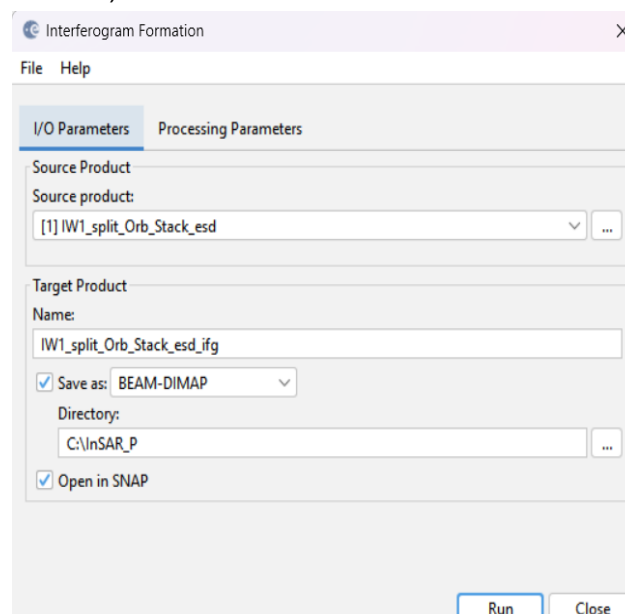


Figura A21. Parámetros del operador Interferogram Formation.



Utilizando el conjunto de bandas que previamente fueron co-registradas del conjunto.

- Procesamiento de los parámetros (Figura A22.)

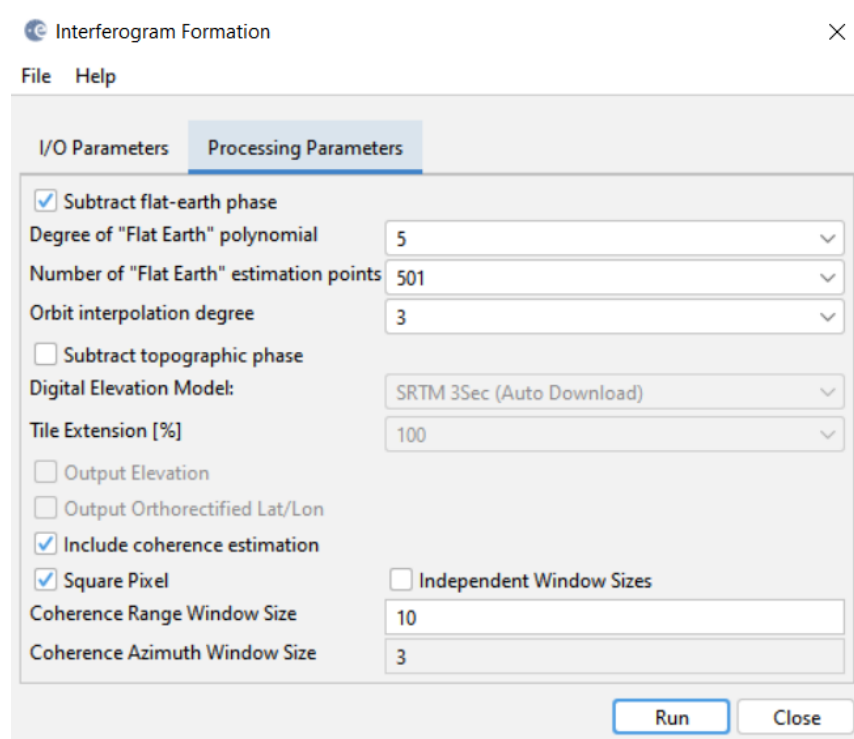


Figura A22. Procesamiento de los parámetros del operador Interferogram Formation.

- ☒ Subtract flat-earth phase

La fase de tierra plana es la fase presente en la señal interferométrica debido a la curvatura de la superficie de referencia. La fase de tierra plana se estima utilizando la información orbital y de metadatos y se resta del interferograma complejo, el sistema de referencia geométrico de la superficie de referencia se define mediante el sistema de referencia de las orbitas de los satélites (WGS84, sistema de referencia utilizados por los sistemas SAR a bordo del espacio), calcula en una serie de puntos distribuidos sobre la imagen total, estimado por un polinomio 2D (usando mínimos cuadrados), que ajusta estas “observaciones”. (ESA, 2016)

- Degree of “flat Earth” polynomial: 5

Sirve para modelar la fase de referencia para la escena SAR completa (aproximadamente 100x100 km), teniendo en cuenta que los términos de orden superior del polinomio de la tierra plana son generalmente pequeños, ya que un polinomio nos describe un cuerpo de onda largo y suave (elipsoide). (ESA, 2016)



- Number of “flat Earth” estimation points: **501**
Número de puntos para calcular la fase de referencia para la estimación de mínimos cuadrados, para las escenas SAR de 100x100 km.
- Orbit interpolation degree: **3**
Valor del polinomio predeterminado es de grado -1 (número de vectores de estado), el grado especificado tiene que ser menor que el grado 5. Las posiciones de los vectores de estado (x, y, z) se interpolan de forma independiente, las velocidades se estiman a partir de la posición, por tanto, las velocidades anotadas, si están disponibles, se utilizarán en la interpolación y no se calcularán a partir de las posiciones.
- ☒ Include coherence estimation
Calcula o estima la coherencia en una pila de imágenes complejas registradas conjuntamente, ya que el ruido de paso se puede estimar a partir del par SAR interferométrico mediante la coherencia local, esta coherencia local es el coeficiente de la correlación cruzada del par de imágenes SAR estimado sobre una ventana pequeña (unos pocos píxeles en rango y acimut) una vez que se compensan todos los componentes deterministas del paso (debido principalmente a la elevación del terreno). (ESA, 2016)
- ☒ Square Pixel
Los píxeles deberán ser generados de forma cuadrada.
- Coherence Range Window Size: **10**
Rango de tamaño de la ventana de coherencia.
- Coherence azimuth Window Size: **3**
Tamaño de la ventana de coherencia en el acimut.



- Visualización de la fase interferométrica.

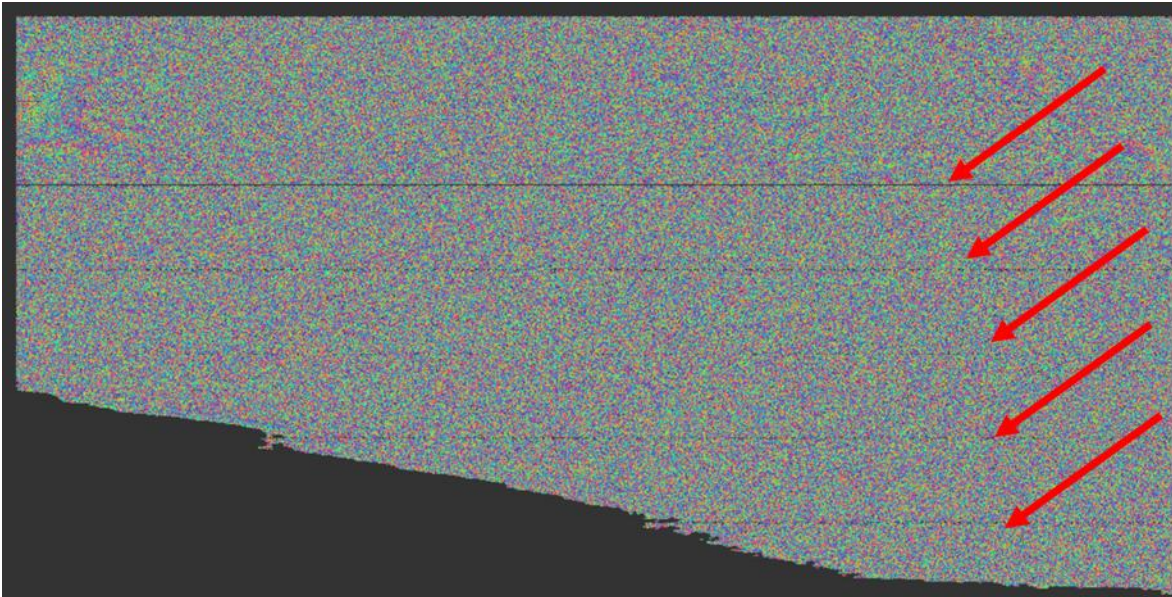


Figura A23. Parte del interferograma bruto formado por el procesamiento de los parámetros del operador Interferogram Formation.

Al ampliar el producto de interferograma (ver Figura A23.), se visualiza la banda de Phase, en donde logran ver zonas con una demarcación entre ráfagas (señalado con flechas rojas), por lo que se deben eliminar una vez aplicando el operador TOPS Deburst.

Las franjas interferométricas representan un ciclo completo de $(-\pi, \pi)$, donde π es el cambio de fase. Las franjas aparecen en un interferograma como ciclos de colores, y cada ciclo representa una diferencia de rango relativa de la mitad de la longitud de onda de un sensor (ESA, 2007). El movimiento relativo del terreno entre dos puntos se puede calcular contando las franjas y multiplicándolas por la mitad de la longitud de onda. Cuanto más próximas estén las franjas de color, mayor será el gradiente de la deformación en el terreno. El terreno llano debe producir franjas constantes o que varíen lentamente. Cualquier desviación de un patrón de franjas paralelas puede interpretarse como una variación topográfica.

- TOPS Deburst (ver Figura A24.)

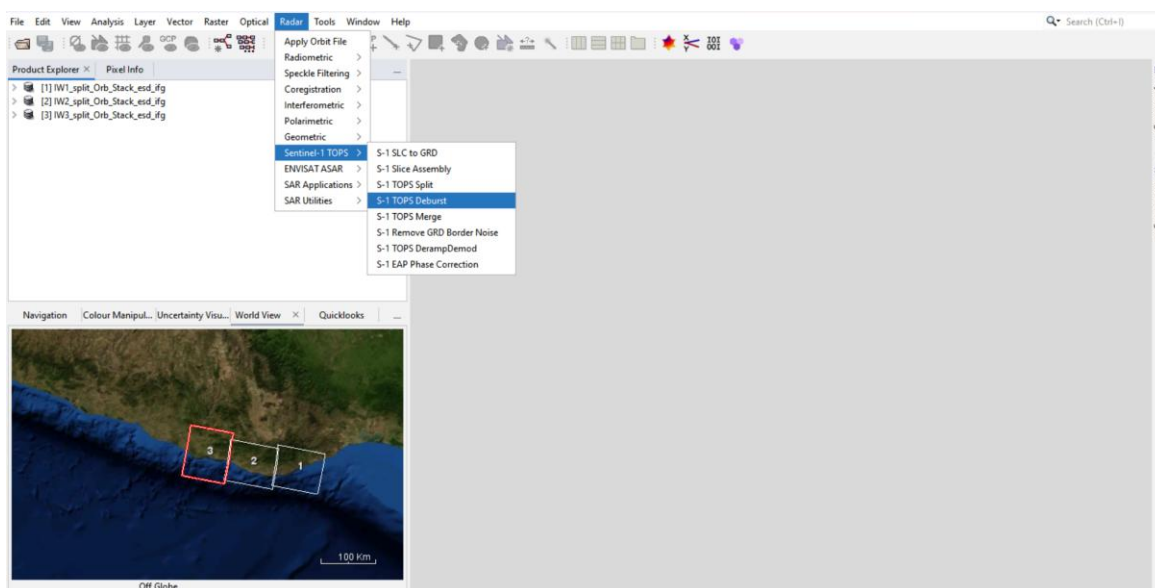


Figura A24. Operador TOPS Deburst.

Los productos IW tienen 3 franjas, cada imagen de subfranja que consta de una serie de ráfagas, donde cada ráfaga se procesó como una imagen SLC independiente, estas imágenes de ráfaga complejas están enfocadas individualmente, las cuales se incluyen, en orden de acimut - tiempo, en una única imagen de subfranja, con una demarcación de relleno negro entre ellas. Para IW una ráfaga enfocada tiene una duración de 2.75 segundos y una superposición de ráfagas aproximadamente de 50 a 100 muestras, las imágenes de todas las ráfagas en todas sus subfranjas de un producto SLC de IW se vuelven a muestrear en una cuadrícula de espaciado de píxeles común en rango y acimut. En el caso del S-1 TOPSAR, el área terrestre captada por imágenes de ráfagas adyacentes solo se superpondrá marginalmente en acimut, lo suficiente como para proporcionar una cobertura contigua del suelo (ESA, 2007). Esto se debe a la única apariencia de acimut natural inherente a los datos, por lo tanto, toma la polarización que se esté utilizado, en este caso polarización VV (ver Figura A25).



➤ Procesamiento de los parámetros

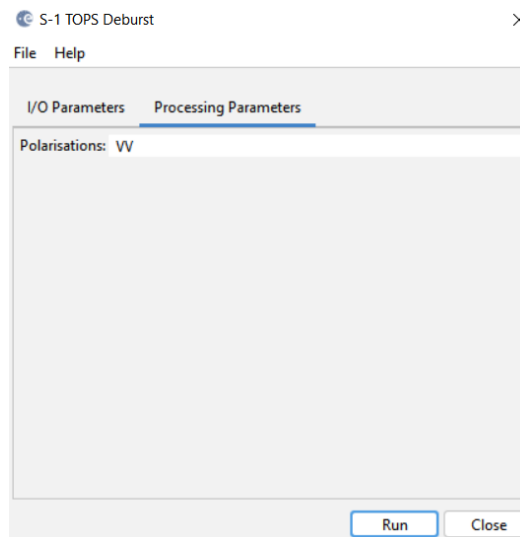


Figura A25. Parámetros de procesamiento del operador TOPS Deburst.

Una vez terminada la primera parte, repetiremos el mismo procesamiento para las demás subfranjas IW2 e IW3 según sea el caso, ya que será necesario para fusionar las subfranjas, y posteriormente realizar el análisis en la zona de interés.

Procesamiento de los productos interferométricos para la creación de un mapa de desplazamiento (fase II)

Con el apoyo del Figura A26. podemos visualizar el flujo de trabajo para poder generar un mapa de desplazamiento.

Preparación de datos interferométricos para la creación de un mapa de desplazamiento. (fase II)

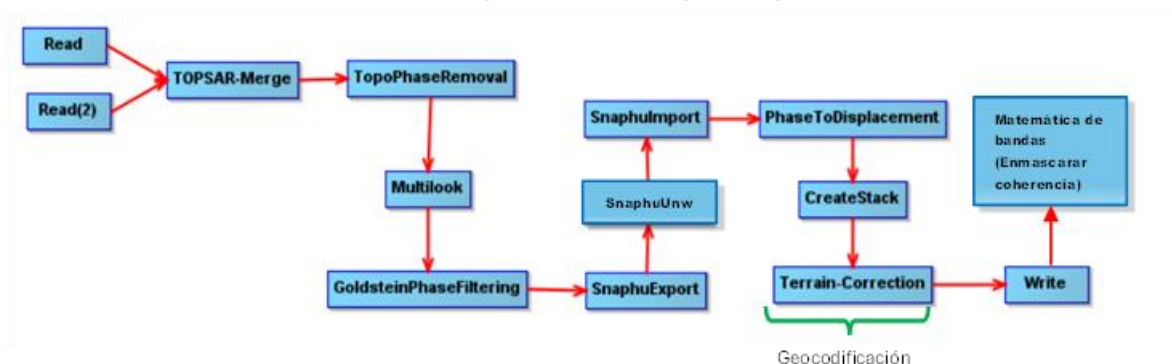


Figura A26. Diagrama del flujo de trabajo para la creación de un mapa de desplazamiento (fase II).



- Merge (fusión de subfranjas IW1, IW2 e IW3, ver Figura A27.)

