



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

“ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO
ASOCIADO A PROCESOS COSÍMICOS, MEDIANTE
INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL (DINSAR)”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

OTZ CHAIM ALCARAZ ALONSO

ASESORES DE TESIS:

LIC. ANTULIO ZARAGOZA ÁLVAREZ

MTRA. FLAVIA TUDELA RIVADENEYRA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A Gisel, por ser una extraordinaria y maravillosa mamá, por tu gran apoyo e infinito cariño, este logro es tuyo también, gracias por ser mi más grande guía y luz en la vida.

A mi abuelita Estela, por todo tu amor, tus cuidados, tus historias y consejos, gracias por ser el pilar de espiritualidad más grande que tengo.

A mi Ana Karen, pues compartir la vida contigo ha sido el viaje más maravilloso que he tenido, gracias al universo por permitirme conocerte y enamorarme cada día más de ti.

A mi pueblo Santa Catarina Ayotzingo, por su grandeza histórica y sus bellos paisajes, por haber encontrado a colegas y amigos que comparten los mismos ideales de cambio y resignificación de este gran lugar.

“En cada ser humano existe la sabiduría de todos los universos, oír la voz que en cada uno habita es ponerse en contacto con esa sabiduría”.

Grinberg, J.

Agradecimientos

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme espacios académicos, culturales y deportivos tan extraordinarios, los cuales han impulsado mi crecimiento personal y profesional.

A mi Mamá Gisel, por todo tu esfuerzo y trabajo, por tus enseñanzas y apoyo incondicional, por siempre estar ahí y nunca dejarme caer. Eres mi más grande admiración ¡Te amo!

A mi Papá Daniel, gracias por la vida, por los instantes juntos, por elegirme este maravilloso nombre con un significado que hasta ahora comienzo a comprender. Trascendiste de este plano muy rápido, pero sé que donde te encuentres, te sientes muy orgulloso de mí.

A ti Ana, por ser mi cómplice, amiga y el más grande amor de mi vida, estos 8 años se me han pasado volando, gracias por tu ayuda, tu paciencia y tu gran amor, haces que todo se vuelva mágico en mi vida.

A mi familia, que me ha apoyado en cada momento, a mis abuelitos Tere, Papo, Estela y a mi abuelito Rogelio quien no pude conocer, pero siempre he admirado por las anécdotas que se cuentan y su pasión por el cine. A mis tías Edith y Blanca, a mis tíos Héctor, Gerardo, Servando y Fernando, gracias por todo su cariño.

A mis primas y primos, Yere, Geras, Areli, Jona, Brandon, Ser, Itzel, Isaac, Rodrigo, Xime, Fer, Monse, Roge, Fati, Ivan, Yanis, Martín y Kevin, gracias por todos los momentos compartidos. A mis sobrinos Airam, Emanuel, Lioret, Belem y Daira, los quiero mucho.

A Elvia, Miguel Ángel y Miguel Jr., gracias por todo su apoyo y confianza, por abrirme las puertas de su hogar e integrarme a su gran familia, los aprecié demasiado.

A mi asesor de tesis Antulio Zaragoza, ¡Si se pudo! Gracias por cada explicación y conocimiento compartido, por exigirme mejorar cada proceso de este trabajo, por las horas invertidas en CENAPRED y por las risas en Jumil y El Rey. Gracias por tu amistad y confianza, son invaluable.

A mi segunda asesora Mtra. Flavia Tudela, le agradezco infinitamente haber aceptado la dirección de esta tesis, por todo su apoyo y amabilidad en cada trámite, así como sus comentarios oportunos en esta investigación.

A los miembros del sínodo, la Dra. Mary Francés Teresa Rodríguez Van Gort por su interés en esta tesis, gracias por sus observaciones y aceptar ser parte del jurado. A la Dra. Elizabeth Chávez por todos los comentarios y correcciones, sin duda mejoraron la interpretación de este trabajo. Al Lic. Andrés Barranco por sus acertadas observaciones hacia la cartografía realizada y por el interés al tema de interferometría, espero poder colaborar alguna vez con usted. En fin, a cada uno de ustedes gracias por su tiempo, por su aporte y paciencia hacia la realización y culminación de este trabajo.

Agradezco al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que bajo el Programa Especial de “Prevención y Mitigación del Riesgo de Desastres” adscrito al Eje de Acción, Ciencia y Tecnología, me permitió realizar mi servicio social y mi estancia de un año como becario en la Subdirección de Dinámica de Suelos y Procesos Gravitacionales. Lugar donde comencé con la investigación de esta tesis y encontré a personas fuera de serie, que me compartieron su experiencia, conocimiento y amistad; Al Ing. Leobardo Domínguez, al Geólogo Alberto González y a la Geógrafa Michelle Munive, gracias por todo su apoyo, los estimo y admiro enormemente.

No quisiera olvidar que durante mi estancia en CENAPRED tuve la oportunidad de conocer increíbles lugares y personas que marcaron grandes momentos en mi vida, uno de ellos fue Don Juve, de Santiago Mitlatongo, Oaxaca, por su hospitalidad y su interés en la situación que vive su comunidad, mi respeto y admiración para usted, espero algún día volver a ese gran lugar. A la comunidad de San Gabriel en Jalisco, a la comunidad de Teziutlán en Puebla y a las diferentes colonias de Tláhuac, Iztapalapa y Naucalpan quienes siempre fueron respetuosos del trabajo que realizábamos, espero haber aportado lo necesario para mitigar cada problemática.

A mis amigos y amigas de la universidad, Brígido, Cristóbal (Zoda), Diego, Javi, Memo, Kike, Charly, Andrés, Izhar, Caro, Itzel, Ari, Rocío y Susana. Gracias por todas las aventuras en las prácticas de campo, por los buenos momentos en la cafetería después la clase de meteorología y por todos los juegos de UNO en las islas.

A mi familia de SEDATU, Arturo Merlo gracias por la oportunidad, por la confianza depositada en mí, eres de los mejores jefes que he tenido, a mis amigos-colegas: Rocío, Luis, Fernanda, Yesenia, Isaac y Guillermo es un honor trabajar con personas tan inteligentes y divertidas como ustedes, les he aprendido tanto, mi respeto y admiración, los quiero.

A mis amigos del Colectivo Ayotli y de Dignicraft, gracias por ser la chispa que le faltaba a la comunidad para comenzar a crear proyectos y atreverse a realizarlos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES.....	6
1.1 Objetivo General	6
1.2 Objetivos Específicos	6
1.3 Marco Teórico Conceptual	7
1.4 Sismicidad en México	13
1.5 Antecedentes sobre eventos sísmicos en las regiones de estudio.....	21
1.5.1 Región central	21
1.5.2 Región Suroeste.....	22
CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA Y EL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)	24
2.1 Elementos de la Percepción Remota.....	24
2.1.1 Aplicación de la Percepción Remota.....	28
2.1.2 Imágenes de satélite RADAR	31
2.1.3 Características e Interacción de la señal RADAR	33
2.2 Radar De Apertura Sintética (SAR).....	36
2.2.1 Ruido (Speckle) en las imágenes SAR.....	37
2.3 Programa Espacial Copernicus	38
2.3.1 Satélite Sentinel 1	43
2.3.2 Geometría de Adquisición del Sentinel- 1	45
CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO	47
3.1 Localización del Estado de Puebla.....	47
3.1.1 Geología.....	47
3.1.2 Localización del municipio de Chiautla de Tapia, Puebla.....	47
3.2 Localización del estado de Oaxaca.....	48
3.2.1 Geología.....	48
3.2.2 Relieve.....	49
3.2.3 Localización del municipio de Santiago Pinotepa Nacional.....	50
3.2.4 Geología.....	50
CAPITULO IV. DINSAR APLICADO A LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR EVENTOS SÍSMICOS	52
4.1 El ciclo sísmico	52
4.2 Interferometría Diferencial (DInSAR).....	54
4.2.1 Metodología DInSAR	57
4.3 SENTINEL APPLICATION PLATFORM (SNAP)	59

4.4 Cálculo de la deformación del terreno producido por el sismo del 16 de febrero de 2018 a 14 Km al sureste de Pinotepa Nacional Oaxaca, México.....	60
4.4.1 SNAPHU.....	65
4.5 Cálculo de deformación del terreno producido por el sismo del 19 de septiembre de 2017 a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia Puebla, México	70
4.6 Cálculo de la deformación del terreno producido por el sismo del 23 de junio de 2020 en las cercanías de la Crucecita, en las costas del Estado de Oaxaca	76
4.7 Mapas de Desplazamiento del Terreno.....	82
DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS.....	85
CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquemasimplificado de un sistema de teledetección.	9
Figura 2. Se muestra la distribución energética de un conjunto de ondas también denominado espectro electromagnético, donde se puntualiza el rango que tienen las ondas infrarrojas y su cercanía a la luz visible.	10
Figura 3. Se muestra la comparación de una imagen de satélite óptica y de RADAR, presenciando la erupción del volcán Kamchatka, Rusia 1994	11
Figura 4. Se muestra como el radar transmite un pulsoymide los ecos queretornan (retrodispersión) para procesar y generar una imagen SAR.	12
Figura 5. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano.	13
Figura 6. Se muestran las dos formas de sismicidad en nuestro país. A) Sismos de subducción yB) Sismos de falla transformante.	14
Figura 7. Se muestra la estructura de subducción ylocalización de sismos profundos en México.	15
Figura 8. Organización y solidaridad del pueblo mexicano tras haber ocurrido el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México.	16
Figura 9. Áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en nuestro país hasta el año 2017.	17
Figura 10. Se muestra la longitud de la Brecha de Guerrero. Zona donde no se ha presentado un sismoen 89 años.	18
Figura 11. Se muestra la regionalización sísmica de la República Mexicana.	20
Figura 12. Se muestran los epicentros de eventos sísmicos en la región central de México de acuerdo con el catálogo del SSN, los colores indican los rangos de acuerdo a la magnitud del evento y la estrella de color rojo indica el epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017.	22
Figura 13. Se muestran los elementos básicos de un sistema de teledetección; 1) Fuente de energía pasiva o activa, 2) trayectoria y su interacción con la atmósfera, 3) incidencia en la superficie terrestre, 4) satélite, 5) ciclo de toma y descarga de datos, 6) estación terrena de pre-proceso, 7) información al usuario	26
Figura 14. Se muestra el segmento del espectro electromagnético en donde trabajan las imágenes de RADAR.	31
Figura 15. Se muestran los componentes de una onda electromagnética	32
Figura 16. Se muestra un ejemplo de la penetración en 3 diferentes ambientes y con 3 tipos de longitud de onda, podemos observar que la mayor penetración sucede al momento de utilizar la banda L que tiene mayor longitud de onda.	33
Figura 17. Se muestran los diferentes mecanismos de retrodispersión.	34
Figura 18. Se muestra una imagen de la cuenca Amazónica en 2015 donde se resalta en un círculo amarillo una superficie plana y su mecanismo de retrodispersión.	34
Figura 19. Se muestra el funcionamiento básico de un sistema SAR.	36
Figura 20. Se muestra el ruido granular (Speckle) en una imagen SAR.	37

Figura 21. Se muestra el sitio web <i>Copernicus</i> Open Access Hub donde se descargan las imágenes de satélite de las diferentes misiones Sentinel.	40
Figura 22. Se muestra el número de usuarios registrados por continente desde el comienzo operacional del programa y hasta 2018. Asimismo, se muestra el aumento porcentual en el número de registros por continente comparado con 2017.	41
Figura 23. Se muestra el porcentaje de usuarios registrados en Copernicus Open Access Hub por tipo de uso declarado al final de 2018, como se observa el mayor porcentaje se encuentra en el área de investigación y el menor porcentaje en el área comercial.	42
Figura 24. Imagen del Sentinel-1 adquiriendo imágenes a través de su sensor activo, el Radar de Apertura Sintética (SAR).	43
Figura 25. Características generales que componen el Sentinel-1.	45
Figura 26. Se muestran los cuatro modos exclusivos de adquisición del Sentinel-1.	46
Figura 27. Representación de la teoría de rebote elástico. a) Carretera atravesada por una línea de falla, la cual no presenta deformación alguna. b) Fase Intersísmica (acumulación de energía) por lo que la carretera se deforma paulatinamente. c) Ruptura del terreno por la liberación de energía en la falla, derivado de un evento sísmico) representación gráfica del ciclo sísmico.	52
Figura 28. A) Representación de las tres fases del ciclo sísmico. B) Gráfica del ciclo sísmico, representada en términos de desplazamiento y tiempo.	53
Figura 29. Se muestra el interferograma de la zona afectada por el sismo de L' Aquila, Italia en abril de 2009	55
Figura 30. Se muestra un ejemplo sobre la observación de un punto en dos momentos diferentes (t_1 y t_2) pero con la misma ubicación en el espacio. La fase interferométrica es directamente proporcional a cualquier cambio en el rango del atributo de la superficie.	57
Figura 31. Diagrama de flujo para el procesamiento metodológico del cálculo de deformaciones del terreno a partir del par de imágenes de radar Sentinel 1, utilizando la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR).	58
Figura 32. Pantalla de inicio del Software SNAP, con dos productos agregados y la visualización de una banda.	59
Figura 33. Corregistro del par de imágenes de radar para el evento del 16 de febrero de 2018.	61
Figura 34. Formación del interferograma. Evento sísmico del 16 de febrero de 2018.	62
Figura 35. Imagen original sin corregir en la parte superior e imagen aplicando el procesamiento Deburst en la parte inferior.	62
Figura 36. Imagen original sin corregir e imagen aplicando el procesamiento Deburst.	63
Figura 37. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico del 16 de febrero de 2018.	63
Figura 38. Multilocking aplicado a la imagen SAR para bajar la resolución y obtener una medición más alta y con menos ruido.	64
Figura 39. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma.	65
Figura 40. Se muestra el resultado de la fase desenvuelta en el símbolo del sistema.	66

Figura 41. En la imagen superior se muestra el interferograma desenvuelto con datos en radianes, una vez aplicada la conversión de la imagen de fase desenvuelta a desplazamiento, se muestra una nueva imagen (inferior) donde se visualizan los datos en unidades métricas.	67
Figura 42. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas.	68
Figura 43. Se trazó un perfil en el área de mayor desplazamiento para identificar los valores máximos y mínimos. La posición de la flecha roja en el perfil y en la imagen indican el mismo lugar en el terreno, el cual presenta la mayor deformación.	68
Figura 44. Corregistro del par de imágenes de radar. Evento sísmico del 19 de septiembre de 2017.	70
Figura 45. Formación del interferograma. Evento sísmico del 19 de septiembre de 2017.	71
Figura 46. Imagen original sin corregir en la parte superior e imagen aplicando el procesamiento Deburst en la parte inferior.	71
Figura 47. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017	72
Figura 48. Multilocking aplicado a la imagen SAR para obtener una medición más alta y con menor ruido.	72
Figura 49. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017	73
Figura 50. Fase enrollada del interferograma siendo exportada para su posterior manejo en el algoritmo SNAPHU. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017	73
Figura 51. Se muestra la imagen que ha creado SNAPHU en el símbolo del sistema (interferograma desenrollado).	74
Figura 52. Se muestra el interferograma desenrollado que ha sido importado de vuelta al SNAP.	74
Figura 53. Imagen convertida a desplazamiento, la cual muestra mediciones en metros para identificar la deformación que se ha presentado en la zona, tras el evento sísmico del 19 de septiembre de 2017.	75
Figura 54. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas. Evento sísmico del 19 de septiembre de 2017.	75
Figura 55. Corregistro del par de imágenes de radar para el evento sísmico del 23 de junio del 2020.	76
Figura 56. Formación del interferograma. Evento sísmico 23 de junio del 2020.	77
Figura 57. Aplicación del procesamiento Deburst, para eliminar las discontinuidades en la imagen.	77
Figura 58. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico 23 de junio del 2020.	78
Figura 59. Multilocking aplicado a la imagen SAR para obtener mediciones más precisas, así como la eliminación de una gran parte del ruido.	78
Figura 60. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma. Evento sísmico del 23 de junio del 2020.	79
Figura 61. Fase enrollada del interferograma siendo exportada para su posterior manejo en el algoritmo SNAPHU. Evento sísmico del 23 de junio del 2020	79

