



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

**CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES
DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA
EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL
LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO
TÉCNICA INSAR MULTI-TEMPORALES**

Alumna: Chávez Rincón, Nelly María Fernanda

Tutor: Prof. D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros.

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Tutor: Prof. D. Joaquim João Moreira de Sousa.

Universidad de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal.

Diciembre, 2023



Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

D. Antonio Miguel Ruiz Armenteros y D. Joaquim João Sousa, tutores del Trabajo Fin de Máster titulado: Control de las deformaciones recientes del terreno producidas por la extracción de petróleo en la cuenca del Lago de Maracaibo (Venezuela) utilizando técnica InSAR multitemporales que presenta Nelly Chávez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Diciembre de 2023

La alumna:

Nelly Chávez

Los tutores:

Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Joaquim João Sousa

Agradecimientos

A mis padres y mi hermana, quienes han sido la brújula de mis esfuerzos y la fuente inagotable de crecimiento tanto personal como profesional. Su apoyo incondicional y amor constante desde la distancia han sido mi mayor motor y fuente de inspiración.

A mis respetados tutores, en especial a mi mentor, Antonio Ruiz. Por la oportunidad, su infinita paciencia y dedicación incansable me han brindado la oportunidad de aprender del mundo de la interferometría satelital. Sus enseñanzas son un tesoro invaluable que siempre llevaré conmigo.

A mi compañero de vida, Roberto, tu presencia y amor han sido mi refugio en los momentos más desafiantes de este trayecto. Tu apoyo constante ha sido fundamental en mi camino hacia el éxito.

A mi querido compañero peludo, Charlie, quien compartió conmigo mis días en Jaén. Aunque ya no esté físicamente a mi lado, su recuerdo y compañía perduran en mi corazón como un eterno recordatorio de lealtad y afecto.

Alcanzar el final de este arduo y emocionante viaje académico es un logro que no habría sido posible sin cada uno de ustedes. Sus contribuciones y apoyo han sido fundamentales en mi éxito y desarrollo como profesional.

Resumen

Las subsidencias presentes en la Cuenca del Lago de Maracaibo, Venezuela, provocado por la explotación petrolera en la zona desde el siglo XX, ha sido monitoreado en años anteriores mediante técnicas de nivelación geodésica y GPS (Global Positioning Systems). Sin embargo, debido al costo asociado a estos métodos, este trabajo se presentan los resultados obtenidos a través de la aplicación de técnicas de teledetección remota utilizando los sensores de la constelación de satélites Sentinel-1, específicamente la técnica basada en interferometría radar PSI (Persistent Scatterers Interferometry). Siendo este el primer estudio en toda la zona aplicando series temporales.

Este enfoque de procesamiento interferométrico se ha apoyado en el software SARPROZ y abarca un período temporal desde 2015 hasta 2022. Los análisis realizados determinan desplazamientos verticales de más de -40 mm/año que en el período de estudio son subsidencias acumuladas del orden de 30 cm en la Costa Oriental, donde se encuentran los campos petroleros de Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero. Esto ha permitido actualizar la información existente en el área y, además, en este presente trabajo de fin de Máster se logró identificar subsidencias por primera vez en la Costa Occidental, con elevaciones de hasta 20 mm/año y a su vez un primer análisis con InSAR del Puente Sobre el Lago de Maracaibo, donde los resultados arrojan estabilidad en la infraestructura.

Finalmente, se ha demostrado la confiabilidad de las técnicas multitemporales (PSI) para la cuantificación de deformaciones. Uno de los mayores aportes de esta técnica radica en la generación de resultados altamente precisos tanto en tierra firme como en los campos petrolíferos ubicados en el Lago de Maracaibo. La alta cantidad, densidad de los pozos y plataformas fijas instaladas en el lago, han servido como reflectores ideales para las señales de radar. La evaluación de las potencialidades y los excelentes resultados obtenidos abre la posibilidad de ampliar su uso a otras áreas de investigación.

Abstract

The subsidence occurring in the Maracaibo Lake Basin, Venezuela, caused by petroleum extraction in the area since the 20th century, has been monitored in previous years using geodetic leveling and GPS (Global Positioning Systems) techniques. However, due to the associated cost of these methods, this work presents the results obtained through the application of remote sensing techniques using the sensors of the Sentinel-1 satellite constellation, specifically the technique based on radar interferometry PSI (Persistent Scatterers Interferometry). This is the first study in the entire area applying time series.

This interferometric processing approach has been supported by SARPROZ software and spans a temporal period from 2015 to 2022. The analyses performed determined displacements of more than -40 mm/year, which, in the study period, resulted in accumulated subsidence on the order of 30 cm in the Eastern Coast, where the Tía Juana, Lagunillas, and Bachaquero oil fields are located. This has allowed for the updating of existing information in the area, and in this present Master's thesis work, subsidence was identified for the first time on the Western Coast, with uplifts of up to 20 cm. Additionally, a preliminary analysis using InSAR was conducted on the Maracaibo Lake Bridge, which yielded results indicating stability in the infrastructure.

Finally, the reliability of multitemporal techniques (PSI) for deformation quantification has been demonstrated. One of the major contributions of this technique lies in generating highly accurate results both on solid ground and in the petroleum fields located in Lake Maracaibo. The high quantity and density of wells and fixed platforms in the lake have served as ideal reflectors for radar signals. The evaluation of its potential and the excellent results obtained open up the possibility of expanding its use to other research areas.

Índice General

1. Introducción	
1.1 Antecedentes del Estudio.....	16
1.2 Hipótesis del Estudio	18
2. Objetivo General	18
3. Área de Estudio	18
3.1 Cuenca del Lago de Maracaibo	18
3.2 Actividad Petrolera en la Cuenca del Lago de Maracaibo	19
3.3 Principales Campos Petroleros en la Cuenca del Lago de Maracaibo	20
3.4 Justificación del área de estudio	21
3.4.1 Costa Oriental del Lago de Maracaibo.....	21
3.5 Estado Actual del Campo de Investigación.....	24
3.6 Contexto Geológico	25
4. Materiales y Métodos	27
4.1 Materiales	28
4.1.1 Imágenes Sentinel-1A/B de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	28
4.1.2 Software de procesado y visualización de los datos	29
4.2 Fundamento Teórico.....	29
4.2.1 Radar de Apertura Sintética (SAR).....	29
4.2.2 Misión Sentinel-1	31
4.2.2.1 Modos de Operación del Sentinel-1.....	33
4.2.3 Polarización.....	36
4.2.4 Retrodispersión.....	37
4.2.5 Geometría de Adquisición SAR.....	38
4.2.5.1 Direcciones de vuelo.....	39

4.2.5.2	Ángulos de observación.....	39
4.2.5.3	Direcciones de operación.....	40
4.2.6	La imagen SAR.....	42
4.2.6.1	Componente fase.....	42
4.2.6.2	Componente Amplitud.....	43
4.2.7	Distorsiones Geométricas.....	44
4.2.7.1	El efecto Foreshortening.....	44
4.2.7.2	Layover o inversión por relieve	45
4.2.7.3	El efecto Shadow o sombra.....	46
4.2.8	Técnicas de análisis de Imágenes de Radar	47
4.2.8.1	Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR).....	47
4.2.8.2	Interferogramas	47
4.2.8.3	Coherencia Interferométrica	48
4.2.8.4	Fuentes de error o ruido en la fase Interferométrica.....	49
4.2.9	La interferometría SAR diferencial (DInSAR).....	50
4.2.10	Series Temporales Interferométricas.....	51
4.2.11	Persistent Scatterer Interferometry (PSI)	52
4.2.12	Software de Procesamiento de Imágenes SAR	53
4.2.13	SARPROZ.....	53
4.3	Metodología desarrollada en la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	54
4.3.1	Procesamiento de las imágenes SAR en SARPROZ	54
4.3.2	Pre-procesamiento para detección de cambios.....	57
4.3.3	Estimación de la Fase Atmosférica (APS).....	61
4.3.4	Análisis Multi-temporal	65

5.	Resultados Obtenidos.....	69
5.1	Resultados de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Imágenes Ascendentes y Descendentes.....	69
5.2	Resultados de la Costa Occidental del Lago de Maracaibo, Imágenes Ascendentes y Descendentes.....	78
6.	Discusión.....	89
7.	Conclusiones	97
8.	Referencias.....	98

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de las distintas técnicas geodésicas en el seguimiento de la subsidencia.....	16
Tabla 2. Resumen de las etapas DinSAR.	17
Tabla 3. Misiones de Sentinel y sus aplicaciones..	33

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Lago de Maracaibo.	19
Figura 2. Ubicación de los Campos Petroleros en la Cuenca del Lago de Maracaibo.	21
Figura 3. Vista aérea Lagunillas, Muro de Contención - Ciudad Ojeda.	22
Figura 4. Evidencia publicada acerca de la subsidencia.	23
Figura 5. Comunicado por la empresa Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA).....	24
Figura 6. Limitación Cuenca del Lago de Maracaibo.....	25
Figura 7. Columna estratigráfica del área de estudio.....	26
Figura 8. Interfaz ASF para descargar las imágenes.....	28
Figura 9. Distribución y tipos de crudos presentes en la cuenca del Lago de Maracaibo ... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 10. Longitudes de ondas del espectro electromagnético.	30
Figura 11. Representación esquemática de la penetración superficial para las bandas X, C, L. ...	31
Figura 12. Geometría de orbitas satelitales.....	32
Figura 13. Modo de operación de Sentinel-1.....	35
Figura 14. Descripción campo electromagnético.....	37
Figura 15. a) Proceso de emisión del pulso electromagnético por parte del sensor, mientras que b) derecha se observa el proceso de retrodispersión.....	38
Figura 16. Dirección de Vuelo.....	39
Figura 17. Angulo de Observación.....	40
Figura 18. Direcciones de Operación de un SAR.	41
Figura 19. Distribución de píxeles que definen la imagen SAR.....	41
Figura 20. Función de la fase SAR emitida.	43
Figura 21. Representación de una imagen SAR.....	44
Figura 22. Ejemplo de efecto Foreshortening.....	45

Figura 23. Ejemplo de inversión por relieve.	46
Figura 24. Ejemplo de efecto Shadow o Sombra.....	47
Figura 25. Ejemplo de detección de deformación en la superficie desde ambas geometrías de trayectoria a) Orientación de la imagen. b) Componentes de movimientos en LOS.....	48
Figura 26. Esquema de adquisición de datos en caso de subsidencia. Principio básico DInSAR..	51
Figura 27. Figura 26. Muestra de la distribución de PS y DS.....	53
Figura 28. Diagrama del procesamiento de las imágenes por SARPROZ.....	55
Figura 29. Interfaz SARPROZ.....	56
Figura 30. SARPROZ Panel del SLC Data Processing.	57
Figura 31. Interfaz mapa de reflectividad e índice de estabilidad de amplitud.....	58
Figura 32. Mapa de reflectividad en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela.	58
Figura 33. Ejemplo de visualización del DEM.	59
Figura 34. Distribución de las líneas base, dirección ascendente y descendente.....	60
Figura 35. Panel de procesamiento APS.....	61
Figura 36. Ejemplo de la distribución de PSC y conexión de Delaunay entre ellos.....	62
Figura 37. Distribución de la velocidad y desplazamiento acumulado como parte de los parámetros estimados en el procesado APS.....	63
Figura 38. Ejemplo de la distribución de la altura de los puntos y su residuo respecto al DEM externo.....	64
Figura 39. Ejemplos de otras distribuciones de los parámetros obtenidas en el procesado APS .	65
Figura 40. Ejemplo de distribución de la coherencia tras la estimación de la atmósfera APS	66
Figura 41. Panel del procesado Multi-temporal (Multi-Image Sparse Points Processing).	66
Figura 42. Ejemplo de distribución de la velocidad y el desplazamiento acumulado como parte de los parámetros estimados	67

Figura 43. Ejemplos de la distribución de la altura y residuos de la altura como parámetros estimados en el procesado multi-temporal	68
Figura 44. Ejemplo de la distribución de la coherencia tras el procesado multi-temporal	68
Figura 45. Mapas de reflectividad ascendente y descendente de la zona Oriental del Lago de Maracaibo.....	70
Figura 46. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	71
Figura 47. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	71
Figura 48. Deformación acumulada en la vertical E-W de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo.	73
Figura 49. Velocidad media en la dirección E-W de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo realizado con el software SARPROZ.....	73
Figura 50. Deformación acumulada en la vertical de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo realizado con el software SARPROZ.....	74
Figura 51. Velocidad Vertical del Campo Petrolero Lagunillas, en la Costa Oriental del Lago. .	75
Figura 52. Deformación Vertical acumulada en el Campo Petrolero Tía Juana de la Costa Oriental del Lago.....	76
Figura 53. Campo de extracción Tía Juana en dirección ascendente (Velocidad media LOS). ...	77
Figura 54. Campo de almacenamiento de Crudo en dirección descendente (Velocidad media LOS).	77
Figura 55. Planta de tratamiento en el Campo Petrolero Tía Juana en dirección descendente. (Velocidad media LOS)	78
Figura 56. Mapa de reflectividad de la Costa Occidental en la Cuenca del Lago de Maracaibo en dirección descendente	79
Figura 57. Mapa de reflectividad de la Costa Occidental en la Cuenca del Lago de Maracaibo en dirección ascendente.	79

Figura 58. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	80
Figura 59. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	80
Figura 60. Zonas con subsidencias en la Costa Occidental, ciudad de Maracaibo, Zulia (Velocidad media LOS).....	81
Figura 61. Zonas con elevaciones en la Costa Occidental, ciudad de Maracaibo, Zulia (Velocidad media LOS).....	82
Figura 62. Localización de las subsidencias en la costa Occidental de la ciudad de Maracaibo, en dirección descendente y ascendente.....	83
Figura 63. Elevaciones del terreno en dirección ascendente, en la ciudad de Maracaibo, Zulia..	84
Figura 64. Localización de elevaciones del terreno en el centro educativo Graciela Rincón de la Ciudad de Maracaibo, Zulia.....	84
Figura 65. Mapa de reflectividad Puente General Rafael Urdaneta, sobre el Lago de Maracaibo en dirección ascendente.....	86
Figura 66. Mapa de reflectividad Puente General Rafael Urdaneta, Maracaibo en dirección descendente.....	86
Figura 67. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en el Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.....	87
Figura 68. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en el Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.....	87
Figura 69. Resultados de la velocidad media en la dirección de visión LOS, del Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.....	88
Figura 70. Resultados de la medición de la deformación vertical en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo.....	90
Figura 71. Resultados de la deformación horizontal alrededor de los campos petroleros de extracción Lagunillas y Bachaquero.....	91

Figura 72. Comparación entre el resultado del levantamiento de nivelación año 1986 (izq.) y la medición de la deformación vertical (der.)	92
Figura 73. Ejemplo de la Costa Oriental del mapa de velocidades y los interferogramas.....	93
Figura 74. Ejemplos de daños en viviendas causados por las subsidencias en el campo Petrolero de Lagunillas de la Costa Oriental de Maracaibo.	95
Figura 75. Ejemplos de daños en viviendas causados por las subsidencias: A) Vivienda en Campo Lagunillas, (B, C) Grietas en paredes.	96

1. Introducción

En los últimos años la Interferometría Radar de Apertura Sintética (Interferometry Synthetic Aperture Radar, InSAR), se ha convertido en una técnica consolidada en el campo de la detección y monitorización de los desplazamientos de la superficie terrestre, debido a su alta resolución espacial y a su habilidad de adquirir datos de forma remota, a un coste reducido (Hooper, 2008).

Por tanto, este es el primer estudio en la cuenca del lago de Maracaibo aplicando técnicas multitemporales de interferometría radar de satélite (MT-InSAR), metodología de procesamiento de series temporales, que comenzó a utilizarse a principios de este siglo (Ferretti et al. 2001), la cual tiene por objetivo la identificación de píxeles (Persistent Scatterers o PS) en las imágenes SAR caracterizadas por pequeño ruido de fase, alta intensidad de la señal reflejada y respuesta constante con el paso del tiempo. Con estas técnicas se obtendrá el mapa de velocidad media de deformación, así como un análisis de series temporales con la evolución espacio-temporal en las dos zonas de estudio.

El presente Trabajo Fin de Master, tiene como propósito monitorear la evolución del estado actual de las deformaciones presentes en la Cuenca del Lago de Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. Una de las zonas de mayor riqueza petrolífera del mundo con más de 15.000 pozos perforados en su cuenca desde 1914, originando esto, incontables beneficios económicos para la nación. Sin embargo, en un periodo más tarde se empezó a evidenciar hundimiento paulatino del terreno, particularmente en la Costa Oriental de la Cuenca, donde se localizan los campos petroleros Tía Juana, Lagunillas, y Bachaquero, por lo que se consideró pertinente evaluar las subsidencias que se presentan, ya que está históricamente documentada y fue observada en años anteriores por diversas técnicas geodésicas (Henneberg et al., 1980 y Chrzanowski et al., 1991), lo que permitió afirmar la presencia del fenómeno de deformación en esta primera área de estudio, provocado por intensas y prolongadas actividades petroleras.

Los registros disponibles también han mostrado algunas fallas estructurales en las viviendas, debido a que la extracción petrolera sigue activa en la región. Este fenómeno aún se presenta en la mayoría de los campos petroleros de la cuenca, y existe una gran preocupación por el drenaje de las reservas, ya que la cantidad de producción de petróleo en Venezuela ha ido disminuyendo, colocando en riesgo la estabilidad de las estructuras que se encuentran en las zonas perjudicadas, sin olvidar la afectación de toda la población en las cercanías del área.

Finalmente, se ha analizado una segunda área de estudio situada en la Costa Occidental de la Cuenca, ampliando así el alcance de este estudio. A lo largo de esta investigación, se han obtenido resultados reveladores que señalan procesos de subsidencia en áreas específicas, junto con elevaciones del terreno que superan los 20 mm/año en la región central de la Ciudad de Maracaibo. Adicionalmente, se ha llevado a cabo un análisis del puente General Rafael Urdaneta, conocido localmente como el puente sobre el Lago de Maracaibo, desempeñando un papel crucial al conectar la ciudad con el resto del país. En este sentido, los hallazgos obtenidos hasta la fecha respaldan la estabilidad de dicha estructura.

1.1 Antecedentes del Estudio

En trabajos previos, se han abordado únicamente estudios en la zona de la Costa Oriental, donde se ha resumido la evolución geodésica en cuatro etapas según los resultados documentados. Estas etapas incluyen la utilización de la técnica de nivelación, seguida por la incorporación del GPS (Global Positioning Systems), posteriormente GNSS (Global Navigation Satellite Systems), y finalmente, la aplicación de técnicas DInSAR (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de las distintas técnicas geodésicas en el seguimiento de la subsidencia. Fuente: SIGGMA.

Técnica	Periodos de Observación	Estaciones	Densidad (Pto/km ²)	Espaciamiento (km)	Precisión	Geometría
Nivelación	1929	2,282	~ 2	~ 0.75	~ 1 mm	Punto
Gravimetría	1978-2007	94	~ 0.07	~ 3.75	NM	Punto
GNSS	1992-2007	94	~ 0.07	~ 3.75	~ 1mm	Punto
DInSAR	2007-2014	N/A	~ 10.000 (urbano) ~500 (rural)	~ 0.01 (urbano) ~0.045 (rural)	~ 3 mm(urbano) ~7mm(rural)	Ráster

Considerando que las mediciones geodésicas y topográficas implican un mayor costo económico, de instrumentación y humano, resultó necesario utilizar otros métodos que significaran un coste menor para la monitorización de la zona mencionada. En este sentido, se optó por emplear la técnica de Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética (DInSAR). Los análisis realizados mediante esta técnica determinaron movimientos verticales de $\pm 2,8$ cm en un periodo de 3 años en las zonas de Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero. De esta manera, se logró actualizar la información del área, complementando los datos obtenidos a través de técnicas geodésicas utilizadas previamente para el monitoreo de la subsidencia.

Estos trabajos fueron llevados a cabo principalmente por la empresa Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) a través de la realización de 3 proyectos que abarcaron el periodo 2007-2013, donde se obtuvieron las velocidades de deformación, generando una metodología de trabajo para proponer la utilización de DInSAR como parte del seguimiento (Suárez et al., 2013, 2014, 2015). La Escuela de Ingeniería Geodésica de la Universidad del Zulia (LUZ, Venezuela) realizó otro proyecto monitoreando este fenómeno, en el periodo 2014-2017, obteniendo la subsidencia acumulada en este lapso para la zona de la Costa Oriental (Arenas et al., 2019).

En total se han realizado 4 proyectos utilizando esta técnica InSAR. Los detalles de cada campaña se presentan en la (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de las etapas DinSAR. Fuente: SIGGMA.

	DInSAR 2012	DInSAR 2014	DInSAR 2015	DInSAR 2019
Plataforma	<i>ALOS-PALSAR</i>	<i>TerraSAR-X</i>	<i>TerraSAR-X</i>	<i>Sentinel- 1</i>
Banda	L	X	X	C
Wavelengths	30-15 cm	3.75-2.50 cm	3.75-2.50 cm	7.5-3.75 cm
Imágenes	11	25	55	36
Modo Adq.	Fine Beam Single	StripMap	StripMap	TopSAR
Resolucion Espacial (m)	60	10	10	30
Fecha Inicio	08-09-2007	29-07-2011	29-07-2011	16-12-2014
Fecha Final	01-02-2011	20-02-2013	07-10-2014	18-12-2017
N° de Interferogramas	55	261	583	36
DEM	SRTM 90 m	WorldDEM 10 m	WorldDEM 10 m	SRTM 30 m
Área (km2)	4.258	2.300	2.500	2.150
Densidad (pt/km2)	~ 100 (urbano) ~25 (rural)	~ 4000 (urbano) ~50 (rural)	~ 4000 (urbano) ~50 (rural)	~ 50 (urbano) ~25 (rural)
Espaciamiento (km)	~ 0.011 (urbano) ~0.038 (rural)	~ 0.011 (urbano) ~0.038 (rural)	~ 0.011 (urbano) ~0.038 (rural)	~ 0.142 (urbano) ~0.2 (rural)
Exactitud	~ 25 mm (urbano) ~50 mm (rural)	~ 3 mm (urbano) ~7 mm (rural)	~ 3 mm (urbano) ~7 mm (rural)	~ 1 cm (urbano) ~2 cm (rural)
Autores	<i>Suárez et al, 2013</i>	<i>Suárez et al, 2014</i>	<i>Suárez et al, 2015</i>	<i>Arenas et al, 2019</i>

Por tanto, dichos resultados nos servirán como apoyo para describir entonces, el alcance para la estimación del control en las deformaciones, mediante el uso de series temporales siendo así

posible identificar el comportamiento actual de la subsidencia, los daños estructurales y su tasa de cambio del nivel del suelo, referente al periodo de nuestros datos (2015-2022).

Se ha aplicado en este estudio la técnica de interferometría radar InSAR multitemporal MT-InSAR, con 147 imágenes del satélite Sentinel-1/A, en modo de adquisición IW, en dirección ascendentes y descendente, con banda C adquiridas mediante el portal de libre acceso Alaska Satellite Facility (ASF).

Todo el procesado de imágenes para la obtención del modelo de deformación se realizó con el Software SARPROZ, de licencia de uso proporcionada, identificando desplazamientos de más de 5 cm/año, en la Costa Oriental, en los campos de Tía Juana, Bachaquero y Cabimas. Por otra parte, en la Costa Occidental el caso de los resultados representa elevaciones de unos 2 cm/año en el centro de la Ciudad de Maracaibo y hundimiento en otras áreas.

Finalmente, el trabajo será concluido actualizando la información de los resultados con la implementación de la técnica (MT-InSAR) en el monitoreo de la Cuenca del Lago de Maracaibo, en conformidad de que ésta pueda ser integrada en un futuro a corto plazo a flujos de trabajo preventivo como un aporte de la teledetección a la seguridad y desarrollo del país.

1.2 Hipótesis del Estudio

La técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) posibilita la detección, la caracterización y el monitoreo de deformaciones de terreno, lo que contribuiría a entender la naturaleza de dichos fenómenos y mitigar sus efectos.

2. Objetivo General

El Objetivo General consiste en aplicar las técnicas multitemporales de interferometría radar de satélite con las imágenes radar disponibles de Sentinel-1 para el control de las deformaciones recientes del terreno en la Cuenca del Lago de Maracaibo, donde se encuentra los mayores campos de extracción de petróleo de Venezuela, el cual tiene evidencias documentadas de subsidencia.

3. Área de Estudio

3.1 Cuenca del Lago de Maracaibo

La Cuenca del Lago de Maracaibo, es la cuenca petrolífera más importante de Venezuela, localizada en el noroeste del país, se encuentra limitada al oeste por la zona de piedemonte de la

Serranía de Perijá, al norte por la Península de la Guajira y la Plataforma del Caribe, al sur por la Cordillera de los Andes y, por último, al este con los Estados Trujillo y Lara. Ocupa una superficie de 59 663,74 km² y representa el 6,51% del territorio venezolano. En el mapa se puede ver su forma y cómo está delimitada (Figura 1), correspondiendo en su mayor parte al Estado Zulia y, en mucha menor medida, a los estados Táchira, Mérida y Trujillo.

Geográficamente, dicha cuenca está incluida en su totalidad dentro de la cuenca hidrográfica del Lago de Maracaibo, que posee una superficie de 13870 km², un largo de 160 km, un ancho máximo de 110 km y una profundidad media de 30 m (González de Juana et al., 1980). Su ubicación geográfica es estratégica, ya que tiene conexiones con el mar Caribe y de allí con los Océanos Atlántico y Pacífico. Esto favorece a las exportaciones, especialmente la de petróleo.

3.2 Actividad Petrolera en la Cuenca del Lago de Maracaibo

En la actualidad posee 13.000 pozos activos y su capacidad de producción es de 1.885 millones de barriles diarios si bien se ha visto reducida en los últimos años. En el año 2000, el 46,6% de la producción nacional se produjo en esta cuenca. Una porción considerable de dicha cuenca ha sido explotada desde comienzos del siglo XX. Desde la perforación del pozo Zumaque-1 en 1914, pasando por el reventón sufrido en 1922 por el pozo Barroso-2, se ha tenido producción activa en buena parte del Lago de Maracaibo (Hawkins y Chigne, 1982).

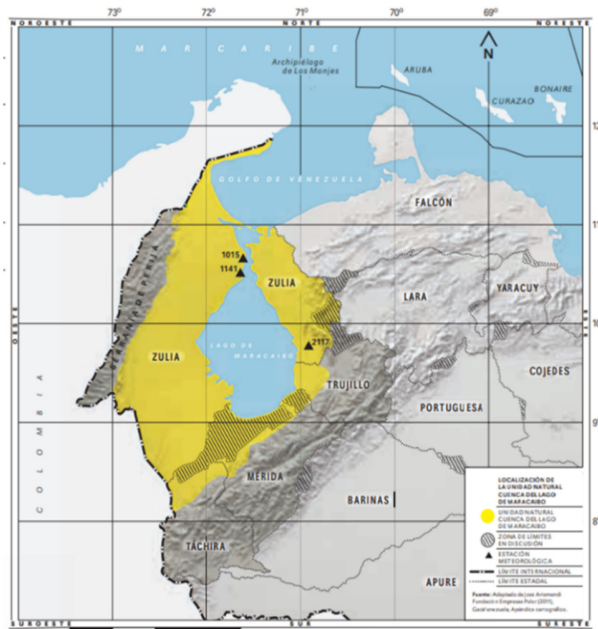


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Lago de Maracaibo.
Fuente: <https://fundacionempresasolar.org/>

3.3 Principales Campos Petroleros en la Cuenca del Lago de Maracaibo

En la Costa Oriental de la Cuenca se encuentran los campos de:

- **Tía Juana:** es uno de los campos petroleros más importantes de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Fue descubierto en 1922 y ha producido más de 1.000 millones de barriles de petróleo.
- **Lagunillas:** es el campo petrolero más grande de Venezuela y uno de los más importantes de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Fue descubierto en 1917 y ha producido más de 3.000 millones de barriles de petróleo.
- **Bachaquero:** es uno de los campos petroleros más grandes de Venezuela y uno de los más antiguos de la Cuenca del Lago de Maracaibo. Fue descubierto en 1929 y ha producido más de 2.000 millones de barriles de petróleo.

Por otro lado, los Campos Costa adentro que se ubican dentro del Lago de Maracaibo son:

- Lama, Lamar, Centro y Lago.

En la Costa Occidental de la Cuenca se encuentran los campos de:

- **La Paz:** descubierto en 1922, fue el primer campo petrolero de importancia en dicha región.
- Los Manueles y Boscán (1946)
- La Concepción (1948), y Siburaca (1949)

Más concretamente, la zona petrolera de la Costa Oriental donde se encuentran las subsidencias se informó que la cantidad anual de producción de petróleo durante tres años, desde 2017 hasta 2020 fue de 59.720 kb/año (2017), 53.331 kb/año (2018), 46,297kb/año (2019) en Tía Juana, 58.216kb/año (2018), 52.517 kb/año (2020), 42.775 kb/año (2019), en Lagunillas y 55.180kb/año (2020), 45.419 kb/año (2020), 37.534 kb/ año (2019) en Bachaquero. La capacidad de producción de petróleo había disminuido entre un 20 y un 30% durante tres años como máximo (Figura 2).

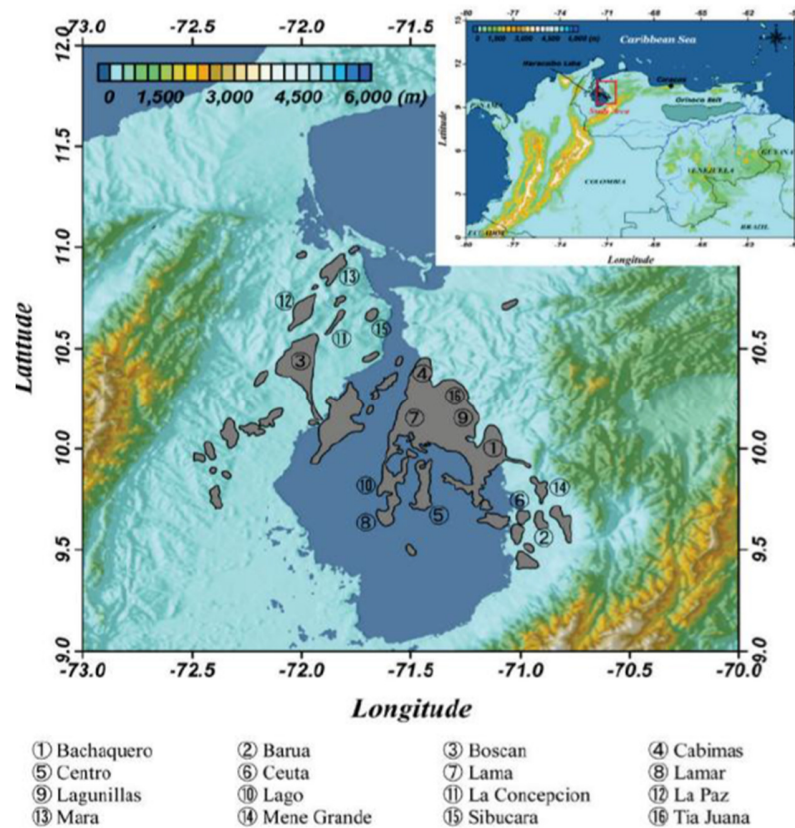


Figura 2. Ubicación de los Campos Petroleros en la Cuenca del Lago de Maracaibo. Fuente: Deguchi y Narita et., (2015).

3.4 Justificación del área de estudio

3.4.1 Costa Oriental del Lago de Maracaibo

La Costa Oriental del Lago de Maracaibo (C.O.L.M) ha sido una zona de extracción petrolera por más de 80 años en Venezuela. Actualmente se extrae el 35% de la producción de crudo del país (INE, 2009). Producto de la extracción intensa de petróleo, las arenas reservorio donde el hidrocarburo se encuentra se han compactado, dando origen al fenómeno de subsidencia (Cano y Víctor et., al 2011). Este fenómeno afecta a las zonas de Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero, donde viven alrededor de 232.636 personas según el censo de 2001 (INE, 2009).