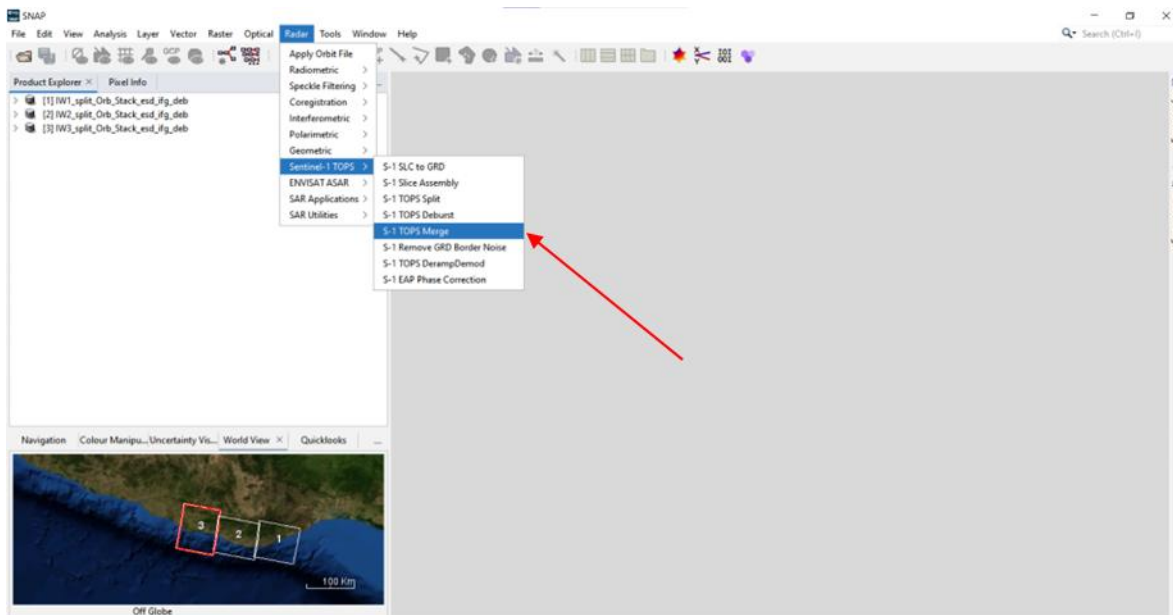


Figura A27. Operador TopS-Merge.

Fusiona el producto dividido desglosado de diferentes subfranjas en un solo producto completo.

La fusión ocurre solo en el rango de la misma manera que en el operador TOPSAR Deburst.

- ProductSet-Reader (Figura A28.)

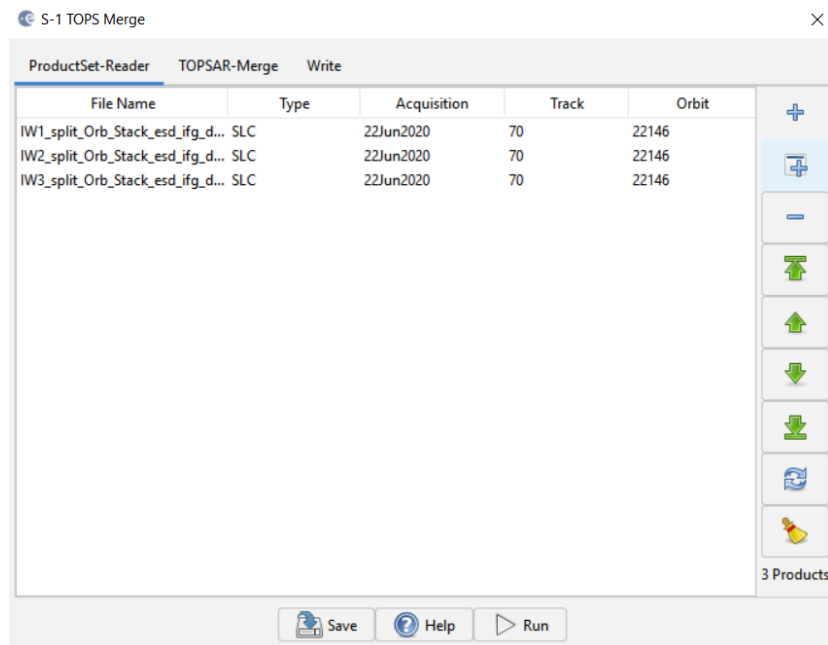


Figura A28. Set de productos IW1, IW2 e IW3 para la fusión, operador TOPS-Merge.



La entrada debe ser un conjunto de productos SLC Sentinel-1 divididos con el mismo modo de adquisición, las mismas polarizaciones e índices de subfranja consecutivos.

- TOPSAR-Merge (Figura A29.)

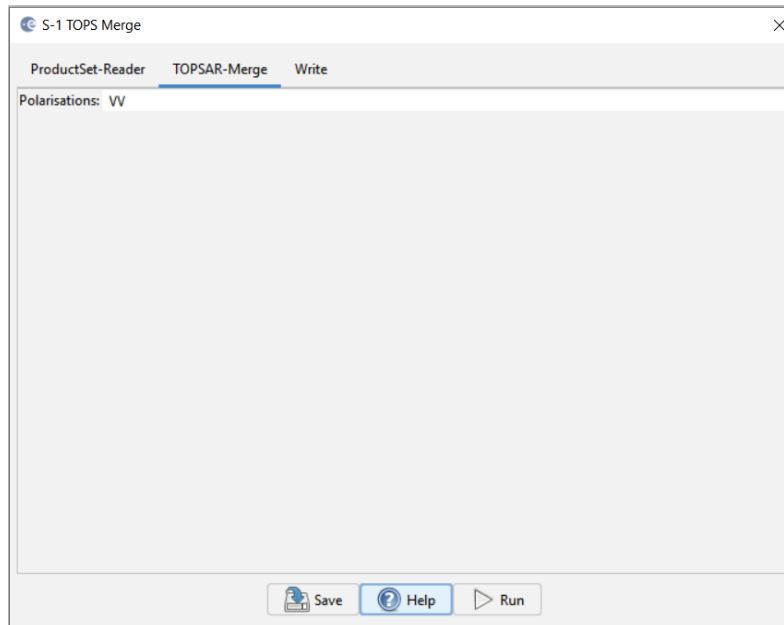


Figura A29. Polarización de las subfranjas IW1 e IW2 para la fusión, operador TopS-Merge.

Las polarizaciones para el producto fusionado, ocurre de la misma manera que en TOPSAR Deburst.

- Topographic Phase Removal (Eliminación de la fase topográfica, Figura A30.)

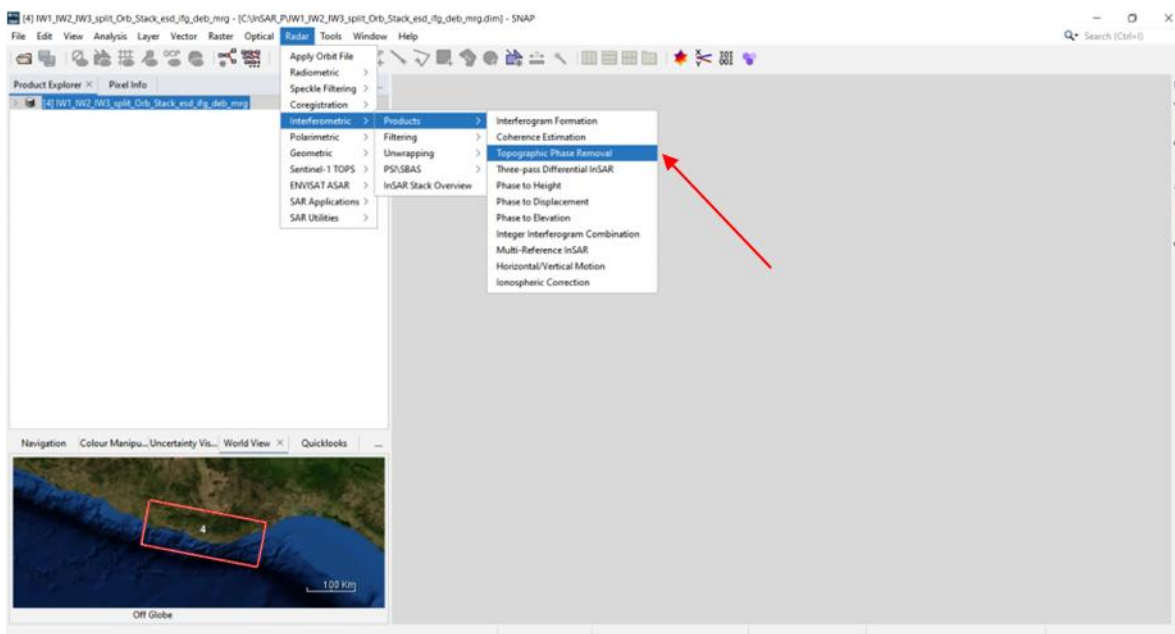


Figura A30. Operador Topographic Phase Removal.



Calcula y resta la fase topográfica del interferograma, primero “codifica por radar” el modelo digital de elevación (DEM) del área del interferograma y luego lo resta del interferograma complejo (interferograma procesado).

➤ Parámetros

Se selecciona el producto fusionado IW1_IW2_IW3 (ver Figura A31.), para remover la fase topográfica.

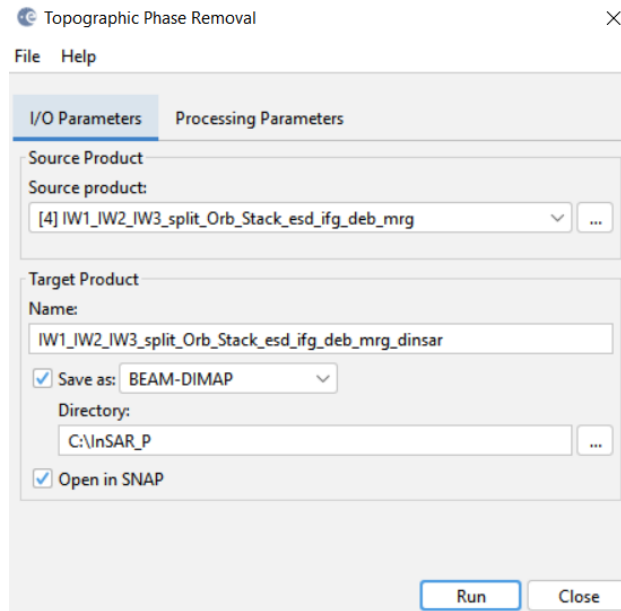


Figura A31. Parámetros o productos al cual se aplica el operador Topographic Phase Removal.

➤ Procesamiento de los parámetros (Figura A32.)

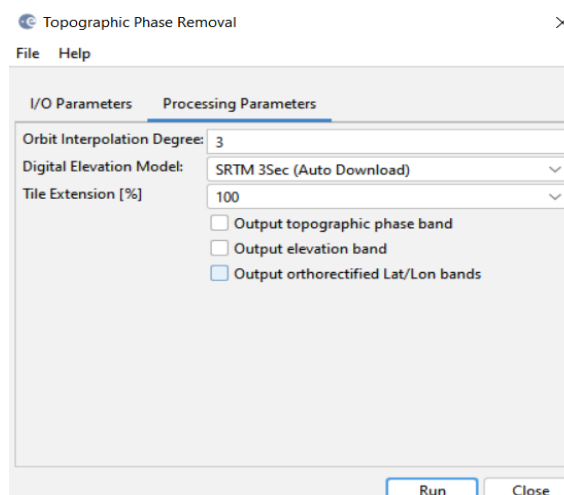


Figura A32. Procesamiento de los parámetros del operador Topographic Phase Removal.



- Orbit Interpolation Degree: **3**

Grado del polinomio de interpolación de órbita.

- Digital Elevation Model: **SRTM 3Sec (Auto Download)**

Modelo de elevación que se utilizará para el procesamiento.

La fase de referencia DEM se calcula en dos pasos:

1. El DEM se codifica por radar en los sistemas de coordenadas de la imagen maestra. Por cada punto del DEM, la coordenada maestra (valor real) y la fase de referencia calculada se guardan en un archivo.
2. La fase de referencia se interpola a la cuadrícula entera de coordenadas maestras. Se utiliza una interpolación lineal basada en una triangulación de Delaunay.

- Tile extension [%]: **100**

Define la extensión del mosaico para la simulación DEM (parámetro de optimización).

- Multilooking (Filtrado de múltiples vistas y fases)

Generalmente, una imagen original de SAR aparece moteada con ruido de moteado inherente. Para reducir esta apariencia moteada inherente, se combinan varias imágenes de manera incoherente como si correspondieran a diferentes aspectos de la misma escena.

La fase interferométrica puede verse alterada por el ruido de:

- Decorrelación temporal.
- Decorrelación geométrica.
- Dispersión de volumen.
- Error de procesamiento.

Para obtener la imagen multilook, se utiliza el operador Multilooking (ver Figura A33. flecha roja), que mejora la interpretabilidad de la imagen, además, el procesamiento multilook se puede utilizar para producir un producto de aplicación con un tamaño de píxel de imagen nominal.

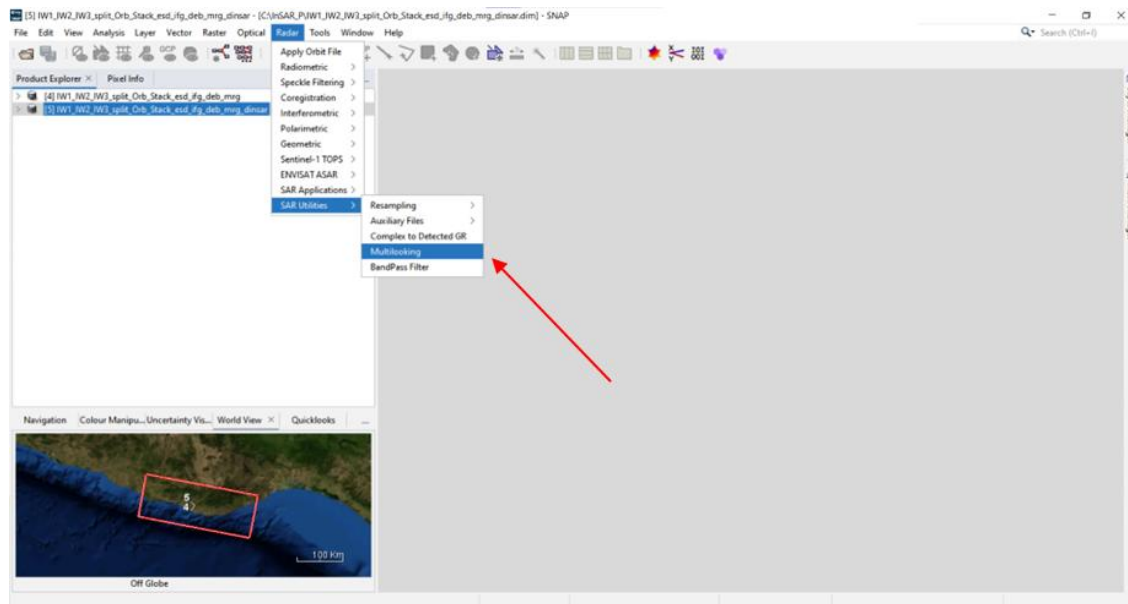


Figura A33. Operador Multilooking.

La determinación de multi-looking que se debe hacer, depende de la resolución espacial que se requiere y el espaciamiento de las franjas, ya que su resultado son pixeles más grandes, lo que reduce la cantidad de ruido de manera significativa.

- Procesamiento de los parámetros

Para mejorar la fidelidad de la fase, se denomina Multilooking.

- Source Bands

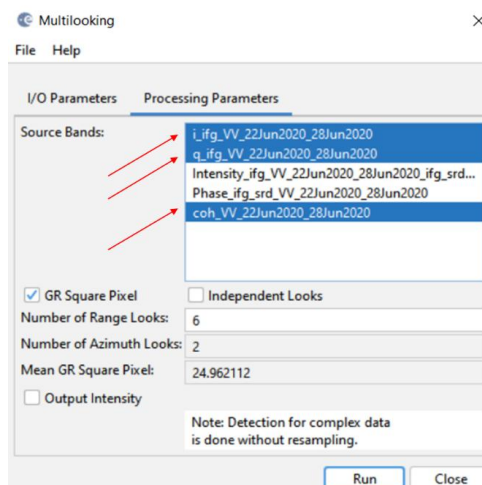


Figura A34. Procesamiento de los parámetros del operador Multilooking.