Figura 62. Se muestra la imagen que ha creado SNAPHU en el símbolo del sistema (interferograma desenrollado). Evento sísmico del 23 de junio del 2020	80
Figura 63. Se muestra el interferograma desenrollado que ha sido importado de vuelta al SNAP. Evento sísmico del 23 de junio del 2020.	80
Figura 64. Imagen convertida a desplazamiento, la cual muestra mediciones en metros para identificar la deformación que se ha presentado en la zona, tras el evento sísmico del 23 de junio del 2020.	81
Figura 65. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas. Evento sísmico del 23 de junio del 2020.	81
Figura 66. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 16 de febrero de 2018 (m. 7.2), al sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca, México.	82
Figura 67. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 19 de septiembre de 2019 (m. 7.1), al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla.	83
Figura 68. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 23 de junio de 2020 (M. 7.4), cerca de la localidad de Crucecita Oaxaca, México.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de daños por sismos en la República Mexicana (1957-2003).	25
Tabla 2. Objetivos que plantea la percepción remota para cada proceso de la administración de desastre por un sismo.	36
Tabla 3. Satélites Sentinel del programa <i>Copernicus</i> con su fecha de lanzamiento y su campo de utilidad.	44
Tabla 4. Resumen de las características generales que componen el Sentinel-1.	50
Tabla 5. Eventos sísmicos de gran relevancia estudiados con Interferometría RADAR, desde el año 1993 hasta el 2000.	60
Tabla 6. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Oaxaca, México.	65
Tabla 7. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Puebla y Morelos.	75
Tabla 8. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Crucecita, Oaxaca, México.	81

INTRODUCCIÓN

Nuestro planeta tiene un funcionamiento dinámico y en constante transformación debido a la energía producida en su interior, pero también a la energía externa como la proveniente del sol, la cual se esparce en los océanos, continentes, y la atmósfera. La presencia de fenómenos naturales en el territorio es prueba de dicho dinamismo; sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, hundimientos regionales, surgen por el movimiento y la actividad de la corteza terrestre (CENAPRED, 2011).

La sismicidad ha estado presente en la historia geológica de nuestro planeta y continuará manifestándose de forma similar a lo observado en el pasado. Un factor importante que destaca a este fenómeno es el hecho de no poder predecir cuándo ocurrirá; en la actualidad no existe un procedimiento confiable que establezca la fecha, el sitio exacto o la magnitud que presentará el evento sísmico. Pese a ello los sismos tienden a manifestarse en zonas muy definidas a nivel regional y se estima su magnitud máxima en función de los registros históricos y estudios geofísicos (Gutiérrez, Ramírez y Reyes 2014).

En la antigüedad el estudio de los sismos comenzó hace más de 3 mil años con los registros de culturas orientales; China y Japón registraron los impactos físicos y sociales que ocurrieron en sus pueblos. En Europa existen escritos de hace 1600 años redactando como la población se vio afectada por grandes eventos sísmicos. En el continente americano, diversas culturas como los Mayas y los Aztecas manifestaron su conocimiento por este fenómeno y lo plasmaron en códices donde diferenciaban dos tipos de temblores: los volcánicos y los tectónicos. En Sudamérica los Incas quienes demostraron una arquitectura impecable, modificaron su técnica para desarrollar construcciones sismorresistentes debido a la alta ocurrencia de este fenómeno en su territorio (CIRES, 2014).

Alrededor del mundo los sismos son considerados como una gran amenaza natural, ya que históricamente han causado un sinnúmero de pérdidas humanas y materiales. Se estima que entre los años 1960 y 2007 la cifra de pérdidas humanas

fue alrededor de 439,000 y las pérdidas económicas superaron los 65 billones de dólares (Sagripanti *et al.*, 2007).

La vulnerabilidad generada por las personas es el factor principal por el que suceden los desastres, los asentamientos humanos, en la mayoría de los casos, carecen de una planeación adecuada y se desarrollan en terrenos altamente propi- cios a la amplificación del movimiento sísmico. Aunado a esto se emplean técnicas constructivas inadecuadas que incrementan el riesgo (Gutiérrez *et al.*, 2014).

México es un país altamente sísmico, tan solo entre los años 2017 y 2019 se reportaron 83,406 sismos, con magnitudes que van desde 1.2 a 8.2 grados (SSN, 2019) esto quiere decir que en promedio ocurrieron alrededor de 76 sismos al día. Dicha cifra nos muestra el panorama en el que se encuentra nuestro país respecto a este fenómeno, así como de las posibles implicaciones sociales que trae consigo si se añaden los factores de vulnerabilidad antes mencionados.

De esta forma el estudio de los sismos es si n duda imprescindible para nuestro país, desde conocer su origen, desarrollo y propagación en el territorio, hasta saber cómo actuar como individuo cuando se presente este fenómeno. De manera que la investigación de los sismos deba realizarse desde una visión integral que permita estudiar las características físicas y sociales del territorio. Actualmente los centros de investigación y observatorios sismológicos que se encargan de realizar proyectos y monitorear la acti vidad sísmica en México son: el Servicio Sismológico Nacional (SSN), Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (C ICESE), Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Asimismo, el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A.C. (CIRES) es quien se encarga de promover la investigación y desarrollo de tecnología aplicada a la instrumentación sísmica en nuestro país.

Respecto a la instrumentación empleada para el fenómeno sísmico, existen desde hace algunas décadas aparatos como los sismógrafos y acelerógrafos que se encargan de medir la amplitud de las oscilaciones de un temblor y se registran finalmente en un sismograma, los cuales se encuentran en las estaciones que

componen la red de observación sismológica de México, para después ser interpretadas por personal técnico (Gutiérrez *et al.*, 2005).

La evolución de las técnicas aplicadas al estudio de fenómenos naturales ha ido en constante aumento, debido a la interacción frecuente con la que el ser humano se ve relacionado con dichos fenómenos. Una de las responsabilidades que toda autoridad tiene sobre el territorio representando, es salvaguardar las vidas y los bienes expuestos, para ello la prevención mediante el conocimiento, permite evitar desastres y minorizar riesgos (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Como parte del avance tecnológico que se ha tenido para el monitoreo de los fenómenos naturales, se encuentran las tecnologías espaciales y de Percepción Remota (PR) donde pioneras como la geógrafa Evelyn Pruit de la Oficina Naval de Investigación de los Estados Unidos a finales de los años setenta (Collado y Díaz, 2015) hizo notar la gran relevancia de las imágenes de satélite en el estudio y monitoreo de los fenómenos naturales. Para el caso del fenómeno sísmico, con imágenes de satélite ópticas se pueden ubicar los depósitos no consolidados en zonas de fallas donde ocurre una mayor destrucción, identificando las áreas donde posiblemente un sismo pueda iniciar deslizamientos de tierra. Con las imágenes de RADAR se identifican las fallas asociadas a la actividad tectónica y se logran demarcar zonas de fallamiento, asimismo se puede calcular la deformación del terreno durante el evento sísmico y recalcular epicentros, lo que ha permitido a expertos y a los tomadores de decisiones generar planes de prevención en las zonas donde existe el peligro, evitando así pérdidas humanas, la afectación de los servicios básicos y la infraestructura en general (USAID, 1993).

El estudio de la deformación de la superficie terrestre provocada por sismos ha sido importante y complejo a la vez, ya que ha enfrentado grandes desafíos para poder analizar con claridad lo que pasa en el terreno (Fernández, 2009). Los primeros estudios con métodos tradicionales representaron dichos desafíos ya que se basaban en el despliegue de instrumentación *in situ* con extensómetros y redes GPS, pero el costo de mantenimiento resultaba muy elevado, además de proporcionar mediciones específicas de un lugar y no del comportamiento regional de grandes áreas (Fernández, 2009).

Por lo que la PR de tipo RADAR y la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR), resultaron de gran utilidad para el análisis de la deformación del terreno, ya que las mediciones a través de sensores remotos permitieron obtener información de áreas más extensas, generando así datos de desplazamiento del terreno en el orden de los centímetros e incluso milímetros, haciendo que esta técnica por su bajo costo y su precisión sea utilizada en la actualidad como una gran alternativa (Seppi, 2016).

Por ello, este trabajo emplea la técnica DInSAR para calcular las deformaciones del terreno que se presentaron durante los tres sismos de gran magnitud ocurridos en México entre los años 2017 y 2020. Dicho estudio es de gran importancia ya que permite identificar y cuantificar a través de mapas, las regiones que, a partir del evento, presentaron cambios en su morfología. Por ejemplo, las zonas urbanas, al concentrar grandes edificaciones y por ende un gran número de personas, requieren ser monitoreadas debido a la infraestructura con la que cuentan, las cuales pudieran llegar a deteriorarse o desestabilizarse causando grandes pérdidas humanas y materiales; para ello, la zonificación realizada con esta metodología funge como una estrategia para emplear de manera eficiente los recursos de emergencia y apoyo en caso de un desastre, pero a su vez, los resultados podrían ser ocupados en la fase preventiva, mediante el conocimiento de las zonas que presentaron mayor afectación respecto a eventos pasados, lo que ayudaría a focalizar y realizar acciones pertinentes que aseguren una mejor respuesta del fenómeno en el territorio.

El 19 de septiembre de 2017 se generó un sismo de magnitud 7.1 localizado a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, en el estado de Puebla. Tuvo lugar a las 13:14 horas, dos horas después de haber realizado el simulacro en conmemoración al sismo de 1985. Las coordenadas del epicentro fueron: 18.32° latitud N y -98.67° longitud W, con una profundidad de 51.2 km (SSN, 2017). Dicho sismo se generó en el interior de la Placa de Cocos que subduce a la Placa Norteamericana. El evento afectó a 12 millones de personas y se estableció la cantidad de 369 como la cifra oficial de muertos (Silva, 2019).

El segundo evento de gran relevancia en nuestro país ocurrió el 16 de febrero de 2018, el Servicio Sismológico Nacional reportó un evento de magnitud 7.2 grados, localizado en las cercanías de Pinotepa Nacional en las costas del Estado de

Oaxaca a las 17:39 horas, las coordenadas del epicentro fueron: 16.25° latitud N y -98.03° longitud W, con una profundidad de 12 km (SSN, 2018). Siendo un sismo intraplaca, es decir que se desarrolló internamente en la Placa Norteamericana. La percepción sobre la intensidad de este evento llegó hasta varios municipios de Guerrero y del mismo estado de Oaxaca.

Finalmente, el tercer evento sísmico se suscitó el 23 de junio del 2020 en las cercanías de la localidad Crucecita, Estado de Oaxaca. Dicho sismo fue considerado de Interplaca debido a la interacción entre la Placa de Cocos que subduce por debajo de la Placa Norteamericana; El evento ocurrió a las 10:29 horas tuvo una magnitud de 7.4 grados y las coordenadas del epicentro fueron: 15.784° latitud N y 96.120° longitud W, a una profundidad de 22.6 km (SSN, 2020).

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1 Objetivo General

Analizar la deformación del terreno producida por los sismos del 19 de septiembre de 2017, 16 de febrero de 2018 y 23 de junio de 2020 en México, a partir de métodos indirectos, utilizando interferometría diferencial (DInSAR).

1.2 Objetivos Específicos

- Medir la deformación del terreno ocurrida en la región centro y suroeste de la República Mexicana para obtener los mapas de deformación de tres eventos sísmicos.
- Utilizar el software SNAP e imágenes de libre distribución para el estudio y análisis de sismos.

1.3 Marco Teórico Conceptual

El fenómeno sísmico es considerado como un evento que pone a prueba la infraestructura de una comunidad, región o país, su capacidad de respuesta ante el suceso, así como la pronta recuperación de acuerdo con los planes y manejos en la atención del fenómeno (Godínez, 2016).

Tener presente el riesgo que conlleva este tipo de fenómenos naturales en nuestra cotidianidad permite construir sociedades preventivas, donde el objetivo es minorar las pérdidas humanas y materiales a través de la información y las acciones de preparación que realicen las comunidades en conjunto con las instancias y representantes de gobierno (Valdés, 2018).

Para ello lo que propone la Gestión Integral del Riesgo (GIR), enunciada como “*el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de riesgos*”, es combatir las causas estructurales de los desastres y fortalecer las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad (LGPC, 2014). En las diferentes etapas de administración del desastre se han desarrollado una serie de herramientas y metodologías que permiten analizar el fenómeno y comprender su comportamiento en el territorio.

Siguiendo con esta base, se muestran los conceptos utilizados para la elaboración de esta investigación.

Sismo

Fenómeno geológico que ocurre cuando en los límites de placas se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto a la otra, generando grandes esfuerzos en el material que los constituye, es decir, si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta o agresiva que libera de forma repentina la energía acumulada. Desde el foco o hipocentro donde se genera el sismo, esta energía irradia en forma de ondas, comúnmente llamadas ondas sísmicas que, a través del medio sólido de la Tierra, se propagan en todas direcciones (CENAPRED, 2011).

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2017), los sismos son movimientos de la corteza terrestre que se originan en el interior de la Tierra y se propagan por ella en diferentes direcciones en forma de ondas, generalmente son de corta duración e intensidad variable. Este fenómeno puede ser generado por diferentes causas: el desplazamiento de las placas tectónicas que conforman la corteza y que llegan a afectar grandes extensiones de tierra, actividad volcánica provocada por erupciones violentas que afectan en menor escala, hundimiento debido a la acción erosiva del agua subterránea, deslizamientos causados por la influencia de la gravedad y acciones realizadas por el ser humano como explosiones atómicas.

Percepción Remota

Es la técnica que permite adquirir información de un objeto o fenómeno sin estar en contacto con él. Particularmente se refiere a la observación de nuestro planeta a través de cámaras y sensores, los cuales se encuentran montados en aviones o satélites. La información adquirida ha resultado de gran utilidad para investigaciones y aplicaciones como la agricultura, minería, seguimiento de fenómenos naturales, detección de aguas contaminadas, así como en el monitoreo de cobertura de bosques y glaciares, entre otros (González, 2017).