La más importante manifestación en la superficie de la subsidencia es el cambio de relieve en el terreno, lo cual ha dado origen a numerosos eventos adversos. El más significativo ha sido el cambio gradual de la línea de costa (Febres, 1990), por lo cual se realizó la construcción de un sistema de diques con el objetivo de impedir que las aguas del Lago de Maracaibo inunden las zonas pobladas de Tía Juana, Ciudad Ojeda, Lagunillas y Bachaquero (Figura 3). La construcción del sistema de diques comenzó a finales de la década de 1920, integrado por un complejo de 47 km de diques costaneros; 59 km de diques interiores para controlar la inundación de las aguas de lluvia de las tierras más altas; 490 km de canales de drenajes; y 30 estaciones de bombeo que drenan las aguas al Lago.



Figura 3. Vista aérea Lagunillas, Muro de Contención - Ciudad Ojeda. Fuente: Google Imagen.

De acuerdo con Sully & Murria (1996), la diferencia entre la superficie del lago y el terreno es más de 4,5 metros. Sin embargo, vista la magnitud incontrolable del descenso de los suelos, también se inició un programa de reubicación de las comunidades más afectadas. En 1993, se decretó la reubicación de 8.362 familias damnificadas de Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero.

Sin embargo, informaciones de distintas fuentes señalaban que, todavía en 2010, solo se habían reubicado 2.120 familias de un total de 8.120 que habían sido registradas, (Figura 4).

AÑO XX - N° 6.977 Depósito Legal 9001ZU732 **del Zulia** Lunes a viernes

Afectados aseguran que presenta fallas en su estructura

Exigen a Pdvsa darle debido mantenimiento al muro de contención

Los sismos registrados en Haití y Chile, aunado a las constantes fallas que se registran en varios estados del país, han alarmado a las comunidades que viven en subsidencia, puesto que aseguran que Pdvsa no le da mantenimiento al muro de contención desde hace ocho años

Johnny Rojas, dirigente político de la localidad, aseguró que desde el 2002, cuando se dio el paro petrolero, la Gerencia de Diques y Drenaje de la industria abandonó las labores de mantenimiento del muro de contención. Destacó la falta de inversión y la inexistencia de un "plan B" por parte de Pdvsa para las labores de mantenimiento. Por otro lado, Pablo Álvarez, residente de la parroquia Venezuela, dijo que "no se ve movimiento de nada, allí no hacen trabajos, no he visto a ingenieros ni cuadrillas haciendo mantenimiento en el muro. Hace años que el personal de la industria no viene por aquí, eso está abandonado". Orlando Puenmayor, director de Protección Civil de Laganillas, indicó que se han descuidado los procesos de educación, prevención e información dirigidos a las comunidades afectadas por la subsidencia.



El dique costacero, como también es llamada esta estructura, lleva ocho años sin el debido mantenimiento. (Dijifoto/Maryori Delgado).

-5-

3-0 en Maracaibo Ciudad Ojeda - Cabimas, domingo 15 de agosto de 2010

El AMarranco el toraco golcando (15)

EL REGIONAL

www.elregionaldelzulia.com

AÑO XX - N° 7.130 Depósito Legal 9001ZU732 **del Zulia** Lunes a viernes B.O.

Denuncian que desde la desaparición de Ducoisa no se traslada a nadie en la parroquia Venezuela

Cuatro mil familias en zona de subsidencia esperan ser reubicadas

Desde hace más de 40 años sufren por esta problemática, característica de las zonas petroleras. Deben esperar autorización del Gobierno nacional para ser reubicados, mientras tanto no pueden mudarse ni remodelar las viviendas porque pierden el beneficio

Johnny Rojas, director de Gestión y Apoyo a la zona de subsidencia en la Alcaldía de Laganillas, denunció que desde que desapareció la empresa Ducoisa, la cual se encargaba de la construcción de las viviendas para el traslado de estas familias, el proceso prácticamente se paralizó. "Queremos que las cuatro mil familias que faltan en la parroquia Venezuela vivan en las mismas condiciones de los que ya han sido reubicados, con viviendas dignas, porque Fomdar discrimina a algunos vecinos de Abaguayá y Taticas con viviendas de mala calidad y a otros en casas sin terminar", expresó Rojas al decir que nadie da respuestas sobre los traslados. Mientras tanto, los vecinos aseguran que viven prácticamente abandonados por parte de los entes gubernamentales.

-6-

MINISTRO RAMÍREZ: TODO ESTÁ BAJO CONTROL



Durante una inspección realizada ayer al muelle Patra Grande en Laganillas, el ministro del Poder Popular para la Energía y Petróleo, Rafael Ramírez, destacó que las áreas nacionalizadas por el Gobierno nacional están en condiciones óptimas de operatividad. Anunció que pronto entrará en funcionamiento en esta entidad una nueva filial de Pdvsa, denominada Diques y Astilleros. (Dijifoto/Nervin Torres).

-7-

Figura 4. Evidencia publicada acerca de la subsidencia. Fuente: Diario El Regional.

3.5 Estado Actual del Campo de Investigación

En la actualidad, después de algunas denuncias sobre la necesidad de hacer mantenimiento al muro de contención, el cual protege ciertas zonas urbanas de la Costa Oriental del Lago, PDVSA emitió con un comunicado al respecto, (Figura 5).



COMUNICADO

La Dirección Ejecutiva de Producción Cuenca Occidente hace del conocimiento de toda la población residente en las zonas de subsidencia en la Costa Oriental del Lago que, a través de la Gerencia de Diques y Drenaje, se han venido desarrollando programas de limpieza y extracción de sedimentos en canales principales y secundarios de manera preventiva con el objetivo de minimizar el impacto ante la temporada de lluvias. Así mismo, se realiza la restitución de estaciones de drenaje e incremento de bombas operativas con monitoreo remoto, principalmente en el área de Tía Juana, donde la operatividad de los equipos es de un 90%.

Adicionalmente, se vienen desarrollando los programas de ingeniería para la ejecución de los trabajos de elevación del dique costanero en las secciones 5, 5A y 2 de Lagunillas y las secciones 2, 4 y 5 de Bachaquero, sector Pueblo Viejo.

Se disponen de más de 20.000 m³ de piedra caliza para la ejecución de enrocado y está en desarrollo el proceso de estudio para la cuantificación y certificación de piedra caliza de calidad para dar cumplimiento a los planes de mantenimiento que periódicamente se le realiza al dique costanero.

En materia de gestión de riesgos, la Gerencia de Seguridad Industrial e Higiene Ocupacional, a través del Plan COLM, realiza el abordaje comunitario para la validación de los planes de contingencia de forma coordinada de nuestros Bomberos de PDVSA con los organismos de seguridad y prevención, ejecutando monitoreo continuo de las áreas susceptibles a inundaciones para actuar de manera oportuna en caso de eventos no deseados.

Figura 5. Comunicado por la empresa Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA). Fuente: <https://www.pdvsa.com/>

3.6 Contexto Geológico

El esquema geológico de la región está definido por dos estructuras de fuerte expresión topográfica que nacen de la cordillera de los Andes en su cadena oriental, las que, al bifurcarse en el páramo de Tamá, forman la sierra de Perijá al oeste, la cordillera de Mérida, estribaciones de Falcón, Lara al sur y este, desarrollándose entre ambas la cuenca del Lago de Maracaibo.

La sierra de Perijá, con rumbo N-NE, define el límite occidental de la región quedando separada de la península de la Guajira por la falla de Oca. A su vez, la cordillera de Mérida y sierras de Falcón y Lara definen el límite sudoeste y este de la región (Figura 6). Estos accidentes están constituidos por complejas formaciones del precámbrico hasta el reciente, constituidas por rocas ígneas, ígneas-metamórficas y sedimentarias. Los levantamientos terciarios de la cordillera de los Andes y sierra de Perijá causaron la depresión estructural y topográfica de la cuenca del Lago de Maracaibo.



Figura 6. Limitación Cuenca del Lago de Maracaibo. Fuente: <https://portaldepetroleo.com/cuenca-del-lago-de-maracaibo/>

Si bien, las cuencas petrolíferas son zonas que han sido geológicamente favorables para la formación y acumulación de hidrocarburos. En ellas se encuentran grandes yacimientos de petróleo. Durante millones de años los restos de animales marinos junto con grandes masas de sedimentos se depositan en los fondos marinos y dan origen a las formaciones de petróleo. En la actualidad son zonas planas que una vez estuvieron cubiertas por mares. Los restos de los organismos que habitan los lagos o mares se combinan con el carbono y el hidrógeno, posteriormente se desliza o flota en el agua. Cuando éste queda atrapado en los poros de las rocas sedimentarias se acumula continuamente permitiendo la formación del petróleo, por lo que su localización se da en cuencas sedimentarias. Los suelos de la región se han desarrollado sobre una gran variedad de materiales litológicos y texturales bajo cambiantes condiciones climáticas y topográficas (Figura 7-8).

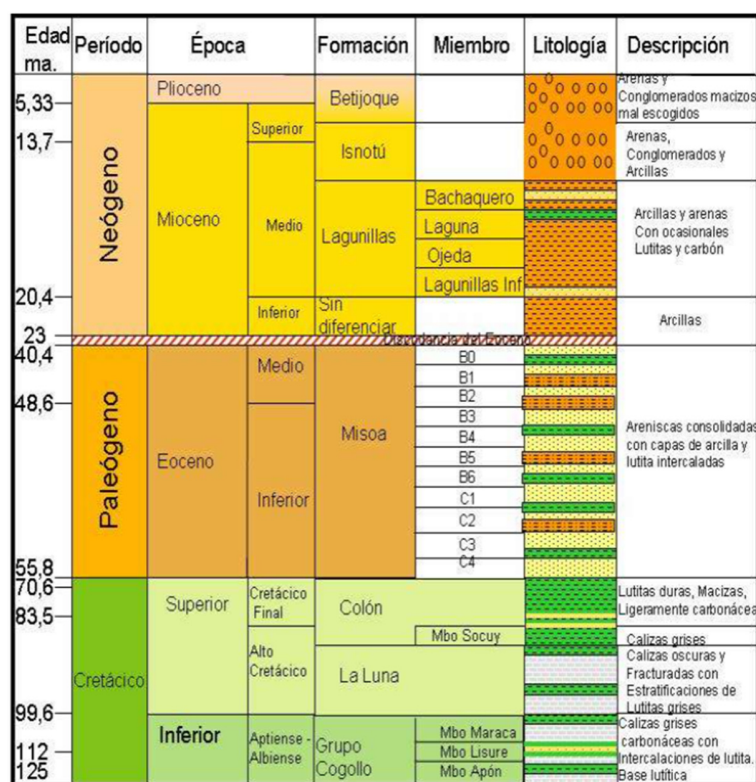


Figura 7. Columna estratigráfica del área de estudio. Fuente: <https://portaldelpetroleo.com/cuenca-del-lago-de-maracaibo/>

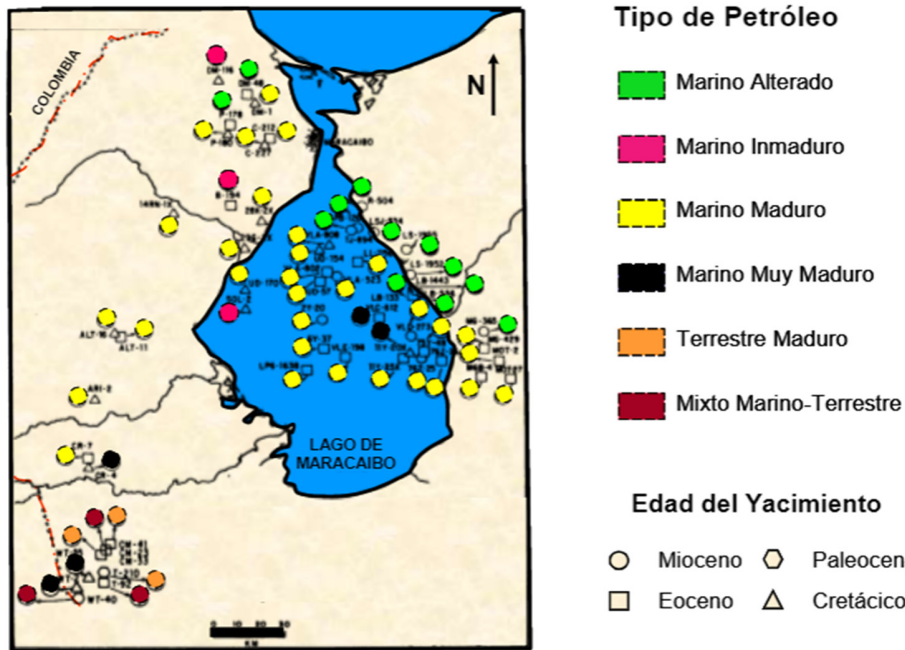


Figura 8. Distribuci6n y tipos de crudos presentes en la cuenca del Lago de Maracaibo. Fuente: (Gallango et al. 1985).

4. Materiales y M6todos

En este apartado se desarrollar6 todo el proceso de obtenci6n y procesamiento de datos necesarios para el presente Trabajo Fin de M6ster, su posterior procesamiento de las im6genes SAR utilizando el software SARPROZ, de esta manera, se describir6 la adquisici6n de las im6genes hasta su posterior exportaci6n, abordando cada uno de los elementos y herramientas que conforman el software y que son necesarios para llevar a cabo dicho procesamiento en la Cuenca del Lago de Maracaibo.

4.1 Materiales

4.1.1 Imágenes Sentinel-1A/B de la Cuenca del Lago de Maracaibo

Estas imágenes pertenecientes al satélite Sentinel-1A/B y se han obtenido de forma gratuita a través de la web de ASF (Alaska SAR Facility), de la Universidad de Alaska, (Figura 9). A través del siguiente enlace: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

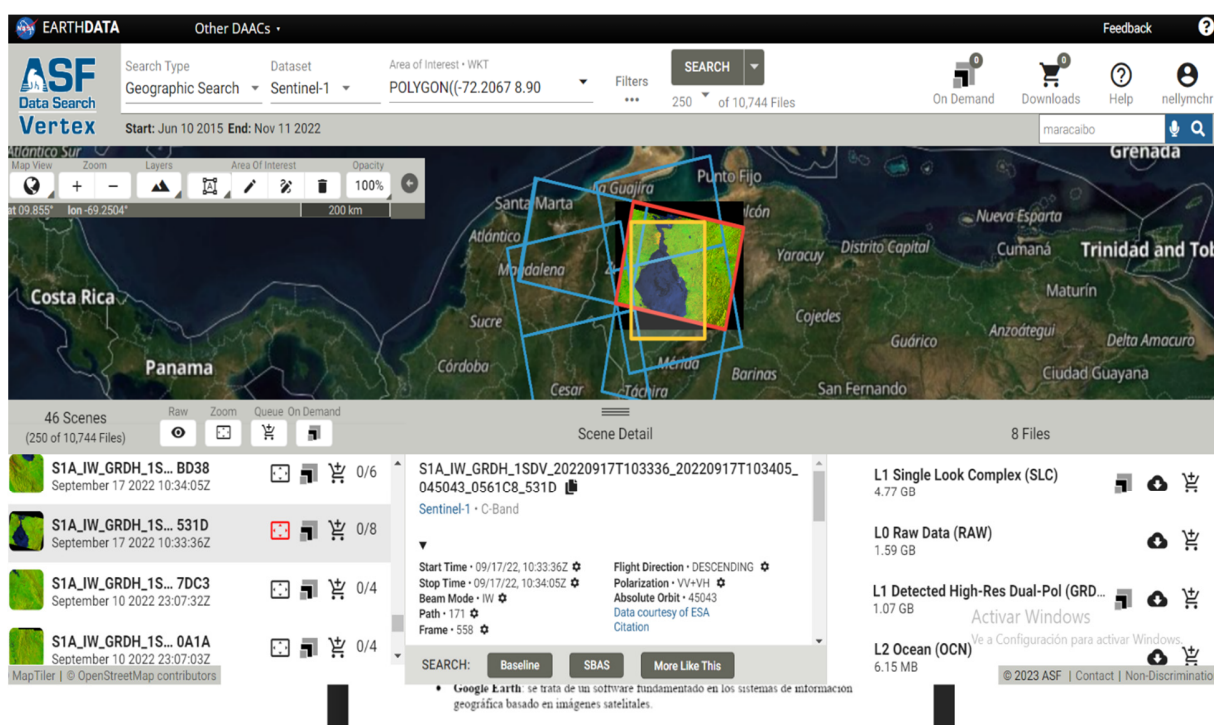


Figura 9. Interfaz ASF para descargar las imágenes.

Esta información se trabajó en formato Single Look Complex (SLC), en donde cada adquisición de las imágenes representa una captura perteneciente a las zonas de estudio de la cuenca del Lago de Maracaibo, los datos utilizados para el procesamiento de las zonas de estudio son:

- **Costa Oriental del Lago de Maracaibo, (Tía Juana, Bachaquero, Lagunillas)**

Se adquirieron 134 imágenes Sentinel 1-A/B, ascendente desde el 14 de febrero del 2015 hasta el 23 de diciembre del 2022 y 124 imágenes descendente, Sentinel-1A/B, su modo de barrido para la recogida de datos corresponde al “Interferometric Wide” o “IW” desde el 24 de diciembre del 2016 hasta el 24 de mayo del 2022.

- **Costa Occidental, (Maracaibo)**

Se adquirieron 134 imágenes Sentinel 1-A/B, ascendente desde el 14 de febrero del 2015 hasta el 23 de diciembre del 2022 y 124 imágenes descendente, Sentinel-1A/B, su modo de barrido para la recogida de datos corresponde al “Interferometric Wide” o “IW” desde el 24 de diciembre del 2016 hasta el 24 de mayo del 2022.

4.1.2 Software de procesado y visualización de los datos

SARPROZ: se utilizó la plataforma de procesamiento de imágenes SAR, desarrollado en MATLAB©, versátil en materia de procesamiento de datos SAR.

- **Google Earth Pro:** la visualización de los resultados se realizó mediante Google Earth Pro©.

4.2 Fundamento Teórico

A continuación, se describen algunos conceptos fundamentales para comprender el funcionamiento de un radar de apertura sintética, enfocados principalmente en los productos de Sentinel-1 que se trabajaron en este estudio.

4.2.1 Radar de Apertura Sintética (SAR)

En Teledetección, un radar es un sensor activo, capaz de emitir de forma artificial su propia radiación, el funcionamiento consiste en enviar un haz de luz a la superficie terrestre y al rebotar el sensor captura las señales reflejadas (Chuvieco, 1995). Este tipo de sensores tiene ciertas ventajas con respecto a los pasivos, ya que capturan información bajo cualquier condición meteorológica de nubosidad o precipitación y pueden capturar datos en el día o la noche. Todo esto es posible, porque el radar trabaja en longitudes de onda larga entre 1 mm y 100 cm del rango de las microondas del espectro electromagnético, (Figura 10).

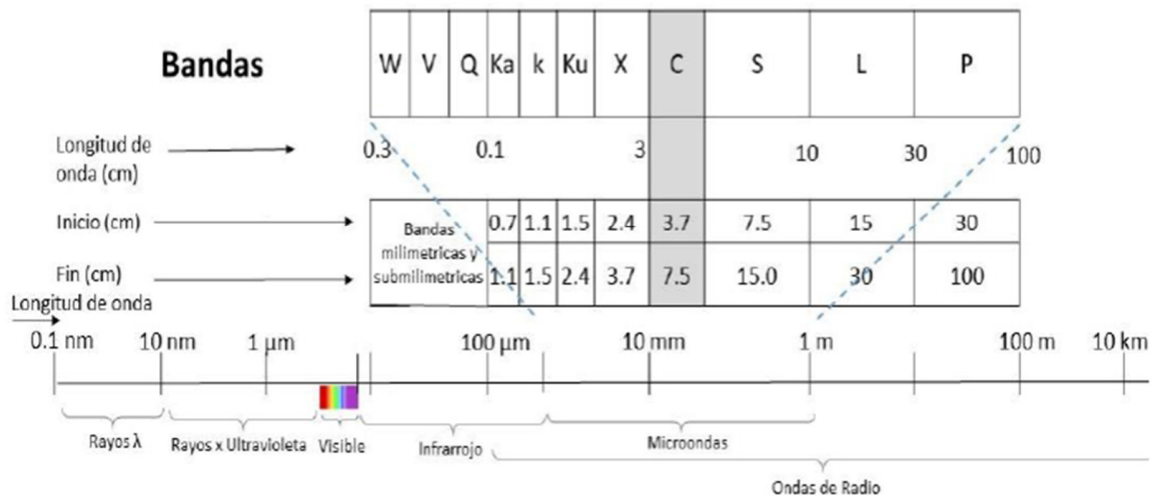


Figura 8. Longitudes de ondas del espectro electromagnético. Fuente: (Oliveras y Paz et al, 2009).

Las longitudes de onda del espectro electromagnético se clasifican en bandas las cuales se agrupan en frecuencias similares de acuerdo con la radiación reflejada por la superficie terrestre, tal como se observa en la Figura 10, (Oliveras y Paz et al, 2009). Las bandas de frecuencias de emisión de radar más utilizadas son P, L, S, C, X (Buemi, 2012).

En el presente estudio se trabajará la banda C, la cual equivale a una frecuencia de 3.90 GHz a 5.75 GHz y en el rango del espectro electromagnético se encuentra en longitudes de onda de 3.7 cm a 7.5 cm. La longitud de onda define la interacción de la señal con la superficie, proporcionando información acerca de si esta es lisa o rugosa. En función de su longitud de onda, se dice que un satélite Radar trabaja en una determinada banda. Es importante tener en cuenta dichas frecuencias de operación ya que estarán estrechamente relacionadas con la resolución espacial y la penetración del frente de ondas. A mayor longitud de onda, mayor será la penetración y, por tanto, menor la resolución espacial (Figura 11).

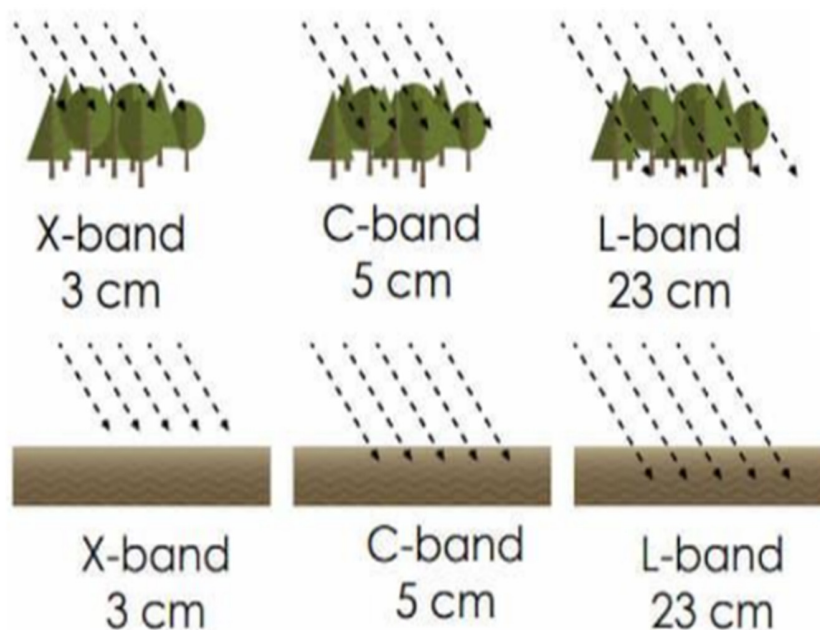


Figura 9. Representación esquemática de la penetración superficial para las bandas X, C, L. Fuente: (Villegas et al, 2019).

El radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar – SAR) logra reducir el efecto de desplazamiento con la implementación de una antena más larga, que produce un ancho de iluminación más angosto que mejora la resolución y la captura de la señal reflejada (Chuvienco, 1995).

4.2.2 Misión Sentinel-1

Sentinel-1 es una misión espacial de radar de imágenes continuas que abarcan todo sobre nuestro planeta, está compuesto por una constelación de dos satélites con órbita polar que transitan a una altura aproximada de 690 km. Los satélites Sentinel-1A y Sentinel-1B, cuyas fechas de lanzamiento fueron en abril de 2014 y abril 2016 respectivamente, pertenecen a la Agencia Espacial Europea 19 (ESA), y forman parte del Programa Copérnico (CE).

Los instrumentos SAR de la misión Sentinel 1 operan en la banda C y admiten tanto, polarización HH o VV y polarización dual (HH+HV o VV+VH). Estos satélites presentan distintos modos de adquisición: Strip Map Mode, Interferometric Wide Swath, Extra-Wide Mode y Wave- Mode.

Los satélites Sentinel 1, realizan un barrido completo del mundo una vez cada 12 días, pero como se cuenta con dos satélites en la constelación, es posible obtener un ciclo de repetición completo en 6 días. Esta constelación de satélites presenta orbitas de geometría casi polar, lo que hace referencia a que mientras uno de los satélites realiza su recorrido hacia el polo norte (geometría ascendente), el otro realiza lo propio hacia el polo sur (geometría descendente) como se ilustra en la Figura 12.

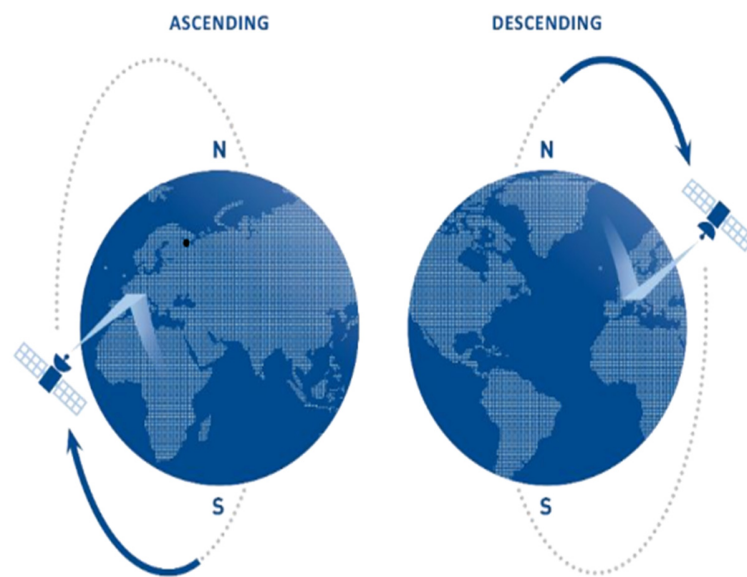


Figura 10. Geometría de orbitas satelitales. Fuente: <https://site.tre-altamira.com/insar/>

En base a lo anterior, en la dirección ascendente, el satélite viaja en dirección Sur a Norte para la adquisición de datos, por otro lado, en la dirección descendente el satélite viaja de Norte a Sur para la adquisición de datos (Ferretti et al., 2007).

De esta manera, existen seis misiones Sentinel, en la actualidad, que cumplen los objetivos del programa: control de suelos, monitoreo marino, control atmosférico, seguridad y emergencia y control del cambio climático. Junto con ellas, están las conocidas misiones contributivas que incluyen sensores SAR, sensores ópticos, altímetros, radiómetros o espectrómetros.

A continuación, se recogen las misiones Sentinel y su destino a determinadas aplicaciones.

Tabla 3. Misiones de Sentinel y sus aplicaciones. Fuente: (Gómez et al, 2021).

	Fechas de lanzamiento	Aplicaciones
SENTINEL-1	1A → 2014 1B → 2016	Imagen RADAR para estudio de la superficie terrestre y oceánica
SENTINEL-2	2A → 2015 2B → 2017	Imágenes multiespectrales de alta resolución para monitoreo de la superficie terrestre para teledetección óptica.
SENTINEL-3	3A → 2016 3B → 2018	Imágenes del visible al infrarrojo térmico para monitoreo de océanos, cambios ambientales y climáticos.
SENTINEL-4	2021	Control de la calidad del aire y composición atmosférica desde órbita geoestacionario.
SENTINEL-5	2021	Control de la composición atmosférica desde órbita polar.
SENTINEL-5P (precursor de Sentinel-5)	2017	Monitoreo de la atmósfera para calidad del aire, ozono, etc.
SENTINEL-6	2020	Medición de la altura global de la superficie del mar mediante altímetro Radar.

4.2.2.1 Modos de Operación del Sentinel-1

El trabajo de la ESA (Agencia Espacial Europea), ha contemplado cuatro modos de operación del satélite tipo SAR enviado a inicios del 2014 con el nombre Sentinel-1, lanzado al espacio a bordo del cohete espacial Soyuz bajo el alero del programa Copernicus.

Estos cuatro modos operativos a bordo del mismo satélite son un intento por satisfacer en primer lugar los requerimientos estipulados por el programa Copernicus, y en segundo lugar también para los requerimientos de los usuarios interesados en utilizar tecnología Radar de Sentinel-1 (ESA). Estos modos son:

Wave Mode (WM): Este método de escaneo se caracteriza por el pequeño tamaño de sus imágenes de 20 km² en intervalos de 100 km² a lo largo de la órbita. Estas imágenes poseen una resolución en Rango de 5 m. y de 20 m. en Azimut y son obtenidas a partir de ángulos de elevación medios de 23° y de 37° en forma alternada.

StripMap Mode (SM): En este modo el haz del radar cubre una longitud de 80 km en la dirección en Rango. En ésta misma dirección provee imágenes con una resolución de 5 m. cuadrados, utilizando ángulos de incidencia entre los 20° y 47°. Este método también permite seleccionar una de seis subfranjas que componen un largo de 375 km, cambiando el ángulo de incidencia y el ancho del haz de elevación.

Extra-Wide Mode (EW): Cubre una longitud de 410 km en la dirección de Rango con una baja resolución de 30 m. en Rango y 40 m. en Azimut. Al igual que el anterior, opera con ángulos de incidencia entre los 20° y 47°.

Interferometric Wide-Swath (IW): Este modo permite combinar una larga longitud de 250 km en dirección de Rango con una resolución moderada de 5 m. por 20 m. en Rango y Azimut respectivamente, y lo hace con ángulos incidentes de entre 31° y 46°. El IW se caracteriza por separarse en tres subfranjas (IW1, IW2, IW3) adquiridas mediante la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), la cual, además de dirigir el haz de microondas en dirección de Rango, también lo hace en la dirección de Azimut desde adelante hacia atrás en forma electrónica con cada ráfaga, entregando una mejor calidad de imagen. Las imágenes de este modo son entregadas con suficiente traslape en Azimut y en Rango.

Por último, se terminará con una relación de los distintos productos de Sentinel-1:

Single Look Complex (SLC): Los productos Nivel-1 SLC son datos SAR georreferenciados utilizando información de la órbita y de la altitud del satélite. Cada píxel de la imagen está representado por un valor de magnitud compleja (I y Q) y, por lo tanto, contiene información de amplitud y fase. Cada valor I y Q es de 16 bits por píxel.

El procesamiento de todos los productos SLC produce como resultado una única vista (single look) en cada dimensión utilizando el ancho de banda completo de la señal disponible. Los productos SLC se generan para todos los modos de adquisición:

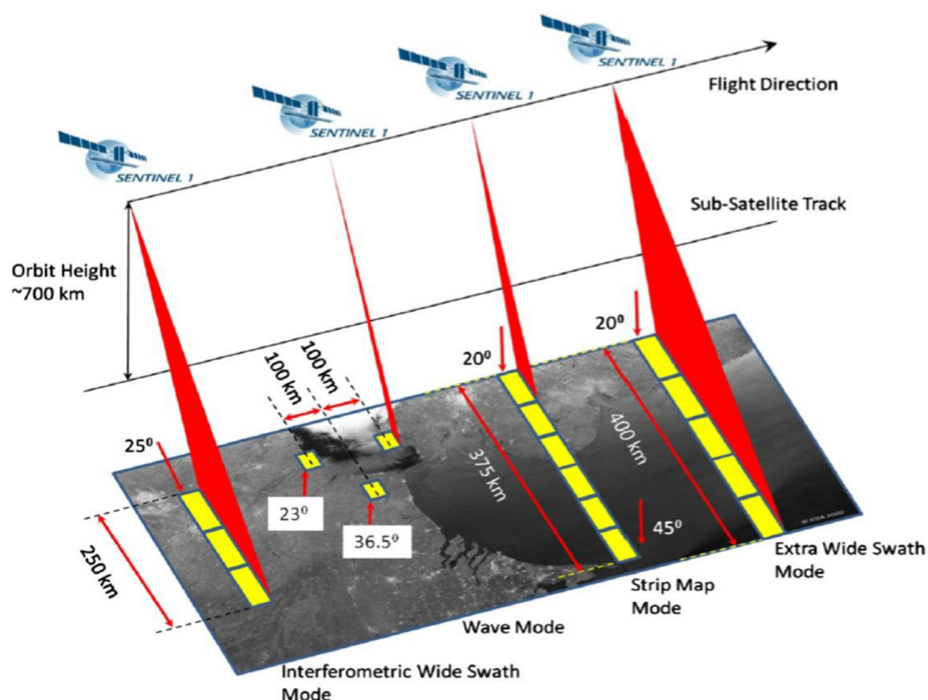


Figura 11. Modo de operación de Sentinel-1. Fuente: <https://sentinels.copernicus.eu>.