Utilizando el botón **Ctrl** para seleccionar (ver Figura A34. señalado con flechas rojas) las bandas “i”, “q” y “coh” de la lista como las bandas de origen que se analizarán en forma múltiple, estas son bandas reales, adicionando que la banda de



coherencia es importante para desenvolver el interferograma y poder crear un mapa de deformación, esta coherencia se utiliza para verificar la legitimidad de los datos de fase derivados.

- ☒ GR Square Pixel

El promedio de los espaciados de píxeles de rango y acimut en la imagen con múltiples vistas. Se calcula en función de la cantidad de vistas de rango, la cantidad de vistas de acimut y los espaciados de píxeles de la imagen de origen, y solo está disponible cuando se selecciona.

- Number of Range Looks:6

Numero de miradas de rango.

- Number of Azimuth Looks:2

Numero de miradas del acimut.

Number of Range Looks y Number of Azimuth Looks, realiza un promedio espacial de una cantidad de pixeles vecinos, en este caso de 6x2 pixeles), para disminuir el ruido y generar una imagen correctamente, con un tamaño de píxel cuadrado de ~25 metros. (ESA, 2007)

Al ejecutar, en el producto final desaparecerá las bandas virtuales de Intensity_ifg_VV... y Phase_ifg_srd_vv, pero estas regresaran una vez aplicando el paso de filtrado.

- Golden Phase Filtering (Filtrado de fase, Figura A35.)

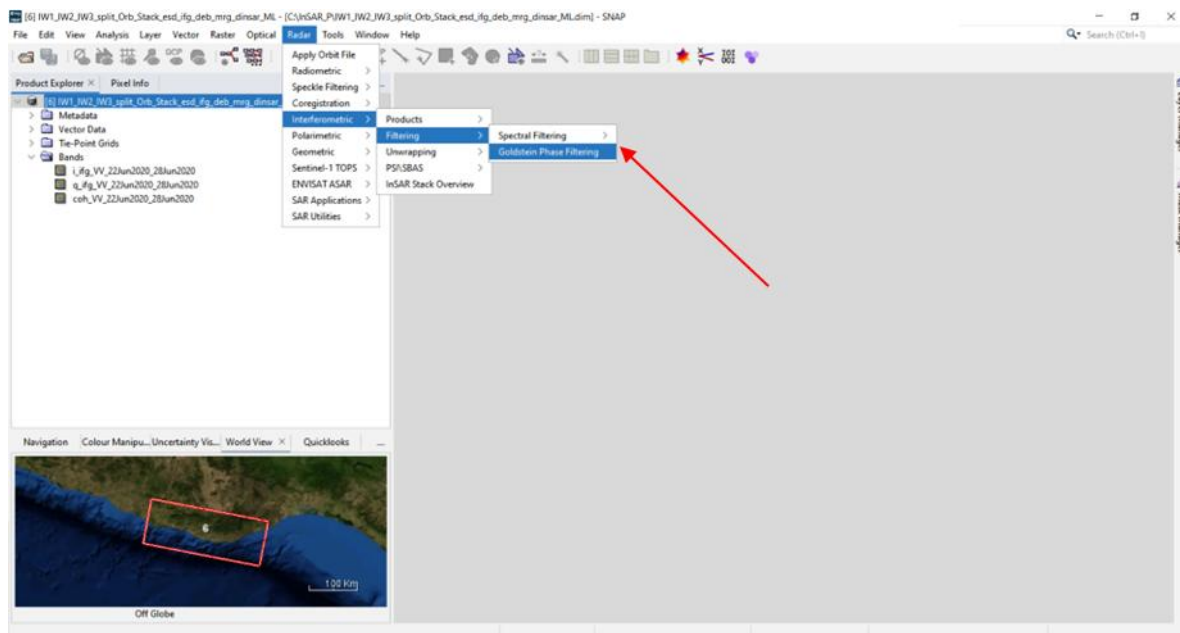


Figura A35. Operador Golden Phase Filtering.



El filtrado de fases es una técnica de procesamiento que reduce en gran medida los residuos en los pasos posteriores, además mejora la precisión para el desenrollado de fases, recordando que es un algoritmo adaptativo, no lineal.

El filtro Goldstein se utiliza para suavizar la fase ruidosa residual con parámetros modificados α . Depende tanto del mapa de coherencia como de la frecuencia de fase residual. La fase residual filtrada y la frecuencia marginal eliminada se combinan finalmente para obtener el interferograma filtrado. (Goldstein & Werner, 1998)

➤ Procesamiento de los parámetros (Figura A36.)

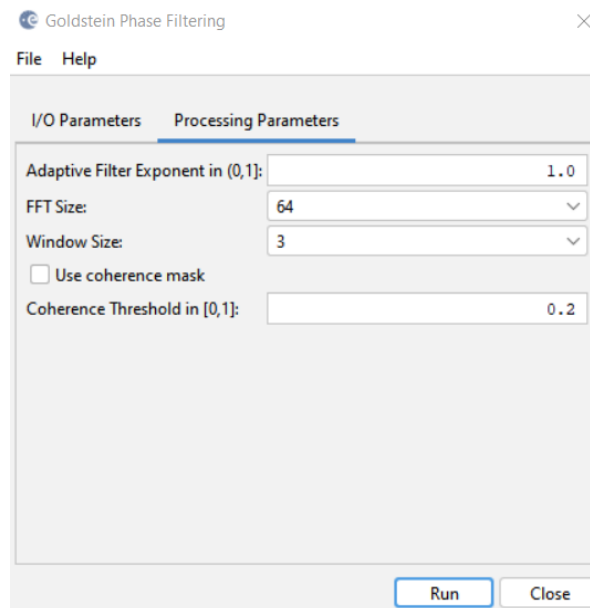


Figura A36. Procesamiento de los parámetros del operador Golden Phase Filtering.

- **Adaptive Filter Exponent in (0,1]: 1.0**
Cuanto mayor sea el valor, más fuerte será el filtrado, $\alpha=0$ no implementa ningún filtrado y se mantiene la resolución de la imagen. (Goldstein & Werner, 1998)
- **FFT Size: 64**
Tamaño de la Transformada Rápida de Fourier, es aplicada para compensar los píxeles y obtener un parche para la fase de ruido original antes del pre-filtrado y denotar una fase compleja compensada, para la estimación de frecuencia de franja sin reducir la resolución del interferograma (suprime el ruido).
- **Window Size: 3**
Para el tamaño de la ventana de pre-filtrado se ajustará con los valores de la coherencia media y la desviación estándar de fase en cada parche filtrado, este tamaño de ventana se limita para evitar la distorsión de las franjas.



- Coherence Threshold in (0,1]: **0.2**

Las áreas con baja coherencia o alto nivel de ruido se filtran con ventanas más grandes, por tanto, se limita para las franjas con curvaturas fuertes.

Una vez aplicado el filtro, podemos ver que las bandas virtuales de Intensity_ifg_... y de Phase_ifg_..., aparecen nuevamente, al abrir el producto en la parte de Bands.

Paso adicional, si se requiere

- Subset (Figura A37.)

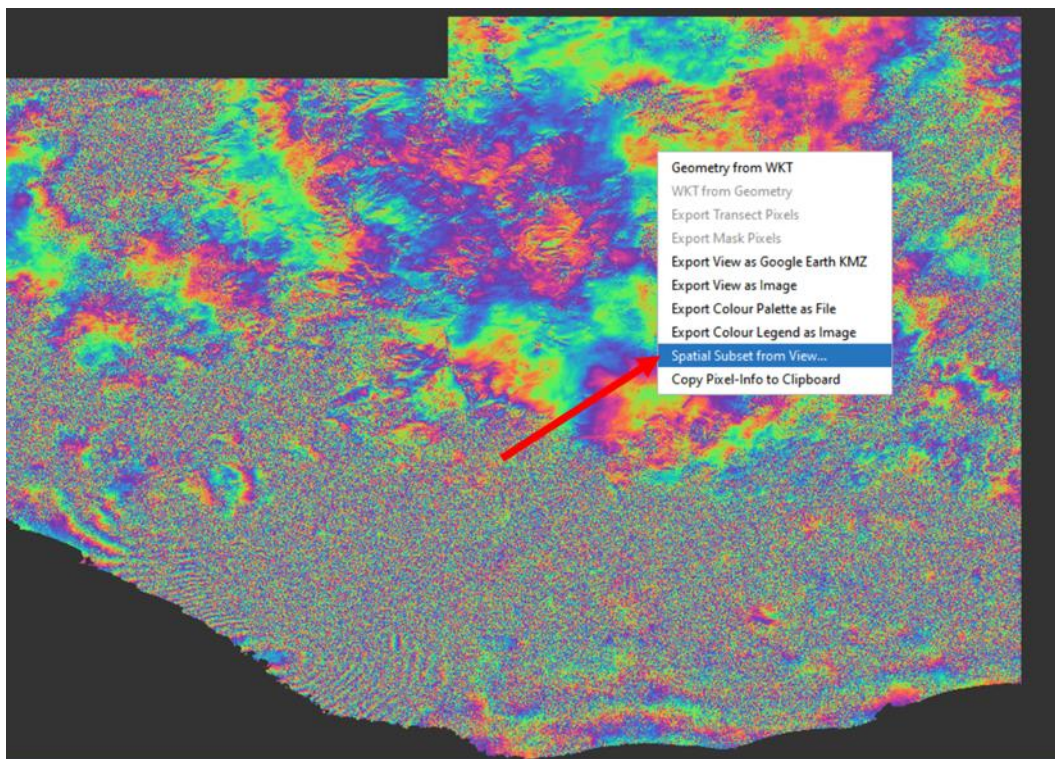


Figura A37. Operador Subset desde la vista de la imagen del interferograma.

Puesto que nuestra área de interés es una zona bastante grande y solo deseamos una parte, al abrir la banda del interferograma con filtro aplicado, hacemos click derecho como es señalado con la flecha roja, seleccionamos Spatial Subset from View.



➤ Spatial Subset (Figura A38.)

Pixel Coordinates		Geo Coordinates	
Scene start X:	0		
Scene start Y:	684		
Scene end X:	11248		
Scene end Y:	3436		
Scene step X:	1		
Scene step Y:	1		
Subset scene width:	11249.0		
Subset scene height:	2753.0		
Source scene width:	11249		
Source scene height:	3437		

Use Preview ☐ Fix full width ☐ Fix full height

Estimated, raw storage size: 354.4M

OK Cancel Help

Figura A38. Zona espacial en donde desea que el operador Subset extraiga o corte en la imagen del interferograma.

Lo que hace este operador Subset, es recortar la zona de nuestro interés, conservando cada banda y su configuración, así como sus metadatos, este subset se aplica si se requiere una zona más pequeña después de fusionar las subfranjas o si solo es más pequeña, para este caso lo dejamos todo por defecto, ver Figura A39.

Band Subset		Tie-Point Grid Subset	
☒ i_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020		☒ latitude	
☒ q_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020		☒ longitude	
☒ Intensity_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020_db Intensity in dB from complex data		☒ slant_range_time	
☒ Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020 Phase from complex data		☒ incident_angle	
☒ coh_VV_22Jun2020_28Jun2020			

Select all Select none

Estimated, raw storage size: 354.4M

OK Cancel Help

Figura A39. Bandas y la cuadrícula de puntos en la que se realizara el enlace para extraer en el Subset de la imagen del interferograma.



Una vez ejecutado se crea un archivo temporal por lo que lo guardaremos para que se pueda utilizar posteriormente como lo señala la flecha verde en la Figura A40.

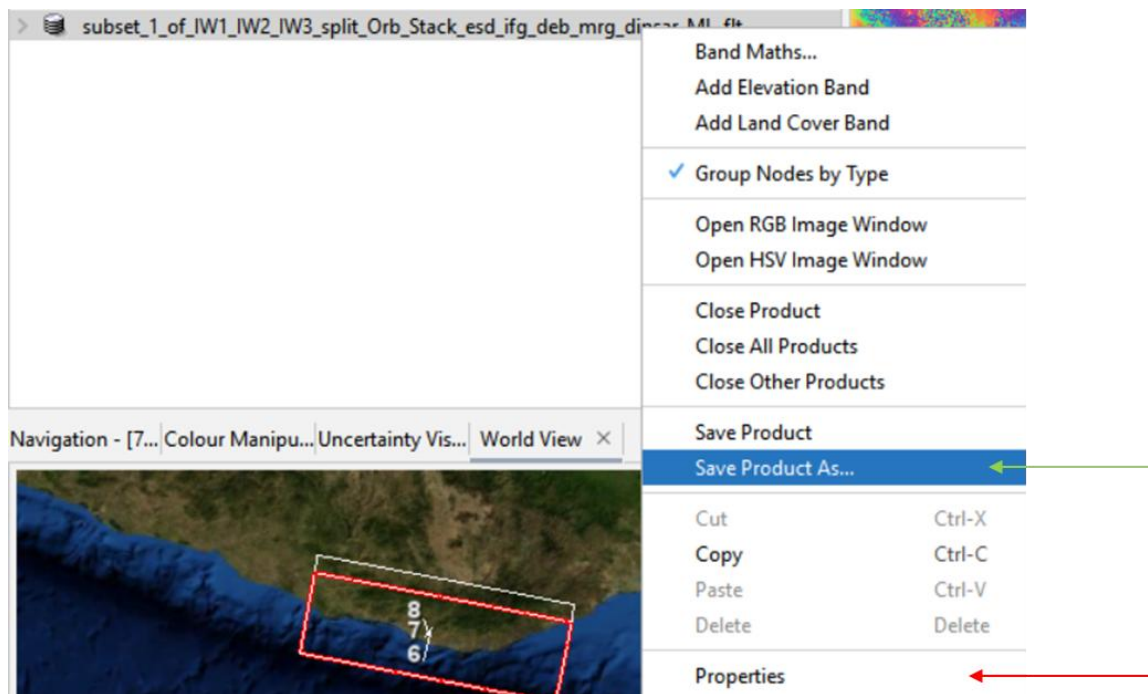


Figura A40. Subset de forma temporal de la imagen del interferograma.

Al guardar el producto, nos advertirá (Figura A41.), si lo queremos guardar en formato BEAM-DIMAP, por lo que procedemos a aceptar, este proceso se tardara en guardar ya que contiene toda la información (metadatos), si no desea ese nombre de salida puede cambiarse previamente, haciendo click derecho en la parte del producto temporal y properties, como lo señala la flecha roja en la Figura A40.

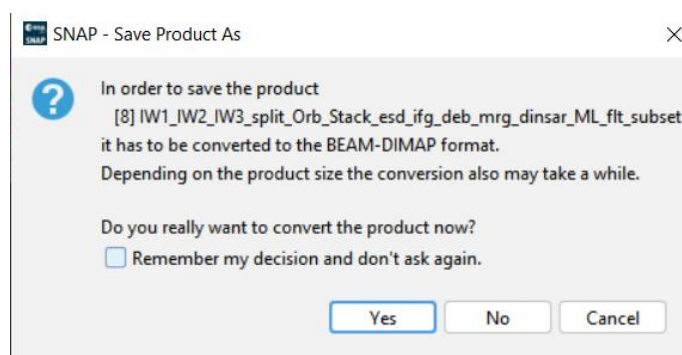


Figura A41. Advertencia al momento de guardar el producto Subset se convertirá en un producto de BEAM-DIMAP.



- Snaphu Export (Exportar a SNAPHU, ver Figura A42.)