Espectro electromagnético

Es el rango total de la radiación electromagnética, compuesto por diversas regiones que van desde la menor longitud de onda (rayos gamma) hasta la mayor longitud de onda (ondas de radio). La radiación electromagnética de la cual hablamos es la energía que se propaga mediante ondas desplazándose por el espacio a la velocidad de la luz. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones en función de la longitud de onda. Las regiones más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son la luz visible y el Infrarrojo.

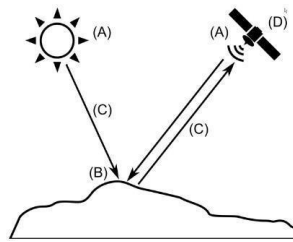
Los ojos del ser humano pueden considerarse como sensores remotos que detectan la luz reflejada por los objetos de su entorno, pese a ello la visión humana sólo alcanza a percibir una pequeña parte de dicho espectro "el visible". La luz visible es tan solo una pequeña región dentro del espectro electromagnético, por ello los sensores montados a bordo de satélites tienen la capacidad de detectar, así como

de grabar radiaciones de las regiones no visibles que van desde el ultravioleta hasta las microondas (Fontal *et al.*, 2005; Labrador *et al.*, 2012).

Imágenes de Satélite

Una imagen de satélite es la representación visual de las características de la Tierra que se obtiene por medio de sensores remotos instalados en plataformas espaciales. Dichas imágenes se obtienen por medio de la interacción energética de la Tierra con un sensor (Figura 1), la cual puede ser de dos formas: de reflexión ocupando la energía solar como lo hacen las imágenes ópticas o de emisión mediante un haz energético proporcionado por el mismo sensor como las imágenes de RADAR (Catuna, 1995).

Figura 1. Esquema simplificado de un sistema de teledetección. **A)** Fuente de radiación de origen natural o artificial. **B)** Objetos que interaccionan con la radiación. **C)** Una atmósfera por la que se desplaza la radiación, tanto de la fuente hasta el objeto como desde el objeto al receptor. **D)** Receptor que recoge la radiación una vez ha sido perturbada o emitida por los objetos. Fuente: Olaya, 2014.



Imágenes de satélite (Ópticas o pasivas)

De acuerdo con Mieza *et al.* (2012) las imágenes ópticas:

“Se generan mediante sensores que capturan la porción de la radiación solar que llega al sensor a bordo del satélite luego de interactuar con la superficie terrestre es decir en cultivos, agua y suelo desnudo”.

Para poder obtener estas imágenes es necesario el recurso solar como medio de funcionamiento, por lo que no se dispone de información en horarios nocturnos, además un factor que se debe considerar en estas imágenes es la nubosidad, pues se necesita una imagen lo más limpia posible para poder apreciar los rasgos físicos del terreno.

Estas imágenes llevan asociados valores numéricos a cada pixel, de acuerdo con el número de bandas espectrales que sea capaz de detectar el sensor del satélite. Lo que se obtiene de estos productos es la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Además, es importante destacar que una imagen no es lo mismo que una foto, ya que las primeras contienen información de los valores de reflectancia de la superficie terrestre en distintas zonas del espectro electromagnético (Labrador *et al.*, 2012; Mieza *et al.*, 2012).

Radiación infrarroja

Dentro del espectro electromagnético, la radiación infrarroja se encuentra comprendida entre el espectro visible y las microondas. Las ondas infrarrojas tienen una longitud de onda más larga que la luz visible, pero más corta que las microondas. El término *infrarrojo cercano* se refiere a la parte del espectro infrarrojo que se encuentra más próxima a la luz visible; el término *infrarrojo lejano* denomina la sección más cercana a la región de las microondas (Figura 2). La fuente primaria de la radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que tenga una temperatura superior al cero absoluto es decir (-273.15°C, o 0 grados Kelvin), irradia ondas en la banda infrarroja. Mientras más caliente se encuentre un objeto mayor será la emisión de radiación infrarroja (IPAC, 2000).

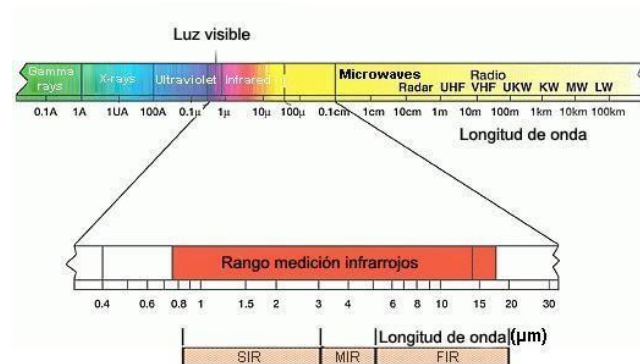


Figura 2. Se muestra la distribución energética de un conjunto de ondas también denominado espectro electromagnético, donde se puntualiza el rango que tienen las ondas infrarrojas y su cercanía a la luz visible.

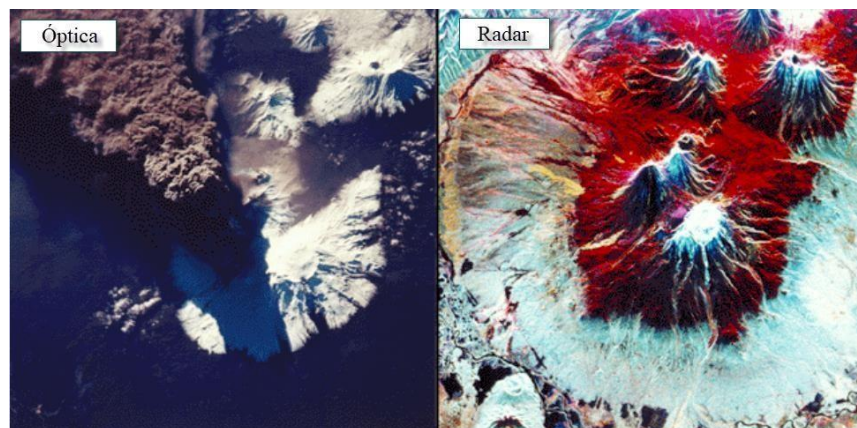
Imágenes de satélite Activas (Radar)

Estas imágenes se generan mediante sensores activos, las ventajas de estas imágenes, en comparación con las imágenes ópticas (Figura 3), son que funcionan en casi cualquier condición meteorológica, su capacidad de observación es diurna

y nocturna, y pueden penetrar hasta cierto punto la vegetación y el suelo (Podest, 2017). A pesar de ello algunos inconvenientes que pueden presentarse, es la distorsión en áreas donde hay topografía pronunciada, así como presencia de *speckle* en las imágenes (ver apartado 2.2.1) lo que puede ser difícil al momento de ser interpretadas.

En cuanto a la formación de las imágenes lo que hace el radar es medir la amplitud (magnitud del eco reflejado) y la fase que es la posición de un punto en un momento específico en el ciclo de la onda. Algunos parámetros del radar que se deben considerar en un estudio son: longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia (Podest, 2017).

Figura 3. Se muestra la comparación de una imagen de satélite óptica y de RADAR, presenciando la erupción del volcán Kamchatka, Rusia 1994. Fuente: Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética, noviembre 2017.

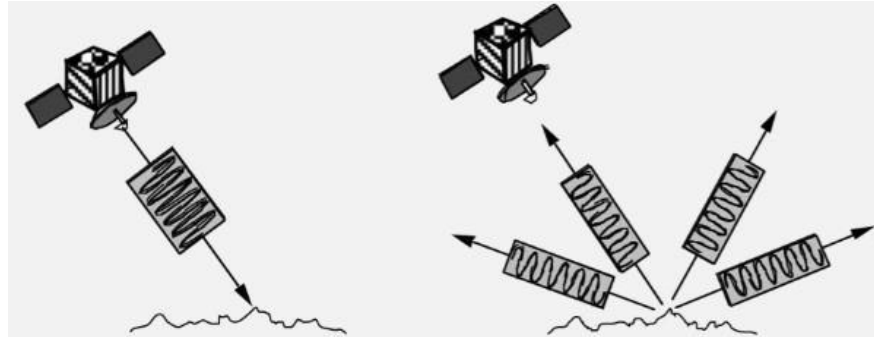


Radar de Apertura Sintética (SAR)

Es un sensor que emite pulsos de energía electromagnética en el rango de las microondas una de las características más importantes del radar es que tiene su propio sistema de *iluminación*, además al tener longitudes de onda relativamente largas, pueden penetrar nubes, polvo y obtener información independientemente de condiciones climáticas adversas (Ager, 2013). El radar transmite pulsos electromagnéticos con cierta periodicidad, tal como se muestra en la Figura 4, y recibe el reflejo de los ecos sucesivos del punto o área observada, estos son procesados almacenándose en una matriz 2D de números complejos

proporcionando una imagen de reflectividad conocida como imagen SAR (Frontera *et al.*, 2012).

Figura 4. Se muestra como el radar transmite un pulso y mide los ecos que retornan (retrodispersión) para procesar y generar una imagen SAR. Fuente: Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética, noviembre, 2017.



Interferometría Diferencial SAR (DInSAR)

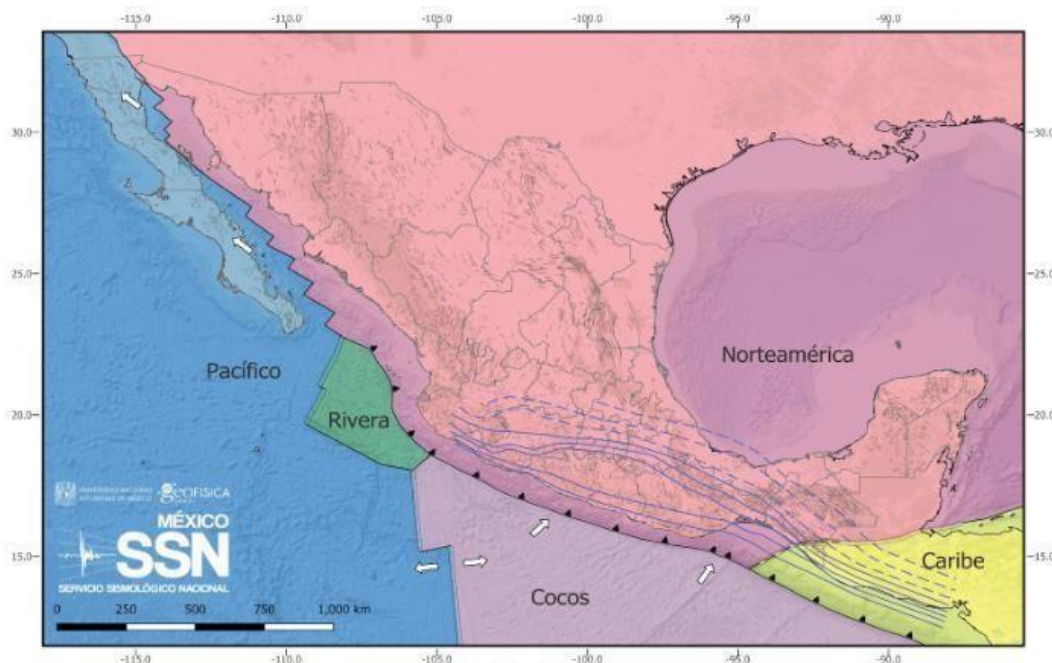
Es una técnica basada en la capacidad del SAR para medir y monitorear de manera precisa las deformaciones de la superficie. Es decir, se hacen dos observaciones de un mismo lugar en el espacio, pero en momentos diferentes. La técnica DInSAR permite extraer movimientos superficiales de la escena observada con alta precisión, que puede ser en centímetros e incluso en milímetros, dependiendo de la longitud de onda empleada (Frontera *et al.*, 2012; Fielding, 2018).

1.4 Sismicidad en México

México es uno de los países del mundo con mayor actividad sísmica debido a la interacción de cinco placas tectónicas: Norteamérica, Cocos, Pacífico, Rivera y Caribe (Figura 5). Desde 1990 a 2016, el SSN ha reportado un promedio anual de 28 sismos con magnitudes entre 5 y 5.9. Asimismo, el 3.5% del promedio anual muestra sismos con magnitud entre 6 y 6.9, así como de un sismo de magnitud entre 7 y 7.9 cada dos años. En este intervalo de 27 años se generó un sismo de magnitud entre 8 y 8.9; no obstante, los sismos de magnitud entre 4 y 4.9 son los más abundantes en nuestro país; en promedio suceden 708 sismos de esa magnitud al año (Pérez *et al.*, 2018).

Como se mencionó los sismos ocurren debido a vibraciones y movimientos de la corteza terrestre como resultado de una rápida liberación de energía. Las fuerzas tectónicas que están presentes en la Tierra son las que actúan sobre las rocas tensándolas y deformándolas (Lewis, G. y Collins, 2014).

Figura 5. Placas tectónicas que interactúan en territorio mexicano. Fuente: SSN, 2020

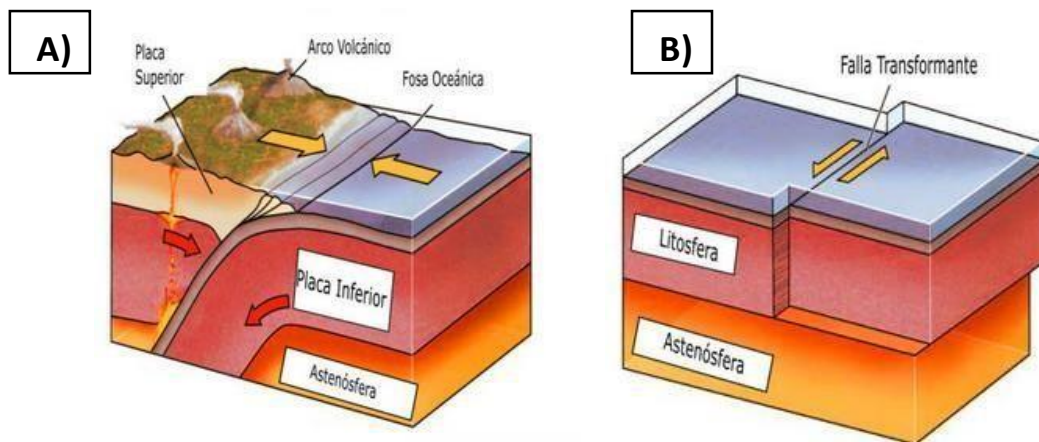


La sismicidad en nuestro territorio se da en dos formas principalmente: de subducción y de falla transformante. El proceso de subducción se da cuando parte de la corteza oceánica se sumerge bajo otra placa de carácter continental, es el

caso de la Placa de Cocos y Rivera (ambas placas oceánicas) las cuales se subducen bajo la placa continental de Norteamérica donde se encuentra México. Dicho proceso se da en las regiones costeras de Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán Jalisco y Nayarit. Por el contrario, la sismicidad de la península de Baja California y de los estados de Sonora y Sinaloa está dominada por fallas transformantes, las cuales interactúan desplazándose lateralmente una respecto a la otra, tal como se muestra en la Figura 6. Dichas fallas son parte del Sistema de San Andrés en California, E.U.A. (Rosenblueth, 1994).

Cabe señalar que las placas continentales y oceánicas también están sujetas a esfuerzos y que la rotura de ellas también origina sismos denominados: *intraplaca*.