- Productos Nivel-1 SLC StripMap (Nivel-1 SLC SM).
- Productos Nivel-1 SLC Interferometric Wide swath (Nivel-1 SLC IW).
- Productos Nivel-1 SLC Extra Wide swath (Nivel-1 SLC EW).

Ground Range Detected (GRD): Los productos Nivel-1 GRD consisten en datos SAR proyectados utilizando un modelo elipsoidal WGS84. Los píxeles incluyen el valor de amplitud, perdiéndose la información de la fase. El producto original tiene píxeles aproximadamente cuadrados. Tras la aplicación del procesamiento multi-look para la reducción del efecto de moteado o efecto “sal y pimienta” (speckle) se obtendrán píxeles cuadrados con pérdida de resolución. Los productos de GRD están disponibles en tres resoluciones, que se caracterizan por el modo de adquisición: StripMap (SM), Interferometric Wide swath (IW) o Extra-Wide swath (EW), y por el nivel de procesamiento multi-looking aplicado:

- Resolución completa (FR).
- Alta Resolución (HR).
- Resolución media (MR).

Ocean (OCN): Los productos de Nivel-2 (derivados de productos del Nivel-1) OCN - Ocean consisten en datos georreferenciados sobre los siguientes parámetros geofísicos recabados del océano:

- Ocean Wind field (OWI), datos sobre la velocidad y dirección del viento derivados de productos GRD.
- Ocean Swell spectra (OSW), datos sobre oleaje derivados de productos SLC exclusivos de los modos SM y WV.
- Surface Radial Velocity (RVL) datos sobre la velocidad de la superficie del mar derivados de productos SLC.

4.2.3 Polarización

Las ondas emitidas por la antena pueden tener distinta polarización, siendo éstas: Emisión Vertical y Recepción Vertical (VV), Emisión Horizontal y Recepción Horizontal (HH) y combinaciones HV; VH. Lo más relevante en esta materia, es que dependiendo de las características del blanco que se quiera analizar, se deberá seleccionar la onda incidente, ya que los resultados pueden variar dependiente si la polarización seleccionada es de carácter VV o HH. Una porción de este pulso retorna hacia la antena, lo cual se denomina retrodispersión este pulso es captado en función de su amplitud, fase, tiempo de retorno y polarización. Estos parámetros son procesados en conjunto, para formar una imagen de la superficie capturada (Figura 14).

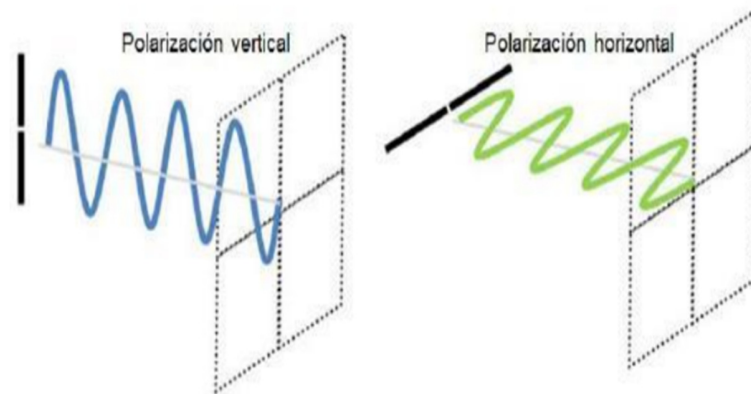


Figura 12. Descripción campo electromagnético. Fuente: (Torres et al, 2013).

4.2.4 Retrodispersión

Según lo indicado por Nievinski (2004), la “retrodispersión” (Back-scattering en inglés) es un proceso de reflexión y toma de datos en el cual, la radiación emitida por el radar en dirección a la superficie o blanco específico es reflejado en todas las direcciones y solo una pequeña parte retorna al sensor, capturando la información de amplitud y fase.

Cuando se capturan imágenes de radar suelen presentarse errores en la dispersión y la reflectancia por un efecto conocido como doppler, esto se forma debido al movimiento entre el sensor y el objeto capturado, generando un desplazamiento cuando el radar envía el pulso y lo recibe nuevamente como onda reflejada, este corrimiento es el causante de generarse ruido e interferencia en las imágenes (Figura 15).

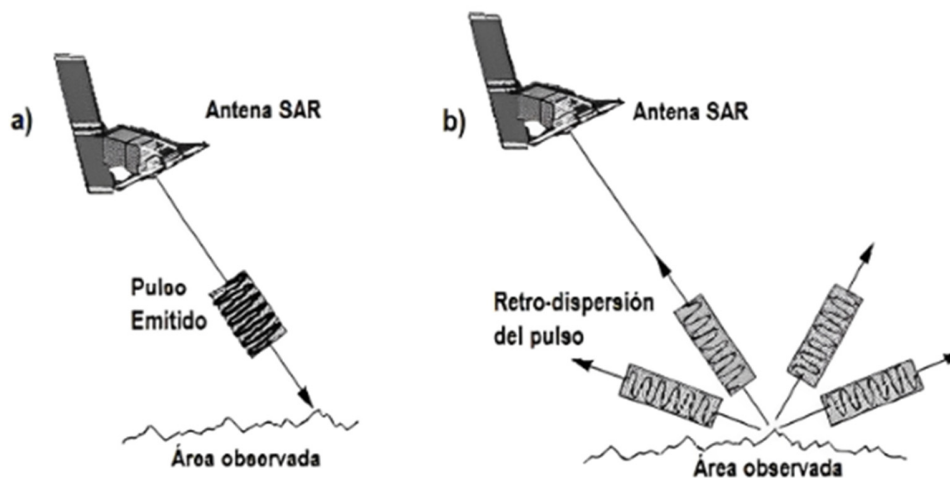


Figura 13. a) Proceso de emisión del pulso electromagnético por parte del sensor, mientras que b) derecha se observa el proceso de retrodispersión. Fuente: (Torres et al, 2013).

4.2.5 Geometría de Adquisición SAR

Debido a que las imágenes de radar son tomadas con mirada lateral (y no nadiral como la mayoría de los sensores ópticos), las mismas presentan dos dimensiones o medidas diferenciadas conocidas como Azimut y Rango. El término Azimut se emplea para indicar la distancia lineal o la escala de la imagen en la dirección paralela al camino de la plataforma o satélite. El Rango en cambio se refiere a la distancia entre el sensor y el blanco, perpendicular a la línea de vuelo.

Esta línea de mirada perpendicular, conocida como LOS o Line of Sight o línea de mirada del sensor, da lugar a lo que se denomina dirección de Rango Oblicuo o Slant Range. El Rango Oblicuo es por defecto la geometría en la que se visualiza la imagen Radar en los niveles de procesamiento más bajos. La proyección del Rango Oblicuo sobre un plano de referencia horizontal se denomina Rango Horizontal o Ground Range (Perna et al., 2013), y es como generalmente se visualizan los productos derivados del Radar a partir de los niveles de procesamiento más altos.

Por parte de un sensor radar, describe diferentes componentes geométricas que están relacionadas con direcciones de vuelo de la plataforma portadora, los ángulos de observación generados por la emisión de la radiación y las direcciones de operación del sensor, las cuales permiten describir al mismo sensor y el producto final (imagen SAR), (Nievinski, 2004).

4.2.5.1 Direcciones de vuelo

La geometría de las direcciones de vuelo está relacionada principalmente con la trayectoria que describe la plataforma portadora del sensor radar (Figura 15). La “línea de vuelo” (flight track en inglés) es la trayectoria que describe el sensor para la captura de información, a una altura definida sobre la superficie de referencia (p.ej. altura orbital de los satélites portadores de radar). Dicha línea, describe una proyección sobre la superficie de referencia (p.ej. esferoide sin relieves) denominada “proyección de la línea de vuelo” (ground track en inglés).

En base a estas dos direcciones, se genera la “dirección vertical”, descrita como la normal que va desde la línea de vuelo a su proyección, y la “dirección ortogonal” que es la proyección sobre la superficie de referencia que es perpendicular a la proyección de la línea de vuelo.

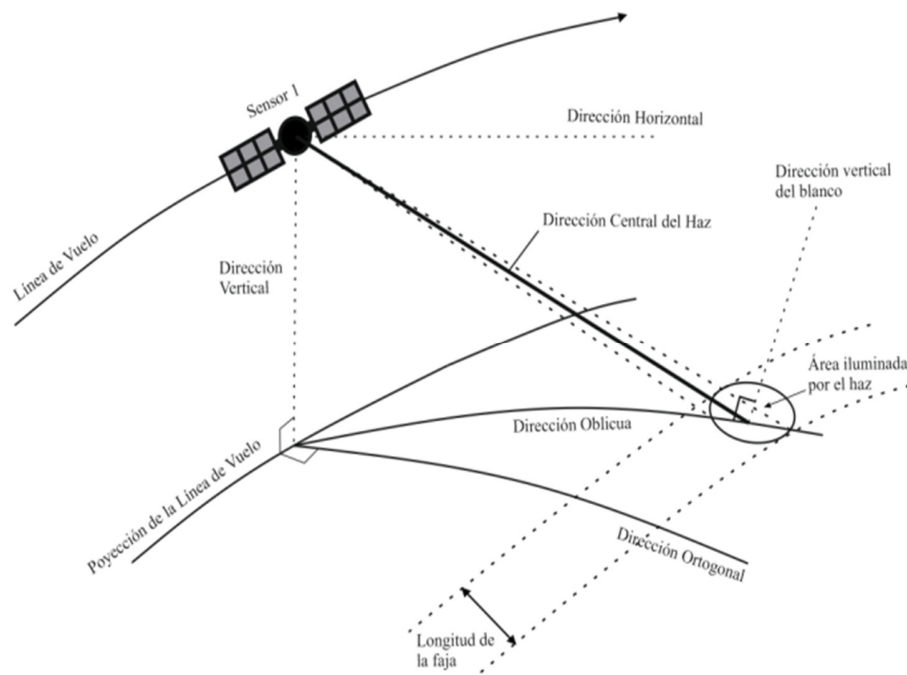


Figura 14. Dirección de Vuelo. Fuente: (Nievinski et al, 2004).

4.2.5.2 Ángulos de observación

Los ángulos de un SAR se sustentan en el principio de que la radiación emitida por el radar es asociada a un haz, ya que dicho haz describe una dirección central que genera diferentes ángulos que establecen la relación entre el sensor, los blancos (puntos dispersores en terreno) y la superficie de referencia (Figura 17). En este contexto, la dirección central describe dos ángulos:

1. El **ángulo oblicuo** (squint angle, en inglés), definido como un ángulo horizontal formado entre la dirección ortogonal y la dirección oblicua. Además, su complemento es denominado como el “ángulo de azimut”.
2. El **ángulo de elevación**, que está comprendido entre la dirección central del haz y la dirección vertical. Además, su complemento es denominado como el “ángulo de depresión”.

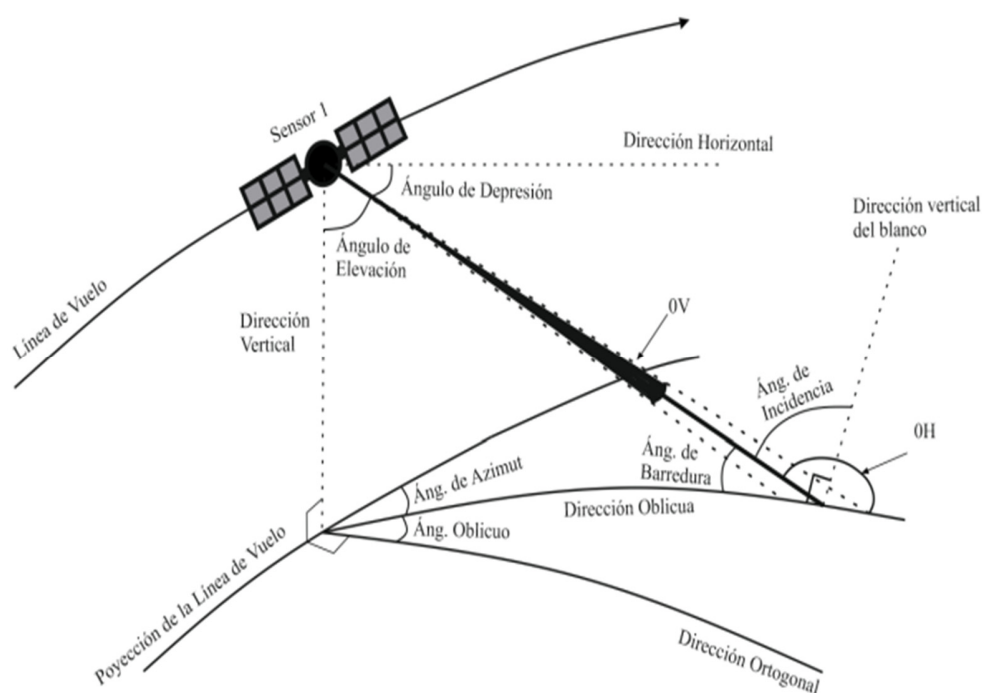


Figura 15. Ángulo de Observación. Fuente: (Nievinski et al, 2004).

4.2.5.3 Direcciones de operación

La geometría de las direcciones de operación relaciona los procedimientos para la captura de información de la superficie y el producto final (imagen SAR), ya que, en base a los parámetros considerados en el procedimiento de toma de datos, se definen las dimensiones de la imagen.

En base a la Figura 18, se define la dirección rango o de alcance directo de la línea de visada (en inglés, slant rango o across-track direction LOS) como cualquier blanco que es iluminado por la

radiación del sensor. Por otro lado, la dirección de azimut (en inglés, azimuth o along track-direction), es la tangente a la línea de vuelo de la plataforma.

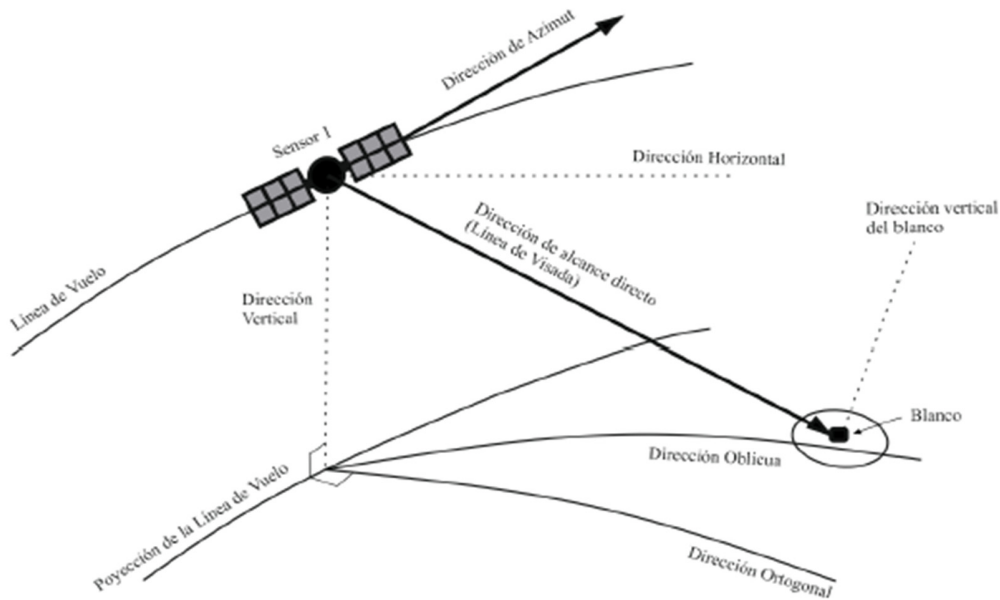


Figura 16. Direcciones de Operación de un SAR. Fuente: (Nievinski et al, 2004).

Considerando lo descrito, las dimensiones de las imágenes radar son definidas a partir de las direcciones de operación (ver figura 19), donde la dirección de rango o de alcance directo define las columnas de píxeles de la imagen radar y la dirección de azimut define las filas de píxeles en la imagen radar.

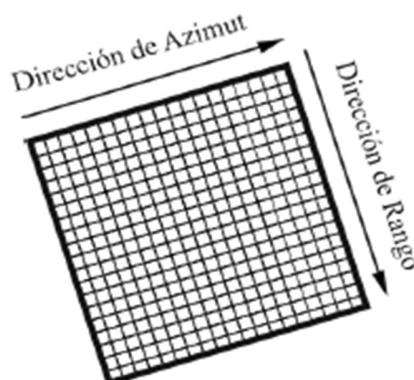


Figura 17. Distribución de píxeles que definen la imagen SAR. Fuente: Ferreti et al (2004)

4.2.6 La imagen SAR

La imagen SAR es un mosaico compuesto por píxeles que están distribuidos en filas y columnas, donde dicha distribución define las dimensiones de la imagen, por otro lado, cuando estos píxeles están asociados a una superficie de terreno observada reciben el nombre de píxeles o celdas de resolución y contienen valores complejos de información relacionada con la amplitud y fase del espectro retro-dispersado por los elementos de cada celda en terreno (p.ej., rocas, edificios, vegetación, etc.) (Ferretti et al., 2007).

Considerando lo descrito en el párrafo anterior, la imagen SAR es aquella que es utilizada para realizar procedimientos interferométricos que permiten obtener como resultado las deformaciones de un área de estudio, concluyendo aspectos como la velocidad de la deformación durante la época de estudio y si el fenómeno de deformación se trata de un alzamiento o un hundimiento.

4.2.6.1 Componente fase

De acuerdo con Fielding (2018) y Ferretti et al. (2007), la fase total capturada por un sensor se define como el número de ciclos oscilatorios ejecutados por la onda electromagnética entre el sensor y la superficie, generando un viaje de ida y vuelta (2ρ).

Por consiguiente, la onda está compuesta por partículas que describen un movimiento similar a la función seno (comportamiento sinusoidal), por lo que se dice que las partículas ejecutan un ciclo igual a 2π cuando recorren una distancia igual a la longitud de onda, como lo expresa la Figura 20.

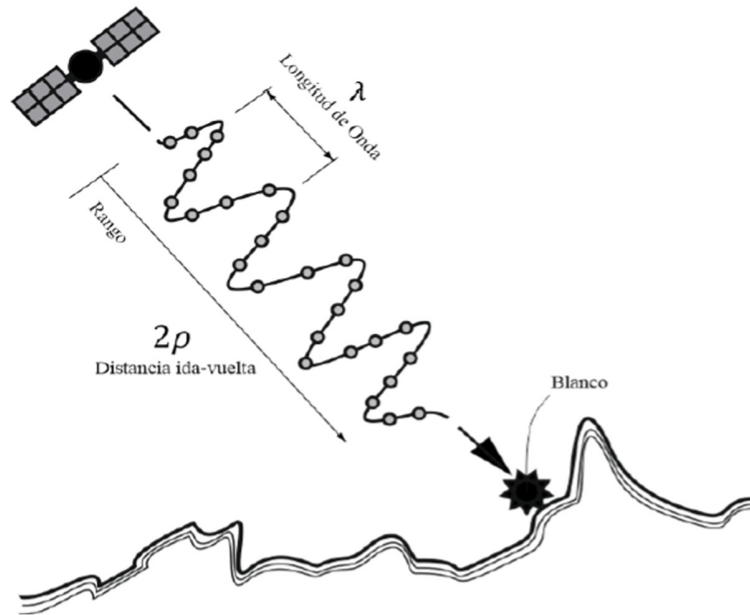


Figura 18. Función de la fase SAR emitida. Fuente: Fielding (2018)

4.2.6.2 Componente Amplitud

Las celdas de resolución que componen la imagen SAR presentan un valor complejo de números imaginarios, el cual depende de factores como la rugosidad y la composición química-geométrica de los elementos de dispersión en terreno.

Dicho valor complejo es definido como la amplitud y en la imagen se presenta como una escala de grises, conocida como moteado (speckle en inglés), donde aquellos pixeles de resolución que presentan tonalidad brillante indica que existe una mayor radiación retro-dispersada.

Por otro lado, una menor radiación retro-dispersada es presentada en la imagen SAR con una tonalidad más oscura. Por ejemplo, en rocas expuestas o zonas urbanizadas, el valor de la amplitud es mayor, mientras que, en superficies planas o con menor retro-dispersión como los cuerpos de agua, presentan un valor menor de amplitud Ferretti et al., 2007 (Figura 21).

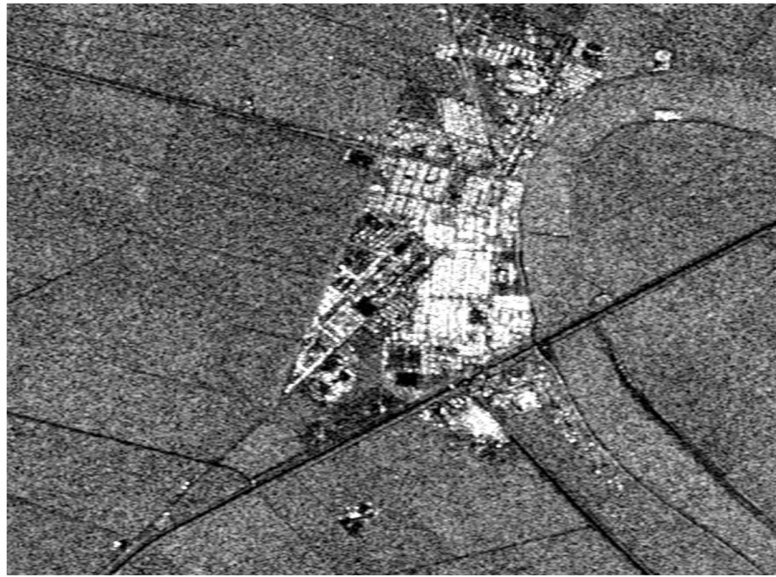


Figura 19. Representación de una imagen SAR. Fuente: Meyer (2019).

4.2.7 Distorsiones Geométricas

Existen tres tipos de distorsiones geométricas, provocadas a partir del punto de vista lateral del sensor.

4.2.7.1 El efecto Foreshortening.

Ocurre en un terreno con pendiente donde la cara apunta hacia la iluminación lateral del radar, esto produce que la imagen se comprima en pocos píxeles. Este efecto consiste en que la apariencia de compresión esté más inclinadas al radar. Si el ángulo de visión aumenta, disminuye la distorsión (Figura 22).

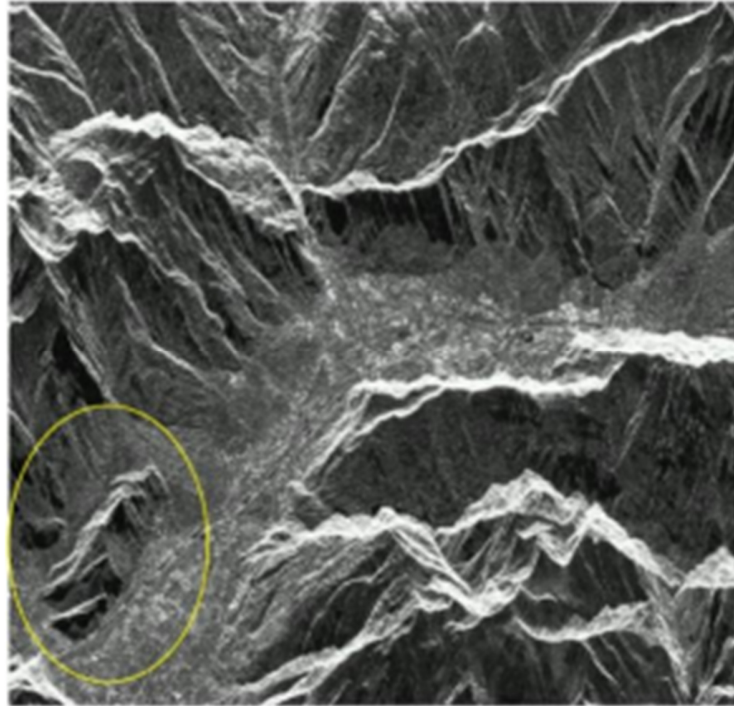


Figura 20. Ejemplo de efecto Foreshortening. Fuente: Meyer (2019).

4.2.7.2 Layover o inversión por relieve

Ocurre cuando el pulso del radar alcanza primero la cima de una montaña y luego su base, como resultado la cima de la montaña se desplaza desde su posición original hacia la dirección de visión del radar. Esta distorsión sucede cuando el ángulo de incidencia es más pequeño que la pendiente del terreno (Figura 23).

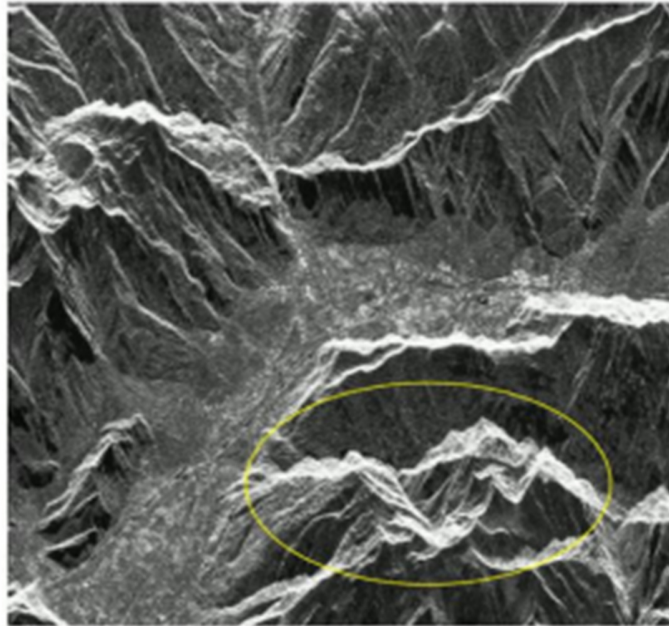


Figura 21. Ejemplo de inversión por relieve. Fuente: Meyer (2019).

4.2.7.3 El efecto Shadow o sombra

Se presenta cuando existe un mayor objeto al ángulo de incidencia, en donde parte de la información de una montaña, por ejemplo, no puede ser vista por el sensor. Tiene como resultado zonas negras en la imagen puesto que el paso del pulso es obstruido (Figura 24).

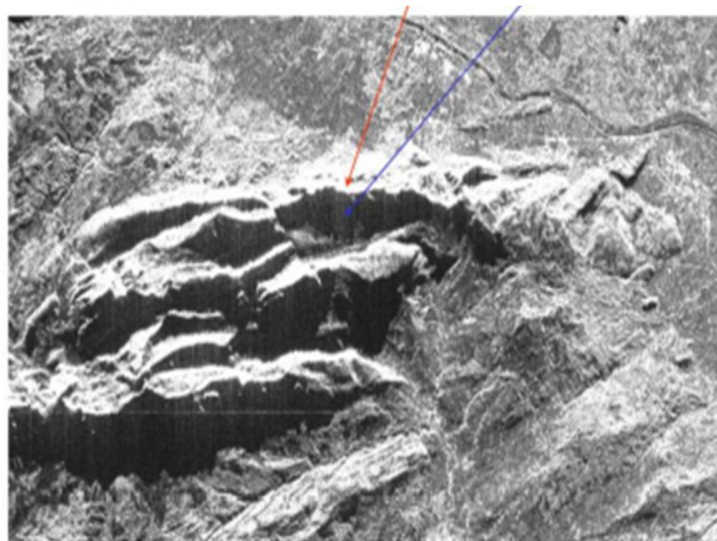


Figura 22. Ejemplo de efecto Shadow o Sombra. Fuente: Meyer 2020.

4.2.8 Técnicas de análisis de Imágenes de Radar

4.2.8.1 Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica de teledetección avanzada que utiliza imágenes de radar para medir los desplazamientos de la superficie terrestre con alta precisión. Esta técnica funciona mediante la comparación de dos o más imágenes de radar de apertura sintética (SAR) adquiridas en diferentes momentos en la misma área. Al medir la diferencia de fase entre las ondas reflejadas del radar, se puede calcular el desplazamiento del terreno con precisión milimétrica.

Por otro lado, (Ferretti, et al., 2007), definen InSAR como una configuración de los Radares de Apertura Sintética (SAR), que es un sistema de imágenes radar que permite mediante un post-proceso la generación de modelos digitales de elevación y medición de deformaciones milimétricas producidas en la superficie del terreno durante el tiempo de estudio.

4.2.8.2 Interferogramas

Para generar un interferograma en InSAR, se requieren dos imágenes de radar adquiridas desde diferentes ángulos y en diferentes momentos. La primera imagen se utiliza como imagen maestra, mientras que la segunda imagen se utiliza como imagen esclava. El Interferograma se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de la imagen

esclava. La amplitud de ambas imágenes es multiplicada, y las fases son restadas para formar un Interferograma.

En resumen, la generación de interferogramas en InSAR es un proceso fundamental para obtener mediciones precisas de deformación del terreno. Sin embargo, la diferencia de fase puede verse afectada por diversas fuentes de error, que deben eliminarse mediante técnicas de corrección y procesamiento de datos para obtener mediciones precisas y confiables.

La interferometría SAR, es capaz de realizar mediciones de deformación en la superficie en una sola dimensión, que corresponde a la línea de visión del satélite o LOS.

En la Figura 25, es posible observar un ejemplo de capturas SAR, para geometrías ascendentes y descendentes. En donde los movimientos superficiales observados se pueden interpretar de la siguiente manera; 1) Los mismos signos de valor de movimientos para ambas geometrías indica movimientos predominantemente verticales, positivo al acercarse al satélite (alzamiento) y negativo al alejarse (descenso). 2) Signos opuestos de valor de movimiento en ambas geometrías. Indican predominantemente movimientos al este u oeste según el caso (Vassileva et al., 2017).

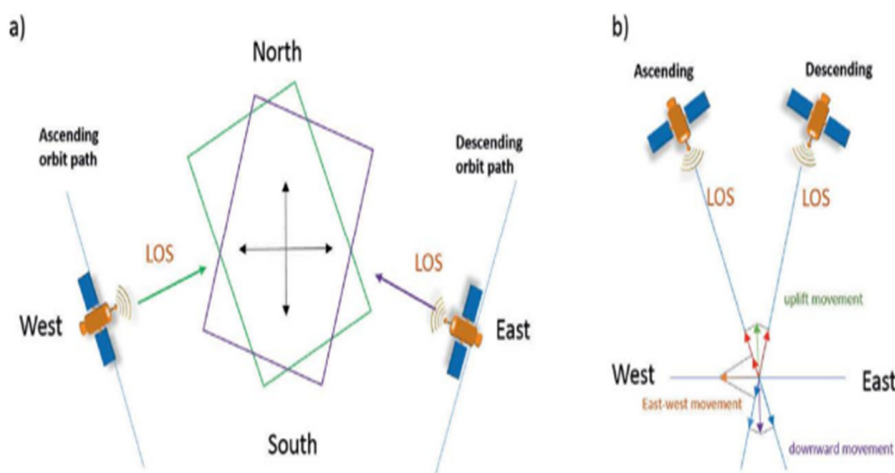


Figura 23. Ejemplo de detección de deformación en la superficie desde ambas geometrías de trayectoria a) Orientación de la imagen. b) Componentes de movimientos en LOS. Fuente: Vassileva et al. (2017).

4.2.8.3 Coherencia Interferométrica

A través de la coherencia se determina la calidad y fiabilidad del Interferograma, la medida de coherencia se relaciona con la desviación estándar (dispersión de datos con respecto a la media) de

la fase diferencial, con esta información se determina que tan apropiado es el resultado del Interferograma, ya que la calidad depende de que tanta correlación contienen los pares de imágenes capturados en intervalos de tiempo diferentes, la correlación es mayor o menor de acuerdo a la similitud entre los píxeles de una comparación, donde la magnitud de coherencia es 0 significa que no hay coherencia, entre 0.3 y 0.5 es utilizable pero ruidosa, de 0.5 a 0.7 es buena y de 0.7 a 1 son completamente coherentes (Globe SAR, 2005).