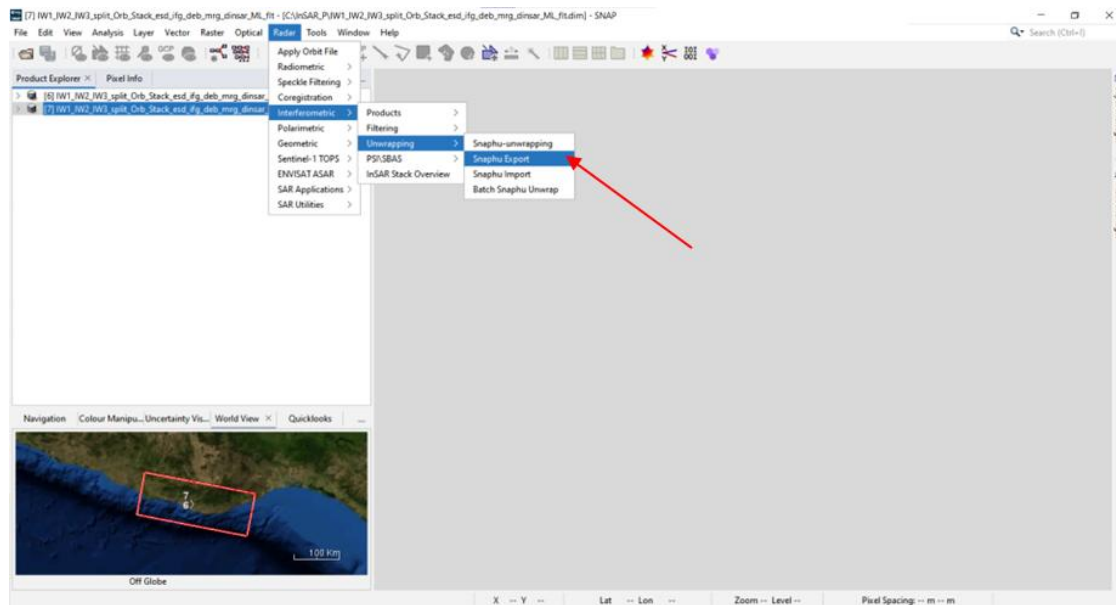


Figura A42. Operador Shaphu Export.

Para poder derivar valores de altura del producto para usarlos en un procesamiento posterior, como generar mapas de deformación o DEM (si no se aplicó la remoción de fase topográfica), se tiene que desenvolver un interferograma ya que en esta parte al no desenvolver el interferograma se encuentra en fase ambigua y solo se conoce dentro del rango de 2π .

➤ Read

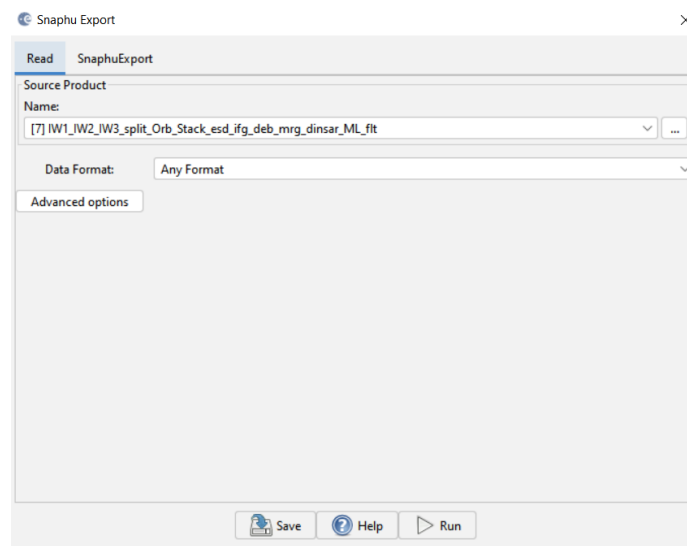


Figura A43. Producto de lectura para el operador Shaphu Export.

Se toma el producto procesado con terminación ...flt (ver Figura A43.) o en su defecto si se realizó un sub-set con terminación ...sub (fase no desenvuelta), como lo es en este caso.



➤ SnaphuExport (parámetros, ver Figura A44.)

Figura A44. Parámetros del producto para exportar dentro del operador Shaphu Export.

- Target folder
Donde se exportará la carpeta que contendrá la coherencia, la fase de desenvolvimiento, la fase y el archivo de desenvolvimiento. (Se copia y pega la ruta de destino)
Si en dado caso sale la advertencia eventual de Error: **[Nodelid: SnaphuExport Please add a target folder]**, este desaparecerá una vez que cambiemos de pestaña o presionemos correr, siempre y cuando se haya introducido una carpeta de destino valida.
- Statistical-cost mode: **DEFO**
Modo de resolución suave, las estadísticas del problema y las funciones de costo resultantes se basan en el supuesto de que la fase desenrollada real representa una superficie genérica sin discontinuidades.
- Initial method: **MCF**
El algoritmo de flujo de costo mínimo para la inicialización, utilizando solucionador cs2 de Golberg y Cherkasssky, que es óptimo para L1.
- Number of Tile Rows: **10**
- Number of Tile Columns: **10**



Numero de mosaicos de fila y columna, para desenrollar el interferograma en mosaico, de forma independiente

- Number of Processors: **4** (dependiendo de las capacidades de la computadora que tenga).
- Row Overlap: **0**
- Column Overlap: **0**

Los mosaicos se superponen en pixeles, en las direcciones de fila y columna.

- Tile Cost Threshold: **500**

Los mosaicos se segmentan en regiones confiables según las funciones de costo y las regiones se vuelven a ensamblar.

Instalación del plugin Snaphu, para la fase de desenvolvimiento (unwapping).

El complemento SNAPHU es un complemento independiente de la herramienta Sentinel-1 Toolbox de la Agencia Espacial Europea (ESA). Este algoritmo, implementa un flujo de red estadística de costo para el desenrollado de fase, debe ser instalado de manera separada. El uso del plugin SNAPHU permite realizar un desenrollado preciso de las fases interferométricas, lo cual es esencial para el análisis detallado de los datos SAR.

Para llevar a cabo la instalación, se deben acceder a la sección superior en Tools y seleccionamos Plugins en SNAP, ver Figura A45.

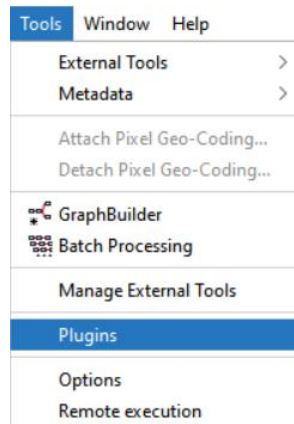


Figura A45. Ubicación de la herramienta de los complementos (plugins).

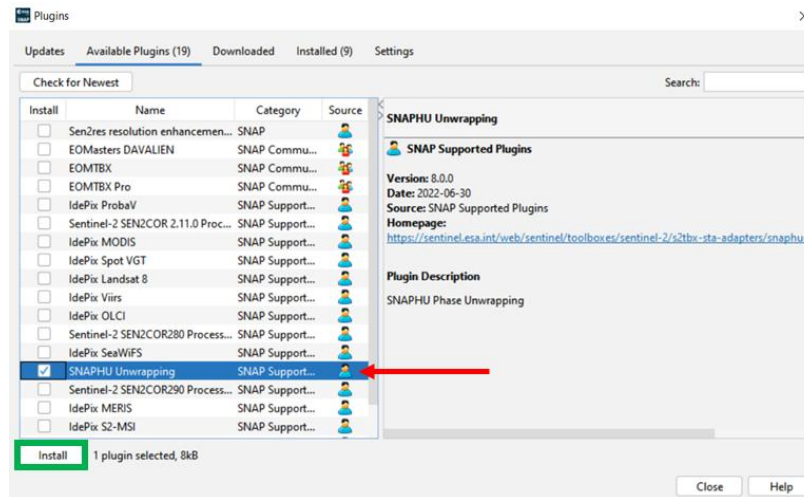


Figura A47. Complementos disponibles (available plugins).

En la pestaña de Available Plugins (ver Figura A46.) encontraremos que el plugin que se necesita es el de SNAPHU Unwrapping (señalado con la flecha roja), lo seleccionamos y en el apartado de Install (cuadro verde), se selecciona. Una vez que comience la instalación le damos siguiente como lo señala la flecha roja en la Figura A47. Una vez completada la instalación, seleccionamos la parte de reiniciar ahora (flecha verde) y después Finish (cuadro azul).

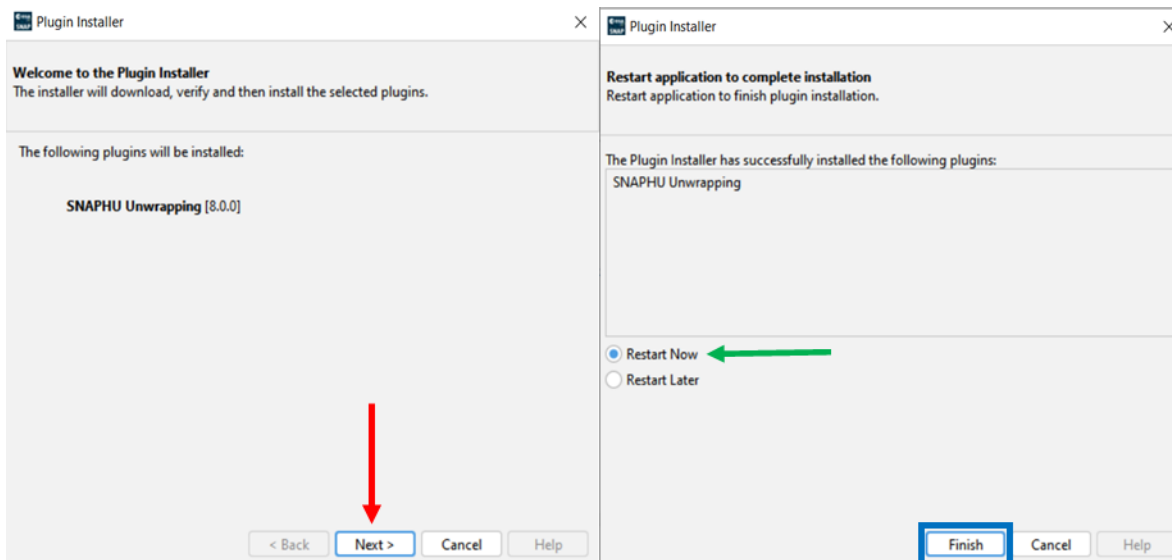


Figura A46. Instalación del complemento SNAPHU Unwrapping.

Con esto se procederá a reiniciarse el programa y el paso siguiente es instalar los paquetes de SNAPHU.

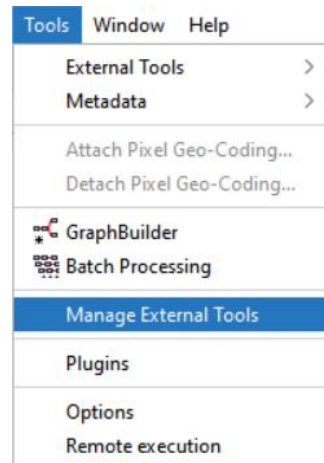


Figura A49. Administrador de complementos externos.

En la parte superior, seleccionamos nuevamente en Tools, seguido de Manage External Tools, ver Figura A48.

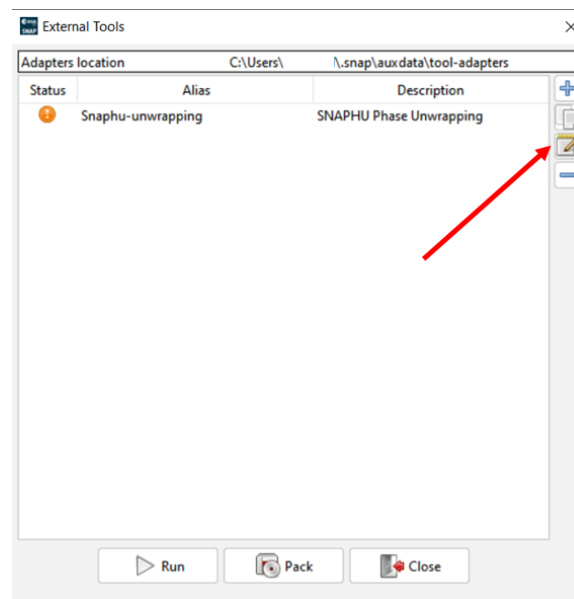


Figura A48. Herramientas externas.

Seleccionamos el operador Snaphu- unwrapping y después el icono de editar el operador seleccionado, señalado con la flecha roja en la Figura A49.

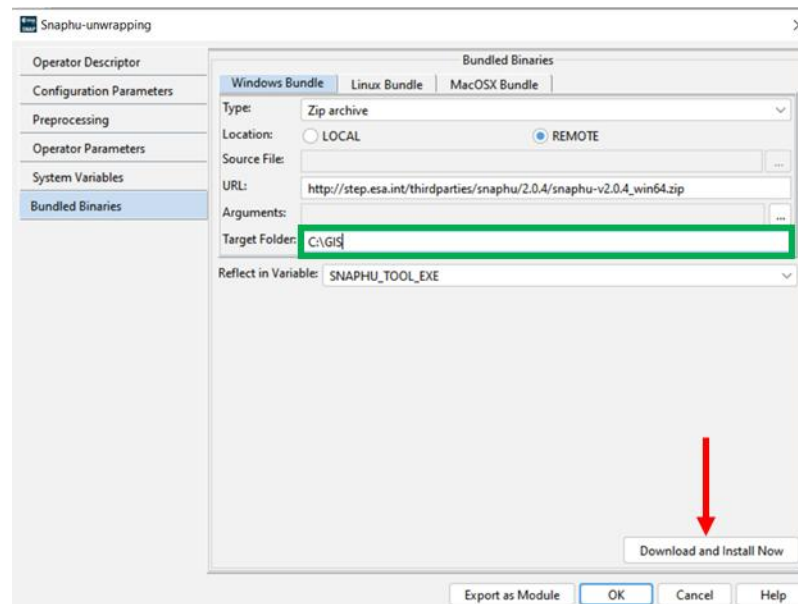


Figura A50. Instalación de la carpeta o ruta de destino para la instalación de Shaphu.

Una vez abierto, nos dirigimos a la parte lateral izquierda en Bundled Binaries (ver Figura A50.), en la sección de Target Folder, seleccionamos o escribimos la ruta en donde queremos que se instale Snaphu (cuadro verde), una vez escrita la ruta de instalación, seleccionamos en la parte inferior derecha (flecha roja) Download and install Now.

Por tanto, quedara instalado la paquetería de Snaphu, como recomendación es preferible colocar la carpeta de instalación de la paquetería en el directorio de raíz o en su defecto en la carpeta que se encuentre trabajando el procesamiento de las imágenes.

- Snaphu Unwrapping (ver Figura A51.)

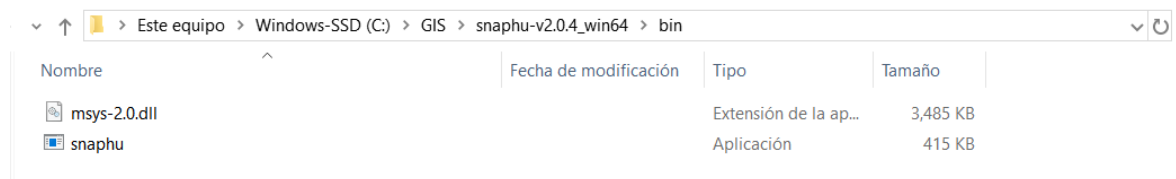
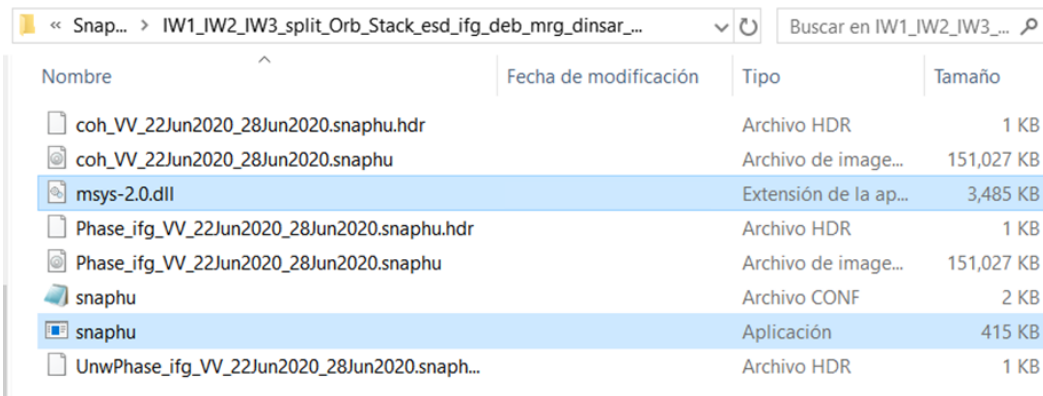


Figura A51. Carpeta bin proveniente de la instalación de Shaphu.