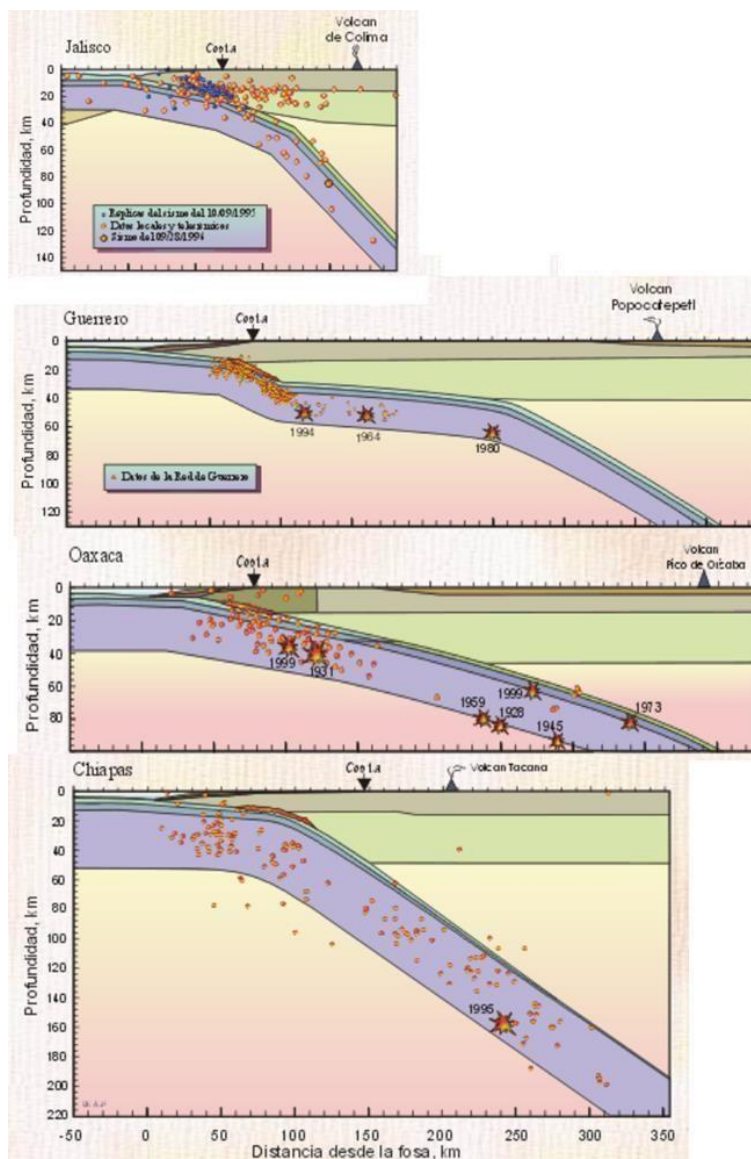
Figura 6. Se muestran las dos formas de sismicidad en nuestro país. **A)** Sismos de subducción y **B)** Sismos de falla transformante. Fuente: Maldonado, Y. (s.f).



Los sismos de subducción que han ocurrido en México en la temporalidad de 1900 a 2000, es decir en un siglo, han tenido una longitud de ruptura entre 50 kilómetros y 200 kilómetros de largo. El sismo más grande que se registró en este periodo ocurrió el 03 de junio de 1932 en las costas de Jalisco, con una magnitud de 8.2 y una longitud de ruptura de 280 km (Kostoglodov y Pacheco, 2000). En la Figura 7 se puede observar la estructura de subducción y la localización de los sismos más profundos acontecidos en México. El estado de Chiapas es el que ha presentado sismos con profundidades mayores, los cuales han llegado hasta los 200 km.

Asimismo, en la historia de nuestro país los epicentros de magnitud 7 o más, no solo se han ubicado en las costas del Pacífico, también podemos encontrar registros de esa magnitud en el centro-sur de Veracruz y Puebla, así como el norte-centro de Oaxaca, Chiapas y Estado de México. La península de Baja California presenta sismos particularmente en la zona fronteriza con Estados Unidos. Por otro lado, Zacatecas, Durango, Sinaloa y Sonora son los estados donde es nula la sismicidad, sin embargo, cabe mencionar que Sonora cuenta con un registro sísmico a finales del siglo XIX, con magnitud de 7.3 (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Figura 7. Se muestra la estructura de subducción y localización de sismos profundos en México. Fuente: Kostoglodov, V y Pacheco, J. (2000).



Uno de los sismos más importantes del siglo XX, fue el que se registró en Michoacán el 19 de septiembre de 1985 el cual tuvo una magnitud de 8.1 grados y su ruptura cubrió casi toda la costa de Michoacán, aproximadamente unos 180 km (Kostoglodov y Pacheco, 2000). Este sismo en particular evidenció la nula preparación de las autoridades y la población en cuanto al tema de los sismos de gran magnitud en México, lo cual se hizo notar en la improvisada coordinación tanto de autoridades como de ciudadanos para ayudar a remover escombros y participar en las tareas de búsqueda y rescate (Figura 8). Pese a ello, dicho evento marcó un parteaguas en la historia de nuestro país, obligándolo a crear un centro de investigación científica de sismos, así como el surgimiento de la protección civil, para posteriormente llegar a conformar el Sistema Nacional de Protección Civil en México y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) este último, un esfuerzo internacional de cooperación entre Japón y México.

Figura 8. Organización y solidaridad del pueblo mexicano tras haber ocurrido el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la Ciudad de México. Fuente: Redondo, M. (11 de marzo de 2021).



De acuerdo con Kostoglodov y Pacheco (2000):

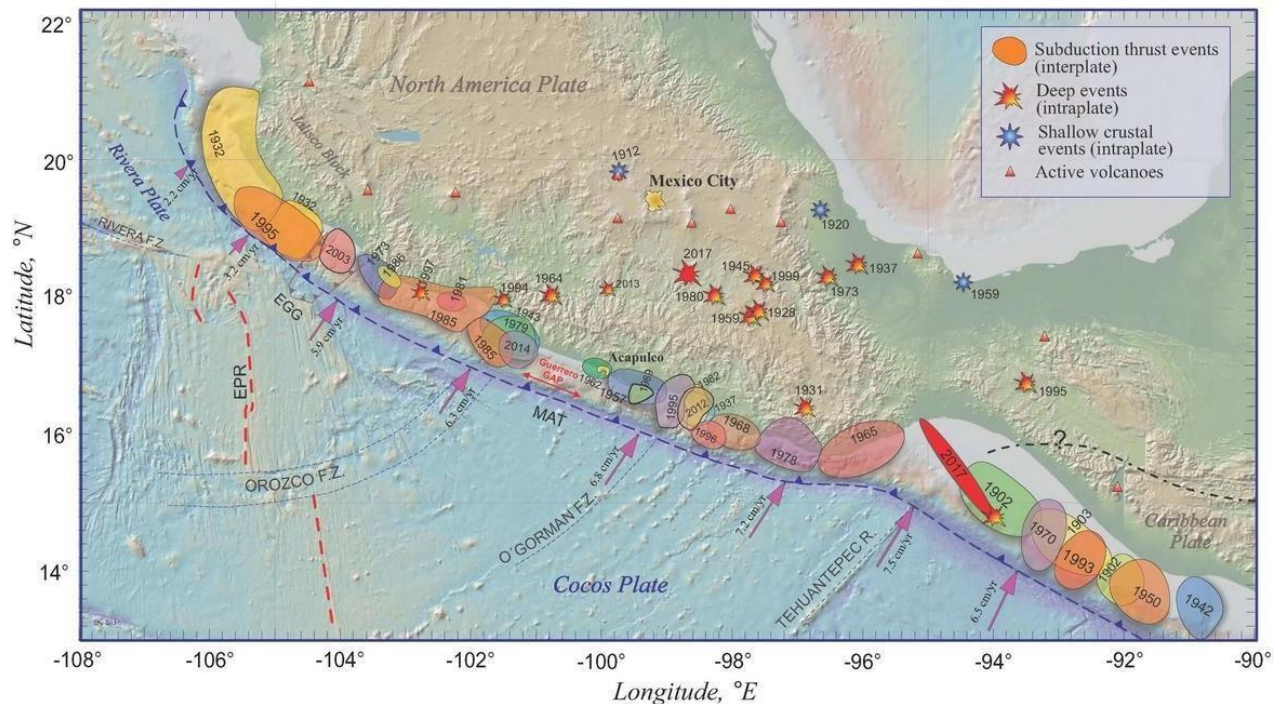
“Entre mayor sea el área que se rompe por la acción de las fuerzas tectónicas, mayor es el tamaño del temblor. Como la mayor área de contacto entre placas

se encuentra en las zonas de subducción, es aquí donde ocurren los sismos más grandes, no solo en México sino en el mundo. A lo largo de esta extensión se han producido los sismos más grandes que se han registrado en México al menos durante un siglo”.

En la Figura 9 se muestran las áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en México, las elipses corresponden a las áreas de ruptura de los sismos interplaca, las estrellas de color rojo y azul corresponden a sismos intraplaca donde el color rojo representa los sismos con profundidades mayores y en azul los sismos con profundidades menores (SSN, 2017).

Figura 9. Áreas de ruptura de los sismos más importantes que han ocurrido en nuestro país hasta el año 2017.

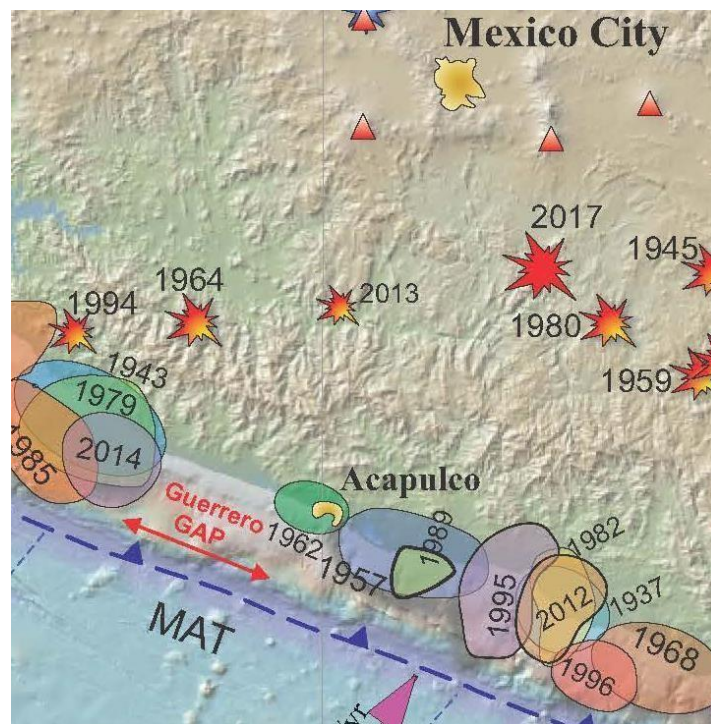
Fuente: Kostoglodov, V y Pacheco, J. (2000).



Una de las brechas con mayor potencial sísmico, se encuentra en la costa de Guerrero denominada como “Brecha de Guerrero” (Figura 10). Se tiene registro que entre 1899 y 1911 ocurrieron 4 sismos con magnitudes entre 7.5 y 7.8. En este sentido, dada su nula actividad en casi 89 años, la “Brecha de Guerrero” ha contenido energía en grandes proporciones, por lo que se esperaría un evento sísmico importante (SSN, 2014).

Una vez identificados los escenarios de magnitud esperada, es importante también capacitar y prevenir tanto a las autoridades de equipo de respuesta y apoyo, como a la población en general sobre el que hacer antes, durante y después de un sismo, con la finalidad de generar conciencia sobre el riesgo presente y las implicaciones que se tendría por un fenómeno de estas dimensiones. Por ende, sigue siendo fundamental continuar con el monitoreo de la brecha, en particular sobre las comunidades que integran la región de la costa y la mixteca oaxaqueña. (Instituto Estatal de Protección Civil, 2010).

Figura 10. Imagen donde se muestra la longitud de la Brecha de Guerrero, zona donde no se ha presentado un sismo en 89 años. Fuente: Kostoglodov, V y Pacheco, J. (2000).



A continuación, se presenta una tabla donde se resumen los daños por sismos en la República Mexicana en la temporalidad de 1957-2003; se puede observar que en el campo de las cifras de población afectada los números tienden a ser muy elevados pese al paso del tiempo, lo que podría significar que aún no se están tomando las medidas necesarias para prevenir este tipo de desastres, por ende el monto del daño también es un factor económico que genera importancia para el Estado, por las múltiples afectaciones a los servicios e infraestructura de la región, traduciéndose en grandes costos.

Tabla 1. Resumen de daños por sismos en la República Mexicana (1957-2003). Fuente: Fascículo Sismos, CENAPRED, 2014.

Sismos 1957 - 2003	Dececos	Población afectada	Afectaciones en edificios o casas	Monto del daño (millones de dólares corrientes)
Sismo en Guerrero y Ciudad de México 1957	160	Sin dato	Sin dato	25
Sismo en Guerrero y Michoacán 1964	45	4,000 personas afectadas	Sin dato	3
Sismo en la Ciudad de México 1979	5	3,750 personas afectadas	Sin dato	30
Sismo en Guerrero y Oaxaca 1985		10,000 personas damnificadas	2,204 viviendas, 20 escuelas, 11 templos y edificios públicos	sin dato
Sismo en la Ciudad de México 1985	6000	30,000 heridos y 150,000 damnificados	3,300 edificios dañados, 36,000 viviendas destruidas y 65,000 viviendas con daños considerables, 50 hospitales, 34% del total de los edificios de la administración pública, el 11.4% del total de la infraestructura educativa y el 8.9% del total de la pequeña industria y comercio	4,103.50
Sismo en Colima 1995	58	35,000 personas damnificadas	3 hoteles, termina de autobuses, edificio de telmex, cinematógrafo, 89 edificaciones, una iglesia, la presidencia municipal de Cihuatlán	sin dato
Sismo en Puebla y Oaxaca 1999	15	2 millones de personas, la mayor parte en Puebla	500 edificios de los siglos XVI y XIX en Puebla, 7,867 viviendas dañadas en Oaxaca, 65 edificios de salud en Puebla, 22 edificios de salud en Oaxaca, 870 escuelas en Puebla, 468 escuelas en Oaxaca, 109 inmuebles históricos dañados en Oaxaca	150.9
Sismo en Oaxaca 1999	35	360,000 personas afectadas	43,200 viviendas afectadas, 2,800 escuelas 270 edificios en la ciudad, 15 unidades de salud y 240 iglesias	149.8
Sismo en Guerrero 2001	0	3,000 personas afectadas	2,600 viviendas afectadas	3.2
Sismo en Colima 2003	21	2,000 personas afectadas	3,757 viviendas, 387 escuelas, 94 inmuebles de la universidad, 134 unidades de salud, afectaciones en edificios históricos, artísticos y religiosos y en varios edificios públicos y en infraestructura urbana de varias localidades	99.8

Nuestro territorio se encuentra clasificado según el peligro sísmico, esto se ha hecho con base a registros históricos de grandes sismos ocurridos en México, catálogos de sismicidad y aceleración del terreno. A esta clasificación se le conoce como “Regionalización Sísmica” la cual divide al país en 4 zonas (A, B, C y D) cuyo peligro es de menor a mayor. Su objetivo principal junto al manual de obras civiles es proporcionar a los diseñadores y constructores la información necesaria para el cálculo de valores de diseño de obras de tal forma que sean construidas tomando en cuenta los posibles efectos de un evento sísmico, para que resulten suficientemente seguras y no excedan los costos (Gutiérrez *et al.*, 2014).