4.2.8.4 Fuentes de error o ruido en la fase Interferométrica

En SAR se pueden presentar tres fuentes de error para el desenrollamiento de la fase, estos parámetros pueden generar una mala correlación al momento de realizar un Interferograma o un DEM, a continuación, se describen las fuentes de error conocidas como ruido de fase, efectos atmosféricos e indeterminación de la órbita.

El ruido de fase hace referencia a una señal que ha sido alterada por diversos factores del ambiente en el momento de la captura de información, en SAR se presentan comúnmente dos tipos de ruido: aditivo si es del receptor y dependiente si es de la señal. El ruido de fase se presenta por factores como condiciones climáticas, ángulo de observación, ruido térmico, registro incorrecto de la imagen, decorrelación temporal y trayectoria de la onda electromagnética enviada a través de la atmósfera, la cual se hace más larga o corta de acuerdo con el tipo de topografía. Todas estas fuentes de ruido incrementan la dispersión del valor de fase interferométrica.

Es importante mencionar que, en los resultados del procesamiento, cualquier valor en coherencia con magnitud menor a 0.3 indica que la estimación de la fase es demasiado ruidosa para ser utilizada (ESA et al., 2007b; Globe SAR, 2005).

Otra fuente de ruido en la fase es la generada por efectos atmosféricos. Se genera principalmente por el vapor de agua que se encuentra en la atmósfera al momento de capturar la información, este fenómeno altera el índice de refracción, es decir, se presenta un cambio en la dirección del rayo de luz enviado por el sensor hacia la superficie terrestre y, por tanto, la velocidad de propagación de la luz se modifica. Estos factores comprometen la calidad de la imagen InSAR debido a la variación temporal y espacial de este fenómeno atmosférico.

Finalmente, otro tipo de ruido que afecta la fase interferométrica es el ocasionado por indeterminación de órbita. Para el procesamiento de InSAR son muy importantes los datos orbitales, sin embargo, se encuentran incertidumbres que generan pequeños desplazamientos

superficiales, la indeterminación de la órbita afecta la estimación de las coordenadas del objeto capturado por el sensor, ya que altera tanto la precisión de la ubicación como la reconstrucción del DEM.

Los errores que genera son principalmente en la topografía del terreno, ya que presenta variaciones de altura formando distorsiones y errores en la topografía local, también compromete la codificación geográfica de los datos, pues la georreferenciación es importante para poder realizar la comparación entre imágenes de un mismo sitio con topografías aproximadas, la coherencia en estos casos es pequeña debido a la alta decorrelación geométrica (ESA et al., 2007).

4.2.9 La interferometría SAR diferencial (DInSAR)

La interferometría SAR diferencial (DInSAR), es una variante de InSAR, así lo aclaran Zhilin, et al. (2004), Se trata de una técnica de proceso de imagen que permite la generación de mapas de desplazamiento del terreno y el cálculo de la coherencia relativa, a partir de pasos del sensor SAR por una misma zona de estudio. Es decir, que los resultados de los procesos de los pares de imágenes para lograr los Interferogramas se pueden convertir en una herramienta para analizar los comportamientos de los movimientos en un área a analizar detectando los cambios en la fase interferométrica en las zonas de alta coherencia relativa.

Como lo explica Hanssen (2001), DInSAR, como técnica general, incluye métodos desde interferometría de un solo par, hasta enfoques más avanzados. Sin embargo, lo que tienen en común es que explotan la información contenida en la fase interferométrica calculada como la diferencia de fase entre dos imágenes adquiridas en dos momentos diferentes desde casi la misma posición del satélite (Figura 26)

Consideraciones sobre las limitaciones del DInSAR en el monitoreo de deformaciones:

- Una de las consideraciones es el tiempo, es decir, los cambios que pueden ocurrir entre la primera y segunda toma de los datos. La decorrelación temporal influye directamente en la componente de fase del ruido. Además, la distinción entre la atmósfera en cada toma agrega efectos de retardos en la velocidad de propagación de la señal, que no son deseables en el proceso.
- Los Interferogramas diferenciales proporcionan como resultado directo la medición del desplazamiento del objeto en relación con la línea de visión del satélite (LOS). Para superar

esta limitación, es necesario procesar ambos sentidos de adquisición del satélite (ascendente y descendente) y con sus resultados, descomponer los vectores para encontrar el desplazamiento real en la dirección vertical. Para este estudio solamente tuvimos acceso a imágenes descendentes.

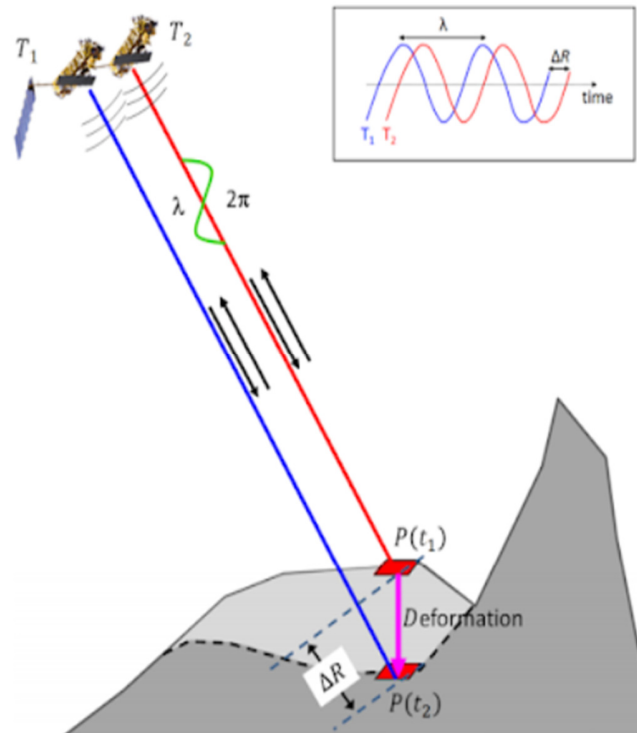


Figura 24. Esquema de adquisición de datos en caso de subsidencia. Principio básico DInSAR. Fuente: (Sousa et al, 2013).

4.2.10 Series Temporales Interferométricas

Según Hooper (2008), Shanker (2010) y Shanker (2011), las técnicas multitemporales InSAR son extensiones de la InSAR convencional, dirigidas a abordar los problemas causados por los diferentes tipos de decorrelación y los efectos generados por el retraso atmosférico. Estas técnicas, consisten en el procesamiento simultáneo de un conjunto de adquisiciones SAR que busca generar una serie de Interferogramas sobre la misma área, con el propósito de maximizar los índices de correlación de fase, y por lo tanto reducir el error asociado con la estimación de deformaciones.

En términos generales, los algoritmos de series temporales pueden ser clasificados en dos grandes categorías: Persistent Scatterers Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS).

Cada uno de este conjunto de métodos está diseñado para un tipo específico de mecanismo de dispersión Hooper (2008).

4.2.11 Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

La interferometría multitemporal utilizando dispersores persistentes (PSInSAR o PSI) es una técnica derivada del DInSAR. Fue desarrollada en el Instituto Politécnico de Milano (POLIMI) con la finalidad de detectar desplazamientos en la superficie terrestre utilizando series temporales con varias imágenes de la misma zona (Ferreti et al., 2001).

El objetivo de este algoritmo consiste en la generación de Interferogramas diferenciales con respecto a una imagen maestra, para cada adquisición disponible, incluso si el par de datos ocupados son caracterizados por una gran línea de base. En este contexto, el método busca seleccionar la mayor cantidad de dispersores que tengan un comportamiento estable en el tiempo (Hooper et al., 2004; Hooper et al., 2007; Shanker, 2010; Shanker et al., 2011).

Este enfoque, está dado básicamente por la posibilidad de encontrar píxeles en una imagen SAR que posean un eco que sea dominado por un dispersor, de modo que la medición de fase de ese píxel pueda realizarse de forma más eficiente (Ferreti et al., 2001), fueron uno de los primeros en referirse a celdas de resolución con dispersores con un comportamiento estable en el tiempo, denominándolos como Persistent Scatterers (Farina et al., 2006).

En términos generales, este tipo de procesamiento ha sido muy exitoso para el análisis InSAR con imágenes que contengan un gran número de estructuras fijas en el espacio-tiempo y que tiendan a ser angulares, lo cual determina la presencia de dispersores muy eficientes, específicamente en áreas urbanas. Sin embargo, en lugares donde no se presentan estas características, los resultados no han sido altamente precisos (Hooper et al., 2004; Hooper et al., 2007). Debido fundamentalmente a estas limitaciones, en Hooper et al. (2004) propone el concepto Persistent Scatterers (PS), el cual mantiene la lógica de la identificación del dispersor persistente, sin embargo, incorpora al procedimiento la medición de la correlación espacial de los valores de fase presentes, en lugar de solamente un modelo funcional temporal (Figura 27).

Este método, ha logrado encontrar dispersores caracterizados por una fase estable, independiente de las amplitudes asociadas a los objetos angulares presentes en el espacio, por lo que ha sido aplicable en zonas donde InSAR convencional falla (Hooper et al., 2004; Hooper et al., 2007).

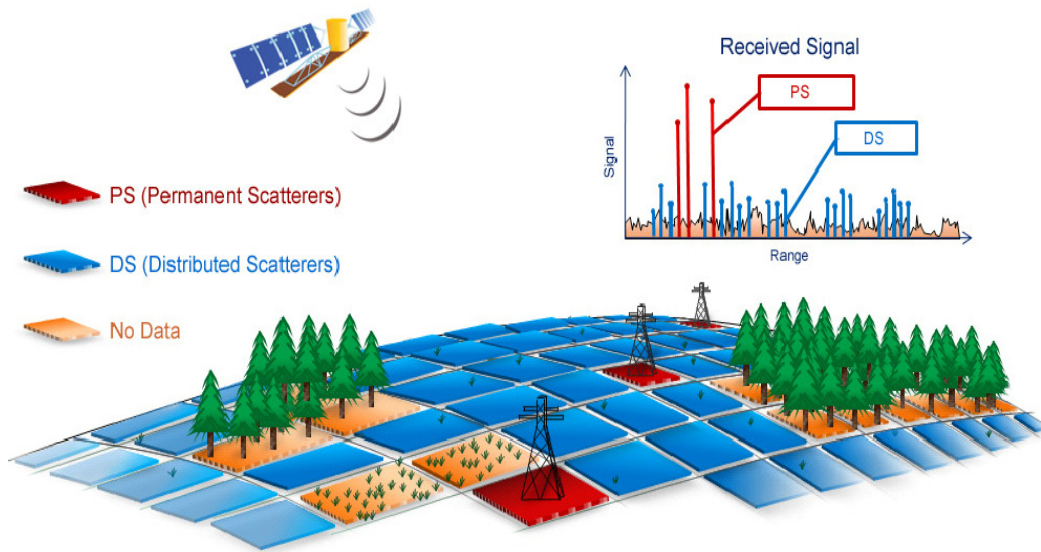


Figura 25. Figura 26. Muestra de la distribución de PS y DS. Fuente: https://site.tre-altamira.com/wpcontent/uploads/2013_Advanced_InSAR_interferometry_reservoir_monitoring.pdf.

4.2.12 Software de Procesamiento de Imágenes SAR

En este contexto, es fundamental contar con un software de procesamiento de imágenes SAR eficiente y preciso para garantizar la calidad y precisión de los resultados obtenidos. Existen diferentes opciones de software de procesamiento de imágenes SAR disponibles en el mercado, desde software de licencia gratuita hasta software de pago con capacidades avanzadas.

4.2.13 SARPROZ

SARPROZ es un software versátil para procesamiento de información InSAR, basado en el Matlab. Fue desarrollado por Daniel Perissin. Inicialmente, el código fue desarrollado para solucionar problemas específicos en la combinando la coherencia de la información con diferentes frecuencias de radar, en particular ERS y Envisat a través de técnicas avanzadas de scatterers persistentes PS.

Algunos problemas están relacionados a la naturaleza física de los objetivos del radar y su capacidad de ser visibles sobre diferentes ángulos y frecuencias de iluminación (Perissin et al., 2011).

El software fue equipado con una herramienta para caracterización y reconocimiento de objetivos, capaz de procesar y extraer información desde la amplitud de imágenes de radar. Por otro lado, el uso de las series temporales de amplitud dio como resultado lidiar con objetivos temporales.

Además, el reconocimiento de un objetivo de radar implica una localización precisa, y con el SARPROZ muchas técnicas para mejorar la estimación de las elevaciones y el proceso de georreferenciación, (Ferretti et al., 2001).

Entre las principales características del SARPROZ están:

- Interfase gráfica amigable para el usuario: no es requerido conocimientos profundos para usuarios estándar.
- Basado en el Matlab: los usuarios avanzados pueden fácilmente desarrollar sus propias extensiones de software.
- Puede ser compilado y puede ejecutarse independientemente desde el Matlab o cualquier plataforma (Unix, PC, Mac).
- Completamente paralelo: SARPROZ puede ser ejecutado en múltiples núcleos automáticamente.
- La mayoría de los formatos satelitales son compatibles, incluyendo Sentinel IW(TOPS). Puede ser ejecutado en modo automático desde la línea de comando sin interfase gráfica.

4.3 Metodología desarrollada en la Cuenca del Lago de Maracaibo

- Análisis de las imágenes disponibles y adquisición de estas. Software de procesado de imágenes para realizar la aplicación concreta de este proyecto.
- Co-registro de las imágenes.
- Selección de Interferogramas.
- Aplicación de la técnica PS-InSAR sobre las imágenes seleccionadas.

4.3.1 Procesamiento de las imágenes SAR en SARPROZ

A continuación, se ilustrará el procedimiento de las imágenes SAR para elaborar un análisis multitemporal con SARPROZ (Figura 28). Correspondiente a la zona Costa Oriental del Lago de Maracaibo en donde se han adquirido 134 imágenes S-1 de órbita ascendente en un período desde 2015 hasta el 2022. El modelo de procesamiento es el mismo para las imágenes descendentes para los períodos desde 2015 al 2022. A su vez se realizará la segunda zona en la Costa Occidental

donde se adquirieron 123 imágenes S-1 en ascendente para los periodos 2015 hasta el 2022, y 245 imágenes descendentes para los años 2015 al 2022.

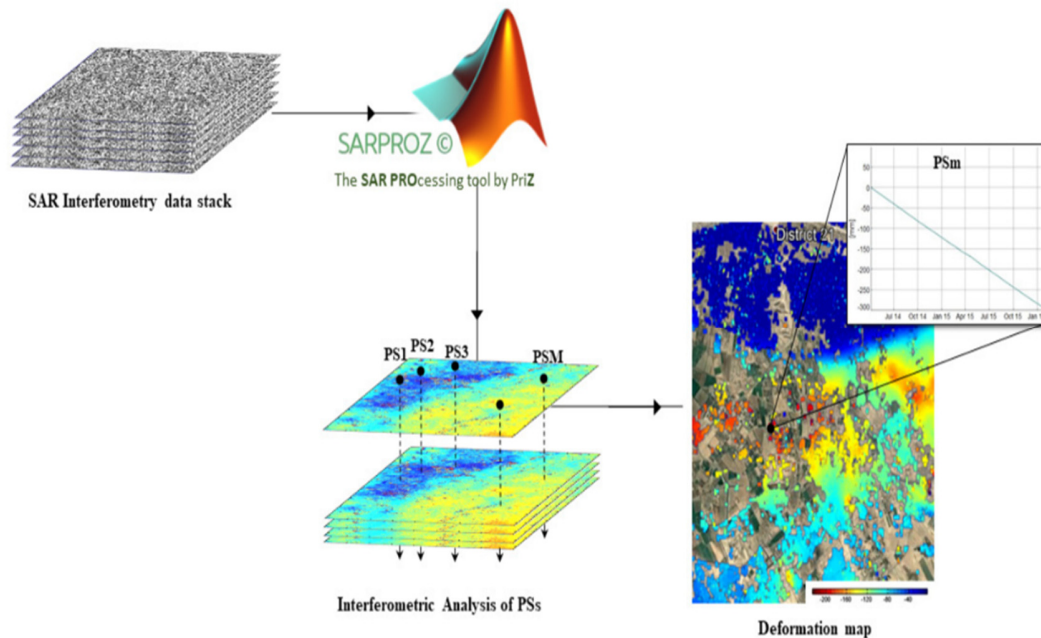


Figura 26. Diagrama del procesamiento de las imágenes por SARPROZ.

Seguidamente debemos importar las imágenes para su conversión a archivos compatibles con SARPROZ. Para ello, debemos crear una subcarpeta llamada SLC con nuestras imágenes S-1. Por lo que las imágenes tienen que ser importadas, se define el tipo de conectividad entre las imágenes, delimitar la zona de interés con coordenadas geodésicas, y desde Google Earth Pro, seleccionar la imagen maestra en el caso de la zona Costa Oriental corresponde a la fecha del 29 de septiembre 2022 y luego co-registrar cada una de las imágenes referenciales con respecto a la maestra (Figura 29).

1. Importa los datos de Radar de Apertura Sintética (SAR), Single-Look Complex (SLC).

A continuación, se debe abrir SARPROZ y clicar en “**Select Dataset**” para abrir el módulo “**Dataset Selection**”. Seleccionamos en “**Select Directory**” y, posteriormente la carpeta SLC. Se abrirá automáticamente el módulo “**SLC Data Processing**”, (Figura 29).

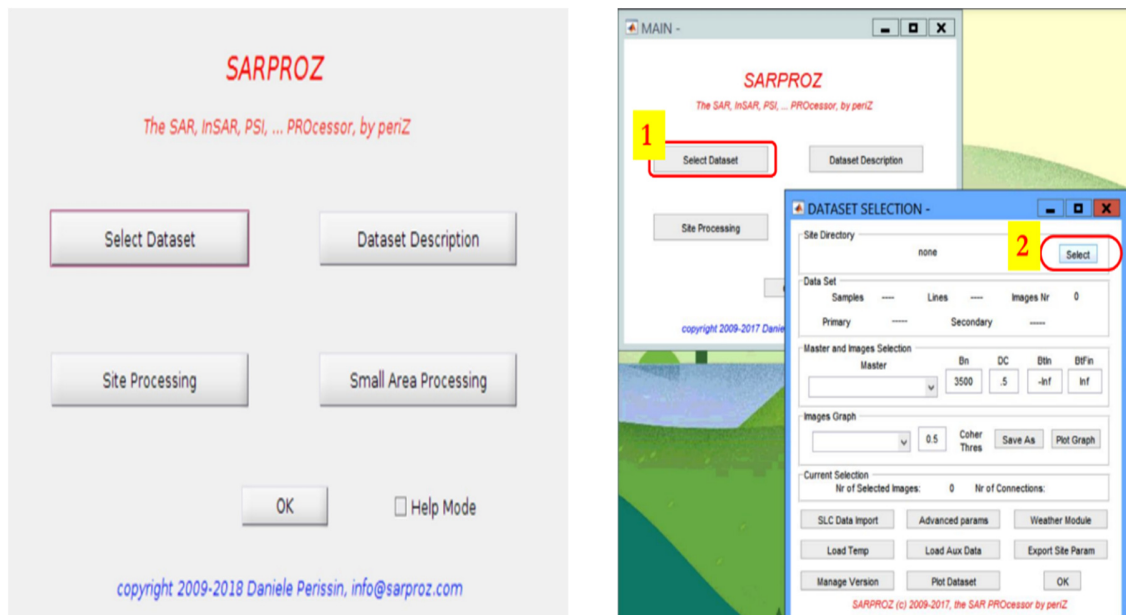


Figura 27. Interfaz SARPROZ.

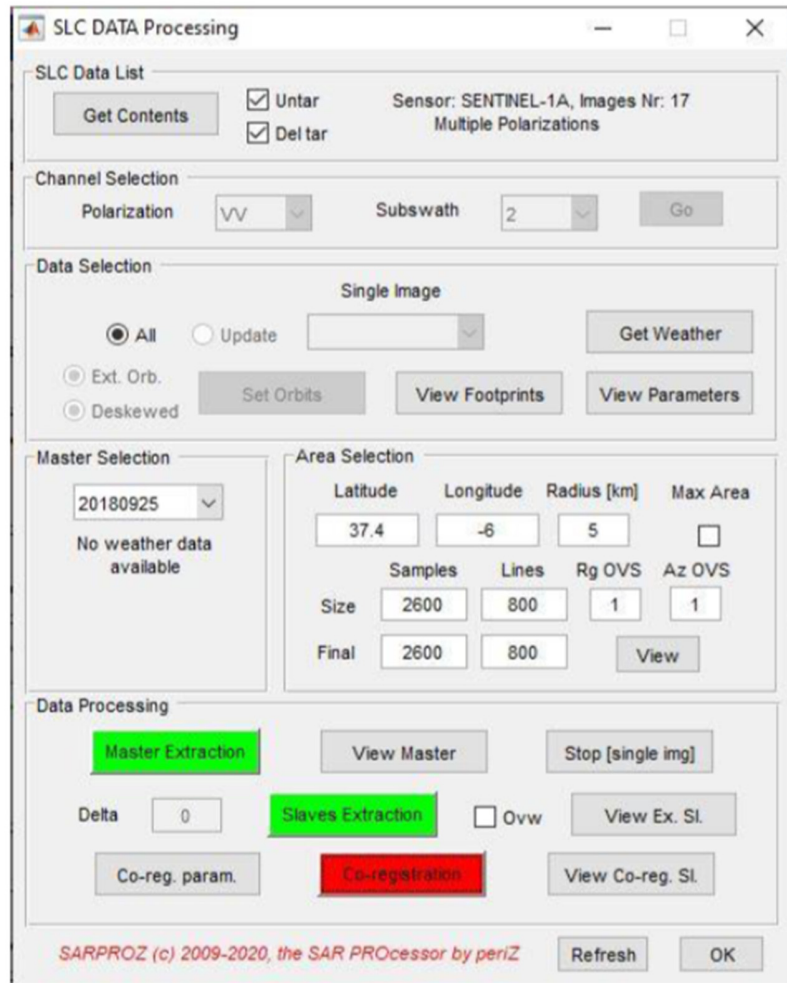


Figura 28. SARPROZ Panel del SLC Data Processing.

4.3.2 Pre-procesamiento para detección de cambios

Se debe tener en cuenta que los puntos de control de la imagen maestra y las imágenes de referencia deben estar dentro del DEM, caso contrario el programa nos dará error en el procesamiento del mapa de reflectividad y no se podrán avanzar en los siguientes procesos (Figura 31).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

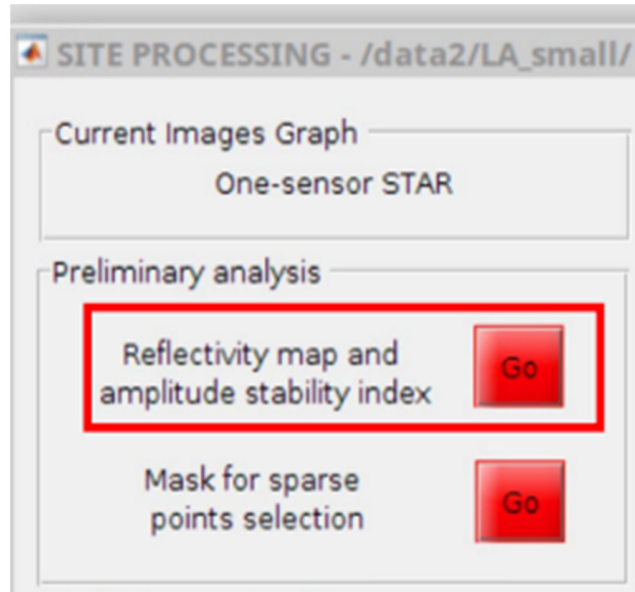


Figura 29. Interfaz mapa de reflectividad e índice de estabilidad de amplitud.

A continuación, se obtiene el mapa de reflectividad en la Cuenca del Lago de Maracaibo.



Figura 30. Mapa de reflectividad en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela.

Con la imagen de reflectividad se puede extraer y procesar información del índice de la estabilidad de la amplitud y así hacer un análisis preliminar. Hay que comprobar que el modelo digital de elevación (DEM), cubra el área de interés en la Cuenca del Lago de Maracaibo (Figura 33).

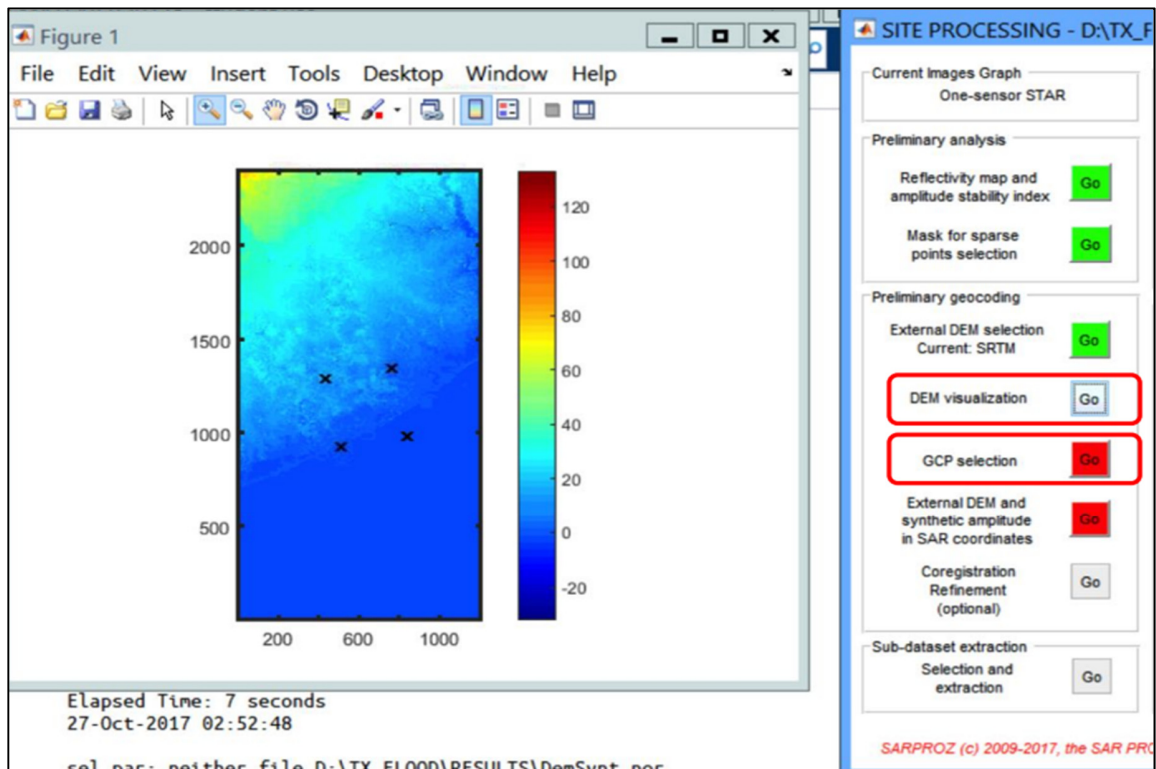


Figura 31. Ejemplo de visualización del DEM.

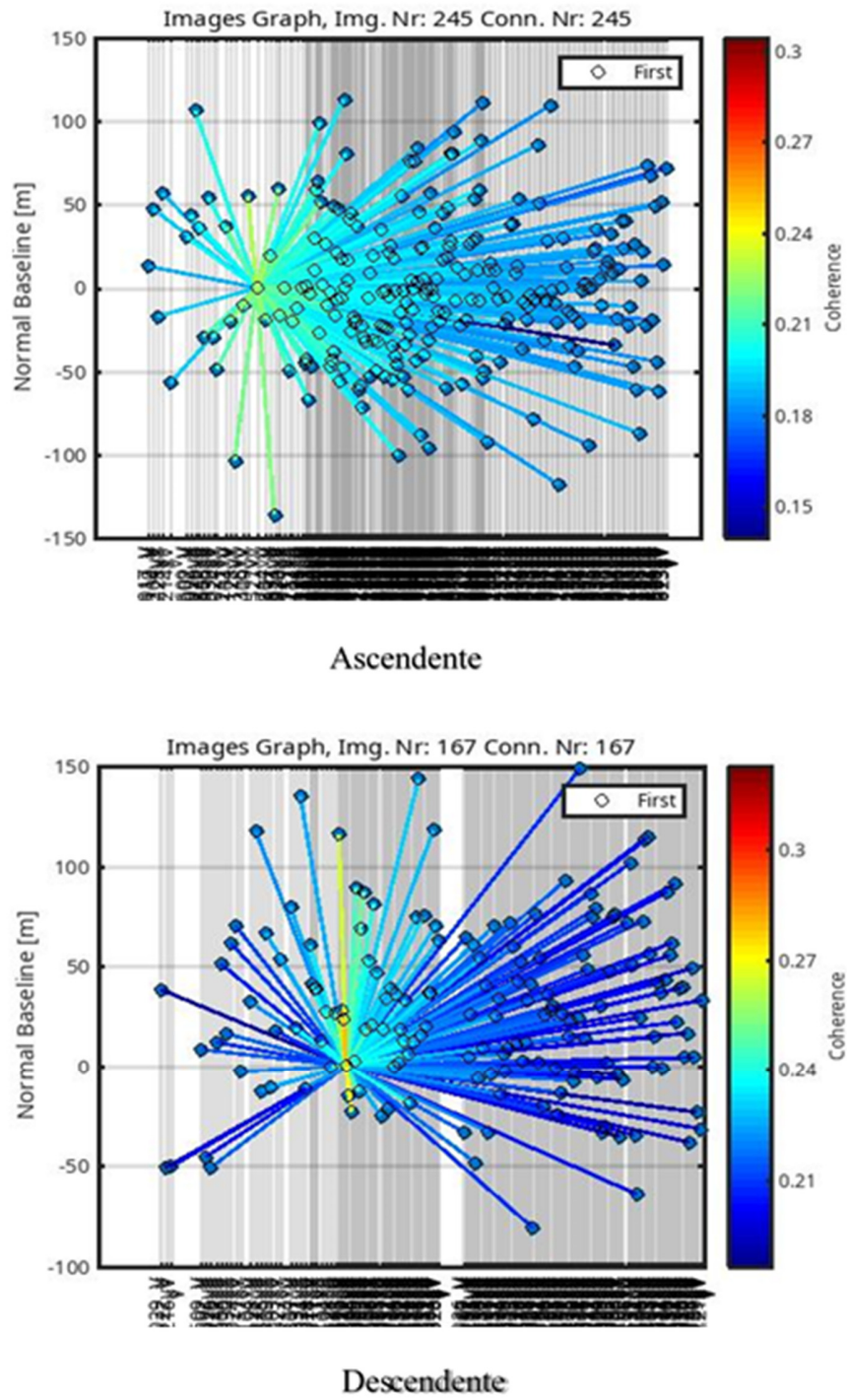


Figura 32. Distribución de las líneas base, dirección ascendente y descendente.

4.3.3 Estimación de la Fase Atmosférica (APS)

Una vez terminado con el paso de procesamiento previo se puede comenzar la estimación de APS. Para calcular el APS, es importante tener en cuenta que el conjunto de interferogramas se genera a partir de la misma imagen que se selecciona como referencia principal. Esta imagen puede ser estimada promediando los residuos que se calculan píxel por píxel. Este cálculo se realiza dentro de una red compuesta por los PS. Una vez que se conoce la contribución del efecto atmosférico generado por cada PS, se aplican filtros para calcular así el APS de la imagen maestra.

Posteriormente se debe seleccionar los puntos dispersos y mantener el valor predeterminado muestreo descendente (DS) y línea descendente (DL) valor para así luego crear el gráfico de conexión (Figura 35).