Nos dirigimos a la carpeta en donde se realizó la instalación del paquete Snaphu, seleccionamos la carpeta bin y copiamos los dos archivos que se encuentran ubicados en la carpeta.



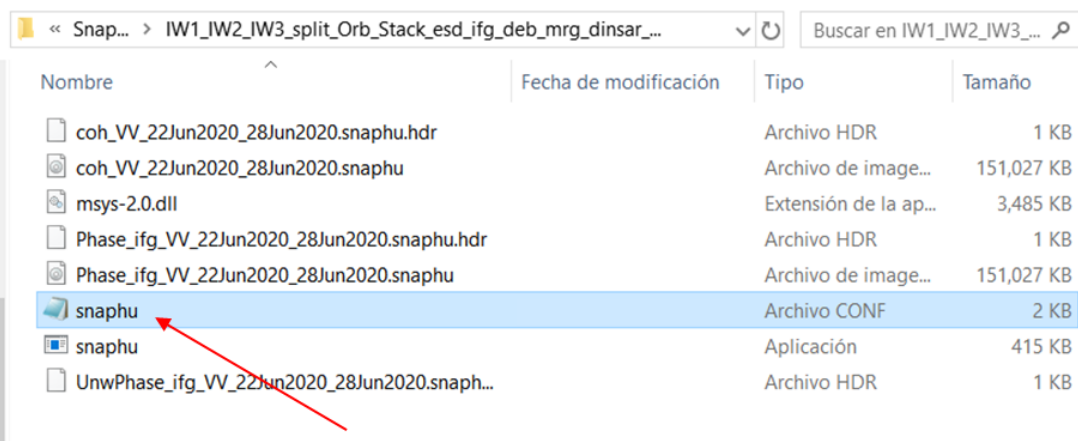
Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
coh_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.hdr		Archivo HDR	1 KB
coh_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu		Archivo de image...	151,027 KB
msys-2.0.dll		Extensión de la ap...	3,485 KB
Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.hdr		Archivo HDR	1 KB
Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu		Archivo de image...	151,027 KB
snaphu		Archivo CONF	2 KB
snaphu		Aplicación	415 KB
UnwPhase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaph...		Archivo HDR	1 KB

Figura A52. Carpeta en donde se exporto el producto con terminación ..._flt_sub.

Los dos archivos copiados previamente, los pegamos en la carpeta donde se encuentra el archivo en donde se ha exportado el producto previamente (SnaphuExport, ver Figura A52.)

Es importante este paso ya que para realizar la fase de desenvolvimiento lo haremos desde CMD, (si se usa Windows).

Seleccionamos el archivo de configuración shaphu (señalado con la flecha roja en la Figura A53.), abrimos con un bloc de notas.



Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
coh_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.hdr		Archivo HDR	1 KB
coh_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu		Archivo de image...	151,027 KB
msys-2.0.dll		Extensión de la ap...	3,485 KB
Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.hdr		Archivo HDR	1 KB
Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu		Archivo de image...	151,027 KB
snaphu		Archivo CONF	2 KB
snaphu		Aplicación	415 KB
UnwPhase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaph...		Archivo HDR	1 KB

Figura A53. Archivo de configuración seleccionado para su modificación.



```
# CONFIG FOR SNAPHU
# -----
# Created by SNAP software on: 22:50:05 23/09/2024
#
# Command to call snaphu:
#
snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.img 11249

#####
# Unwrapping parameters #
#####

STATCOSTMODE      DEFO
INITMETHOD        MCF
VERBOSE           TRUE

#####
# Input files #
#####

CORRFILE           coh_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.img

#####
# Output files #
#####

OUTFILE            UnwPhase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.img
#LOGFILE           snaphu.log
```

Línea de comando que se debe copiar, sin modificar.

Línea de comando LOGFILE que se debe modificar, se agrega "#".

Figura A54. Modificación del archivo de configuración snaphu, vista desde un bloc de notas.

En este archivo (ver Figura A54.), se busca la línea de comando que dice LOGFILE (flecha roja) en esta parte le agregamos un “#”, por lo que queda como **#LOGFILE** que servirá para que lea de forma “manual”, después se copia la línea de comando que dice **snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV** (cuadro verde), le damos en guardar y cerramos el archivo.



En esta misma carpeta, nos dirigimos a la barra de dirección, escribimos CMD como se muestra en la Figura A55. y ejecutamos.

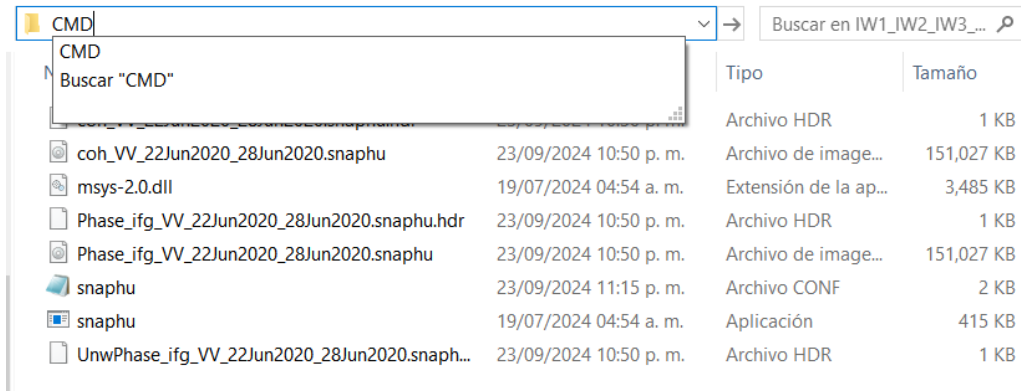


Figura A55. Barra de dirección para ejecución de la CMD.

Una vez abierta la CMD, mandamos a llamar a snaphu como se muestra en la Figura A56. (flecha verde), ejecutamos y nos desplegará el menú de opciones a las que se puede acceder.

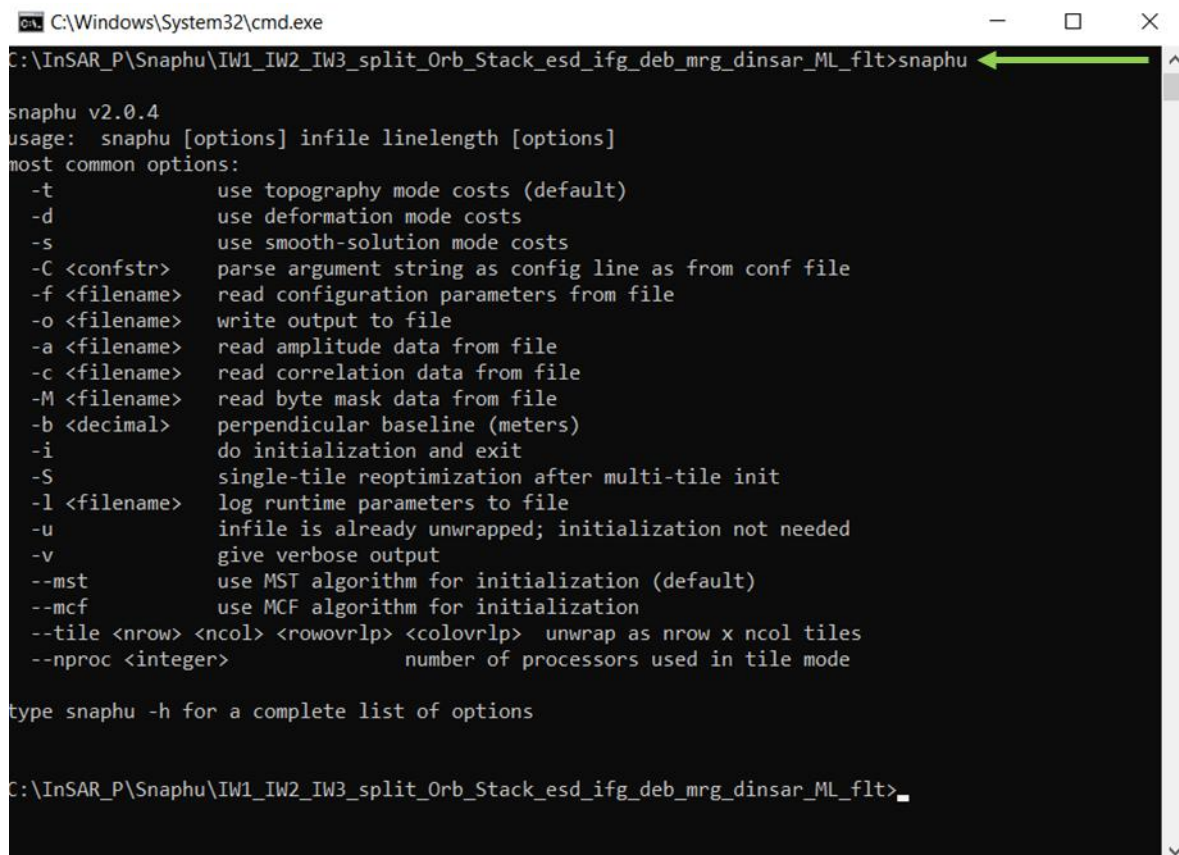


Figura A56. Vista de la CMD para ejecución de snaphu.



```
C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\InSAR_P\Snaphu\IW1_IW2_IW3_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_mrg_dinsar_ML_fit>snaphu

snaphu v2.0.4
usage: snaphu [options] infile linelength [options]
most common options:
-t          use topography mode costs (default)
-d          use deformation mode costs
-s          use smooth-solution mode costs
-C <confstr> parse argument string as config line as from conf file
-f <filename> read configuration parameters from file
-o <filename> write output to file
-a <filename> read amplitude data from file
-c <filename> read correlation data from file
-M <filename> read byte mask data from file
-b <decimal> perpendicular baseline (meters)
-i          do initialization and exit
-S          single-tile reoptimization after multi-tile init
-l <filename> log runtime parameters to file
-u          infile is already unwrapped; initialization not needed
-v          give verbose output
--mst       use MST algorithm for initialization (default)
--mcf       use MCF algorithm for initialization
--tile <nrow> <ncol> <rowovrlp> <colovrlp> unwrap as nrow x ncol tiles
--nproc <integer> number of processors used in tile mode

type snaphu -h for a complete list of options

C:\InSAR_P\Snaphu\IW1_IW2_IW3_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_mrg_dinsar_ML_fit>snaphu -f snaphu.conf Phase_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020.snaphu.img 11249
```

Línea de comando de configuración para llamar a snaphu.

Figura A57. Vista de la CMD para ejecución de la línea de configuración.

Procedemos a pegar la línea de comando como se muestra en la Figura A57. (cuadro rojo) que previamente ha sido copiada y volvemos a ejecutar.

Al ejecutarse snaphu, comenzara el proceso de desenvolvimiento, cuyo tiempo puede variar, dependiendo de la capacidad de la máquina en la que se corre.

```
C:\Windows\System32\cmd.exe
snaphu v2.0.4
26 parameters input from file snaphu.conf (84 lines total)
Creating temporary directory snaphu_tiles_1250
Unwrapping tile at row 0, column 0 (pid 1251)
Unwrapping tile at row 0, column 1 (pid 1252)
Unwrapping tile at row 0, column 2 (pid 1253)
Unwrapping tile at row 0, column 3 (pid 1254)
Unwrapping tile at row 0, column 4 (pid 1255)
Unwrapping tile at row 0, column 5 (pid 1256)
Unwrapping tile at row 0, column 6 (pid 1257)
Unwrapping tile at row 0, column 7 (pid 1258)
Unwrapping tile at row 0, column 8 (pid 1259)
Unwrapping tile at row 0, column 9 (pid 1260)
Unwrapping tile at row 1, column 0 (pid 1261)
Unwrapping tile at row 1, column 1 (pid 1262)
Unwrapping tile at row 1, column 2 (pid 1263)
Unwrapping tile at row 1, column 3 (pid 1264)
Unwrapping tile at row 1, column 4 (pid 1265)
Unwrapping tile at row 1, column 5 (pid 1266)
Unwrapping tile at row 1, column 6 (pid 1267)
Unwrapping tile at row 1, column 7 (pid 1268)
Unwrapping tile at row 1, column 8 (pid 1269)
Unwrapping tile at row 1, column 9 (pid 1270)
Unwrapping tile at row 2, column 0 (pid 1271)
Unwrapping tile at row 2, column 1 (pid 1272)
Unwrapping tile at row 2, column 2 (pid 1273)
Unwrapping tile at row 2, column 3 (pid 1274)
Unwrapping tile at row 2, column 4 (pid 1275)
Unwrapping tile at row 2, column 5 (pid 1276)
```

Figura A58. Vista de la CMD ejecutándose la línea de configuración de snaphu.

Para saber si se está ejecutando o no, saldrá el siguiente mensaje (ver Figura A58.), lo cual significa que está empezando a desenvolverse. Este proceso puede fallar, ya sea por motivos de los parámetros o en su defecto algo salió mal al momento de la exportación, por lo que se recomienda no descuidar este proceso.



➤ Snaphu Import

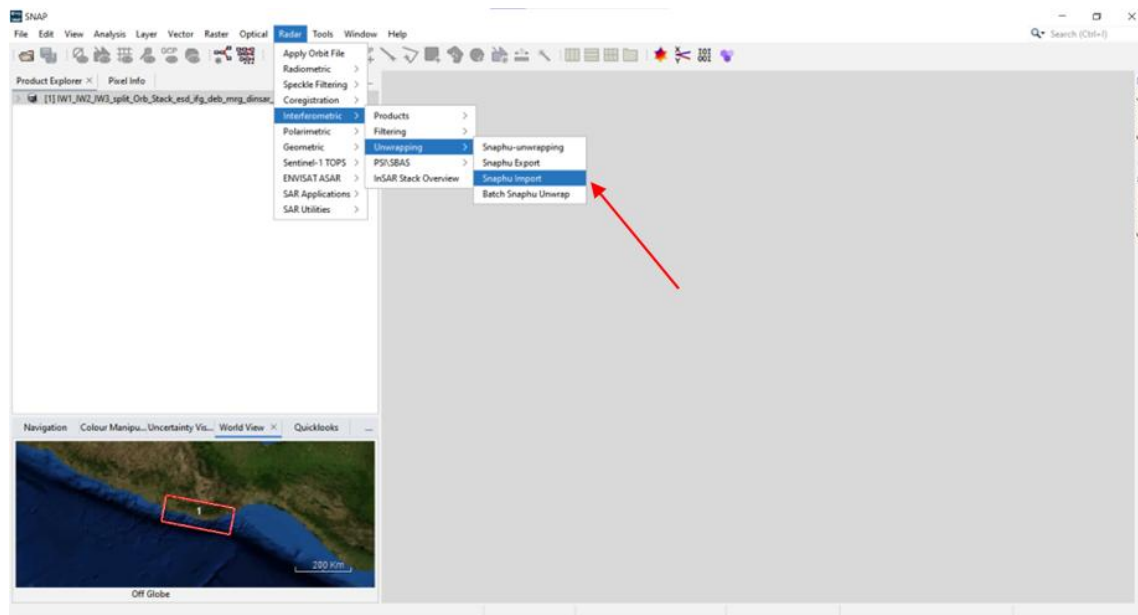


Figura A59. Operador Snaphu Import.