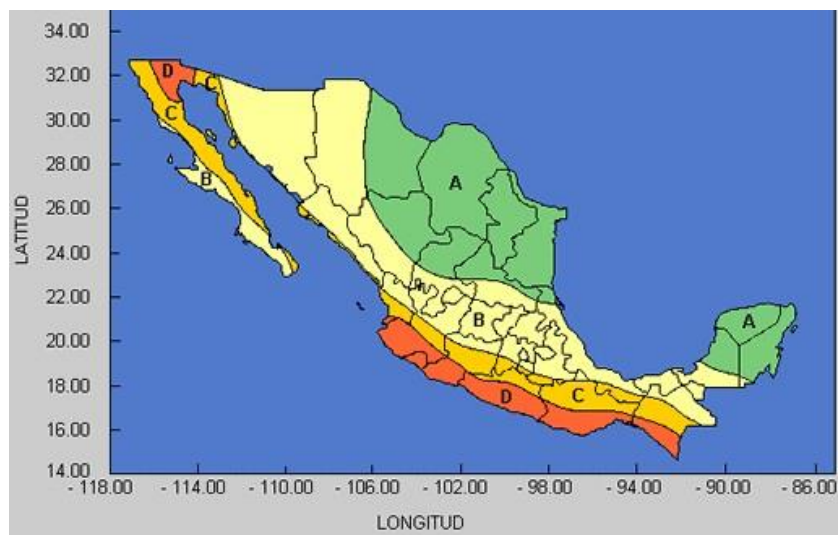
De acuerdo con el Manual de Diseño de Obras Civiles, de la Comisión Federal de Electricidad (2008), las características de cada clasificación son:

La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% del valor de la gravedad (g).

Las zonas B y C, presentan sismicidad con menor frecuencia o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el 70% de g.

En la zona D han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones del terreno que se esperan pueden ser superiores al 70% de g.

Figura 11. Se muestra la regionalización sísmica de la República Mexicana. Regiones Sísmicas en México (10 de agosto de 2019).



1.5 Antecedentes sobre eventos sísmicos en las regiones de estudio

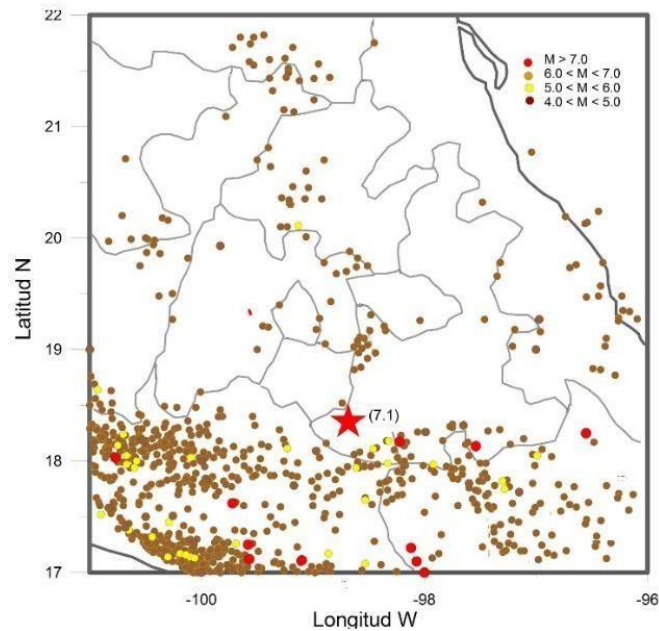
En este subcapítulo veremos de forma general los eventos sísmicos que se han desarrollado en la región central y suroeste de México, de acuerdo con lo registrado por el Servicio Sismológico Nacional.

1.5.1 Región central

La ruptura del sismo del 19 de septiembre de 2017 ocurrió dentro de la placa oceánica de Cocos (sismo intraplaca), a una profundidad de 57 km. Este tipo de sismos no son tan comunes como los sismos causados por la subducción de la Placa de Cocos bajo la placa norteamericana. Sin embargo, este evento registró una magnitud de 7.1 y fue localizado a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, en el estado de Puebla y aproximadamente a 120 km de la Ciudad de México. Debido a la cercanía con varias ciudades del centro del país ocasionó la pérdida de cientos de vidas humanas, así como grandes daños a la infraestructura de la región (viviendas, edificios, comercios y empresas) (SSN, 2017).

En la Figura 12 se muestran los epicentros de eventos sísmicos que ha registrado el Servicio Sismológico Nacional en la zona central del país, a través del catálogo de sismos el cual muestra datos desde el año 1900 hasta la actualidad. Los puntos de color rojo corresponden a eventos con magnitud mayor a 7 que han ocurrido históricamente en la región. El evento más reciente de magnitud considerable fue el que ocurrió el 24 de octubre de 1980 el cual alcanzó una magnitud de 7.1 y se localizó a 19 km al oeste de Acatlán Osorio, Puebla, ocasionando daños importantes en varias ciudades.

Figura 12. Se muestran los epicentros de eventos sísmicos en la región central de México de acuerdo con el Reporte especial del sismo del 19 de septiembre de 2017 Puebla-Morelos (M 7.1), los colores indican los rangos de acuerdo a la magnitud del evento y la estrella de color rojo indica el epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017.



1.5.2 Región Suroeste

El estado de Oaxaca ha registrado aproximadamente el 25 % de los sismos del país (SSN, 2018). Resalta por su alta sismicidad, dado que existe el contacto convergente de dos placas tectónicas la oceánica de Cocos y la continental de Norteamérica, dicha interacción entre ambas placas se da desde el estado de Chiapas hasta el estado de Jalisco.

El último sismo de magnitud 7.2 registrado en el estado de Oaxaca se reportó en el año 2018 en las cercanías de Pinotepa Nacional, dicho sismo fue sentido en varias ciudades de Oaxaca e incluso en el estado de Guerrero (SSN, 2018). En septiembre de 2017 se registró un sismo de magnitud 8.2 en el Golfo de Tehuantepec ocasionando graves daños a dicha región, principalmente en los poblados de Juchitán, el Espinal y Asunción Ixtaltepec, dicho sismo ocurrió al interior de la Placa de Cocos es decir un sismo intraplaca (SSN, 2018). También se tiene registro de algunos otros temblores del siglo pasado, como el del 15 de enero de 1931 de

magnitud 7.8 y el de 30 de septiembre de 1999 de magnitud 7.5, el cual causó varios muertos y daños importantes a infraestructura en viviendas, escuelas, hospitales, puentes y carreteras. En agosto de 1965 se registró un sismo de magnitud 7.5 y trece años después en 1978 se registró otro sismo de magnitud 7.6. Por último, en 2012 se registró también un sismo de magnitud 7.5 en las cercanías de Pinotepa Nacional y Ometepec, Guerrero (SSN, 2018).

Las localidades que han resultado históricamente más afectadas por eventos sísmicos son: Puerto Escondido, Pochutla, Puerto Ángel, Huatulco, Loxitla, Cacahua, Jamiltepec, Pinotepa Nacional, Ometepec y Miahuatlán (SSN,2018). Una vez que se conocen los sitios donde han ocurrido sismos de magnitudes importantes, se debe tener en cuenta que son sitios con alto riesgo a sufrir alguna perturbación de los fenómenos sísmicos, por ello el identificarlos permite a las autoridades coordinar acciones de prevención y mitigación en esos sitios.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA Y EL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR)

En el siguiente capítulo se muestran los elementos que integran la técnica de percepción remota, así como su aplicación en temas de monitoreo del fenómeno sísmico. Por otra parte, se analizan los componentes de las imágenes de RADAR y su interacción con los objetos inmersos en la superficie terrestre.

2.1 Elementos de la Percepción Remota

La percepción visual de los seres humanos presenta limitaciones debido a la restringida sensibilidad espectral de nuestras células sensoriales, las cuales solo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado “*espectro visible*” (Villegas, 2008). Otra de las limitaciones de la visión humana radica en la perspectiva de observación, esto sucede porque el campo de visión del hombre se encuentra limitado a su propia estatura o bien a veces ampliada con la ayuda de observatorios naturales como las montañas o artificiales como los edificios (Collado, Gama y Díaz, 2015).

El ser humano al verse limitado por estas características, desarrolló sensores artificiales montados sobre plataformas (aviones o satélites), lo que permitió acceder a información no detectable por el ojo humano a través de la energía ultravioleta, infrarroja y de microondas, expandiendo notablemente su conocimiento del medio, además de facilitar la interpretación de los procesos naturales y antropogénicos que ocurren en el territorio. Esto quiere decir que la PR es una técnica que adquiere información de los objetos sin estar en contacto físico con ellos, permite obtener una imagen de la superficie terrestre desde el aire o el espacio, para su posterior tratamiento en el contexto de una aplicación específica (Villegas, 2008; Collado *et al.*; 2015).

Un sistema de PR debe incluir los siguientes elementos (Hernández *et al.*, 2008):

- **fFuente de energía:** flujo energético que debe ser detectado por el sensor. En la teledetección pasiva el sensor necesita la energía solar para poder realizar

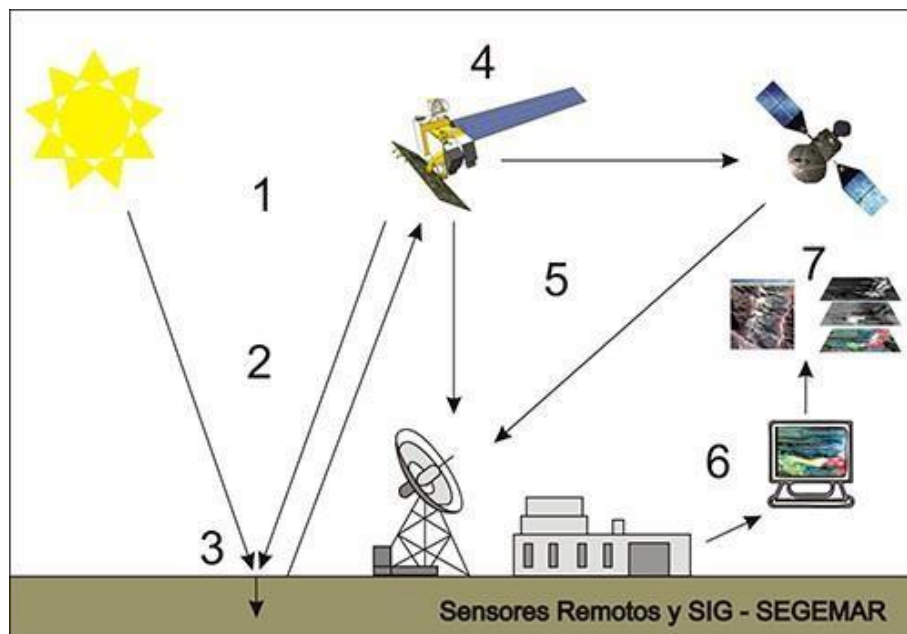
su trabajo, en cambio cuando el satélite puede producir su propia fuente de energía, estamos hablando de una teledetección activa.

- **superficie terrestre:** constituye el blanco de observación de los sistemas de PR. Está formado por un conjunto de sedimentos, rocas, vegetación, agua, construcciones humanas, los cuales reciben la señal energética que procede del sol o del mismo sensor y la reflejan o emiten de acuerdo con sus características físicas.
- **sistema sensor:** tiene como función captar la energía procedente de los diversos materiales que constituyen la superficie terrestre, codificarla, grabarla o enviarla directamente a un sistema de recepción terrestre. Dicho sensor se encuentra sustentado en alguna plataforma ya sea avión o un satélite.
- **sistema de recepción- comercialización:** es donde se reciben los datos transmitidos desde la plataforma, se realizan ciertas correcciones y se graban en formatos apropiados para que puedan ser accesibles a los usuarios.
- **procesador:** es quien opera esta información en formato digital, para generar imágenes que se constituyen en claves temáticas o cuantitativas orientadas a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- **intérprete:** es quien analiza los productos generados por el procesador, para generar un mapa temático que puede ser resultado del proceso de interpretar las imágenes de PR o de la conjunción de dicho proceso con trabajo de campo.
- **usuario final:** encargado de analizar el producto temático, fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

El sol es una fuente de energía para los sensores pasivos de total importancia en su funcionamiento, pero dicha energía puede ser sustituida por una fuente de energía artificial generada por el mismo satélite denominado sensor activo, posteriormente se tiene una plataforma o satélite que contiene un equipo sistematizado y donde se transporta a dicho sensor o serie de sensores quienes captan la información de la superficie terrestre (objeto a observar). Dicha información es enviada y almacenada a un sistema receptor para después realizar el análisis y obtener una aplicación final (Collado *et, al.*, 2015).

En la Figura 13 se ejemplifican dichos elementos, mostrando la forma activa y pasiva de obtener la información.

Figura 13. Se muestran los elementos básicos de un sistema de teledetección: 1) fuente de energía pasiva o activa, 2) trayectoria y su interacción con la atmósfera, 3) incidencia en la superficie terrestre, 4) satélite, 5) ciclo de toma y descarga de datos, 6) estación terrena de preproceso, 7) información al usuario. Fuente: (Servicio Geológico Minero Argentino, 2018)



Los sensores en un satélite de observación de la Tierra cuentan con diferentes resoluciones que permiten obtener información particular de un sitio. Existen 4 tipos de resoluciones (Hernández *et, al.*, 2008):

- **resolución espacial:** se refiere al objeto más pequeño que se puede distinguir sobre una imagen. Entre mayor sea la resolución se apreciará

mejor los detalles de la imagen. El tamaño del pixel registrado por el sistema de observación de la tierra indica su resolución. Esta puede ser de 1 o 1000 m por pixel.

- **resolución espectral:** es la capacidad para resolver las características espectrales y bandas que puede discriminar el sensor. Los sensores de alta resolución espectral permiten recoger información en bandas muy estrechas.
- **resolución radiométrica:** es la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe el sensor, indicada por los niveles de gris recogidos.
- **resolución temporal:** también llamada tiempo de revisita, es el tiempo que se requiere para volver a adquirir datos de una misma ubicación. Este parámetro depende de las características orbitales del satélite, así como la característica del sensor.

Asimismo, las características que ofrece la técnica de PR son:

- **cobertura global y periódica de la superficie terrestre:** se puede obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la Tierra con intervalos de tiempo determinados, en áreas de difícil acceso como desiertos, bosques de lluvia tropical, zonas polares etc.
- **visión panorámica:** la altura orbital de los satélites capta grandes áreas, proporcionando una visión amplia de los rasgos de la superficie terrestre. Si hiciéramos una comparación con la toma de una fotografía aérea a escala de 1:18000, la fotografía captaría una superficie aproximada de 16,000 km², en cambio una imagen del satélite de la constelación Landsat por ejemplo nos permite contemplar 34000 km² en una sola adquisición y aún más en los satélites de observación meteorológica como el NOAA el cual aumenta hasta 9 millones de km² su visión.
- **homogeneidad en la toma de datos:** áreas extensas de la superficie terrestre son captadas por un mismo sensor en cuestión de segundos asegurando la coherencia de los datos.
- **información sobre regiones fuera del espectro visible:** diferentes sensores generan imágenes a partir de la energía electromagnética infrarroja

o de microondas, obteniendo así mayor información sobre el objeto o área de estudio.