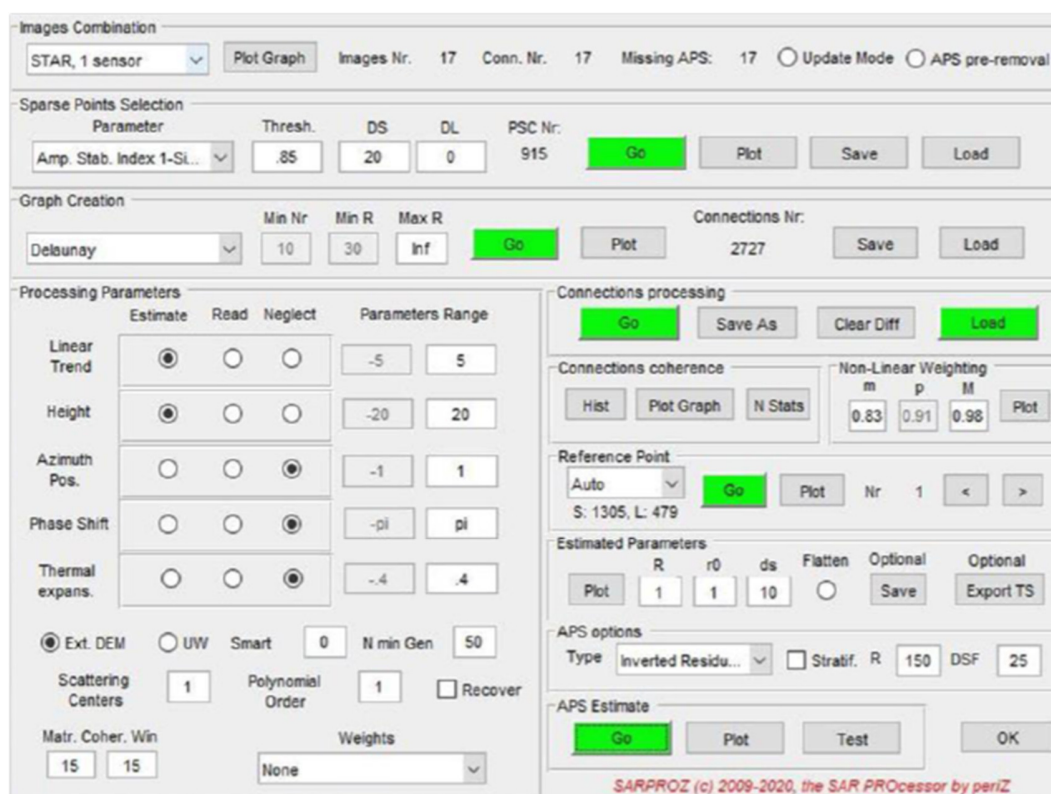


Figura 33. Panel de procesamiento APS.

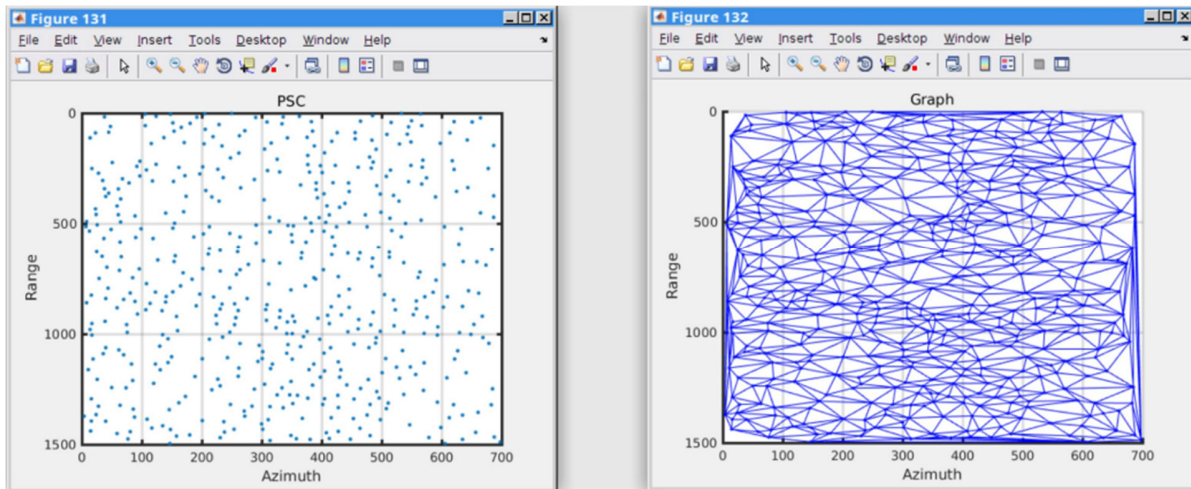


Figura 34. Ejemplo de la distribución de PSC y conexión de Delaunay entre ellos.

Un elemento metodológico que resulta necesario establecer, es que los puntos que serán utilizados para la realización de las series de tiempo corresponden a los de mayor coherencia interferométrica (Persistent Scatterers Candidates, en adelante, PSC), es decir que los blancos iluminados entre las diferentes adquisiciones no cambian, evitando así la degradación de la fase. Valores del módulo cercanos a 0 indican baja correlación y valores del módulo cercanos a 1 indican alta correlación.

Posteriormente, se procede a estimar los parámetros que nos darán la tasa de deformación de esta investigación en la Cuenca del Lago de Maracaibo, para su visualización es importante verificar el histograma de velocidad de conexión y altura residual de conexión. El histograma da una idea de la distribución del valor de velocidad/altura residual.

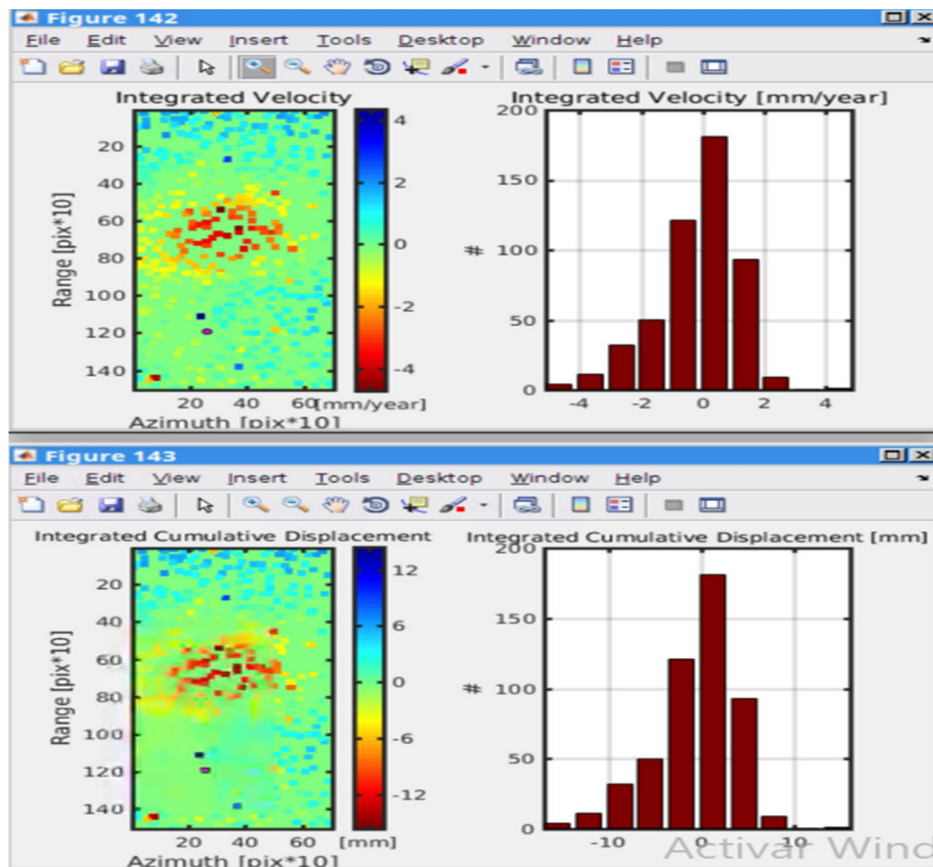


Figura 35. Distribución de la velocidad y desplazamiento acumulado como parte de los parámetros estimados en el procesado APS.

La altura residual integrada es la altura integrada menos el DEM externo. Tomando en cuenta que el pico del histograma de altura residual integrado es más o menos en cero. Esto significa que la mayoría de los puntos tienen cero alturas relativas en comparación con el punto de referencia. Esto es una indicación de que el punto de referencia está en el suelo ya que en la mayoría de los puntos deben estar en el suelo (Figura 38).

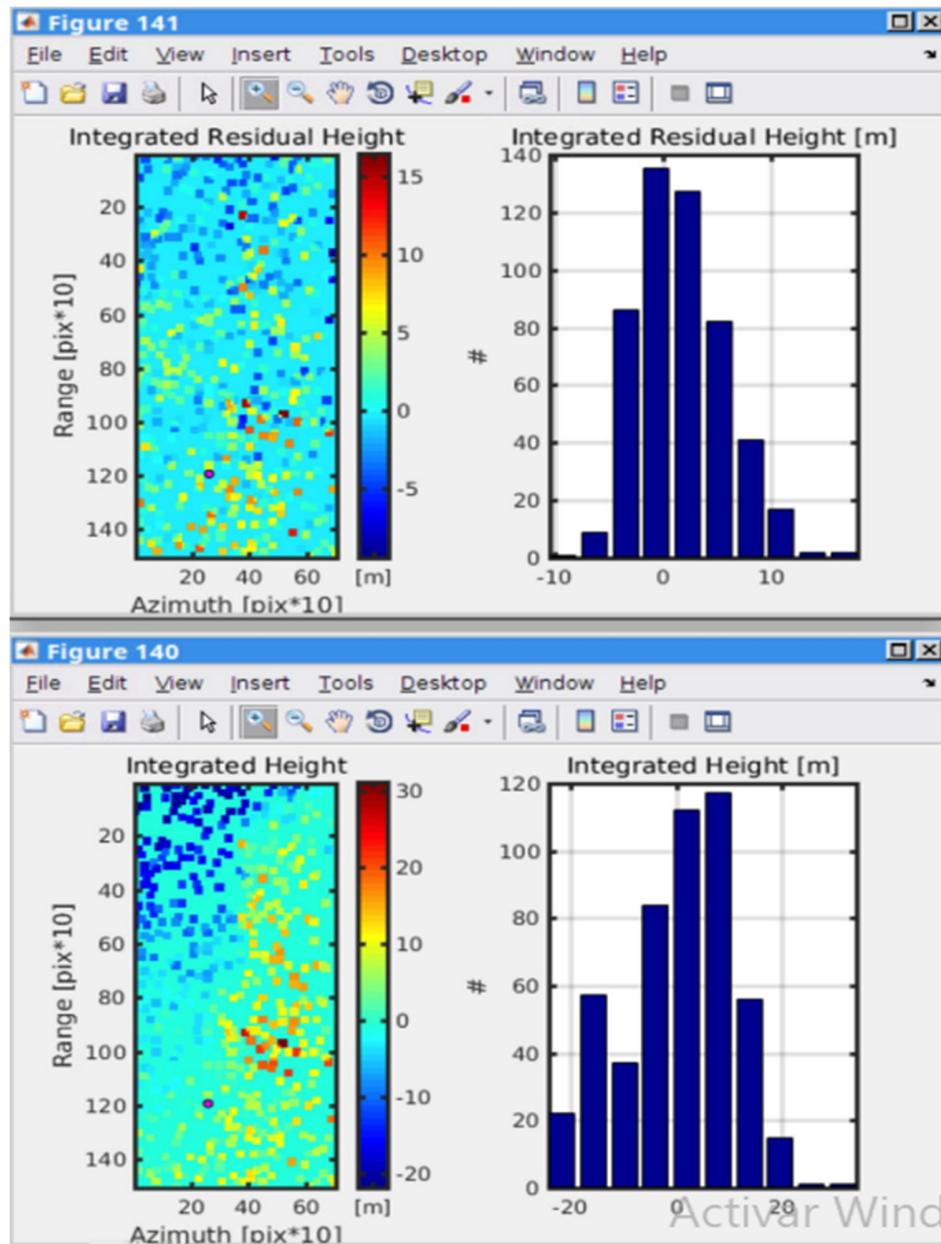


Figura 36. Ejemplo de la distribución de la altura de los puntos y su residuo respecto al DEM externo.

En el procesado se obtienen más histogramas como la distribución de la de velocidad de conexiones, alturas de conexiones y altura residual de conexiones.

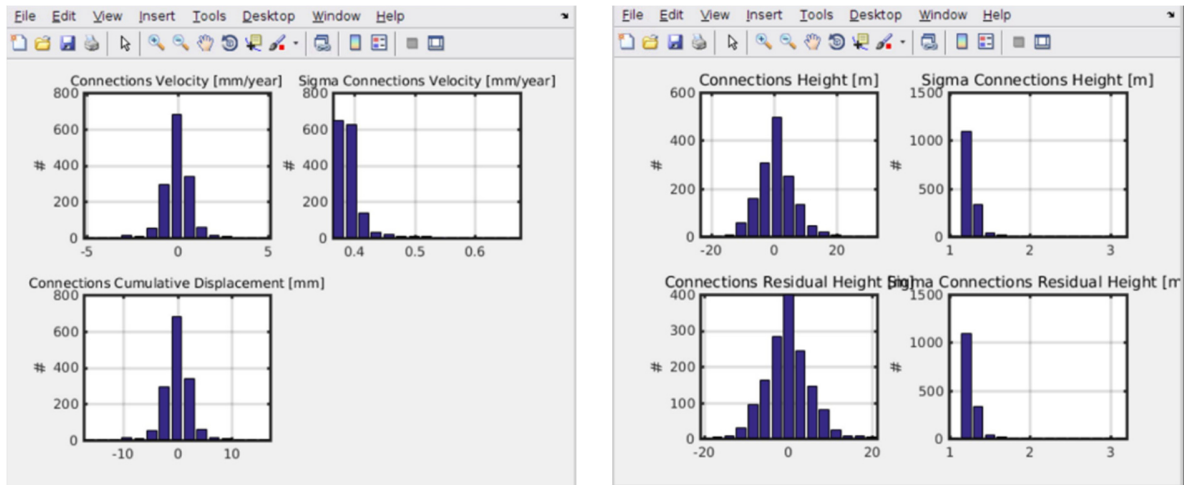


Figura 37. Ejemplos de otras distribuciones de los parámetros obtenidas en el procesado APS.

En resumen, de lo mencionado anteriormente, la velocidad de conexiones y altura residual es la velocidad relativa, altura residual estimada entre dos puntos que están conectados con la gráfica.

- El histograma es la representación para la distribución de las conexiones velocidad-residual altura.
- La velocidad altura residual integrada es la velocidad altura residual, con respecto a la referencia después de integrar las conexiones velocidad/altura residual usando el gráfico dado.
- El histograma representa la distribución de la velocidad integrada-altura residual, para cada punto con respecto al punto de referencia.

La siguiente parte del procesado corresponde a la realización del análisis de Multi-temporal.

4.3.4 Análisis Multi-temporal

Para implementar la metodología PSI, debemos ir seleccionando” en “Sparse Points Processing”, ver Figura 21, para abrir el módulo Multi-Image Sparse Points Processing.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

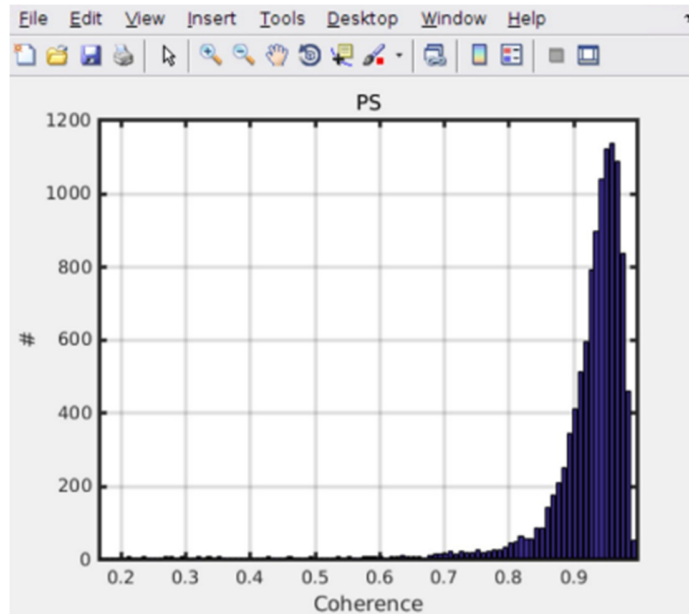


Figura 38. Ejemplo de distribución de la coherencia tras la estimación de la atmósfera APS.

- Se deben seleccionar los Sparse Points. Para ello, como “Parameter” de filtro se ha escogido “Amp. Stab. Index 1- sigma/mu” con un umbral “Thresold” de 0.85.

Step 3-2: select points

Choose “amplitude stability index” and put down “0.69” as the selection threshold.

Click “go” to count the points. These are

Figura 39. Panel del procesado Multi-temporal (Multi-Image Sparse Points Processing).

- Luego se selecciona Sparse Points Processing (procesamiento de puntos dispersos) “Plot Hist” para así verificar los histogramas de coherencia temporal de todos los puntos después de la estimación de parámetros y la eliminación de APS.
- Luego se selecciona “Plot Param,” para visualizar los parámetros estimados en el modelo.
- La velocidad estimada y el desplazamiento acumulado para los puntos seleccionados.

Teniendo en cuenta que de nuevo el pico de histograma está en cero, lo que significa que la mayoría de los puntos tienen una velocidad relativa cero con la referencia punto, lo que indica que el punto de referencia que seleccionamos es más probable que sea estable (Figura 42).

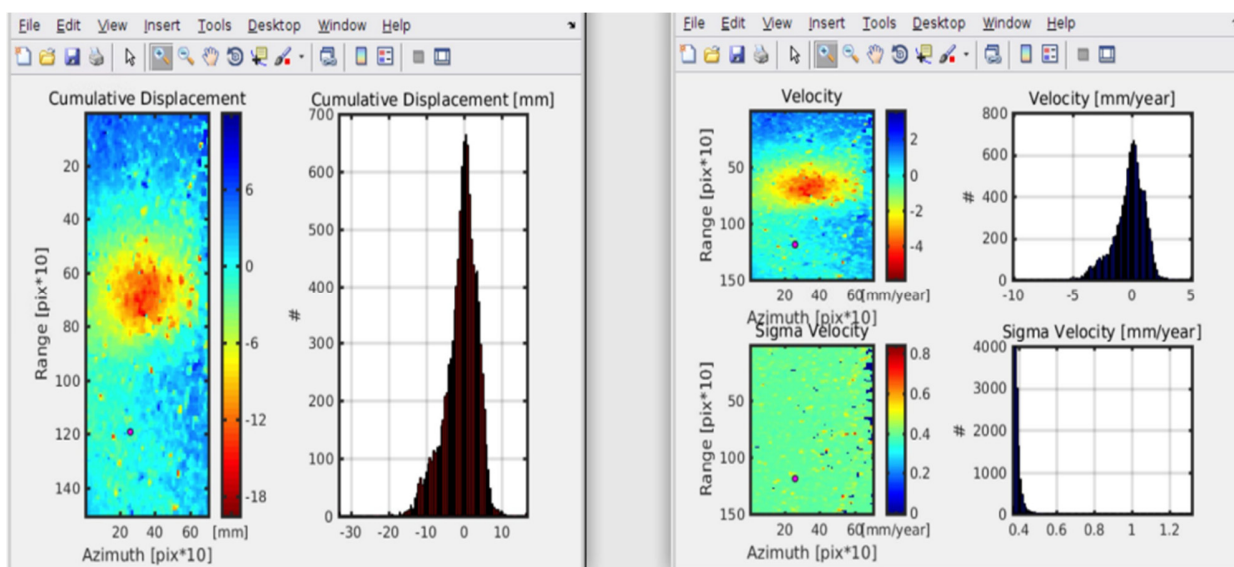


Figura 40. Ejemplo de distribución de la velocidad y el desplazamiento acumulado como parte de los parámetros estimados.

La altura estimada y la altura residual para los puntos seleccionados. Hay que tener en cuenta que de nuevo el pico del histograma de altura residual está en cero, lo que significa que la mayoría de los puntos tienen una altura residual relativa cero con el punto de referencia, lo que indica que el punto de referencia se encuentra en el suelo.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

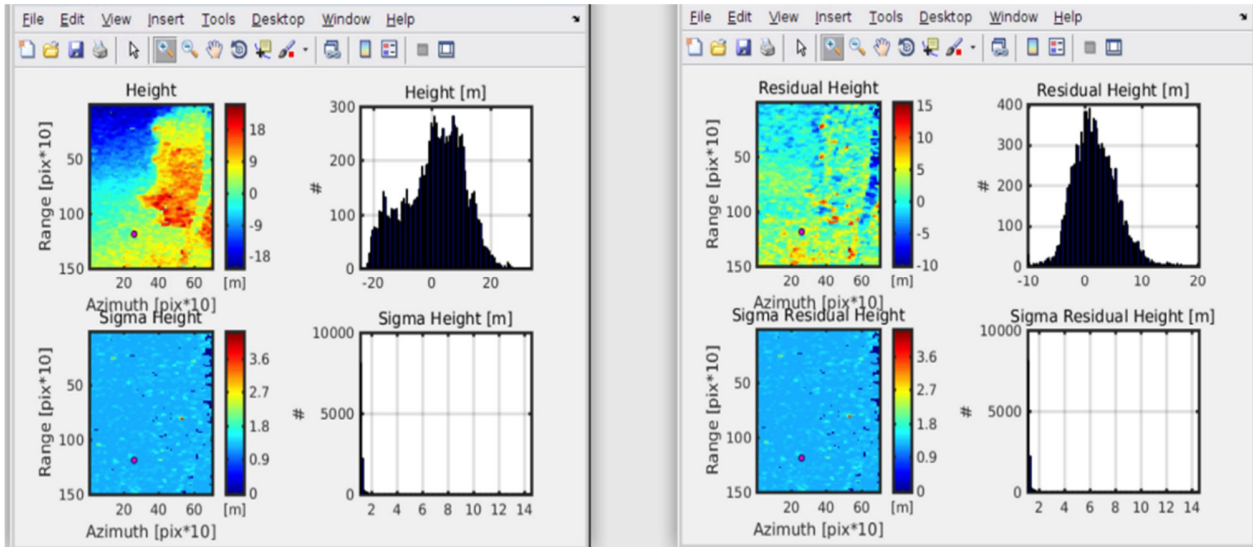


Figura 41. Ejemplos de la distribución de la altura y residuos de la altura como parámetros estimados en el procesado multi-temporal.

Seguidamente se selecciona “plot coher”, para así poder comprobar la coherencia temporal de los puntos seleccionados. Cuanto mayor sea la coherencia temporal, mejor será los parámetros estimados y el APS.

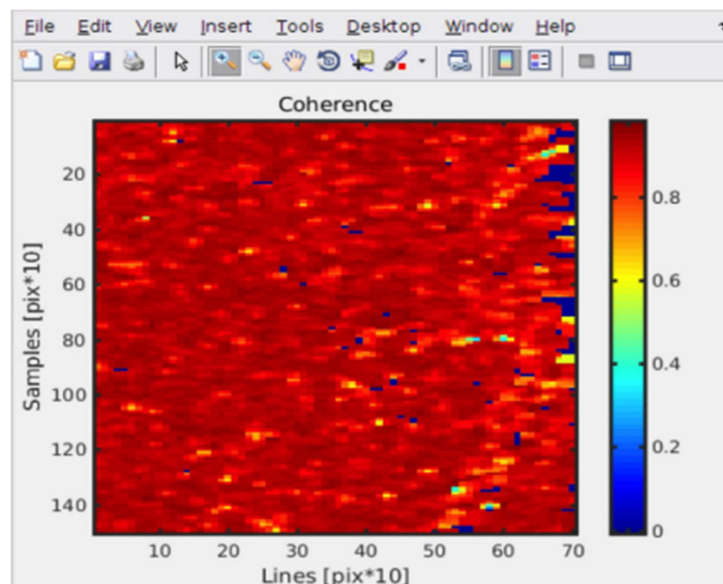


Figura 42. Ejemplo de la distribución de la coherencia tras el procesado multi-temporal.

5. Resultados Obtenidos

Una vez procesadas y analizadas las imágenes adquiridas por Sentinel-1 en la Costa Oriental y la segunda zona de estudio en la Costa Occidental de la Cuenca del Lago de Maracaibo, se logró obtener los resultados que nos permiten evaluar de manera precisa si el proceso de extracción de petróleo en la Cuenca del Lago de Maracaibo, se lleva a cabo de forma continua y comprender las deformaciones presentes en el terreno, tanto en términos de desplazamientos verticales y horizontales, como en relación a las infraestructuras existente en los campos petroleros y cercanías. En particular, analizar cómo estas deformaciones podrían afectar tanto a nivel de desplazamientos como a las propias infraestructuras.

En estos resultados, se destaca especialmente las imágenes de reflectividad en ambas direcciones de visión (LOS) las cuales permiten distinguir con claridad los componentes estructurales de las instalaciones de extracción de petróleo. Basándonos en estos resultados, se obtiene mediciones precisas a través de los puntos de referencia persistentes (PS), lo cual constituye un valioso aporte para el desarrollo y conclusión exitosa de esta investigación.

5.1 Resultados de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Imágenes Ascendentes y Descendentes

Los análisis de las series temporales y sus resultados es posible dividirlos en 2 secciones, la primera relativa a las tasas de deformación generadas con el procesamiento y la segunda con la interpretación de los resultados en función del fenómeno que se está analizando, esto es la deformación generada con motivo de la explotación de petróleo en dicha zona.

El primer producto que se obtiene son las imágenes de reflectividad (Figura 45), en las dos direcciones de visión (LOS), en donde se puede observar con claridad como se diferencian. Obteniéndose así el mapa de velocidades medias de la deformación en dirección LOS ascendentes y descendente, lográndose observar un mapa de deformación con una tasa de velocidad hasta -50 mm/año (Figura 46-47).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

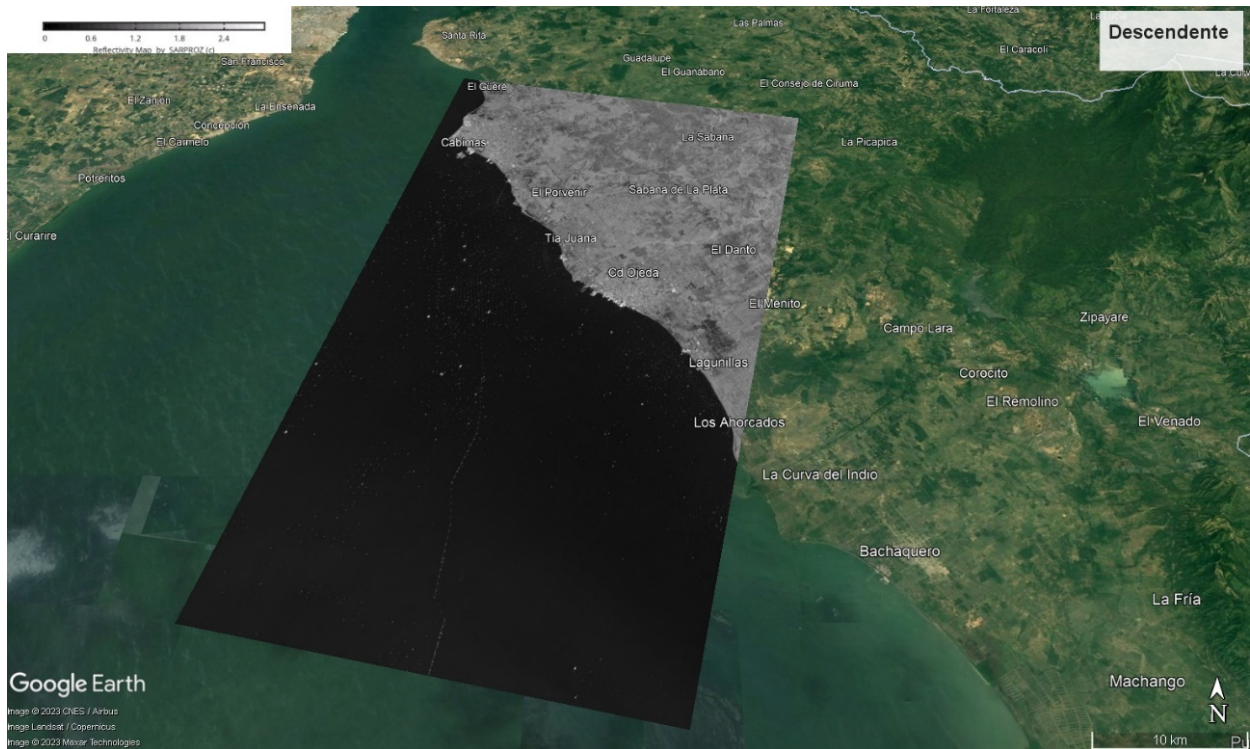
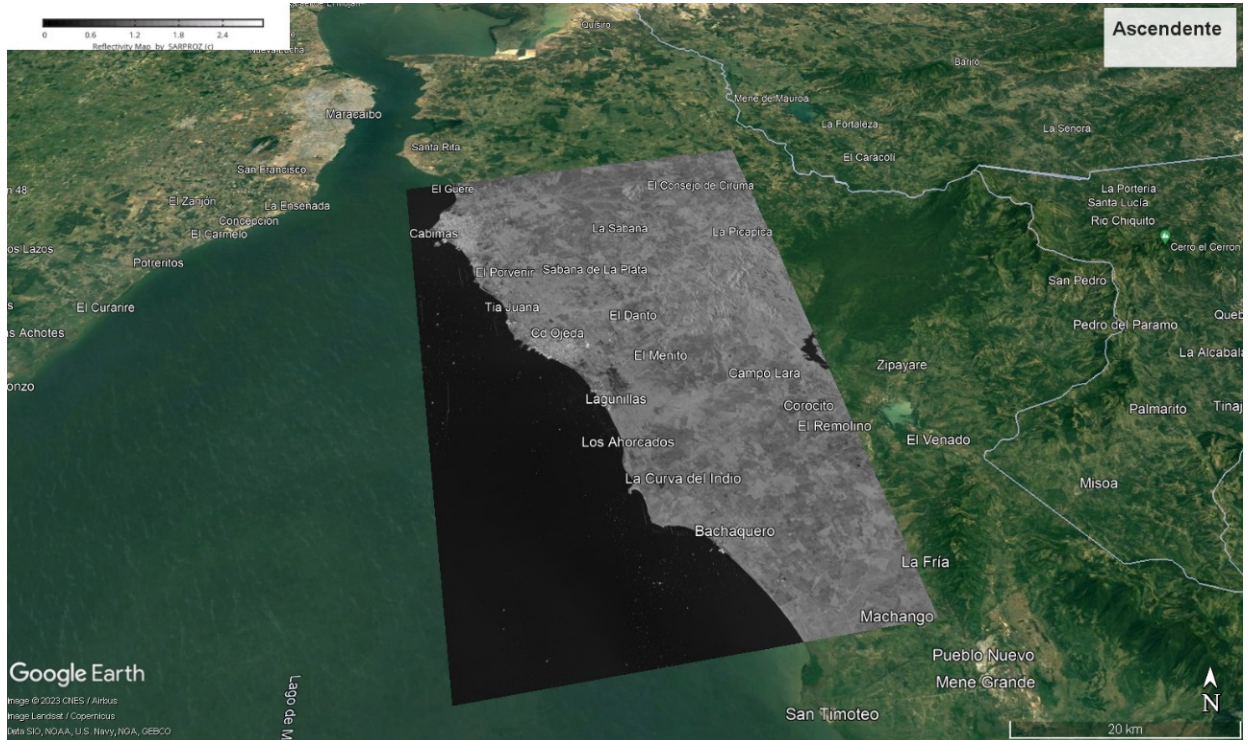


Figura 43. Mapas de reflectividad ascendente y descendente de la zona Oriental del Lago de Maracaibo.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

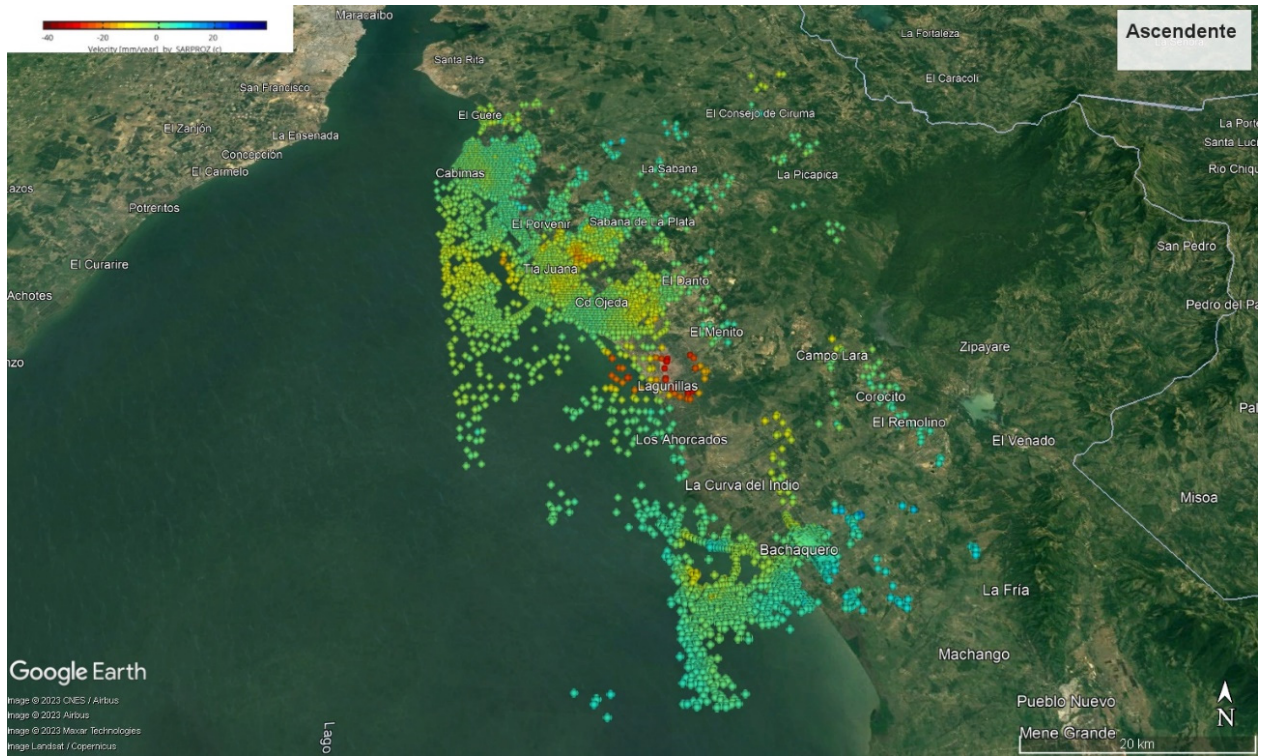


Figura 44. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.