Una vez terminado el desenvolvimiento, debemos importar el archivo de fase desenvuelta, mediante el operador Snaphu Import (ver Figura A59. flecha roja).

➤ Lectura de fase no desenvuelta (ver Figura A60.)

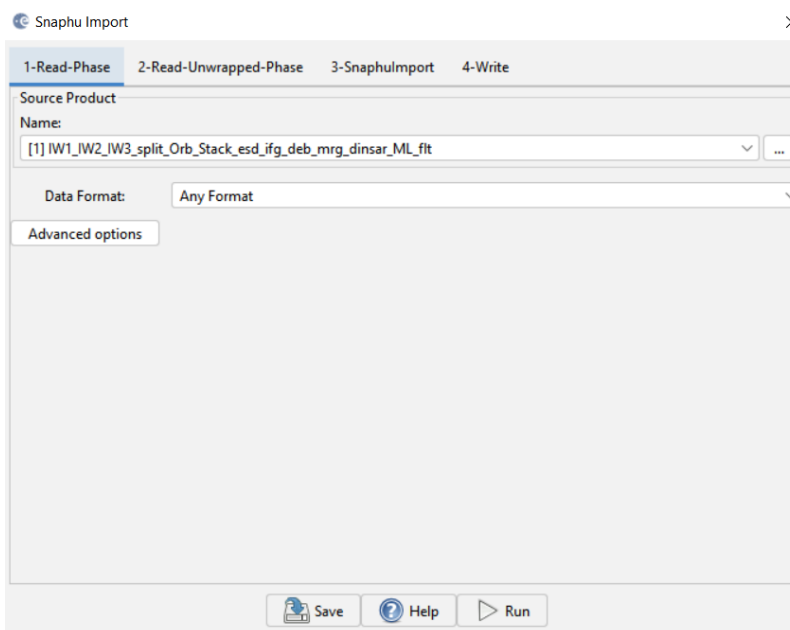


Figura A60. Lectura de fase no desenvuelta para el operador Snaphu Import.

En fase de lectura se selecciona el subconjunto del interferograma (fase no desenvuelta).



➤ Lectura de fase desenvuelta (ver Figura A61.)

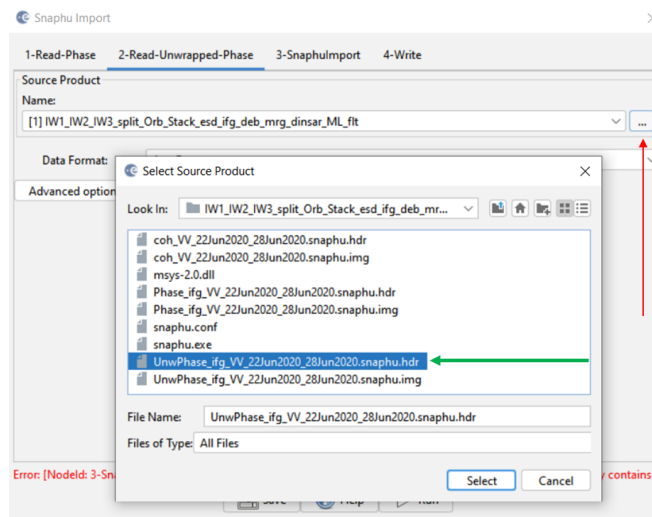


Figura A61. Selección del producto de fase desenvuelta para el operador Snapu Import.

En la parte superior como lo señala la flecha roja, seleccionamos el icono de tres puntos, procedemos a seleccionar el archivo UnwPashe ifg VV... con terminación, .hdr (flecha verde) y damos nombre de salida, le damos correr, esto tardara unos minutos en realizarse.

- Visualización del interferograma desenvuelto

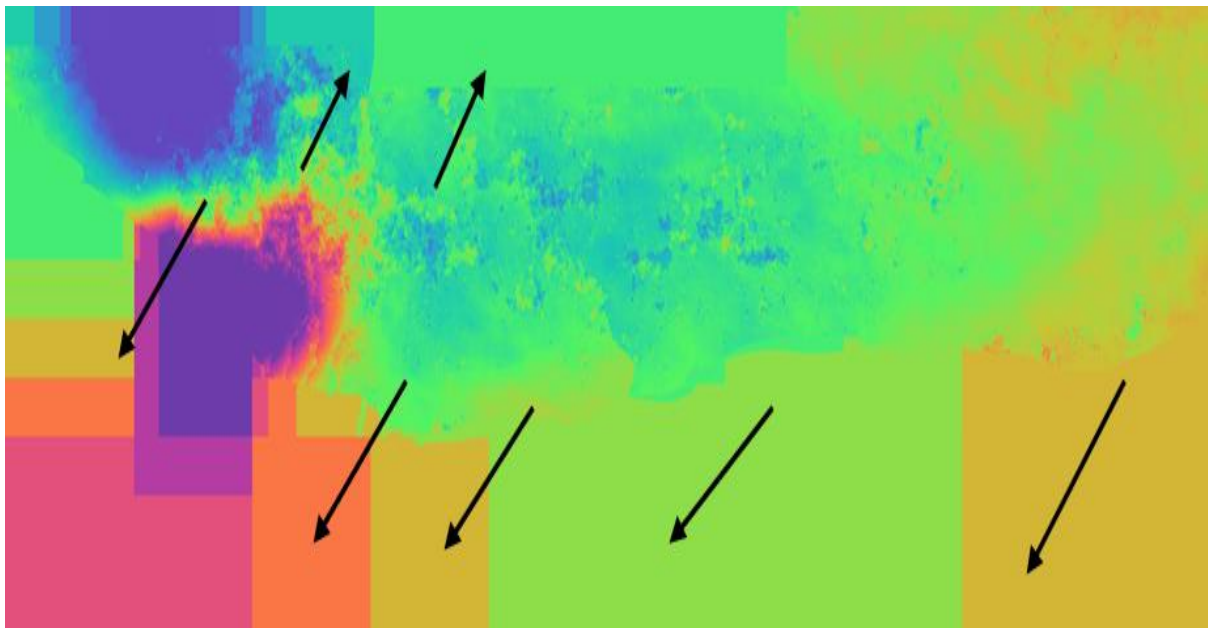


Figura A62. Interferograma desenvuelto.

En este punto, el producto se puede ver que las áreas sin elevación señaladas con flechas negras (ver Figura A62.), aparecen incorrectamente, como si tuviera datos en la imagen desenvuelta, pero no tiene corrección de terreno.

Creación de mapa de desplazamiento

- Phase Displacement (fase de desplazamiento, ver Figura A63.)

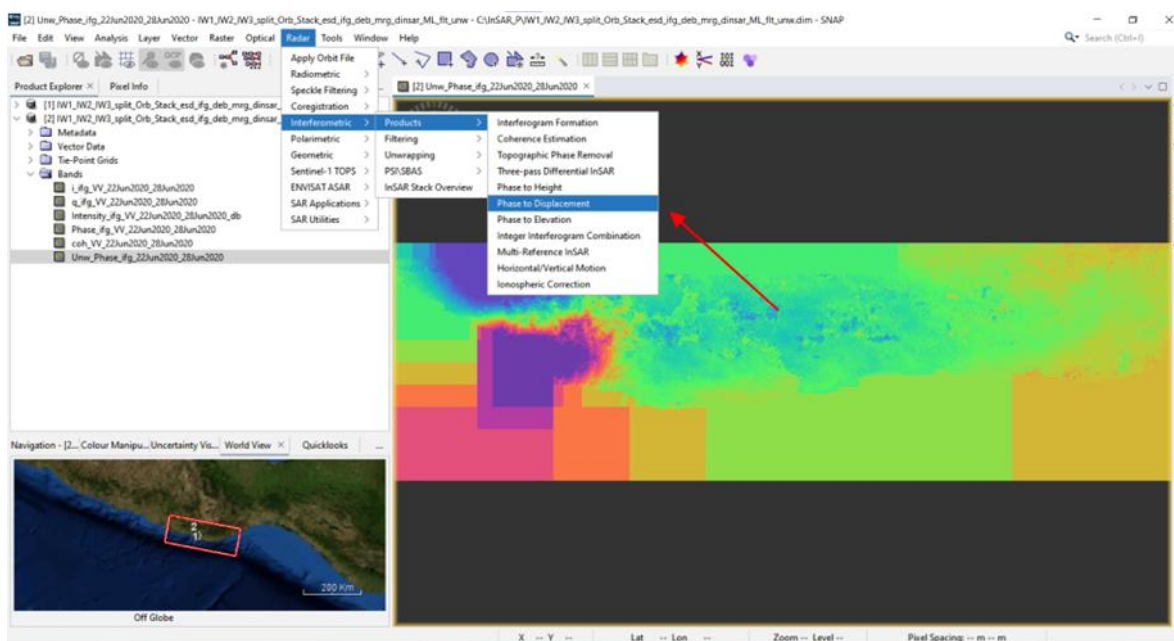


Figura A63. Operador Phase Displacement.

Lo que pretende hacerse con este operador es convertir el valor de la fase diferencial desenrollada (expresada en radianes) a un valor de desplazamiento (expresada en metros) a lo largo de la visión del sensor.

- Parámetros de entrada

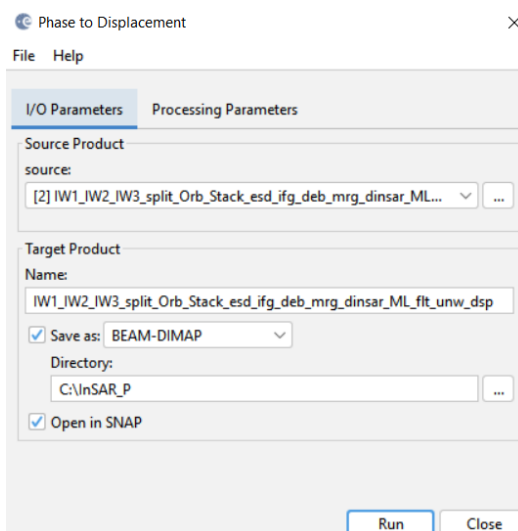


Figura A64. Parámetros de entrada para el operador Phase Displacement.

Debe ser el producto que contiene interferograma (ver Figura A64.) con la fase de Tierra plana y la fase topográfica eliminadas, así como la fase desenrollada.



➤ Parámetros de procesamiento

En esta parte, aun cuando no muestre nada (ver Figura A65.), lo que hace el operador es el cálculo del desplazamiento relativo del terreno mediante la siguiente formula

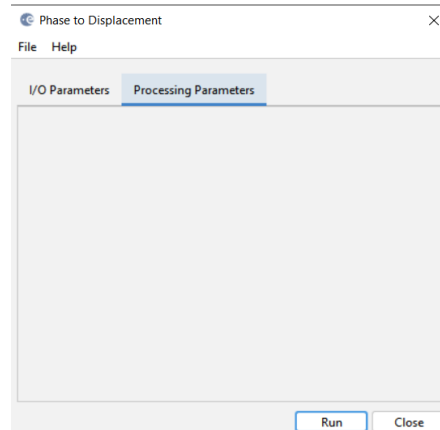


Figura A65. Parámetros de procesamiento para el operador Phase Displacement.

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

Donde

λ es la longitud de onda transmitida (SAR de banda C de Sentinel-1)

d es el desplazamiento relativo del dispersor proyectado en la dirección del rango oblicuo.

$\Delta\phi_d$ es la diferencia de fase desenvuelta entre las dos imágenes SLC.

- Visualización de la fase de desplazamiento (ver Figura A66.)

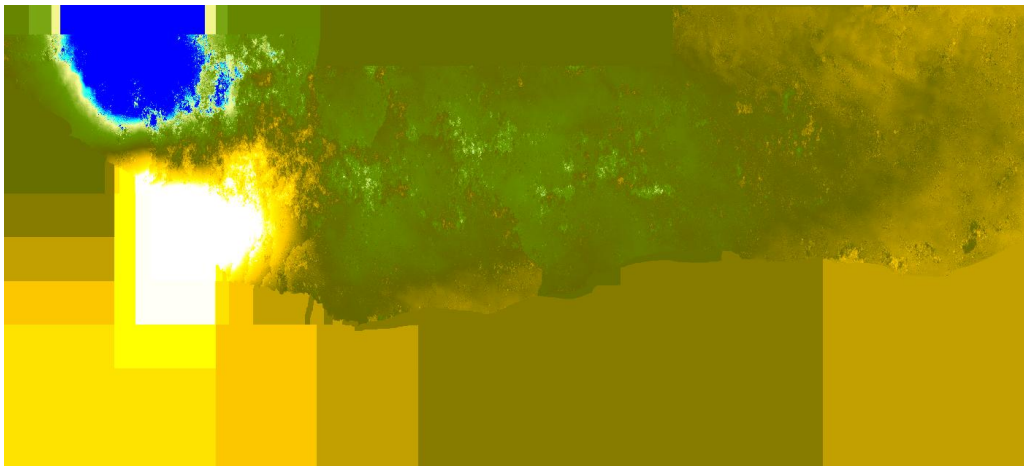


Figura A66. Parte de la fase de desplazamiento.

El producto resultante solo tiene una banda de salida.



- Create Stack

Para verificar la precisión de los datos, se necesita la banda de coherencia, creada cuando se generó el interferograma de fase desenvuelta, esto se realiza mediante el operador Create Stack (ver Figura A67. flecha roja).

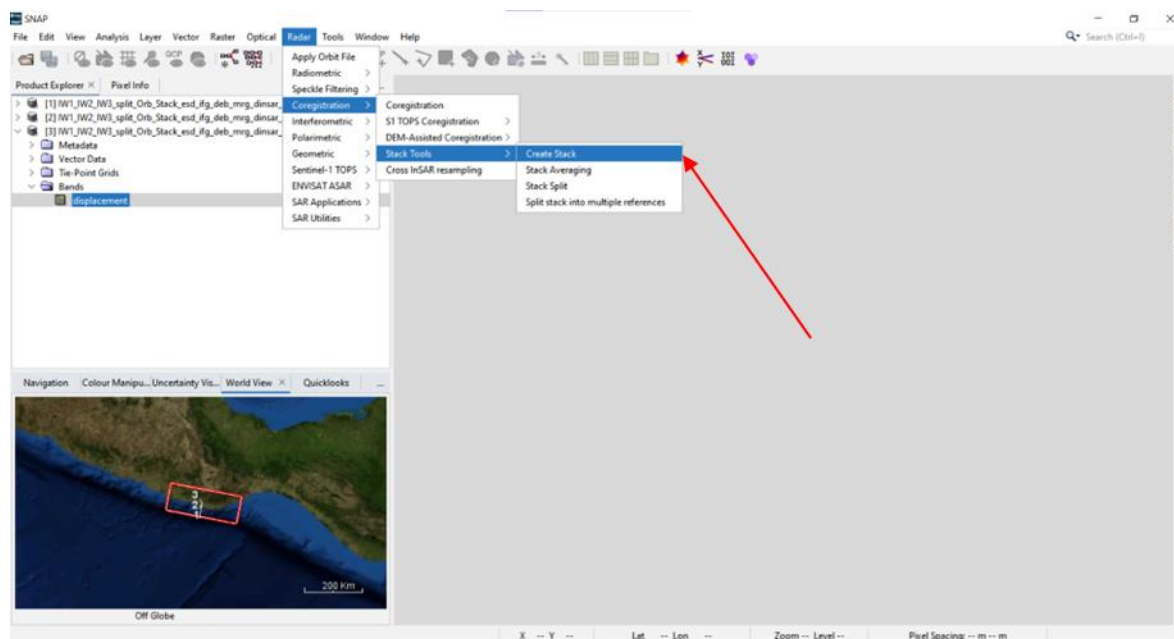


Figura A67. Operador Create Stack.