- **formato digital:** de esta forma se agiliza la manipulación de los datos generados por diferentes constelaciones de satélites y permite que el usuario obtenga dicha información en cuestión de minutos.

En los últimos 50 años la PR ha llegado a redefinirse, puesto que el conocimiento de las características físicas de la superficie terrestre y la atmósfera, han extendido sus estudios al océano y el sistema solar, derivado de los avances tecnológicos aplicados a las actividades humanas, si n embargo, es importante destacar que la información obtenida mediante esta técnica, es complementaria con otras disciplinas y no invalida la importancia del trabajo en campo. (Navarro, 2014; Fernández, 2009; Collado *et al.*, 2015; Villegas, 2008).

2.1.1 Aplicación de la Percepción Remota

En la actualidad, el uso de tecnologías espaciales y su procesamiento mediante técnicas de PR han sido de gran utilidad para la administración, generación y análisis de insumos cartográficos, entre los que destacan: la generación de modelos digitales de elevación, la estimación de hundimientos regionales, la detección y monitoreo de desli zamientos, el seguimiento de eventos atmosféricos, tales como huracanes, ciclones tropicales y la estimación de áreas inundadas tras el efecto de algún fenómeno hidrometeorológico, de igual forma el monitoreo y análisis de áreas incendiadas, el análisis de la cubierta forestal, el monitoreo sobre la cobertura glaciaria y por supuesto el estudio y medición de las deformaciones del terreno causadas por eventos geológicos como las erupciones volcánicas y los sismos.

Además, el hecho de poder analizar los fenómenos desde otras ópticas de la ciencia permite a los expertos y a los tomadores de decisiones generar planes de prevención en las zonas donde existe el riesgo, evitando así las pérdidas humanas, la afectación de los servicios básicos y la infraestructura en general.

La evolución de la PR ha demostrado avances significativos para una serie de temas y aplicaciones, en los últimos años ha funcionado para recopilar datos de desastres en general, puesto que permite evaluar de forma eficiente y a bajo costo las zonas

de afectación. Los fenómenos naturales son una de las áreas de mayor uso para la PR, ya que los sensores remotos capturan múltiples imágenes sobre el evento en cuestión y lo hacen en diferentes instantes de tiempo. El manejo posterior de la información, permite realizar un análisis tan detallado como sea necesario, con la finalidad de proporcionar a las autoridades y a los tomadores de decisiones, el escenario general de la situación y el riesgo existente para que se tomen las medidas necesarias en las fases de prevención, mitigación, preparación y recuperación (Parra, Tiberio y De la Rosa, 2015).

Las actividades específicas que se realizan dentro de la administración de los desastres derivados de algún fenómeno natural, son de gran importancia para el campo de la PR ya que esta disciplina puede elegir los sensores remotos adecuados para proporcionar datos que sean útiles a cada fenómeno y para cada fase de la emergencia.

La planificación del desarrollo en áreas propensas a movimientos sísmicos es bastante compleja debido a la frecuencia de ocurrencia que varía por décadas o siglos, además de no poder predecir en qué momento ocurrirá un sismo. Por ello la fase de mitigación hace énfasis en planificar el uso de tierras, en la resistencia de las edificaciones a partir del uso consciente de los manuales de construcción, en los planes de respuesta a emergencia (simulacros, revisión de zonas de seguridad) y en la incorporación de medidas de mitigación en el proceso de reconstrucción (USAID, 1993).

De acuerdo con Guido y Hans (2014), la PR en la administración de desastres realiza tareas específicas como:

- Detección de daños y determinación de la magnitud del desastre.
- Identificación de áreas afectadas.
- Localización de lugares no afectados para la instalación de personal de rescate, centros de planificación y albergues.
- Simulación de posible amenaza a través de modelos matemáticos-científicos.
- Seguimiento en la fase de recuperación.
- Generación y actualización de mapas de riesgo.

En el caso de los sismos, los objetivos específicos que pueden ser logrados a través de la PR durante los diferentes procesos de administración de la emergencia se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Objetivos que plantea la percepción remota para cada proceso de la administración de desastre por un sismo. Elaboración propia a partir de información obtenida de Guido y Hans (2014).

FENOMENO NATURAL	MITIGACIÓN	PREPARACIÓN	RESPUESTA	RECUPERACIÓN
SISMO	Generación de mapas del lineamiento de uso del suelo.	Monitoreo de deformaciones y de la actividad sísmica.	Adquisición de datos en tiempo casi real sobre áreas destruidas y dañadas.	Cálculo de las deformaciones del terreno derivadas de un evento sísmico/ Detección de defectos arquitectónicos tras el evento sísmico.

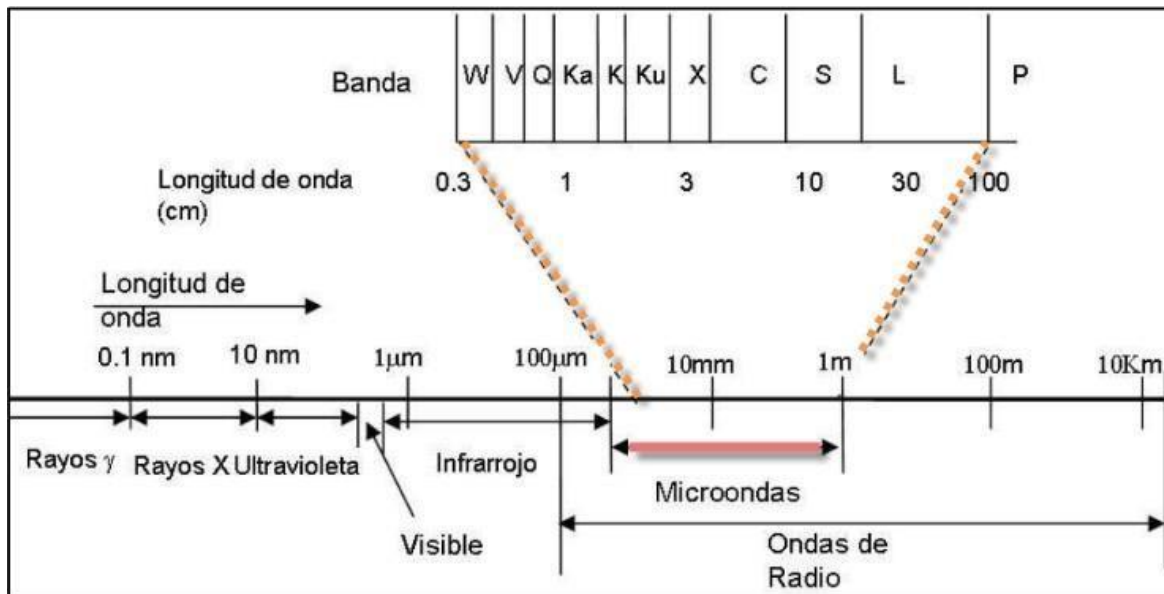
Las observaciones realizadas por sensores instalados en plataformas aéreas han sido de gran ayuda para el estudio del medio ambiente, pero también se ha descubierto un gran potencial en la administración del riesgo de desastre, las fases de mitigación, respuesta y recuperación son algunos de los procesos en los que la PR ha intervenido con éxito. Su utilidad va desde cartografiar daños, hasta realizar monitoreo de la deformación de la corteza para hacer frente a las fases de mitigación y preparación a través del uso de las técnicas InSAR (interferometría Radar) o DInSAR (Interferometría diferencial), puesto que se basan en múltiples observaciones de la zona afectada, adquiriendo imágenes a partir de un Radar de Apertura Sintética (SAR) que genera datos de gran precisión para el cálculo de la deformación del terreno (Guido y Hans, 2014).

2.1.2 Imágenes de satélite RADAR

Las imágenes tipo RADAR (*Radio Detection And Ranging*) representaron un avance significativo en las técnicas de PR debido al control de la fuente generadora de ondas. Aquella fuente de energía que anteriormente era proporcionada por el sol, ahora se proporciona de manera artificial por el mismo satélite, pudiendo así controlar la emisión de ondas en una determinada frecuencia (Fernández, 2009).

Las imágenes de RADAR trabajan en un segmento específico del espectro electromagnético; este segmento corresponde a las microondas (Figura 14) que va de 0.3 a los 100 cm. Por lo tanto, dichas imágenes ofrecen ventajas como la capacidad de atravesar la nubosidad y la lluvia permitiendo analizar diferentes fenómenos en casi cualquier condición atmosférica y en horarios nocturnos (Fernández, 2009).

Figura 14. Se muestra el segmento del espectro electromagnético en donde trabajan las imágenes de RADAR. Fuente: Fernández (2009).



El principio básico de un sistema de radar es el emitir energía electromagnética desde una antena, propagándose por el espacio hasta ser interceptada por el objeto de interés, el cual recibe y redirige esa señal en diferentes direcciones. Parte de esta señal que interacciona con el objeto, llega de vuelta a la antena del radar que se encarga de procesar la información de dicho objeto (Guerrero y Hernández, 2017).

Como menciona Olmsted (1993) la detección por radar se ha desarrollado sobre cuatro principios tecnológicos:

1. La capacidad de una antena para emitir un pulso corto con dirección precisa.
2. La capacidad para detectar con precisión, el eco dispersado de un objeto.
3. La capacidad para medir el tiempo entre la emisión y la detección.
4. La capacidad para escanear con un haz direccionado y examinar un área extendida.

La energía electromagnética viaja a través del espacio en forma de ondas, las cuales tienen características específicas de velocidad (c), longitud de onda (λ) y frecuencia (f). Estas ondas son el resultado de la interacción entre campos eléctricos y magnéticos (Guerrero y Hernández, 2017).

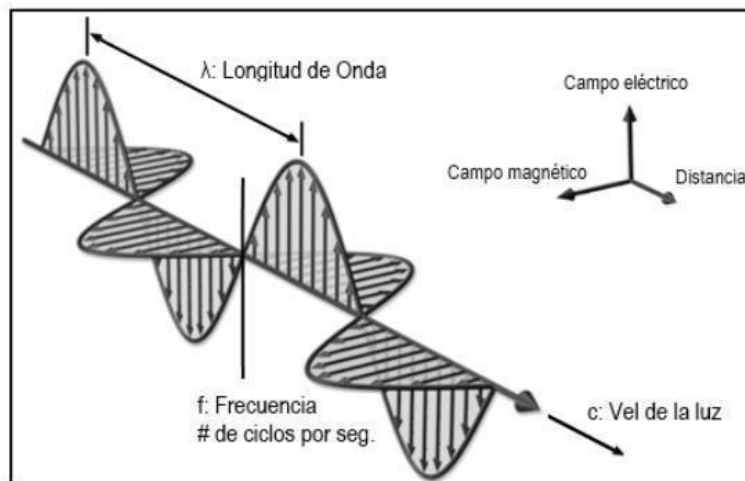
Dichas variables se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$c = f\lambda$$

Por lo que una longitud de onda se define como:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Figura 15. Se muestran los componentes de una onda electromagnética. Fuente: Guerrero y Hernández (2017).



La frecuencia (f) se mide en ciclos por segundo (Hertz), la velocidad (c) se mide en metros por segundo y finalmente la longitud de onda (λ) se mide en metros. En las imágenes de radar existen expresiones particulares como la "Amplitud", que es la distancia del centro al extremo del pico de la misma, la "Fase" que es la posición de un punto en un momento específico en el ciclo de la onda y la "polarización" que es

la orientación de la onda (vertical y horizontal) la cual permite una medida en la simetría del objetivo (Podest, 2017).

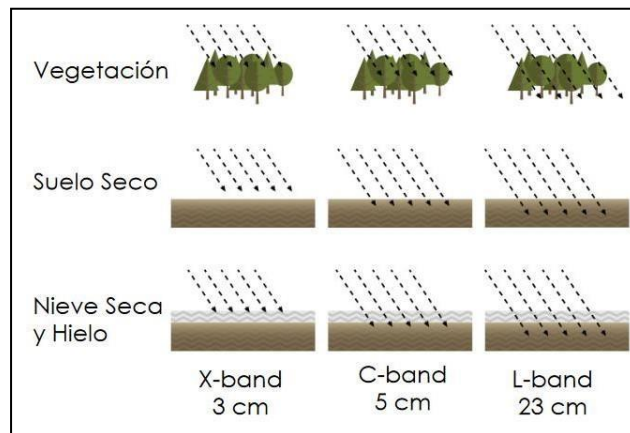
Cabe mencionar que la polarización puede ser de dos formas que dependerán de cómo se recibe la energía transmitida de la antena del radar al objetivo y viceversa; para efecto de una misma orientación tendremos HH, VV y cuando se tiene una orientación distinta entre la emisión y la recepción se expresa así: HV, VH (Guerrero y Hernández 2017; Podest, 2017).

2.1.3 Características e Interacción de la señal RADAR

La penetración de la señal funge como uno de los factores más importantes a considerar en la selección de la longitud de onda. Es decir, la penetración a través de la vegetación o el suelo, incrementa mientras más larga es la longitud de onda (Podest, 2017).

A continuación, en la Figura 16, se muestran 3 tipos de bandas con sus longitudes de onda y su relación con la penetración.

Figura 16. Se muestra un ejemplo de la penetración en 3 diferentes ambientes y con 3 tipos de longitud de onda, podemos observar que la mayor penetración sucede al momento de utilizar la banda L que tiene mayor longitud de onda. Fuente: NASA (s.f).



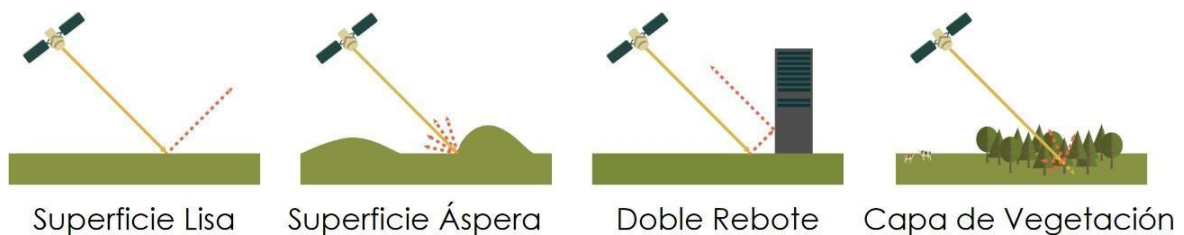
La señal captada por el radar se denomina dispersión o retrodispersión, que es el reflejo o rebote de la señal, generalmente difuso, dispersándose en todas las direcciones opuestas a la señal incidente (Figura 17). Cabe mencionar que todos los objetos producen reflectividad, pero hay materiales como el metal que no produce una reflexión difusa, sino que se comportan más bien como un espejo. En

la transmisión de la señal emitida y la señal captada se obtienen mediciones sobre dirección, distancia y velocidad del objetivo (Fernández y Soria 2015).