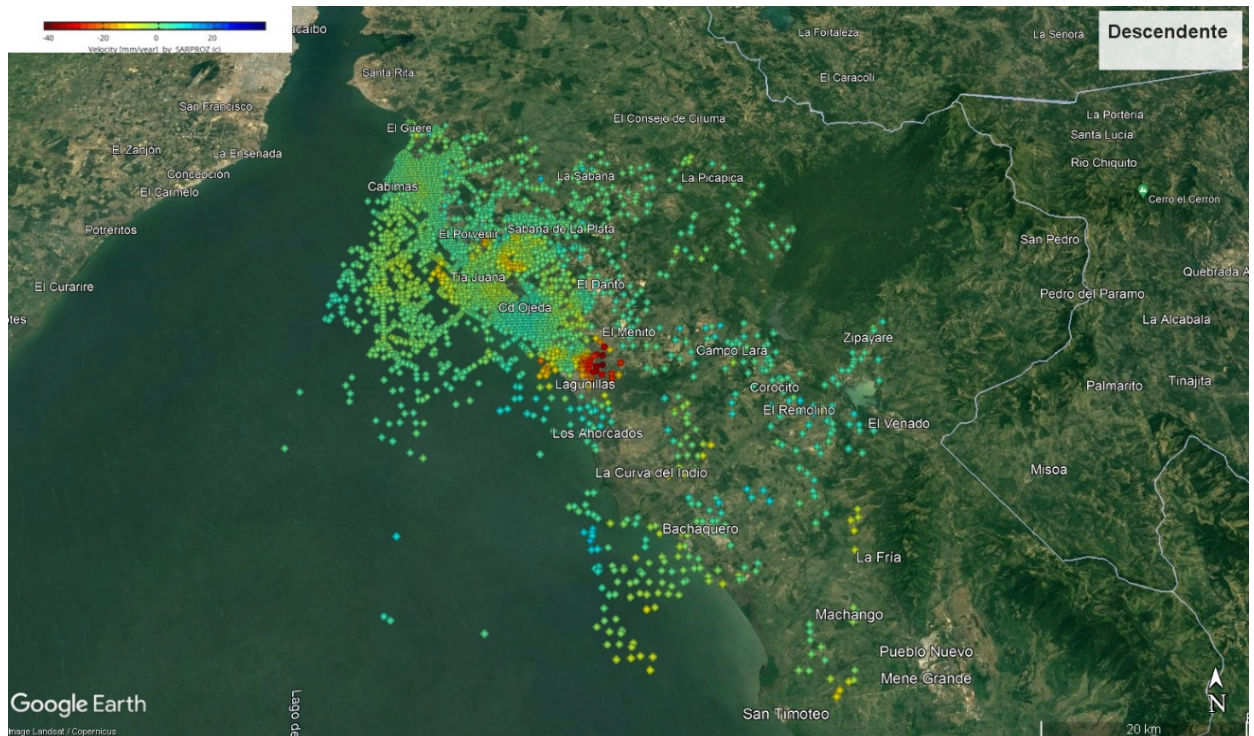


Figura 45. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.

Conforme a lo observado en los resultados de las Figuras 46-47, se interpretó a partir de imágenes de Google Earth, que las instalaciones relacionadas con el petróleo (principalmente estaciones de extracción y almacenamiento), se construyeron sobre las áreas donde se detectaron subsidencias. Por lo tanto, se infirió que existía una alta asociación entre la actividad de operación del campo petrolero y la deformación del terreno.

Para finalizar, se realizó el procesamiento de la descomposición del movimiento del terreno tanto en la órbita ascendente como en la órbita descendente, y de esta manera, obtener los siguientes resultados tras combinar ambas perspectivas. Se analizó, desde una perspectiva dinámica posicional, y desde una perspectiva cinemática, la velocidad que presentan las deformaciones:

- Desplazamiento acumulado en la dirección Este-Oeste con una escala entre -80mm y 80mm. De esta forma, se observó que, a lo largo de todo el período de adquisición de las imágenes, el área al Oeste que debería mostrar alto número de puntos rojos en el análisis, la alta velocidad y la densa vegetación en la zona provocan una coherencia baja en los datos. No obstante, se destaca como la región con el mayor nivel de subsidencia.
- Estos desplazamientos son el producto del fenómeno de subsidencia en la Costa Oriental (Figura 48).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

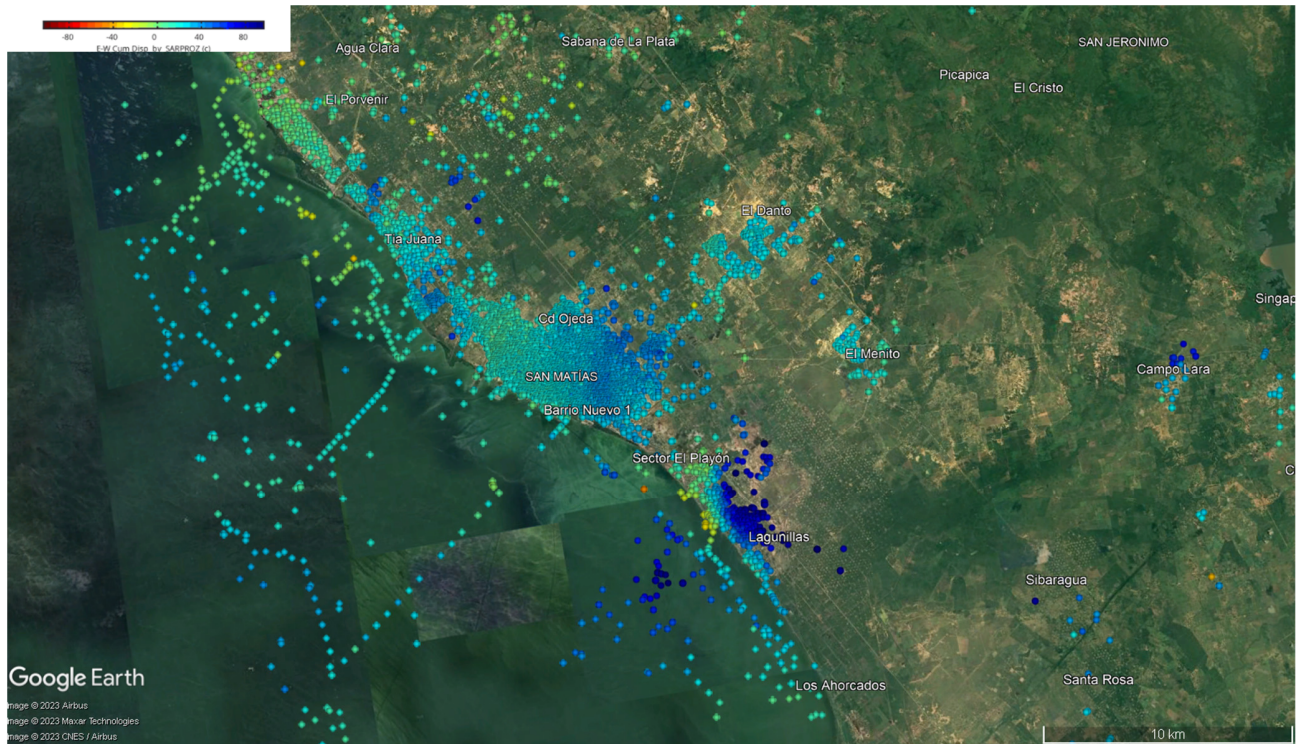


Figura 48. Deformación acumulada en la dirección E-W de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo.

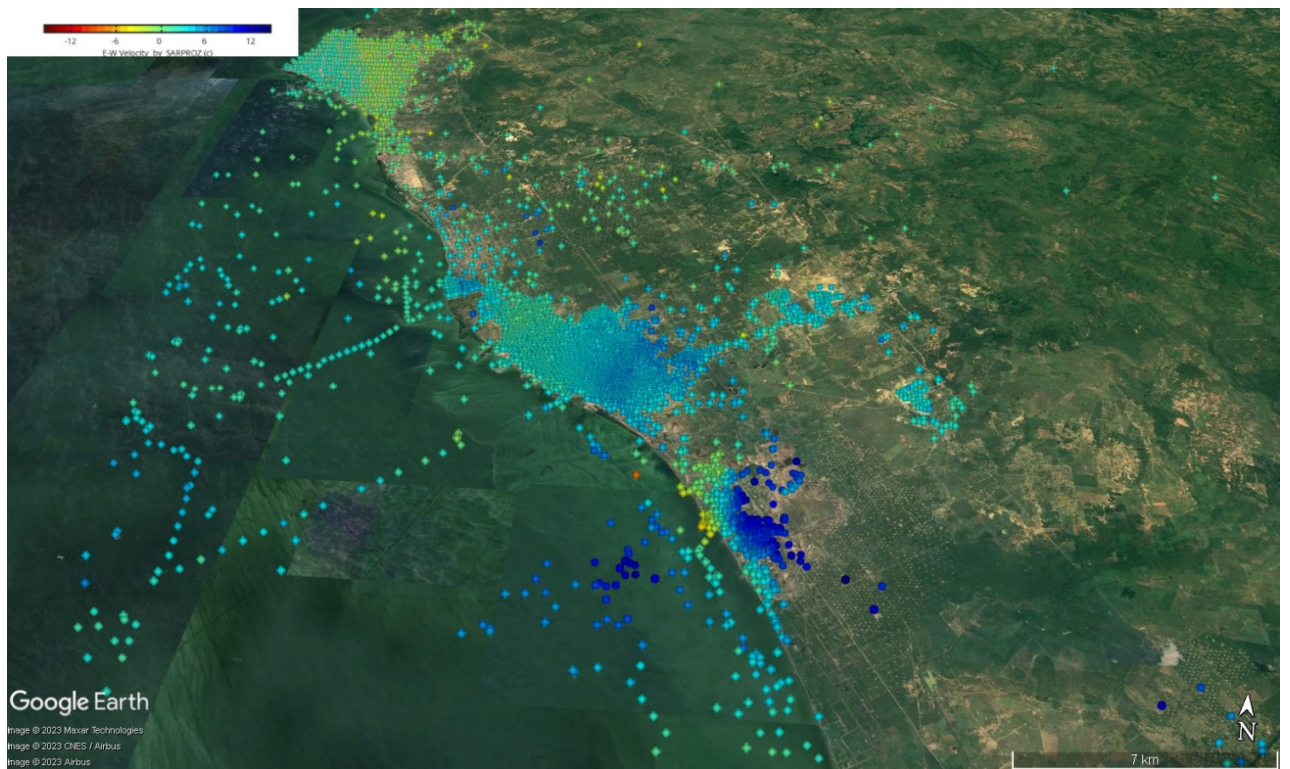


Figura 49. Velocidad media en la dirección E-W de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo realizado con el software SARPROZ.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

- Desplazamiento acumulado en la vertical es decir variaciones de cota de terreno lo que demuestra claramente el fenómeno de las subsidencias en los campos petroleros de Tía Juana y Lagunillas, con valores de más de -30 cm en 6 años. Este desplazamiento vertical del terreno afecta claramente a los reservorios petroleros y a las propias infraestructuras (Figura 50).

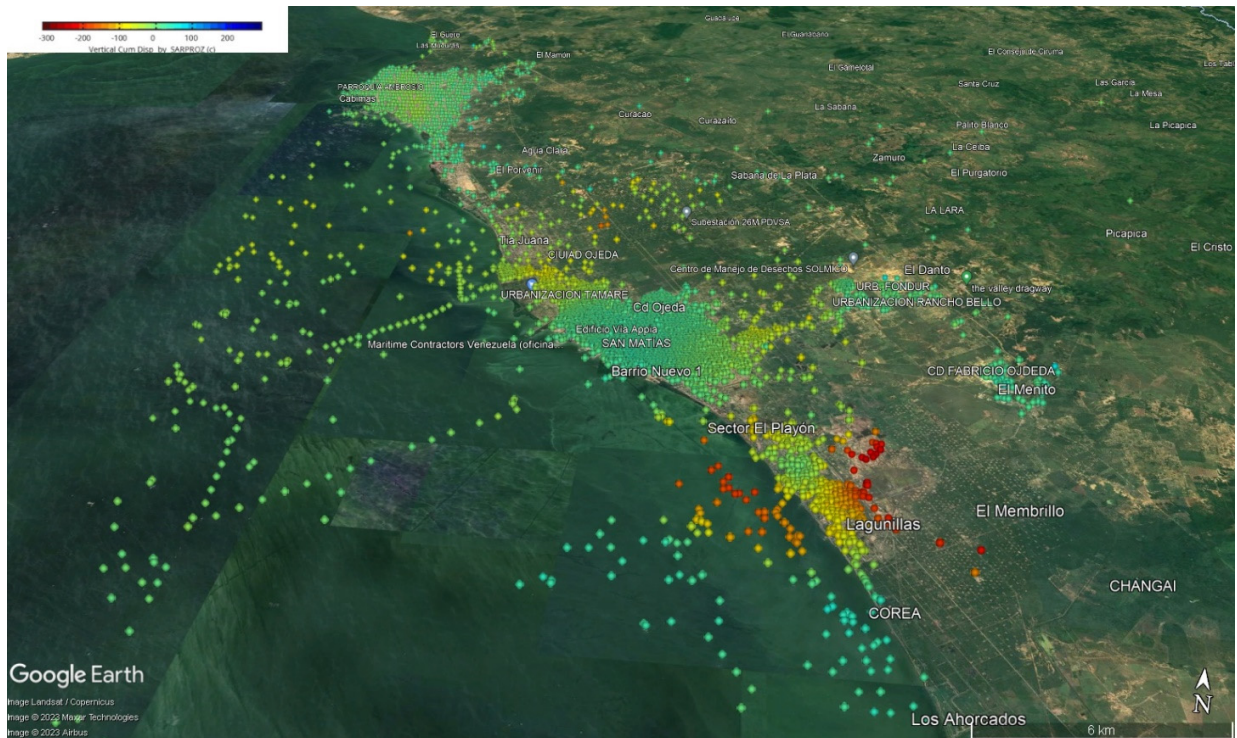


Figura 46. Deformación acumulada en la vertical de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo realizado con el software SARPROZ.

En resumen, la Figura 50, se logra distinguir donde se han encontrado los principales focos de subsidencias. Considerando el campo petrolero de Tía Juana y Lagunillas, donde actualmente se encuentran funcionando las plantas de producción y extracción de petróleo. Encontrando valores de una tasa de velocidad de hasta -40 mm/año.

Continuando con el análisis de los resultados (Figura 51), se muestra que el campo petrolero de Lagunillas es una de las zonas donde se está produciendo mayor subsidencia en relación con las evidencias sobre el terreno. De forma preliminar, tras observar estos resultados se puede deducir que la extracción de petróleo está generando una subsidencia, es decir, el terreno se está hundiendo

dato que el reservorio se va vaciando. Siendo la zona donde hay mayor concentración de puntos rojos ubicados en instalaciones de plantas extracción del crudo.

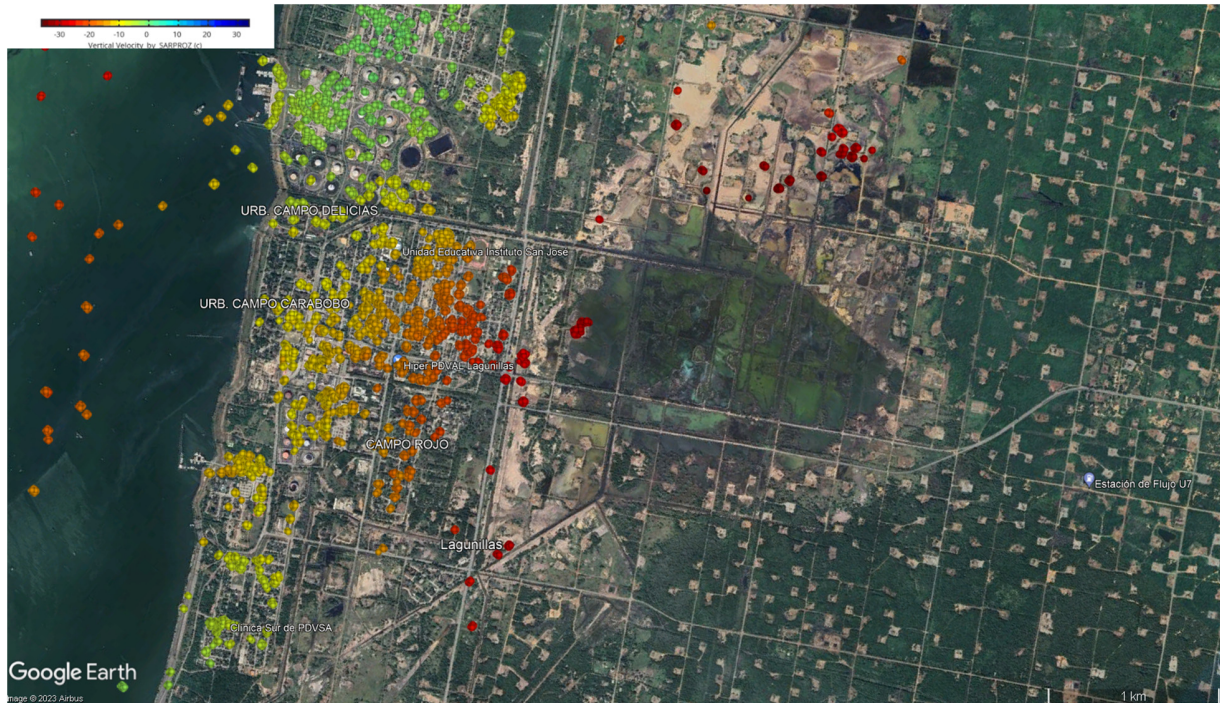


Figura 47. Velocidad Vertical del Campo Petrolero Lagunillas, en la Costa Oriental del Lago.

Por último (Figura 52), del campo petrolero Tía Juana, se observa una menor tasa de velocidad, pero es una zona de interés ya que cuenta con los yacimientos más importantes en la cuenca del Lago de Maracaibo, conteniendo el 70% de las reservas y en donde se han estimado unas velocidades medias en torno a -30 mm/año.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO
EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

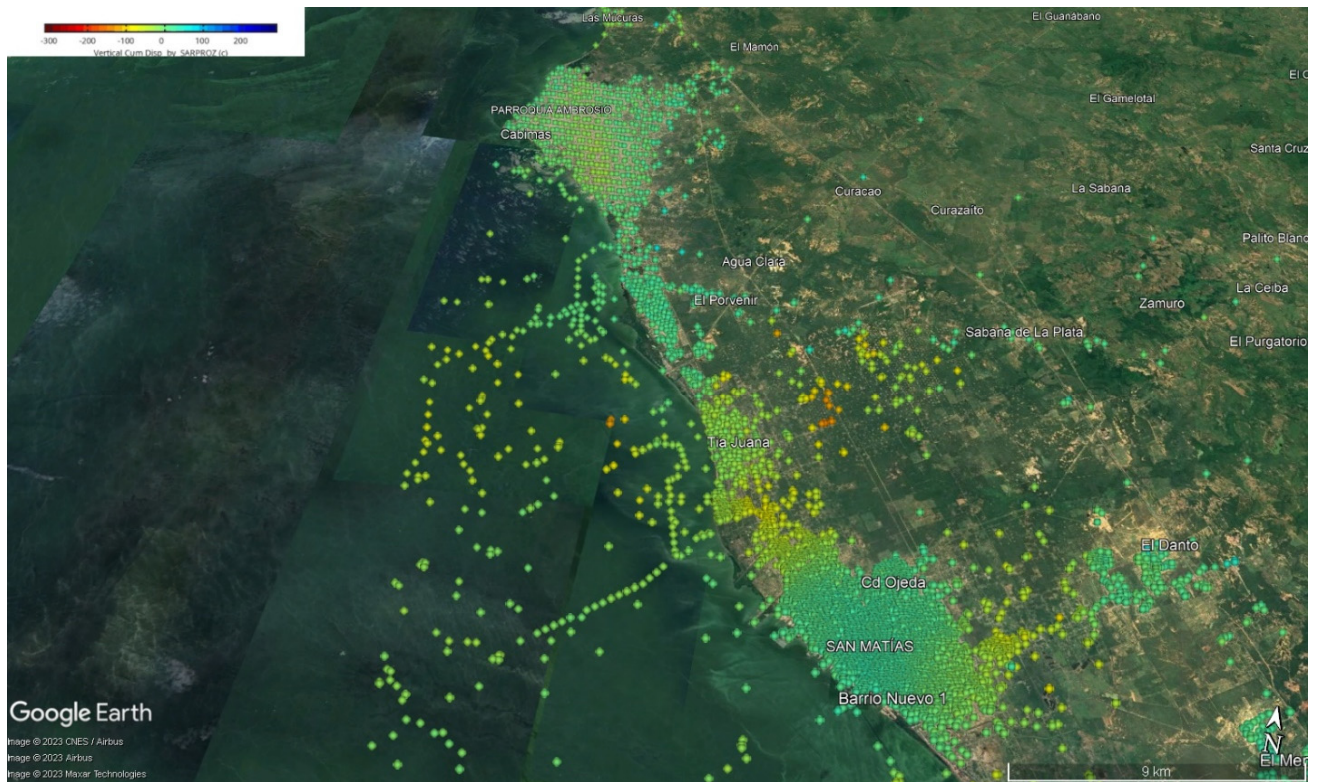


Figura 48. Deformación Vertical acumulada en el Campo Petrolero Tía Juana de la Costa Oriental del Lago.

Con el fin de obtener una comprensión más detallada de cómo la subsidencia está afectando al terreno y a los elementos presentes, se exportan todos los datos al formato KMZ. De esta manera, se puede visualizar la subsidencia en Google Earth y analizar puntos críticos de interés.

Para evaluar los efectos de la subsidencia, se procede al análisis de los siguientes aspectos, centrándose en el desplazamiento acumulado a lo largo de toda la serie temporal, y se identifican puntos en el terreno donde se observan los máximos desplazamientos acumulados.

A continuación, se pueden observar los puntos sobre el terreno con máximos desplazamientos acumulado (dirección LOS) que se producen con una magnitud en la serie temporal de unos -230 mm (Figura 53).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

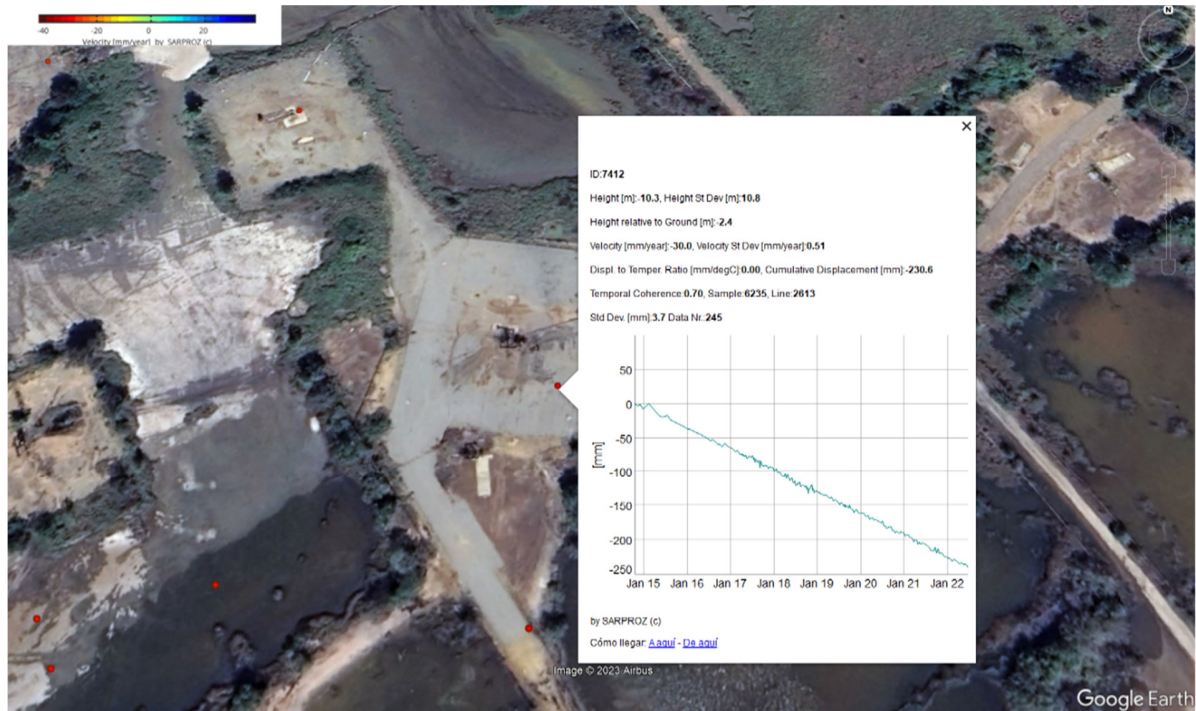


Figura 49. Campo de extracción Tía Juana en dirección ascendente (Velocidad media LOS).

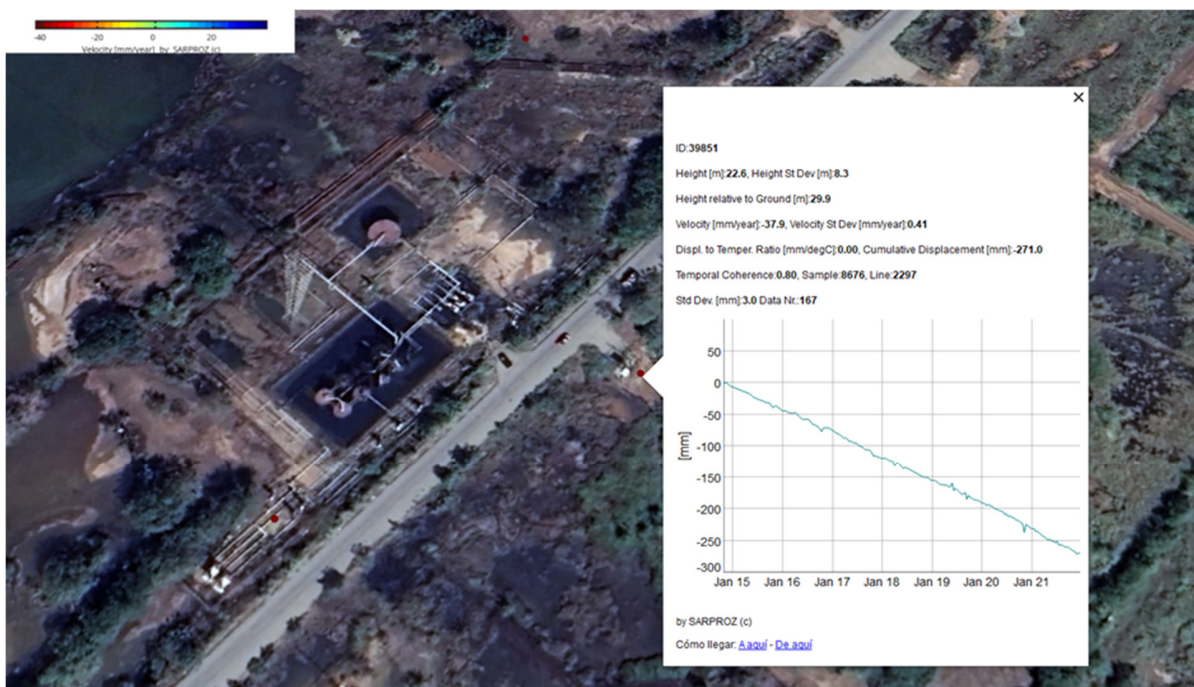


Figura 50. Campo de almacenamiento de Crudo en dirección descendente (Velocidad media LOS).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

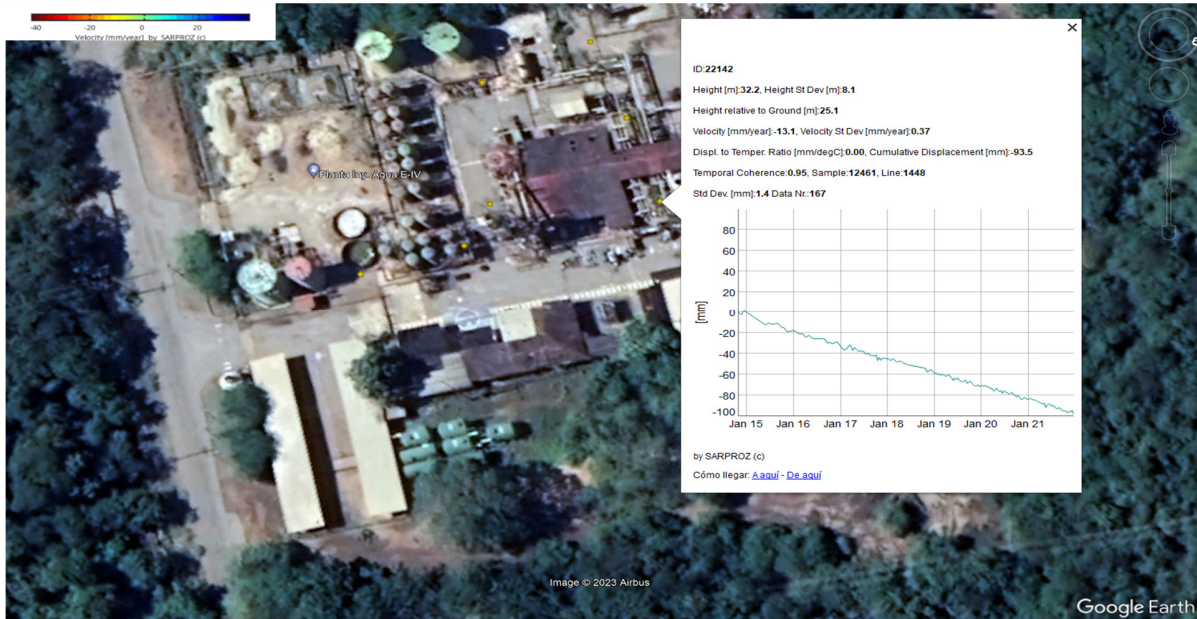


Figura 51. Planta de tratamiento en el Campo Petrolero Tía Juana en dirección descendente. (Velocidad media LOS).