- Set de productos de lectura

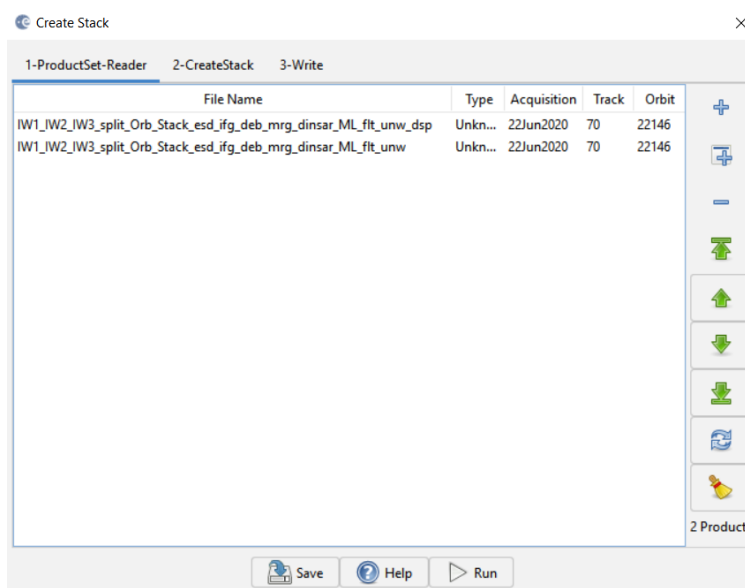


Figura A68. Set de productos para el Operador Create Stack.

Para esta pila se pondrá como imagen maestra a la fase de desplazamiento y como imagen esclava a la fase desenvuelta, ver Figura A68.



➤ Create Stack

▪ Reference

Toma como referencia la imagen maestra (ver Figura A69.)

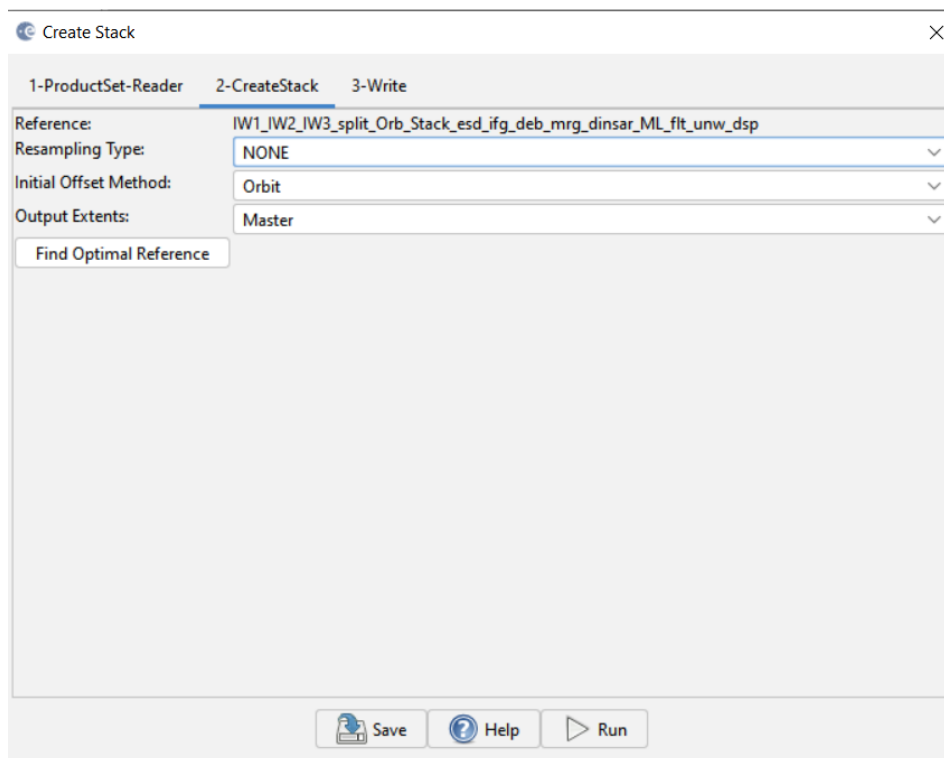


Figura A69. Parámetros para la creación de la pila.

▪ Reampling Type

Tipo de remuestreo, usando información a la posición (x,y) con un método de interpolación o convolución.

▪ Initial Offset Method

El método de compensación inicial utiliza una deformación o tensión generalmente de 0.1% o 0.2% de la longitud calibrada original ya sea a través de la órbita o en su posición.

▪ Output extents

Toma los datos de la imagen para compensar.

Geocodificación

- Terrain- Correction

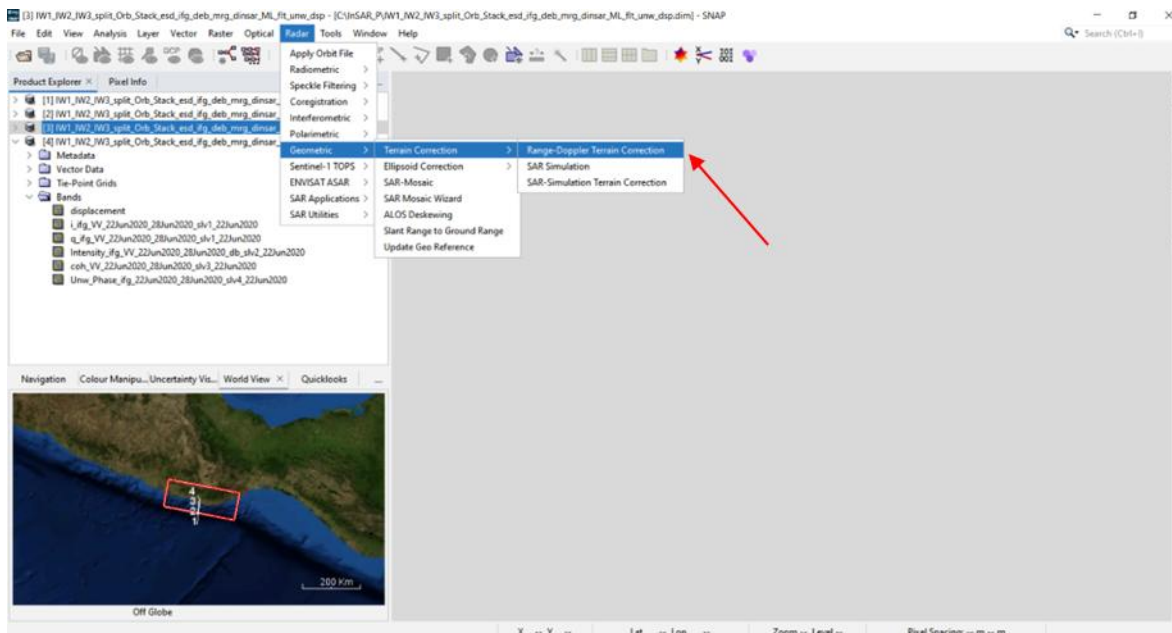


Figura A70. Operador Terrain Correction.

Las variaciones topográficas de una escena, así como la inclinación del sensor satelital, las distancias pueden distorsionarse en las imágenes SAR, por tanto, los datos que no se encuentren directamente en la ubicación del nadir del sensor tendrán cierta distorsión, por lo cual, las correcciones de terreno tienen como objetivo compensar estas distorsiones, para tener una representación geométrica de la imagen sean lo más cercanas a la realidad.

Este operador implementa el método de ortorectificación de Range Doppler (ver Figura A70. flecha roja), para geocodificar imágenes SAR a partir de una geometría de radar ráster 2D único, utilizando la información del vector de estado de órbita disponible en los metadatos o la órbita precisa externa (solo para ERS y ASAR), las anotaciones de tiempo del radar, los parámetros de conversión de inclinación a rango terrestre junto con los datos DEM de referencia para derivar la información de geolocalización precisa. (ESA, 2016)



➤ Parámetros de procesamiento (ver Figura A71.)

Range Doppler Terrain Correction

File Help

I/O Parameters Processing Parameters

Source Bands: displacement
i_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020_slv1_22Jun2020
q_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020_slv1_22Jun2020
Intensity_ifg_VV_22Jun2020_28Jun2020_db_slv2_22Jun2020
coh_VV_22Jun2020_28Jun2020_slv3_22Jun2020
Unw_Phase_ifg_22Jun2020_28Jun2020_slv4_22Jun2020

Digital Elevation Model: SRTM 1Sec HGT (Auto Download)

DEM Resampling Method: BILINEAR_INTERPOLATION

Image Resampling Method: BILINEAR_INTERPOLATION

Source GR Pixel Spacings (az x rg): 28.03108(m) x 21.89308794810085(m)

Pixel Spacing (m): 28.0

Pixel Spacing (deg): 2.51528279553466E-4

Map Projection: WGS84(DD)

☒ Mask out areas without elevation ☐ Output complex data

Output bands for:

☒ Selected source band ☐ DEM ☐ Latitude & Longitude

☐ Incidence angle from ellipsoid ☐ Local incidence angle ☐ Projected local incidence angle

☐ Layover Shadow Mask

☐ Apply radiometric normalization

☐ Save Sigma0 band Use projected local incidence angle from DEM

☐ Save Gamma0 band Use projected local incidence angle from DEM

☐ Save Beta0 band

Auxiliary File (ASAR only): Latest Auxiliary File

Run Close

Figura A71. Parámetros de procesamiento del operador Terrain Correction mediante el método de Range Doppler Terrain Correction.

- Source Bands

Todas las bandas ya sean reales o virtuales del producto de origen, para su calibración.

- Digital Elevation Model

Tipos de DEM que sean compatibles.

- DEM Resampling Method

Método de interpolación para obtener valores de elevación a partir del archivo DEM original.

- Image Resampling Method

Método de interpolación para obtener valores de píxeles de la imagen de origen.

- Pixel Spacing (m)

Se puede especificar el espaciado entre píxeles en metros para la imagen ortorectificada. Si no se especifica ningún espaciado entre píxeles, se utiliza el espaciado entre píxeles predeterminado calculado a partir de la imagen SAR de origen.

- Pixel Spacing (deg)



Se puede especificar el espaciado entre píxeles en grados. Si se modifica el valor de cualquiera de los dos espaciados entre píxeles, el otro se actualiza automáticamente.

- Map Projection

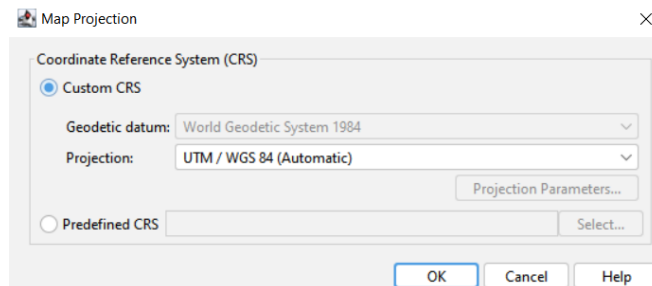


Figura A72. Cambio de proyección de mapa dentro del operador Map Projection.

Tipos de proyección de mapas. De manera predeterminada, la imagen de salida se expresará en coordenadas geográficas de latitud y longitud WGS84 para poder usarlo en Google Earth formato *.kmz*, ver Figura A72.

Por lo cual para hacer uso en SIG, se selecciona.

- ☒Mask out áreas without elevation

Casilla de verificación que indica que las áreas (por ejemplo, el mar) donde DEM no está disponible se enmascararán como sin valor de datos.

- Output bands for

- ☒Select source band

Casilla de verificación que indica que las imágenes ortorectificadas de las bandas seleccionadas por el usuario se guardarán sin aplicar la normalización radiométrica.

- Visualización de la geocodificación (ver Figura A73.)

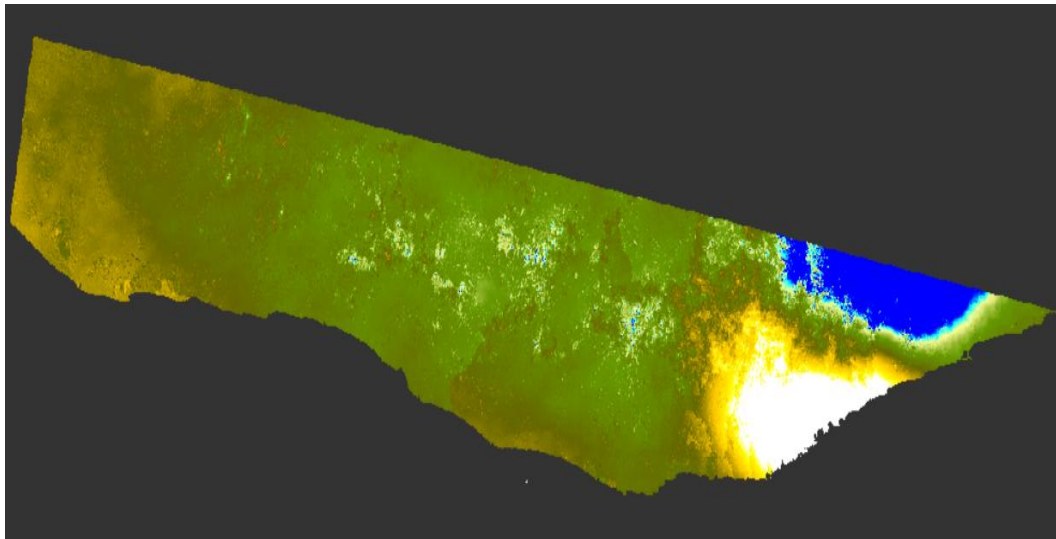


Figura A73. Mapa de desplazamiento geocodificado y corregido.

Las áreas de menor coherencia, es necesario eliminarla, ya que son datos no confiables, por lo cual es necesario enmascarar las áreas de baja coherencia mediante matemática de banda (ver Figura A74. flecha roja), con click derecho al producto.

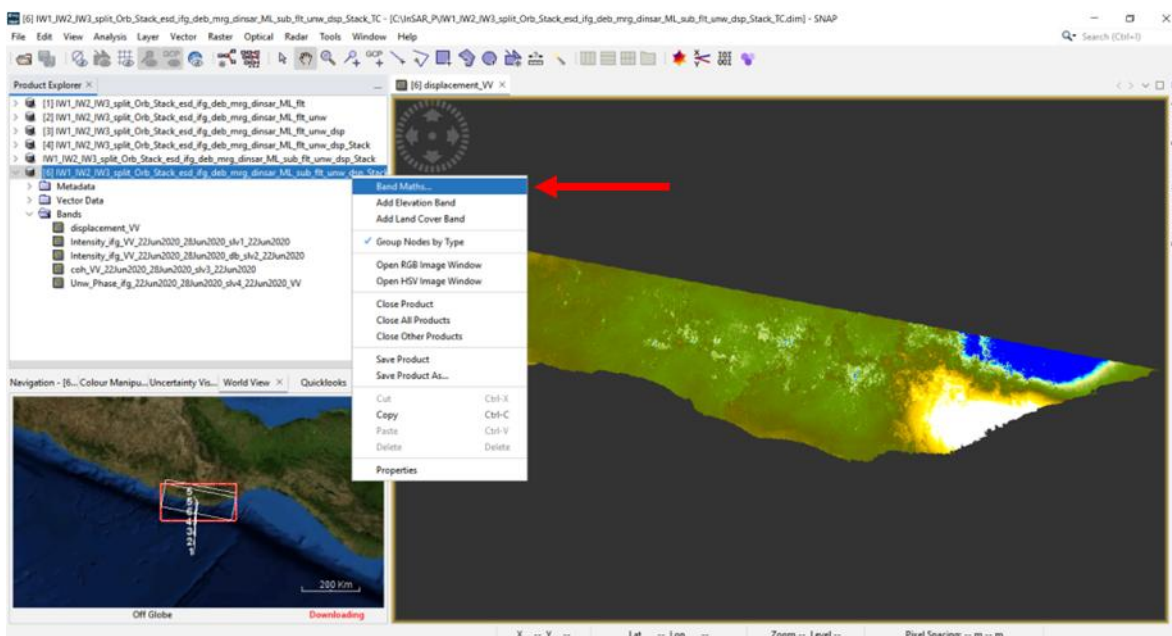


Figura A74. Operación de Band Math.