Los factores involucrados en la captación de datos de radar incluyen la longitud de onda de la radiación incidente, la fuerza y la polarización de la señal, los ángulos de incidencia, la huella o anchura del barrido, la distancia, la orientación del objetivo y la resolución. Mientras que las propiedades inherentes de los objetivos incluyen la rugosidad del terreno, los factores dieléctricos indicadores de humedad, la rugosidad de los materiales, el tamaño absoluto y relativo del objetivo respecto a la sección transversal del radar (Fernández y Soria 2015).

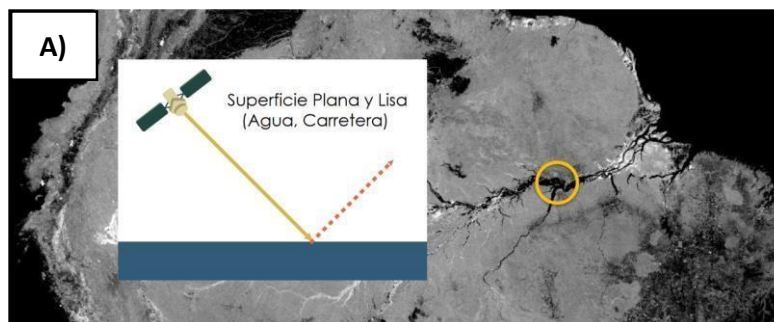
La señal del RADAR es sensible principalmente a la estructura de una superficie. Dicha superficie aparecerá áspera o lisa en la imagen, de acuerdo a la escala de las variaciones de la superficie a la longitud de onda (Podest, 2017).

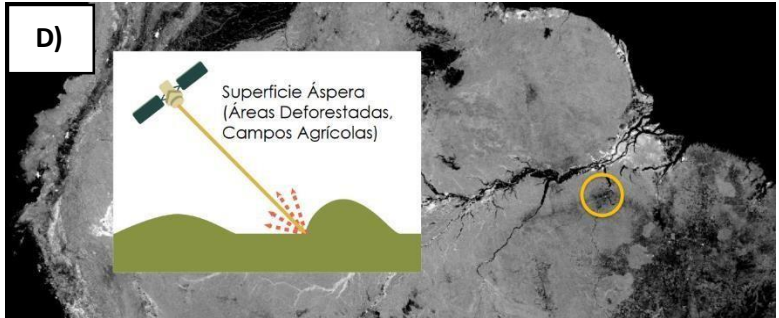
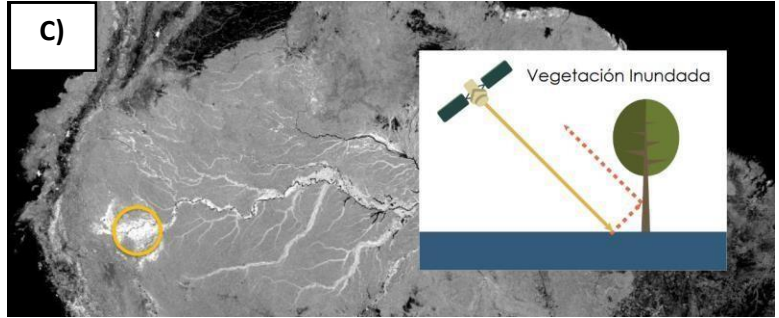
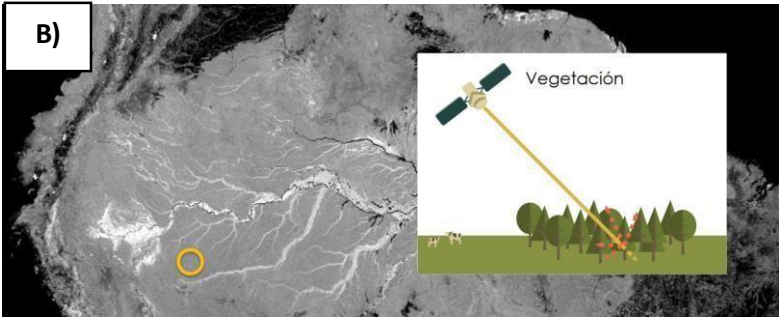
Figura 17. Se muestran los diferentes mecanismos de retrodispersión. Fuente: NASA (s.f).



Algunos ejemplos reales de estos mecanismos de retrodispersión en las imágenes de radar se muestran a continuación:

Figura 18. Se muestran imágenes de la cuenca amazónica en 2015, con los diferentes mecanismos de retrodispersión. **A)** Se resalta en un círculo amarillo la zona del río que representa mecanismo de retrodispersión de superficie plana. **B)** Se muestra una superficie boscosa y su mecanismo de retrodispersión. **C)** Área con vegetación inundada y su mecanismo de retrodispersión denominado de doble rebote. **D)** Superficie con áreas deforestadas (ásperas) y su mecanismo de retrodispersión. Fuente: NASA (s.f).





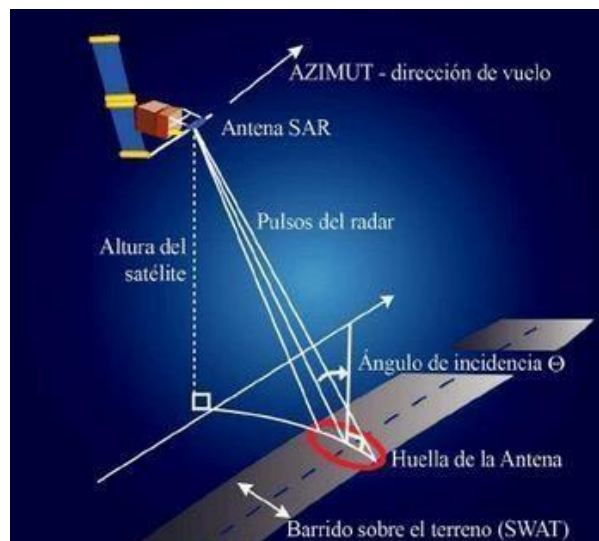
2.2 Radar De Apertura Sintética (SAR)

El SAR es un sistema que opera en la frecuencia de las microondas, utiliza el movimiento relativo entre la antena y una región de interés con el fin de obtener una resolución espacial más detallada (Duarte, 2017).

Este sensor produce imágenes de vista lateral lo que quiere decir que los pulsos emitidos son enviados hacia el terreno en dirección perpendicular al vuelo del vehículo ya sea aeronaves o satélites. La antena montada en la plataforma móvil ilumina repetidamente una escena con pulsos de ondas. Los ecos recibidos en diferentes posiciones derivados de la trayectoria de la antena, son procesados matemáticamente para crear una imagen de la región de interés (ESA, s.f.; Duarte, 2017; Fielding, 2018).

El radar y el SAR registran el tiempo que tarda un pulso en volver, así mismo miden la intensidad y la fase de la microonda. Las señales de fase producen un “interferograma” que se puede definir como una nueva imagen resultado de la combinación de dos imágenes SAR de la misma zona, pero con temporalidad diferente. El radar interferométrico (InSAR) se utiliza para medir elevaciones del terreno, mientras que la Interferometría Diferencial (DInSAR) se emplea para medir desplazamientos (ESA, s.f.; Fielding, 2018).

Figura 19. Se muestra el funcionamiento básico de un sistema SAR. Recuperado de: Fernández y Soria (2015)



2.2.1 Ruido (Speckle) en las imágenes SAR

De acuerdo con Parra *et al.* (2015) el Speckle:

“es un patrón indeseado que es producido por la interferencia mutua de un conjunto de frentes de onda reflejadas de forma difusa por los elementos que componen el terreno”.

Es decir, un ruido granular que existe inherentemente y degrada la calidad de las imágenes SAR. Dicho ruido se manifiesta por puntos claros y oscuros (Figura 20) que son originados por la retrodispersión, es decir el “eco” que se refleja en el terreno y su relación con la rugosidad del suelo. La reducción de ruido en las imágenes, es de gran importancia para poder obtener datos de mejor calidad. El uso de filtros proporcionados por softwares a la hora del procesamiento de nuestras imágenes SAR, reducen el ruido y proporcionan una calidad más alta en cuanto a los datos intrínsecos de las imágenes (Parra, J, *et al.*, 2015; Podest, 2017).

Figura 20. Se muestra el ruido granular (Speckle) en una imagen SAR. Fuente: NASA’s Applied Remote Sensing Training Program. Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética, 2017.



2.3 Programa Espacial Copernicus

El programa “*Copernicus*” liderado por la Comisión Europea (EC) en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), tiene como objetivo apoyar el desarrollo sostenible y la gobernanza global del medio ambiente, al proporcionar datos, información, conocimiento y productos continuos para servicios ambientales y de seguridad (ESA, s.f). Dichos datos son recabados por los satélites de observación de la tierra “**Sentinel**” que, a través de un sistema unificado, son distribuidos de forma gratuita a una amplia gama de usuarios públicos y privados, así como de instituciones científicas que requieran una serie de servicios temáticos como son: la gestión del suelo, el medio marino, el estudio de la atmósfera, la respuesta a situaciones de emergencia por fenómenos naturales, así como el monitoreo ambiental y climático.

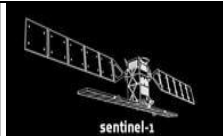

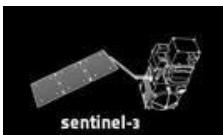




El componente espacial del programa se basa en 6 misiones con distintos campos de utilidad: **Sentinel 1** el cual proporciona imágenes de RADAR en banda C utilizada para servicios terrestres y oceánicos; el **Sentinel 2** proporciona imágenes multiespectrales de alta resolución, para el monitoreo de vegetación, del suelo, de la cubierta de agua, las vías navegables y las zonas costeras. El **Sentinel 3** mide la topografía marina, su temperatura y la de la Tierra, además apoya a los sistemas de pronóstico oceánico, así como el monitoreo ambiental y climático. El **Sentinel 4** y **Sentinel 5** aún se encuentran en desarrollo, dichas misiones serán de apoyo para el **Sentinel 5P** (Precursor) actualmente en operación, para el monitoreo atmosférico, proporcionando datos oportunos sobre una multitud de gases traza y aerosoles que afectan la calidad del aire y el clima. Finalmente, el **Sentinel 6** fue puesto en órbita a finales de 2020, el cual lleva un altímetro de radar para medir la altura global de la superficie del mar y es principalmente utilizado en la oceanografía operacional y en estudios climáticos (ESA, s.f).

A continuación, en la tabla 3 se muestra un desglose general de cada satélite con su constelación “A” y “B”, además de su fecha de lanzamiento y algunos de sus campos de utilidad, por último, se añade una imagen ilustrativa de cada satélite.

Tabla 3. Satélites Sentinel del programa *Copernicus* con su fecha de lanzamiento y su campo de utilidad.

Elaboración propia a partir de información consultada en:

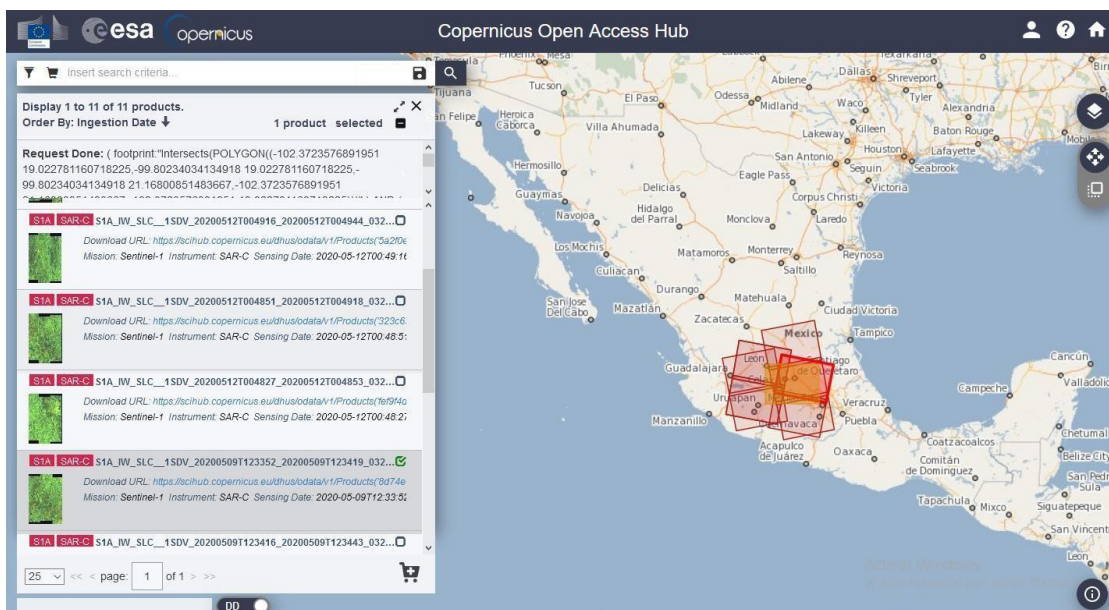
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4

SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	CAMPOS DE UTILIDAD	IMAGEN
Sentinel-1A Sentinel-1B	03 de abril de 2014 25 de abril de 2016	Servicios terrestres y oceánicos	
Sentinel-2A Sentinel-2B	23 de junio de 2015 07 de marzo de 2017	Monitoreo de la vegetación, del suelo, de la cubierta de agua, las vías navegables y las zonas costeras.	
Sentinel-3A Sentinel-3B	16 de febrero de 2016 25 de abril de 2018	Medición de la topografía marina y su temperatura. Apoyo a los sistemas de pronóstico oceánico, así como el monitoreo ambiental y climático	
Sentinel 4 Sentinel 5 Sentinel 5P	2021 2021 13 de octubre de 2017	Monitoreo atmosférico, proporcionando datos oportunos sobre una multitud de gases traza y aerosoles que afectan la calidad del aire y el clima.	  
Sentinel 6	2020	Medición de la altura global de la superficie del mar, principalmente utilizado para la oceanografía operacional y para estudios climáticos.	

De acuerdo con el último reporte anual de operaciones del programa *Copernicus* publicado en 2021, el cual recopila datos de 2019 y 2020, el programa cuenta con 380,000 usuarios registrados en su plataforma, tiene una tasa de publicación diaria de más de 38,700 productos y un volumen de descarga promedio diario de 405 TiB (Tebibyte). Esto quiere decir que los usuarios han descargado un total de 405 millones de productos desde el inicio de operaciones de acceso a datos y hasta finales del 2020 (ESA, 2021).

Mediante la plataforma *Copernicus Open Access Hub* (Figura 21) podemos descargar imágenes de satélite adquiridas por las misiones Sentinel de forma gratuita, con especificaciones detalladas que versan sobre: elegir la plataforma del satélite, el tipo de producto, la polarización de la onda, el modo del sensor, buscar una imagen por el número de órbita relativa y por supuesto la fecha de adquisición de cada imagen. Posteriormente al llenado de las especificaciones, se realiza la búsqueda en la plataforma. Al terminar, el sistema proporciona una serie de imágenes con características y fechas similares, que permiten al usuario identificar y elegir la que mejor se adapte al análisis.

Figura 21. Se muestra el sitio web *Copernicus Open Access Hub* donde se descargan las imágenes de satélite de las diferentes misiones de Sentinel. Fuente: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>



Los datos de usuarios registrados a nivel mundial, muestran a Europa como el continente con la comunidad de usuarios más grande, llegando a 139,657 usuarios registrados a finales de 2020, como lo muestra la Figura 22.