5.2 Resultados de la Costa Occidental del Lago de Maracaibo, Imágenes Ascendentes y Descendentes.

A continuación, se presentarán los resultados realizados en la Costa Occidental, donde se puede evidenciar en la (Figura 56) puntos de color azul, lo que indica elevación en la zona Centro de Maracaibo, y por otra parte en la ciudad de Santa Rosa de tierra más a la costa del Lago, se presenta hundimiento de hasta 30mm (Figura 55).

Al igual que en el procesamiento de la Costa Oriental, se obtiene la imagen de reflectividad, lo cual nos permite observar que cuenta con una gran cantidad de puntos de referencia estables (PS). Estos nos brindan la oportunidad de estudiar las posibles deformaciones (Figura 56-57).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

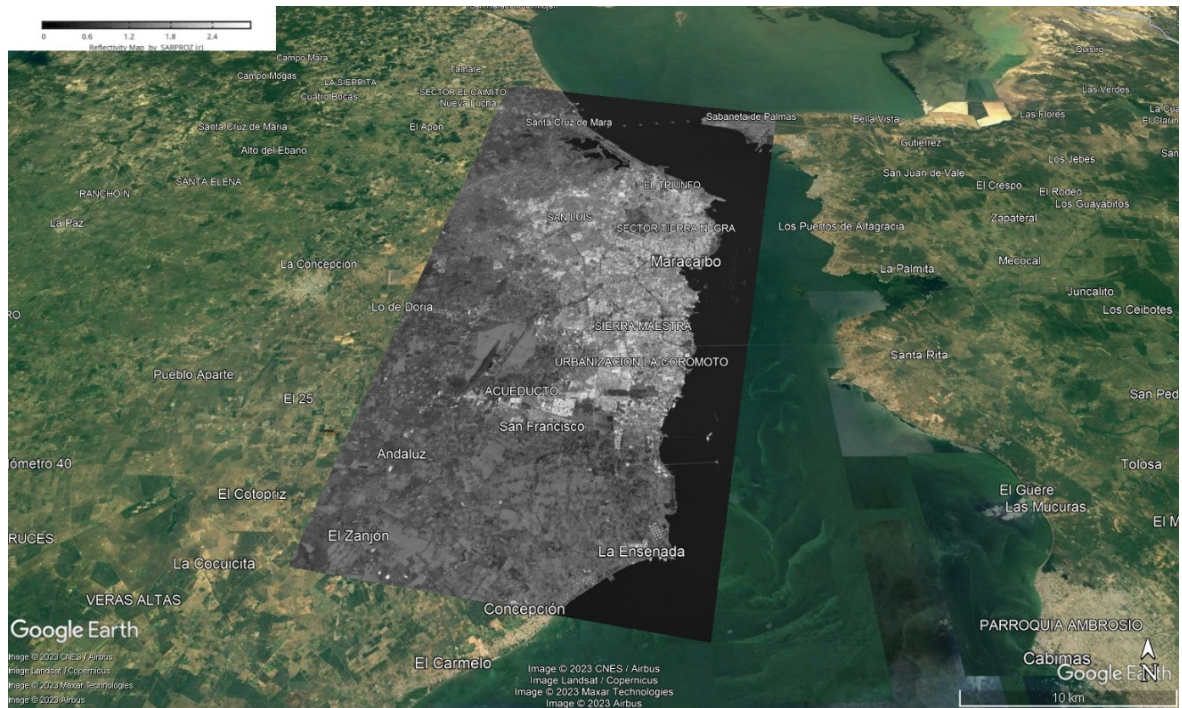


Figura 52. Mapa de reflectividad de la Costa Occidental en la Cuenca del Lago de Maracaibo en dirección descendente.

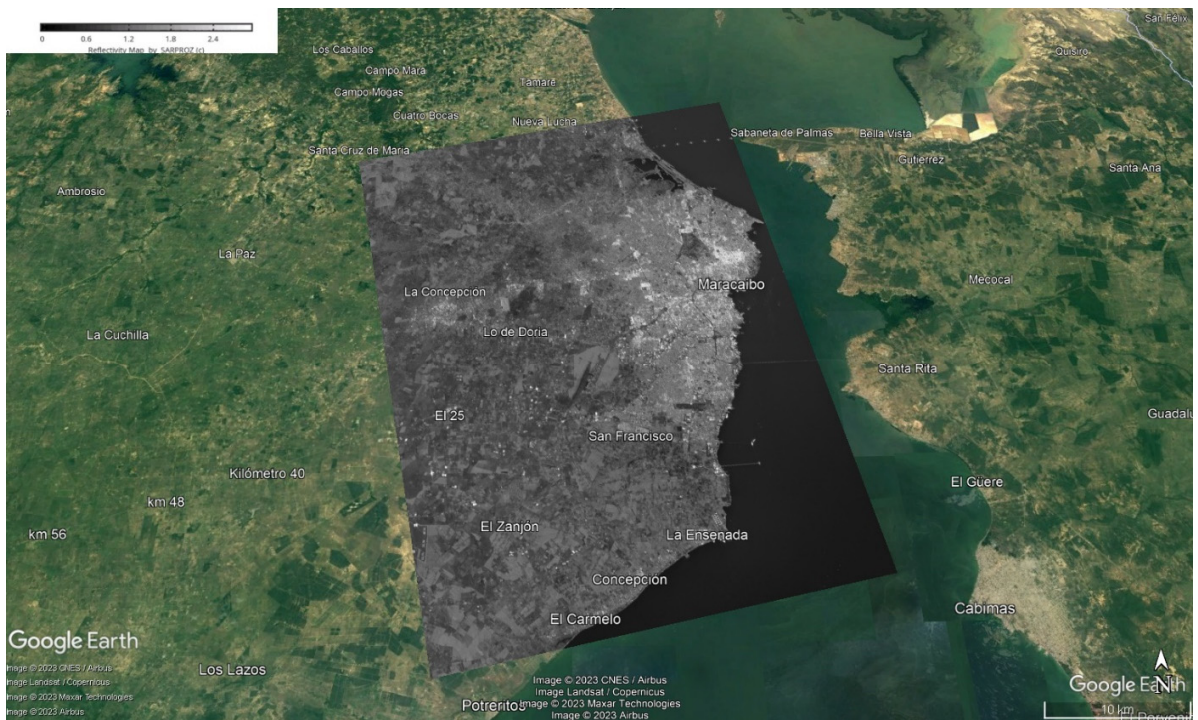


Figura 53. Mapa de reflectividad de la Costa Occidental en la Cuenca del Lago de Maracaibo en dirección ascendente.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

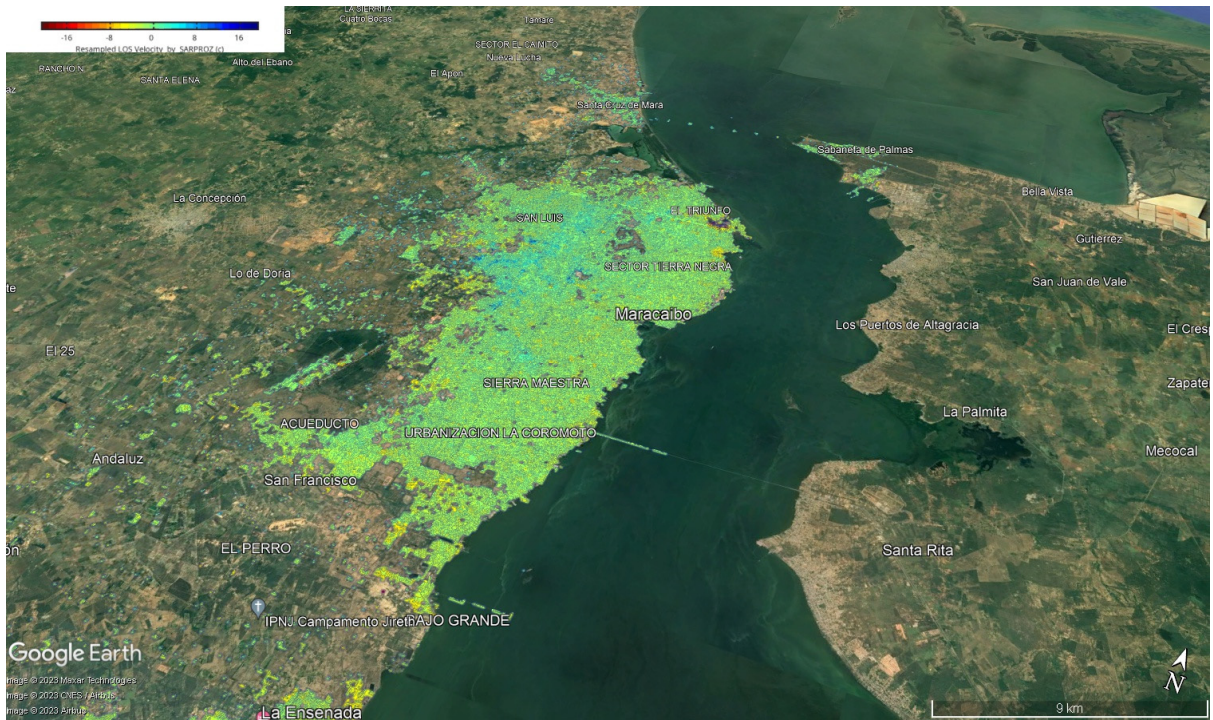


Figura 54. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.



Figura 55. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en los resultados obtenidos para la Costa Oriental de la Cuenca del Lago de Maracaibo.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

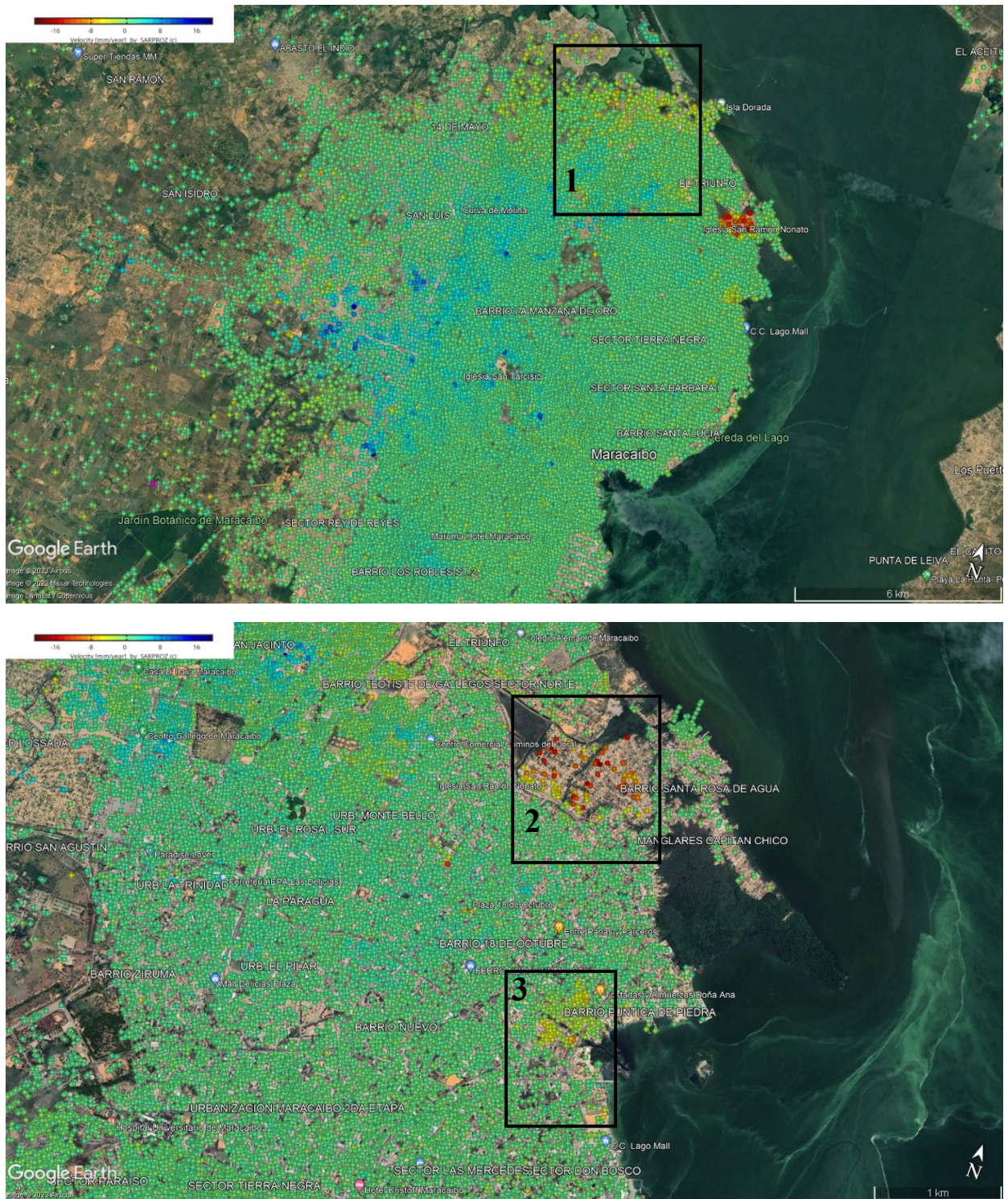


Figura 56. Zonas con subsidencias en la Costa Occidental, ciudad de Maracaibo, Zulia (Velocidad media LOS).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

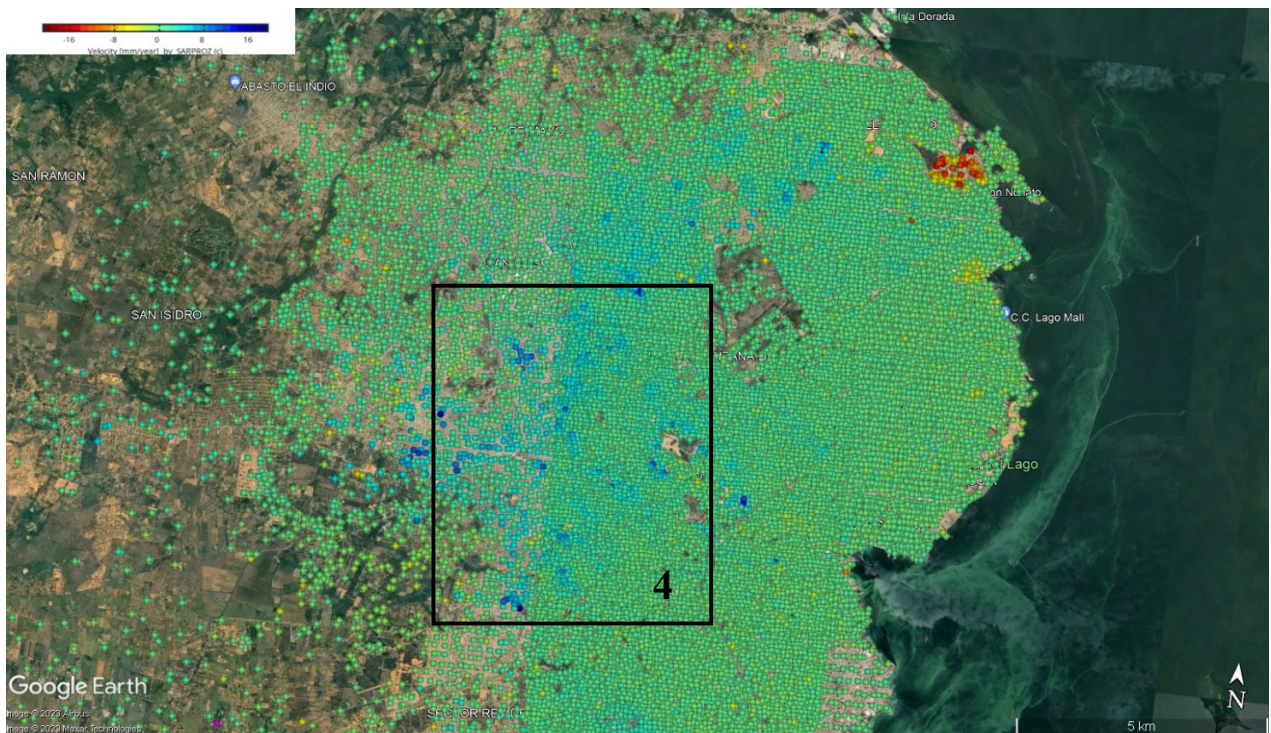


Figura 57. Zonas con elevaciones en la Costa Occidental, ciudad de Maracaibo, Zulia (Velocidad media LOS).

En los resultados de la zona de la Costa Occidental se puede observar claramente dos tendencias (Figura 60-61). En el análisis realizado, se ha identificado un conjunto de Puntos de Referencia (PS) que exhiben una tendencia de hundimiento. Estos PS se encuentran agrupados en áreas urbanas próximas al lago, pero debido a la limitada disponibilidad de datos en dicha zona, no es posible afirmar de manera concluyente que su deformación esté directamente relacionada con la actividad de extracción de petróleo. Asimismo, se ha observado una significativa elevación en gran parte del centro de Maracaibo, lo cual ha sido identificado como una zona anómala en el estudio realizado.

No obstante, es necesario realizar un análisis más profundo e incorporar información adicional para comprender en mayor medida las causas subyacentes de estas deformaciones y su posible vinculación con la actividad petrolera en la zona de estudio (Figura 62).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

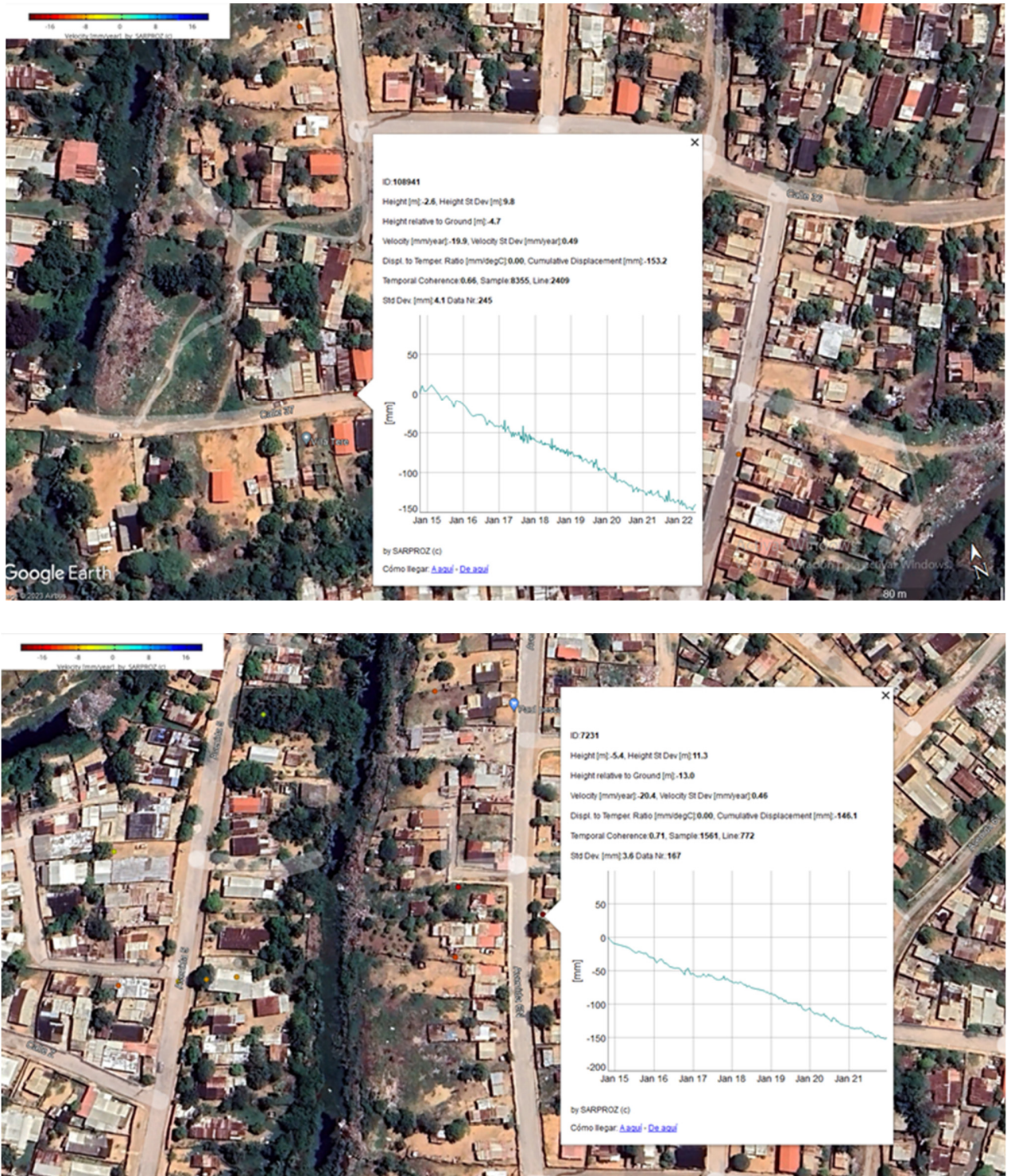


Figura 58. Localización de las subsidencias en la costa Occidental de la ciudad de Maracaibo, en dirección descendente y ascendente.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES



Figura 59. Elevaciones del terreno en dirección ascendente, en la ciudad de Maracaibo, Zulia.

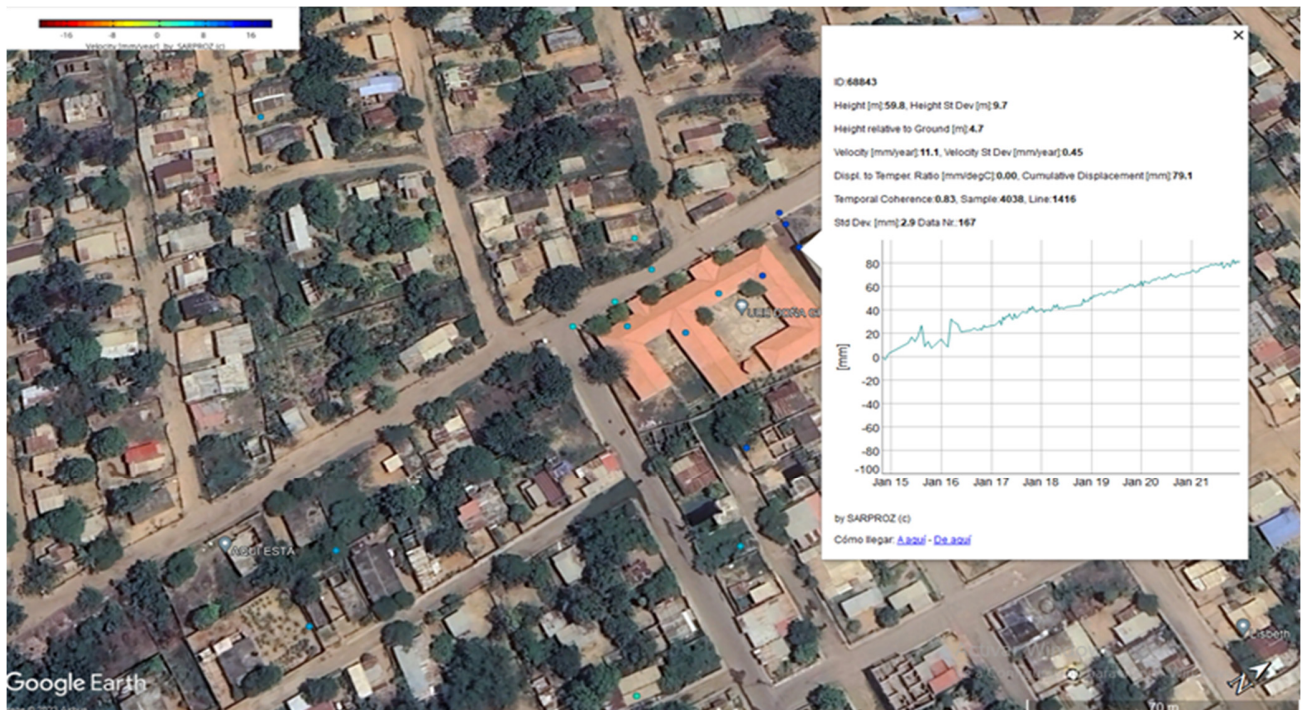


Figura 60. Localización de elevaciones del terreno en el centro educativo Graciela Rincón de la Ciudad de Maracaibo, Zulia.

Además de los resultados obtenidos en esta investigación, se logró analizar el estado del Puente General Rafael Urdaneta, el cual tiene como objetivo principal la conexión de Maracaibo con el resto del país. Este puente no solo ostenta el título de ser el más largo de Latinoamérica, sino que también se encuentra entre los más grandes a nivel mundial en su categoría. Al realizar este análisis, se logró resaltar la importancia de la técnica de Interferometría de Apertura Sintética (InSAR) como una herramienta de gran potencial en el ámbito de la ingeniería civil. Arrojando resultados positivos en cuanto a estabilidad de la estructura (Figura 69).

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES



Figura 61. Mapa de reflectividad Puente General Rafael Urdaneta, sobre el Lago de Maracaibo en dirección ascendente.

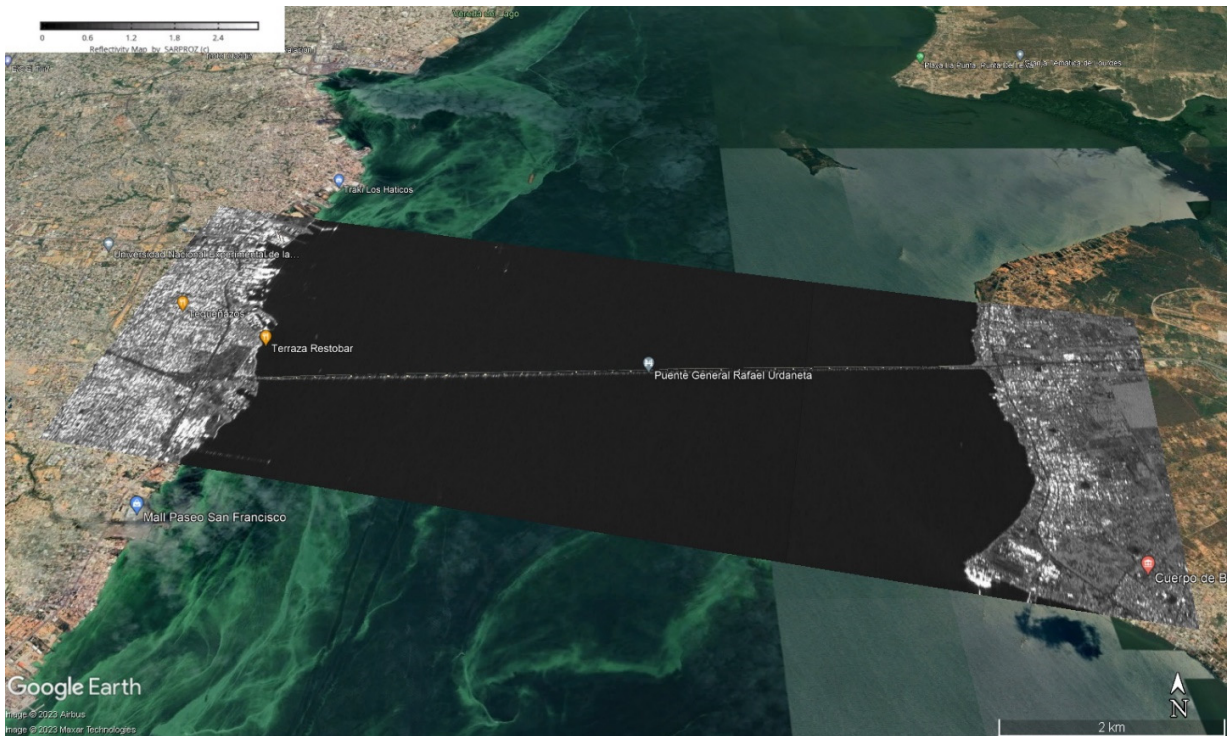


Figura 62. Mapa de reflectividad Puente General Rafael Urdaneta, Maracaibo en dirección descendente.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

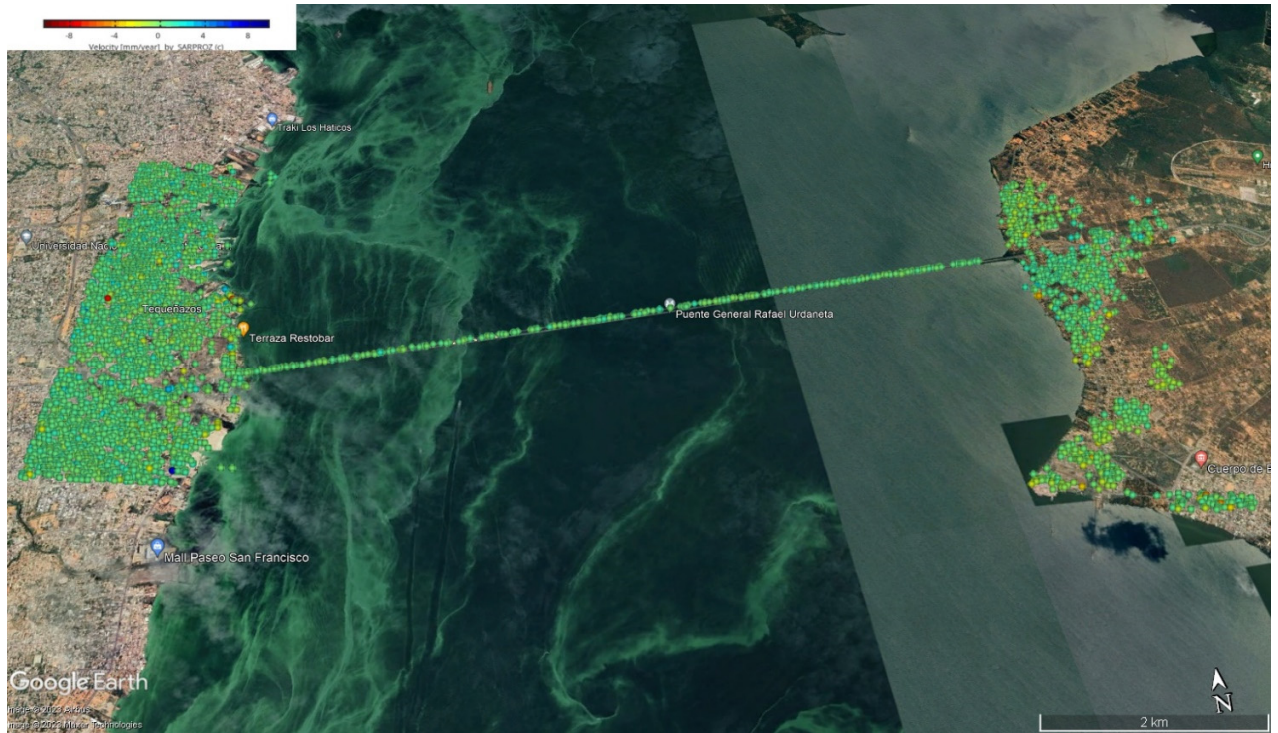


Figura 63. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión descendente en el Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.