- Band Maths
- Matemática de bandas (ver Figura A75.)

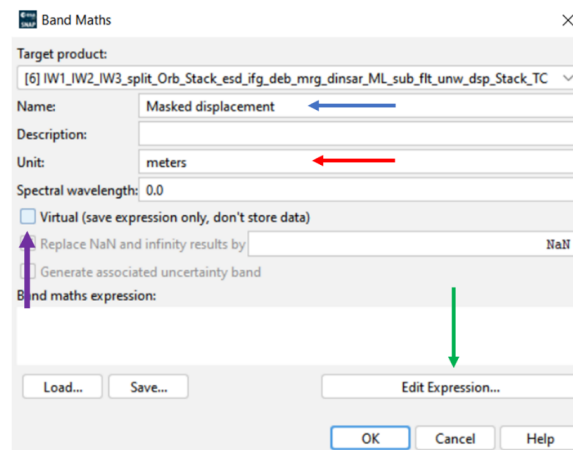


Figura A75. Creación de Band Math.

En nombre de la banda (flecha azul), le pondremos Masked Displacement o Desplazamiento enmascarado, en unidades (flecha roja) le pondremos en metros, quitamos la selección de Virtual (flecha morada), ya que este no lo guardará y cuando se cierre el producto se tendrá que volver a hacer este paso, después en la parte inferior derecha (flecha verde) seleccionamos Edit Expression...

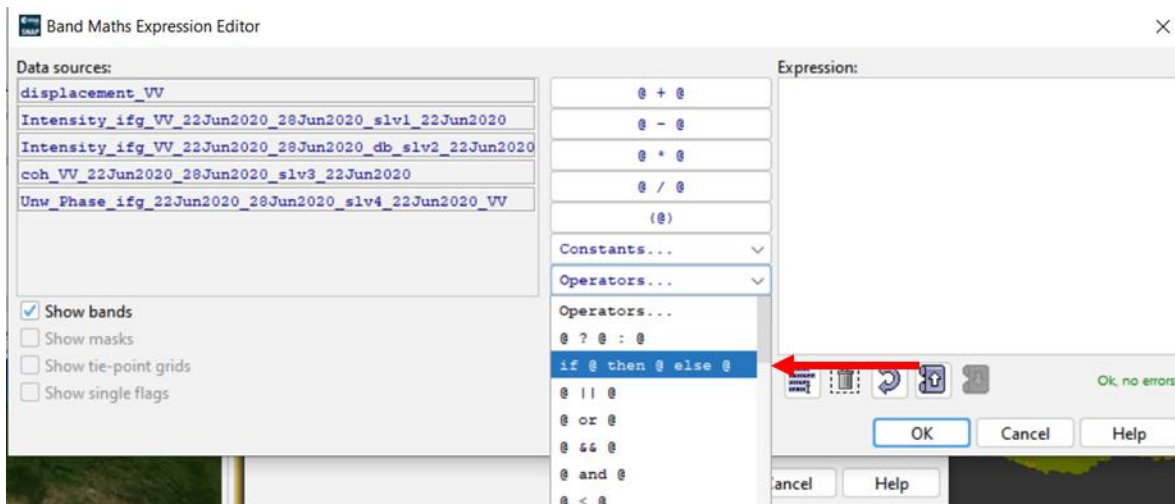


Figura A76. Creación de la expresión para enmascarar el desplazamiento mediante Band Math.

Seleccionamos Operators (ver Figura A76. flecha roja) y seleccionamos el de condición.

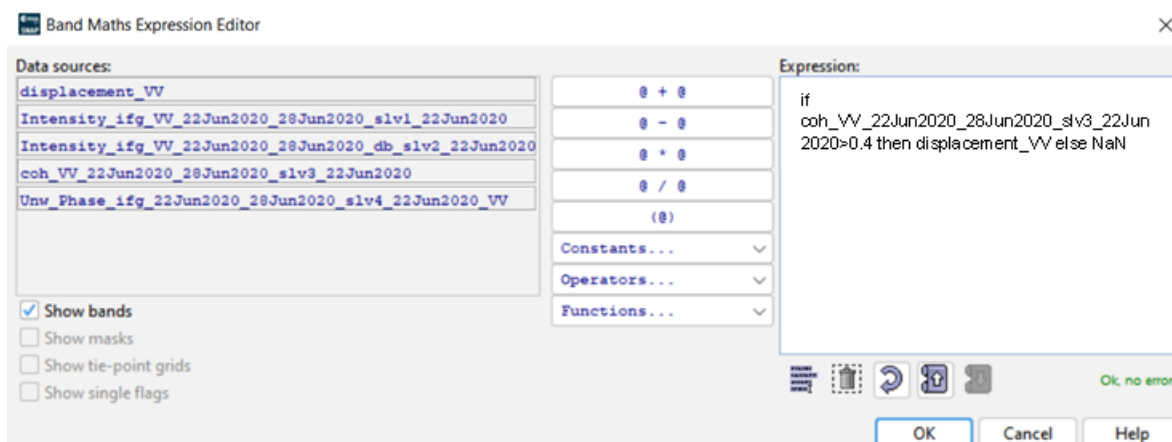


Figura A77. Expresión para enmascarar el desplazamiento mediante Band Math.

Una vez seleccionado escribiremos la expresión (ver Figura A77.)

if coh_VV_22Jun2020_28Jun2020_slv3_22Jun2020>0.4 then displacement_VV else NaN

Tomando en cuenta que las áreas urbanas y las tierras agrícolas muestran valores de coherencia altos, por encima de 0.6, mientras que las áreas forestales muestran coherencia por debajo de 0.3, por lo cual tomando en cuenta que la zona presenta mayoritariamente áreas forestales, pero también áreas urbanas lo dejamos en 0.4

- Visualización de la máscara de desplazamiento a 0.4 (ver Figura A78.)

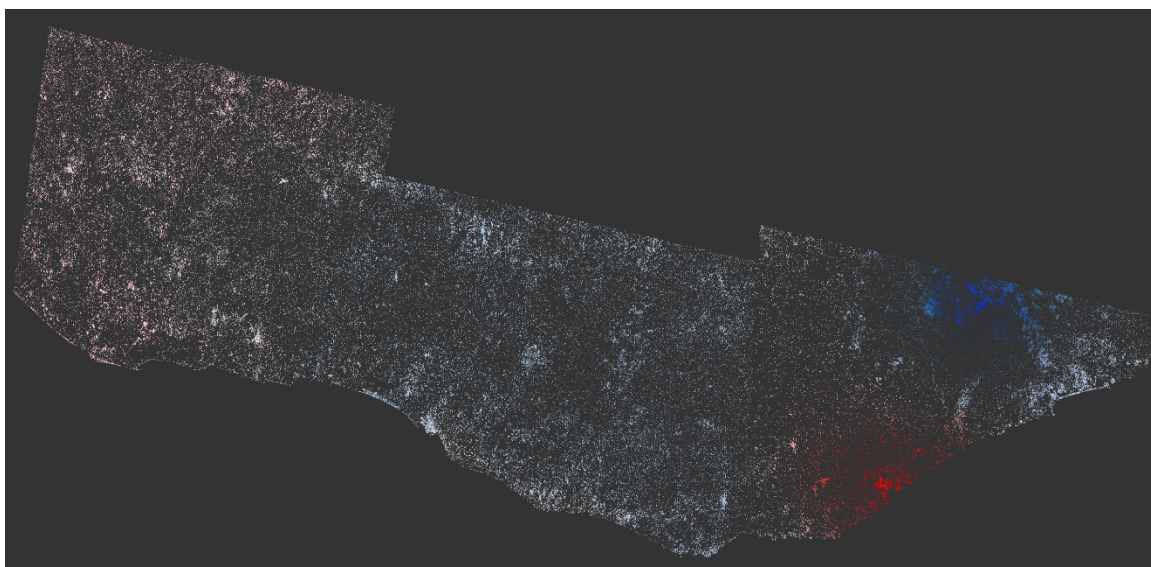


Figura A78. Mascara del desplazamiento 0.4 a partir de la matemática de bandas.

El valor de fase incrementando (positivos, valores rojos) son aquellos que indican que existe un desplazamiento, mientras que los valores en decrecimiento (negativo, valores azules) son aquellos que indican que hay probabilidad de subsidencia.



Ubicación de las estaciones GPS para análisis

Para obtener los valores de desplazamiento, se ubican los sitios de las estaciones GPS, para identificar el desplazamiento en el interferograma usando el producto con terminación ...Stack_TC. Este contiene la corrección del terreno, geolocalizados y enmascarado los valores bajos de coherencia, esto mediante la herramienta de Pin Manager

- Pin Manager (Import)

Seleccionando el icono de Import all pins from XML or text file (ver Figura A79. flecha roja),

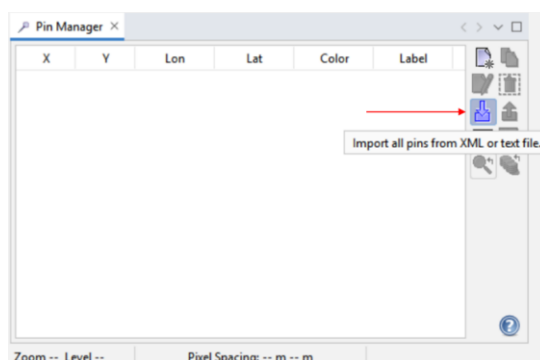


Figura A79. Importación de todos los puntos GPS, mediante Pin Manager.

tomando en cuenta que los puntos de las estaciones GPS deberán estar en formato Texto (delimitado por tabulaciones [.txt]) y que el encabezado de los datos deberá estar organizado de la manera **name lon lat**.

Al abrir la importación de los puntos de GPS, se selecciona el tipo de archivo (ver Figura A80. flecha morada) y así mismo el archivo que contiene estos puntos.

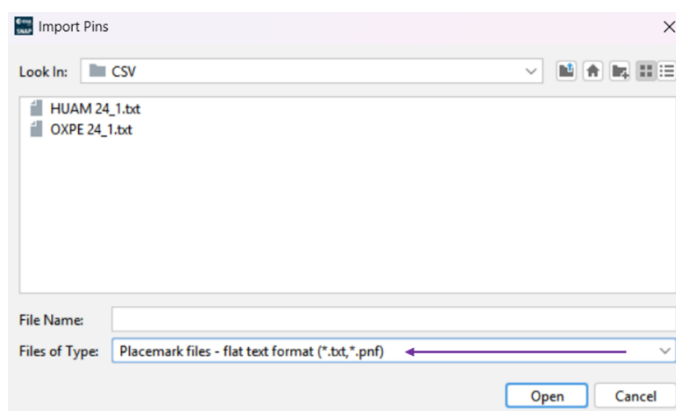


Figura A80. Selección de archivo, tomando el tipo de archivo .txt, .pnf.



- Filtro de datos en píxel

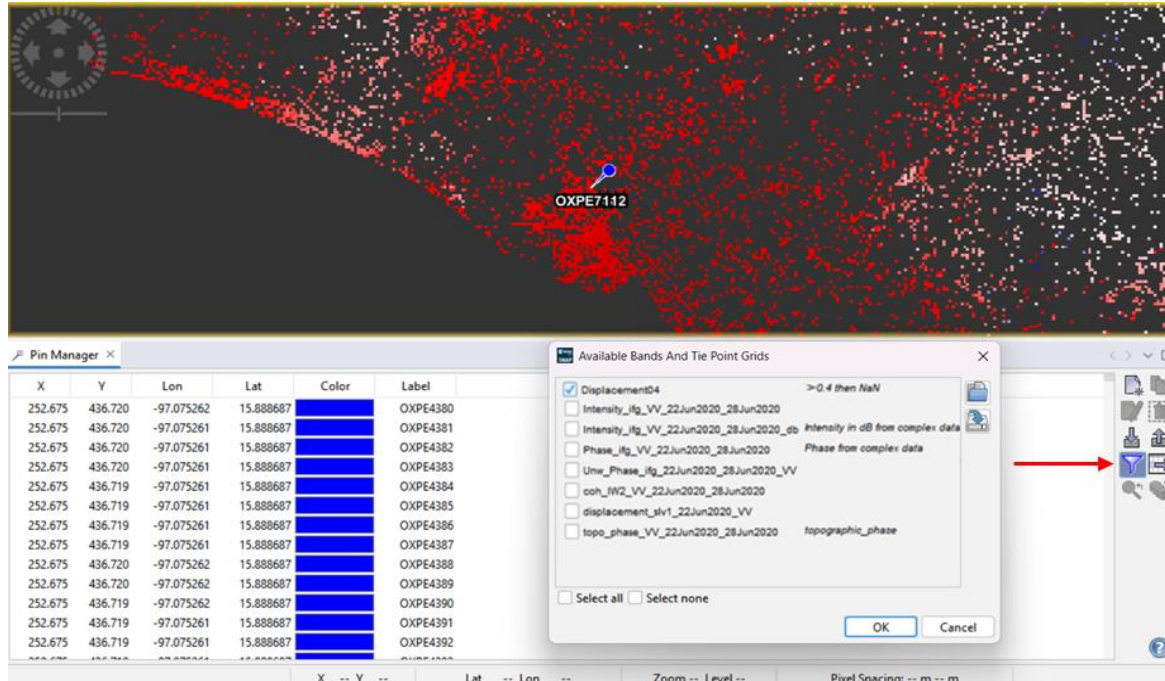


Figura A81. Filtrar los valores de desplazamiento en el píxel, que se mostrará en la tabla.

Una vez abiertos los puntos se selecciona el icono de Filter Pixel data to be displayed in table, señalado con la flecha roja como se muestra en la Figura A81. Seleccionando la banda de desplazamiento enmascarado. Valores de desplazamiento filtrados en los datos de píxel del interferograma.

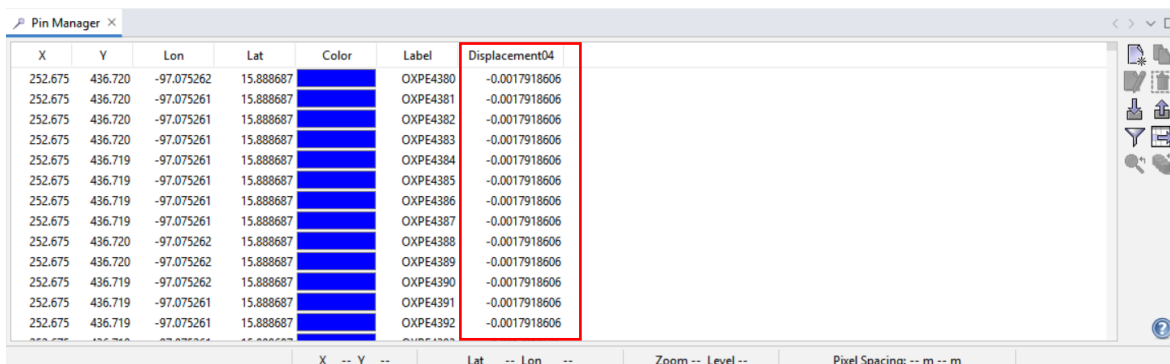


Figura A82. Ejemplo de los valores de desplazamiento en la estación OXPE, GPS.

Como lo muestra la Figura A82. (cuadro rojo) se puede ver que cada punto que contiene la estación OXPE del GPS está filtrado por el parámetro del desplazamiento enmascarado, lo cual este nos devuelve el valor de desplazamiento para cada uno de estos puntos.

Nota: El paso de filtrado de píxel se hace para cada una de las estaciones GPS y así obtener los valores de desplazamiento en cada sitio.