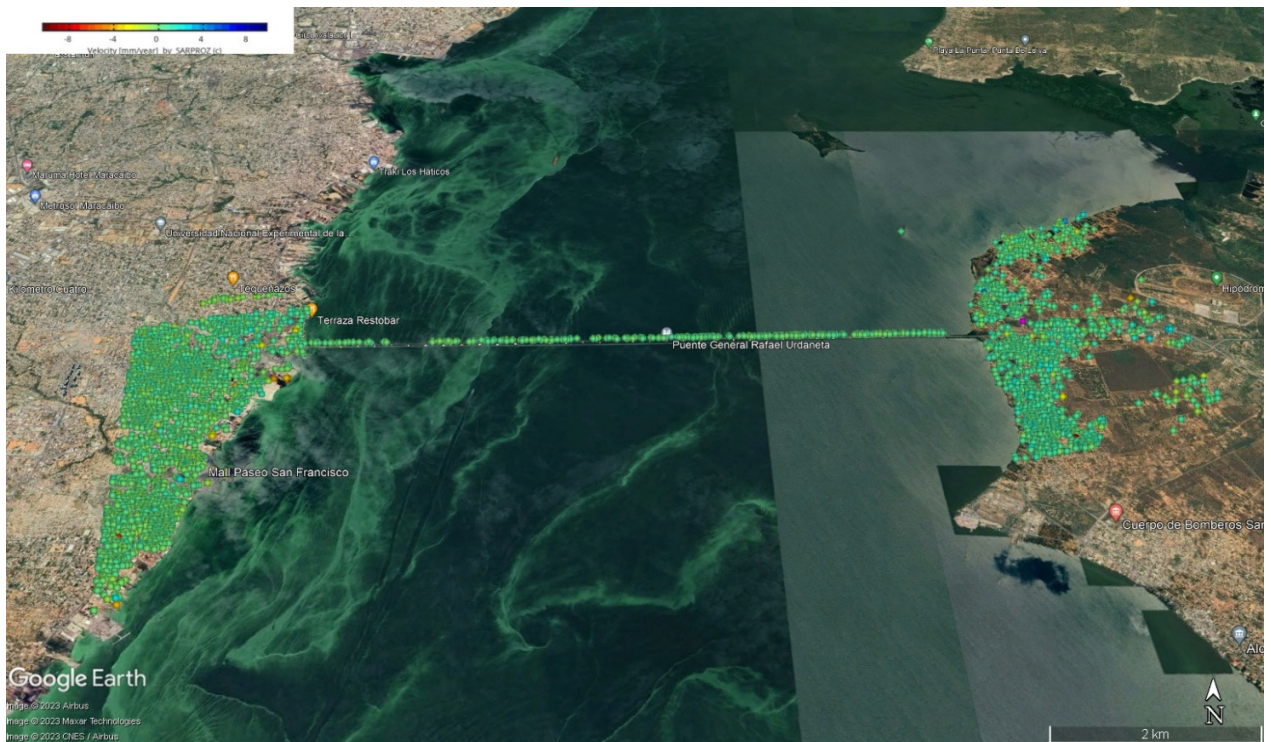


Figura 64. Mapa de velocidad media de la deformación en la dirección de visión ascendente en el Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

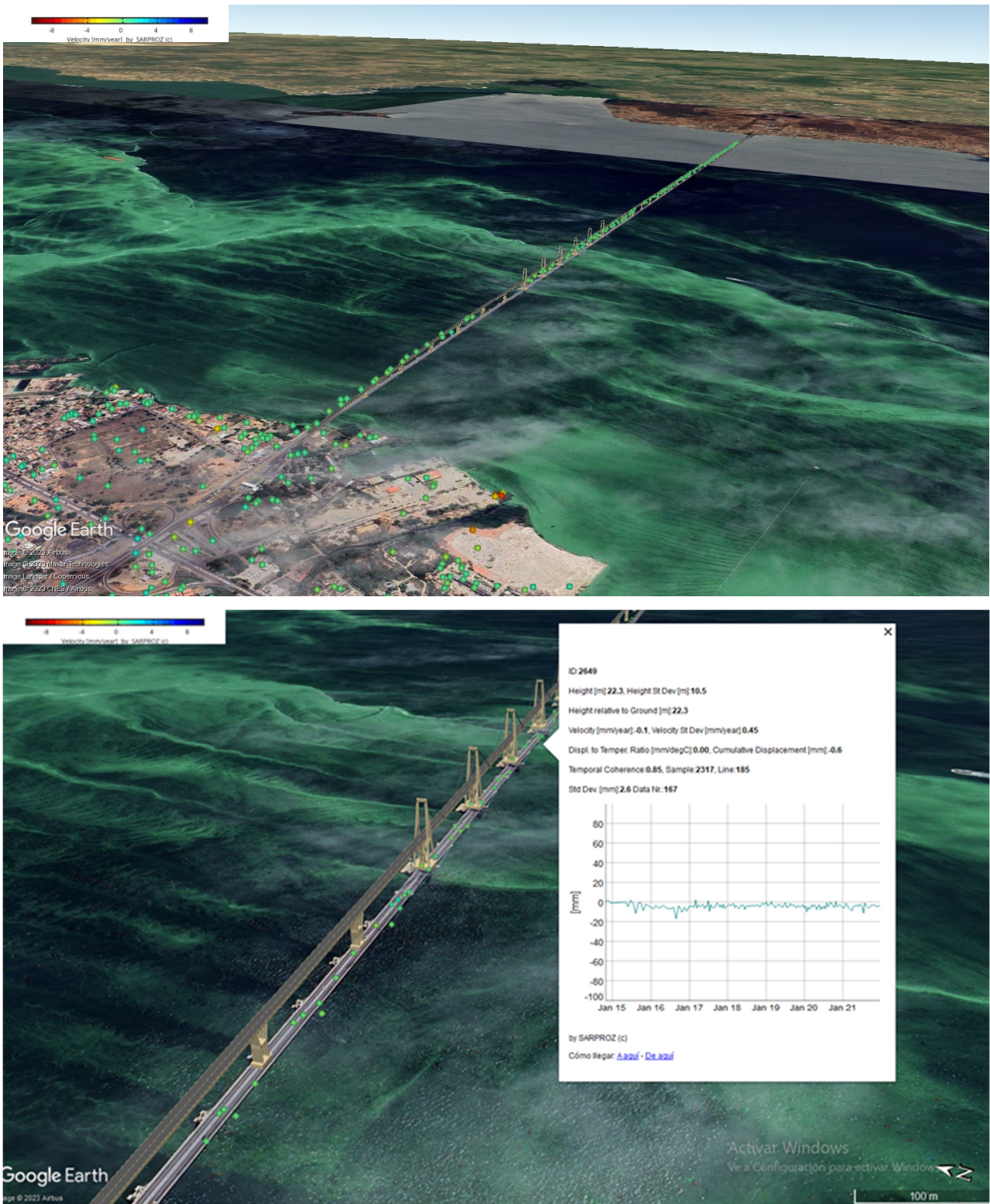


Figura 65. Resultados de la velocidad media en la dirección de visión LOS, del Puente Rafael Urdaneta sobre el Lago de Maracaibo.

6. Discusión

En el análisis de las imágenes de los resultados confirman subsidencias presentes en la Cuenca del Lago de Maracaibo obteniendo una clara diferenciación en cuanto a la dirección de las deformaciones. En primer lugar, en la Costa Oriental, se identificó una concentración significativa de PS en el Campo Lagunillas, indicando un hundimiento considerable en gran parte del área a diferencia de los otros campos petroleros adyacentes. En su desplazamiento de más de 5 mm/año que en el período de estudio 2015-2022 son subsidencias acumuladas del orden de 30 cm, y elevaciones del terreno que superan los 20 cm/año en la región central de la Ciudad de Maracaibo, las variaciones de las deformaciones ya muestran cambios significativos para considerar que la extracción de petróleo está influyendo en el terreno, dado que los valores máximos en lo que se presentan los máximos desplazamientos y velocidades se localizan en los campos petroleros de extracción.

Tal como se mencionó en el apartado 1, existen trabajos previos los cuales se presentarán los resultados obtenidos, con distintas técnicas, esto servirá para dar una mayor afirmación a los resultados de este estudio con los de la investigación realizada por (Deguchi y Narita, 2015). En el análisis del modo de observación de Fine-Beam, se procesaron un total de 96 combinaciones DInSAR utilizando los datos de 21 imágenes. Donde los autores aplicaron la medición del desplazamiento vertical mediante InSAR utilizando datos PALSAR obtenidos en el modo de observación Fine-beam y ScanSAR.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES

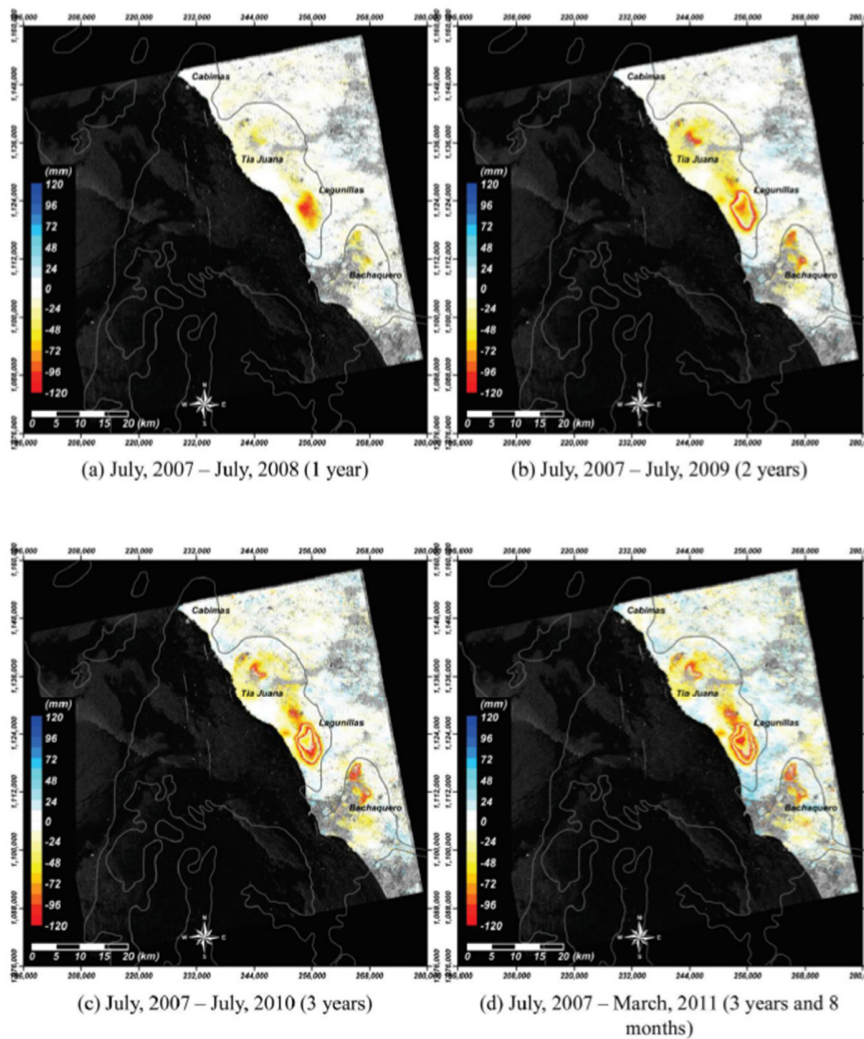


Figura 66. Resultados de la medición de la deformación vertical en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Fuente: Deguchi y Narita et., (2015).

Como resultado, se pudo confirmar una clara deformación del suelo en los alrededores de tres campos petroleros (Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero) y reconocer fácilmente que las áreas de anomalías la velocidad anual del desplazamiento vertical de la superficie del suelo por el análisis de series de tiempo InSAR fue de -51 mm/año, -103 mm/año y -58 mm/año en los campos petroleros Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero, la mayor tasa de desplazamiento media en la línea la línea de visión fue de aproximadamente -33 mm/año del campo petrolero Bachaquero, aproximadamente -41 mm/año en P08 del campo petrolero Lagunillas y -74 mm/año en P04 del campo petrolero Tía Juana. En los periodos de Julio 2007 a marzo 2011 (Figura 70). Se pueden identificar claramente varias áreas de deformación alrededor de tres campos petroleros (Tía Juana,

Lagunillas y Bachaquero) en el mapa de desplazamiento vertical, así como en los resultados del análisis independiente con el modo de Fine-beam y el modo ScanSAR. Es bastante fácil comprender que las anomalías de fase se han extendido y que el número de franjas interferométricas ha aumentado en función del tiempo. Coincidiendo de cierta manera con nuestros resultados presentados en esta investigación solo que en períodos diferentes de tiempo.

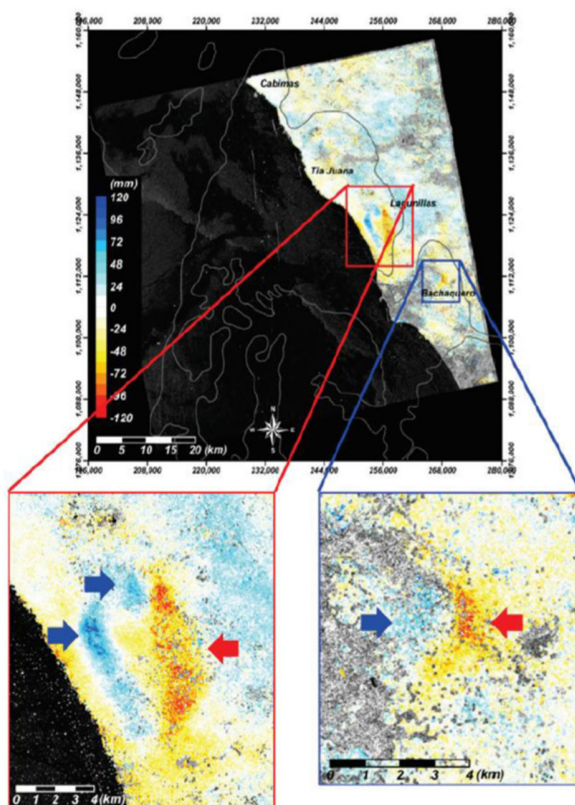


Figura 67. Resultados de la deformación horizontal alrededor de los campos petroleros de extracción Lagunillas y Bachaquero. Fuente: Deguchi y Narita et., (2015).

Posteriormente, se llevaron a cabo trabajos de nivelación y GPS en la investigación realizada por (Henneberg et al., 1980) en su estudio titulado (Investigaciones recientes sobre la subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo). Donde la red de levantamiento de nivelación se había instalado sobre una amplia cobertura de aproximadamente 1.600 km² (longitud total de la línea de levantamiento; aproximadamente 800 km y número de puntos de referencia; aproximadamente 1.600 puntos). Cinco equipos de inspección habían tardado unos tres meses en medir toda la red. El resultado hasta 1986 informó que la cantidad acumulada de hundimiento de la tierra había

alcanzado aproximadamente 5 m y el valor máximo de la superficie la velocidad de hundimiento había sido de unos 20 cm/año. La Figura 72 muestra líneas isométricas de hundimiento de la tierra medidas a partir de un estudio de nivelación superpuesto en el mapa de desplazamiento vertical. El resultado de esta comparación indica una buena concordancia entre InSAR y la medición de nivelación.

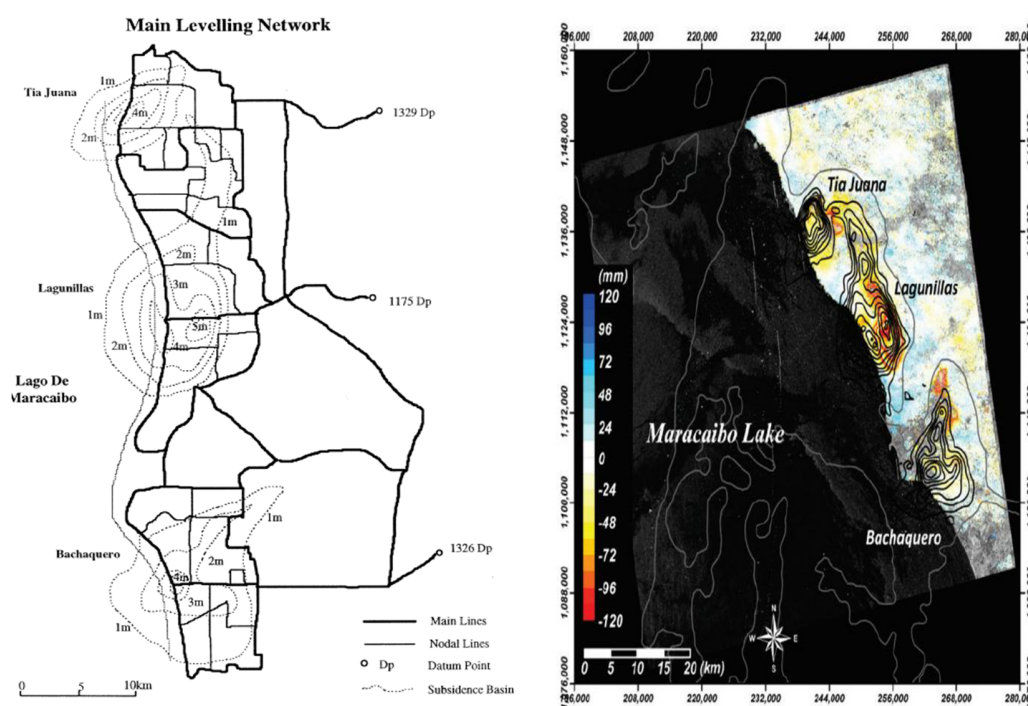


Figura 68. Comparación entre el resultado del levantamiento de nivelación año 1986 (izq.) y la medición de la deformación vertical (der.). Fuente: (Henneberg et al., 1980).

Por último, el estudio realizado por (Arenas et al., 2019), titulado (Detección de subsidencia por efecto de extracción petrolera aplicando la técnica DInSAR en Venezuela), se realizó tomando imágenes satelitales de radar de libre acceso provenientes de las plataformas satelitales Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), para un período de tres años (2014-2017) a través de la generación de 5 interferogramas correspondientes a los periodos diciembre 2014/2017-2014/2016-2015/2017; noviembre 2015/2017 y octubre 2015/2017 para la evaluación del comportamiento de la subsidencia en la costa oriental del lago, empleándose con los programas SNAP v.5.0 y SNAPHU v.1.4.2 en el procesamiento de estos, donde se determinó movimientos

verticales de $\pm 2,8$ cm en las áreas de Cabimas, Tía Juana y Ciudad Ojeda para un periodo de tres años (Figura 73).

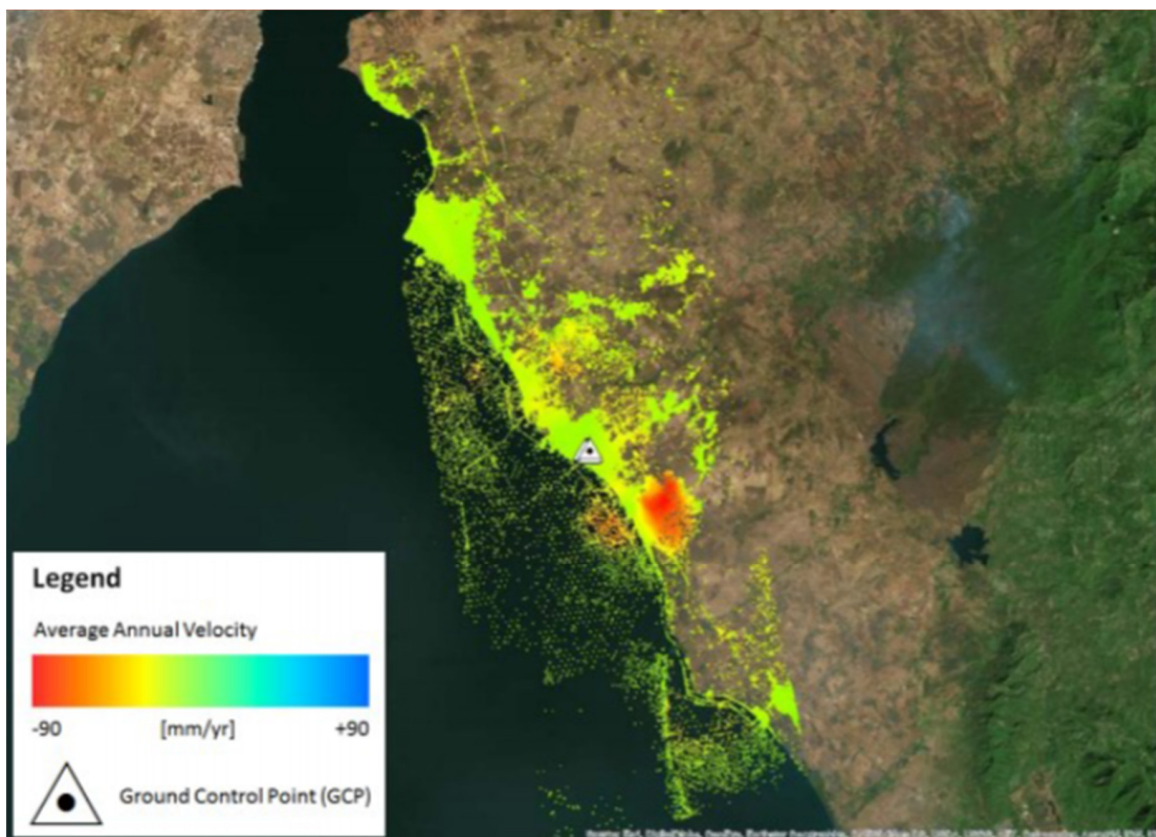


Figura 69. Ejemplo de la Costa Oriental del mapa de velocidades y los interferogramas. Fuente: Suárez et al., 2013.

En resumen, al comparar los resultados previos antes mencionados con los resultados del presente estudio, se confirma una consistencia en la presencia de la subsidencia la costa oriental del lago de Maracaibo. Aunque sean técnicas diferentes y periodos de análisis distinto en el presente trabajo, hemos identificado subsidencias significativas con un enfoque particular en el Campo petrolero de Lagunillas, del orden de 30 cm al año, las tasas de velocidades son notables durante el período de estudio incrementado los dos últimos años.

Tal como se ha indicado líneas arriba, entre los efectos más conocidos de la subsidencia destacan los daños que provoca en las infraestructuras y edificaciones. Las fotografías del Campo Lagunillas confirman señales típicas de desplazamiento vertical, como grietas y daños generalizados en las viviendas, (Figura 74). Por otro lado, en el estudio de la Costa Occidental, se encontró una limitada disponibilidad de información y registros fotográficos sobre los daños causado por la elevación presentada en el terreno. Es necesario realizar estudios más exhaustivos y obtener información detallada para comprender mejor las causas subyacentes y su evolución a lo largo del tiempo. Asimismo, se destaca la necesidad de implementar un seguimiento continuo de estas deformaciones para una gestión adecuada de riesgos y la conservación de las infraestructuras en la región.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES



Figura 70. Ejemplos de daños en viviendas causados por las subsidencias en el campo Petrolero de Lagunillas de la Costa Oriental de Maracaibo. Fuente: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41913823>.

CONTROL DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DEL TERRENO PRODUCIDAS POR LA EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (VENEZUELA) UTILIZANDO TECNICAS InSAR MULTI-TEMPORALES



Figura 71. Ejemplos de daños en viviendas causados por las subsidencias: A) Vivienda en Campo Lagunillas, (B, C) Grietas en paredes. Fuente: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41913823>.

7. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Máster ha proporcionado resultados significativos sobre las deformaciones recientes en la Cuenca del Lago de Maracaibo, demostrando los impactos tanto en la Costa Oriental los campos petroleros (Tía Juana, Lagunillas y Bachaqueros) como en la Costa Occidental. Destaca especialmente por ser el primer estudio que aplica series temporales de Sentinel-1 en la zona petrolera más importante del país. Durante el período de 2015 a 2022, hemos identificado deformaciones acumuladas de hasta 30 cm en la Costa Oriental, así como elevaciones de aproximadamente 20 cm en la Costa Occidental. Este trabajo también ha proporcionado un primer estudio en la zona central de la Ciudad de Maracaibo, donde se detectaron elevaciones en ciertas áreas del centro de la ciudad y hundimientos específicamente más en la costa (Barrio Santa Rosa de Agua y el Barrio Leonardo Ruiz). Además, se ha realizado un análisis del puente sobre el lago, que previamente no había sido analizado con InSAR, demostrando como resultado su estabilidad estructural.

La relevancia de este estudio radica en su contribución al conocimiento científico y en el respaldo a la necesidad de utilizar técnicas multitemporales con PSI y procesamiento de imágenes con SARPROZ para el monitoreo y análisis de las deformaciones. Esto es fundamental para tomar medidas preventivas y mitigar los impactos negativos en las áreas petroleras y la infraestructura en general. La técnica InSAR se posiciona como una herramienta esencial en la monitorización y evaluación de procesos de deformación, proporcionando información precisa y detallada para la toma de decisiones en la ingeniería civil y la gestión de riesgos en infraestructuras críticas de una forma más económica.

Además, los resultados de esta investigación contribuyen al avance reciente de la investigación en Venezuela, demostrando la viabilidad de la aplicación de InSAR para cuantificar la subsidencia en la Cuenca del Lago de Maracaibo. La implementación de esta metodología, utilizando las imágenes Sentinel-1 disponibles, representa una oportunidad para aplicar tecnología de vanguardia a nivel mundial y comprender de manera más completa los fenómenos de deformación en diversas áreas de interés. Esto no solo fortalece el crecimiento tecnológico en el país, sino que también brinda la posibilidad de una gestión más eficiente de los recursos y sienta las bases para futuras investigaciones y monitoreos continuos en diferentes regiones de Venezuela, contribuyendo al progreso y desarrollo sostenible de la nación.

8. Referencias

Arenas, I., Hernández, B., Royero, G., Cioce, V., & Wildermann, E. (2019). Detección de subsidencia por efecto de extracción petrolera aplicando la técnica DInSAR en Venezuela. *Mapping*, 28, 18–26.

Arenas, I. (2018). Cuantificación De la subsidencia en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo a través de Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética.

Alaska Satellite Facility (2022). How to Create an Interferogram Using ESA's Sentinel-1 Toolbox. Publicación en línea. Recuperado de <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esas-sentinel-1-toolbox/>

Buemi, M. (2012). Tratamiento de imágenes de radar de apertura sintética mediante filtros stack (Tesis doctoral). Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Chuvieco, E. (1999). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp.

Cano, P., & Víctor, H. (2011). Application in gis for the generation of evacuation routes, tools for urban planning: case: east coast of Maracaibo Lake. *Revista De La Facultad De ingeniería*, 26(2), 1726. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S079840652011000200003&lng=es&tlng=en.

Chrzanowski, A., Chen, Y., & Poplawski, T. (1991). Use of the Global Positioning System (GPS) for Ground Subsidence Measurements in Western Venezuela Oil Fields. IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences).

Deguchi, T., & Narita, T. (2015). Monitoring of land deformation due to oil production by InSAR time series analysis. Proceedings of Fringe 2015: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop.

ESA, Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., & Rocca, F. (2007b). Part B InSAR processing a practical approach. In K. Fletcher (Ed.), InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation: Vol. Part B (pp. B1–B71). European Space Agency Publications.

European Spatial Agency (2007). InSAR Principles.
<https://earth.esa.int/documents/10174/1597298/SAR61>

González de Juana, C., Iturralde de Arozena, J. M., Picard Cadillat, X. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Venezuela: Foninves.

Gallango, O., Talukdar, S., & Chin-A-Lien, M. (1985). Características de los crudos marinos en la Cuenca de Maracaibo, Venezuela Occidental. In Memorias VI Congreso Geológico Venezolano (Vol. 3, pp. 1661–1693).

Gómez Martín, E. (2022). Interferometría de imágenes radar de apertura sintética aplicada al estudio de deformación superficial del terreno: región de Bío-Bío, Chile. Universidad de Salamanca.

Globe SAR. (2005). Material Educativo para Teledetección mediante radares. In GlobeSAR Program Canadá Centre for Remote Sensing. Centro Canadiense de Teledetección y recurso naturales.
http://www.gep.uchile.cl/Biblioteca/Radar/gsarcd_s.pdf%0Aftp://ftp.ccrs.nrcan.gc.ca/ad/MAS/globesar/spa/adv_pol_s.pdf

Febres, G. (1990). Subsidence and compaction due to fluid extraction in Venezuelan oil-producing areas. *Revista Técnica INTEVEP*, 10(1), 37–46.

Fielding, E. J. (2018). SAR Interferométrico para el Estudio de Terremotos. In *National Aeronautics and Space Administration NASA* (pp. 1–61).

Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., & Rocca, F. (2007). Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing: a publication of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society*, 45(5), 1142–1153. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.894440>

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F., & Moretti, S. (2006). Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. *Engineering Geology*, 88(3–4), 200–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.007>

Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer Netherlands.

Henneberg, H., Badell, C. A., & Drewes, H. (1980). Investigaciones recientes sobre la subsidencia de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 3(1). <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/3886>

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31.

Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B7). <https://doi.org/10.1029/2006jb004763>.

Hooper, Andrew. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16). <https://doi.org/10.1029/2008gl034654>

Hoppe, E. J., Novali, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Del Conte, S., Falorni, G., & Toro, N. (2019). Deformation monitoring of posttensioned bridges using high-resolution satellite remote sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 04019115.

Hawkins, R. D., & Chigne, N. (1982). Geological Evaluation of the Hydrocarbon Prospect of West Maracaibo Lake.

InSAR papers. (2018, June 6). TRE ALTAMIRA - A CLS Group Company; TRE ALTAMIRA. <https://site.tre-altamira.com/insar-papers/>

Li, Z., Zou, W., Ding, X., Chen, Y., & Liu, G. (2004). A quantitative measure for the quality of INSAR interferograms based on phase differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10), 1131–1137. <https://doi.org/10.14358/pers.70.10.1131>

Mayorga Torres, T. M. (2013). Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética). Instituto de Altos estudios espaciales “Mario Gulich” Universidad Nacional de Córdoba.

Nievinski, F.G. (2004). Interferometría por radar de abertura sintética (InSAR).

Oliveras, F., & Paz, M. (2009). Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría Radar DInSAR. Granada: Universidad de Granada.

Perna, S., Esposito, C., Lanari, R., Paucullo, A., Wimmer, C., & Berardino, P. (2013). An algorithm for phase-offset evaluation in InSAR DEM generation. En C. Notarnicola, S. Paloscia, & N. Pierdicca (Eds.), SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XIII. SPIE.

Perissin, D., Piantanida, R., Piccagli, D., & Rocca, F. (2007). Landslide in Dossena (BG): Comparison between interferometric Techniques. In Proceedings of BIOGEOSAR (pp. 25–28).

Sully, J. P. & Murria, J. (1996). Microzonificación sísmica en la costa oriental del Lago de Maracaibo. Venezuela. INTEVEP- Caracas s/n.

Shanker, A. P., & Zebker, H. (2010). Edgelist phase unwrapping algorithm for time series InSAR analysis. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 27(3), 605. <https://doi.org/10.1364/josaa.27.000605>

Shanker, P., Casu, F., Zebker, H. A., & Lanari, R. (2011). Comparison of persistent scatterers and small baseline time-series InSAR results: A case study of the San Francisco bay area. IEEE geoscience and remote sensing letters : a publication of the IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 8(4), 592–596. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2010.2095829>

Suárez H., González D. y Rothe C. (2013). Estudio DInSAR (ALOS-PALSAR) para la determinación de subsidencia en la COLM (2007-2011). Departamento de Sensores Re-motos. Petróleos de Venezuela S.A. Zulia, Venezuela.

Suárez H., González D., Rothe C. y Ramos, F. (2014). Estudio DInSAR (TerraSAR-X) para la determinación de subsidencia en la COLM (2011-2013). Departamento de Sensores Remotos. Petróleos de Venezuela S.A. Zulia, Venezuela.

Suárez, H., González, D., Rothe, C., Ramos, F., & López, A. (2015). Estudio DInSAR (TerraSAR-X) para la determinación de subsidencia en la COLM (2011-2014). Departamento de Sensores Remotos. Petróleos de Venezuela S.A. Zulia.

Suárez, H., González, D., & Y Rothe, C. (2007). Estudio DInSAR (ALOS-PALSAR) para la determinación de subsidencia en la COLM. Petróleos de Venezuela S.A. Zulia.

Sousa, J. J., & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667.

Villegas, P. (2019, noviembre 24). Características de las imágenes de radar de apertura sintética SAR. *Agua y SIG*. <https://aguaysig.com/caracteristicas-de-las-imagenes-de-radar-de-apertura-sintetica-sar/>

Vassileva, M., Giulio Tonolo, F., Riccardi, P., Lecci, D., Boccoardo, P., & Chiesa, G. (2017). Satellite SAR interferometric techniques in support to emergency mapping. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 464–477. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1360155>

Zhilin, L., Zou, W., Ding, X., Chen, Y., & Liu, G. (2004). A Quantitative Measure for the Quality of INSAR Interferograms Based on Phase Differences”. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(10), 1131–1137.