Sin embargo, se ha notado un crecimiento importante en la interacción de este programa con otros continentes. Oceanía por ejemplo, mostró un aumento significativo del 84% llegando hasta los 10,361 usuarios; esto podría relacionarse con la temporada de incendios forestales que se presentaron en Australia, lo cual requirió un monitoreo constante con imágenes de satélite para visualizar las zonas afectadas (ESA,2020).

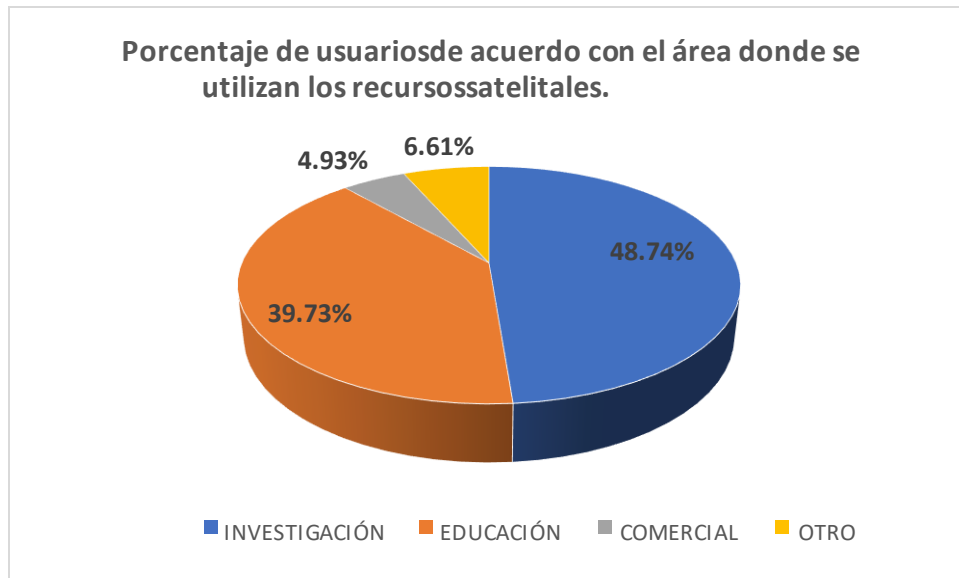
Figura 22. Se muestra el número de usuarios registrados por continente desde el comienzo operacional del programa y hasta 2020. Asimismo, se muestra el aumento porcentual en el número de registros por continente comparado con 2019. Fuente: (ESA, 2020).



Otra de las características importantes que resulta de la información proporcionada por los usuarios al momento de su registro, es el uso que le dará a los datos proporcionados por *Copernicus*, de esta forma la Agencia Espacial Europea realiza un análisis sobre la intención y los ejes temáticos donde se ocupará dicha información (ESA, 2018).

De acuerdo con las estadísticas publicadas por el programa *Copernicus*, el 48.74% de los usuarios utilizan los datos para el área de investigación, el 39.73% para fines educativos, el 4.93% para uso comercial y la opción “otros” tiene un 6.61% en el registro de los usuarios (ESA, 2018).

Figura 23. Se muestra el porcentaje de usuarios registrados en *Copernicus OpenAccess Hub* por tipo de uso declarado al final de 2018, como se observa el mayor porcentaje (48.74%) se encuentra en el área de investigación y el menor porcentaje (4.93%) en el área comercial. Fuente: (ESA, 2018).



2.3.1 Satélite Sentinel 1

Es un satélite vinculado al programa espacial “Copernicus”, compuesto de una constelación de dos satélites (1A- 1B) con órbita polar, es decir realiza su recorrido orbitando la Tierra de polo a polo con frecuencia establecida y sincronizada (Guerrero y Hernández, 2017).

El Sentinel-1, fue lanzado el 3 de abril de 2014 y el Sentinel-1B fue lanzado el 25 de abril de 2016, ambos satélites funcionan de manera complementaria para adquirir mayor cantidad de datos, en menor tiempo. La constelación cuenta con sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR) de banda C, los cuales obtienen información de la superficie terrestre y oceánica, a cualquier hora del día sin importar las condiciones atmosféricas. Proporciona imágenes de cobertura mundial, de doble polarización y con cuatro formatos de resolución que van desde los 5 m cubriendo una extensión de 400 km (Guerrero *et al.*, 2017).

Tiene una resolución temporal de 6 días utilizando datos de Sentinel 1A y 1B, cuenta con un tiempo de revisita de 3 días en el ecuador, menos de un día en el ártico, y entre 1 a 3 días en Europa y Canadá. Además, la rapidez con la que se transmite la información es de una hora después de la toma de adquisición del satélite (ESA, s.f).

Figura 24. Imagen del Sentinel-1 adquiriendo imágenes a través de su sensor activo, el Radar de Apertura Sintética (SAR). Fuente: (Misión Sentinel, s.f).



A continuación, se presenta la tabla 4, con las especificaciones y características del satélite Sentinel 1.

Tabla 4. Resumen de las características generales que componen el Sentinel-1. Elaboración propia a partir de información obtenida de Guerrero y Hernández (2017).

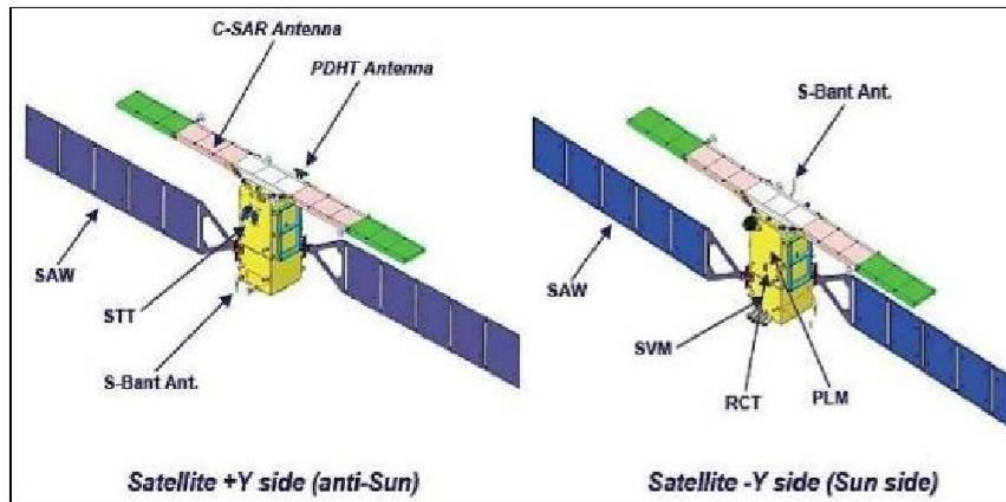
SENTINEL-1	
Órbita	Helio sincrónico o Polar, altitud 693km, 175 órbitas por ciclo.
Periodo Orbital	98.6 minutos
Resolución temporal	12 días en el ecuador
Capacidad de almacenamiento	1410 GB
Peso	2300 kg incluyendo 130 kg de Combustible monopropulsor 10
Autonomía operativa	96 horas
Sensor	Radar de apertura sintética, Banda C
Polarización	VV+VH, HH+HV, HH, VV
Resolución	5m x 20m
Tiempo de vida útil estimado	7 años

Los satélites Sentinel 1 A y B fueron creados por entidades que constituyen el consorcio industrial Thales Alenia Space Italy quien es el contratista principal, asimismo la compañía Astrium Germany es la responsable de la carga útil del Sensor activo SAR C. Esta plataforma de satélite cuenta con 3 ejes de estabilización mediante 4 sensores (sensor de sol, de estrella, un giroscopio, y de campo magnético) (Guerrero *et, al.*, 2017).

El sentinel-1 está basado en la plataforma italiana multi-aplicativa que se desarrolló gracias a la experiencia generada por RADARSAT-2 y COSMO-SKYMED. La plataforma está equipada con dos alas (Figura 25), donde se encuentran paneles

solares capaces de producir hasta 5900 watts hasta el final de su vida útil, esta energía es almacenada en una batería modular (Guerrero *et al.*,2017).

Figura 25. Características generales que componen el Sentinel-1. Fuente: Guerrero y Hernández (2017).



2.3.2 Geometría de Adquisición del Sentinel-1

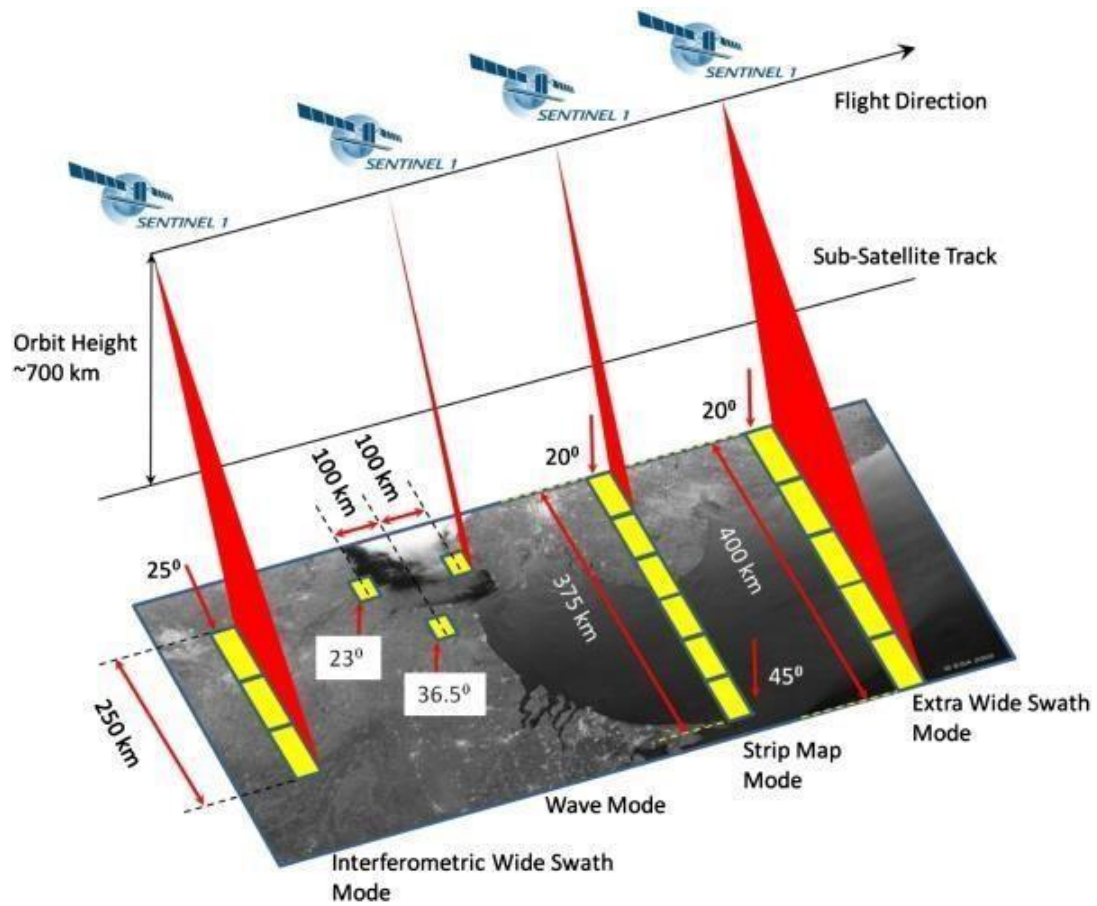
El instrumento a bordo del sistema Sentinel-1 adquiere imágenes en 4 modos exclusivos, con diferente resolución y cobertura. La finalidad en la adquisición, versa sobre la aplicación del estudio, el cual requerirá especificaciones particulares para llegar a los objetivos propuestos (ESA, s.f).

En la Figura 26, se muestran los modos de adquisición que realiza el Sentinel 1:

- **Stripmap (SM)** o “franja de mapa”:
proporciona datos con una resolución espacial de 5x5 m y una escena de vista del sensor sobre la superficie terrestre de 80 km.
- **Interferometric wide swath (IW)** o “Amplia Banda Interferométrica”:
este modo combina un ancho de escena de 250 km con una resolución de 5x20 m.
- **Extra wide swath (EW)** o “Franja externa ancha”:
este modo es empleado en zonas marítimas y polares dado que se necesita de una gran cobertura y tiempos de revisita cortos. El ancho de escena que proporciona este modo es de 400 km con una resolución de 20x 40 m.

- **Wave mode (WV)** o “Modo de ondas”:
este modo ayuda en la determinación de la dirección y altura de las olas del océano. Proporciona imágenes con una resolución de 20x20 km que adquieren alternativamente con dos ángulos de incidencia cada 100 km.

Figura 26. Se muestran los cuatro modos exclusivos de adquisición del Sentinel-1. Fuente: ESA (s.f).



Los productos Sentinel 1 se dividen también según el tipo de procesamiento ESA (s.f):

- **SLC (Single Look Complex):**
consiste en datos SAR enfocados, georreferenciados, usando los datos de altitud y órbita del satélite.
- **GRD (Ground Range Detected):**
consiste en datos SAR enfocados, que han sido detectados y proyectados a la línea del suelo usando un modelo elipsoidal terrestre como el WGS84.

CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Localización del Estado de Puebla

El estado de Puebla se encuentra ubicado al Sureste del Altiplano de la República, entre la Sierra Nevada y al Oeste de la Sierra Madre Oriental. Se encuentra entre los paralelos 17° 52' – 20° 52' latitud Norte y los 96° 43' y 99° 04' de longitud Oeste. Limita al norte con Veracruz al sur con Oaxaca y Guerrero; al oeste con Morelos, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo y al este con Veracruz (INAFED, 2010).

3.1.1 Geología

El estado de Puebla está dividido por cuatro provincias fisiográficas, una de ellas es la Sierra Madre del Sur, la cual presenta gran complejidad en cuanto a su origen geológico. En ella afloran granitos y rocas metamórficas de la era del Precámbrico con más de 900 millones de años de antigüedad. En la parte norte del estado se localizan rocas del Paleozoico de tipo metamórfica pertenecientes a la provincia Sierra Madre Oriental. En la región sureste, existen estratos plegados constituidos principalmente por rocas sedimentarias de edad Mesozoica, siendo de origen marino. Dentro de este tipo de rocas destacan las calizas de Tepexi de Rodríguez, las cuales contienen una gran diversidad de fósiles de peces. En la provincia Llanura Costera del Golfo Norte, se identifican suelos sedimentarios del cuaternario y del cretácico abarcando el 23.3% del territorio poblano, dicha sedimentación es formada por la erosión que presenta el terreno. La última provincia es el Eje Neovolcánico, en el cual abundan las rocas ígneas compuestas por lavas, tobas, brechas y cenizas volcánicas, producto de un alto dinamismo eruptivo durante el cenozoico (cuaternario y terciario), la edad aproximada de las rocas en esta provincia data de 65 millones de años (INEGI, 2000).

3.1.2 Localización del municipio de Chiautla de Tapia, Puebla

El municipio se localiza en la parte suroeste del Estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 18° 07' 48" y 18° 09' 42" de latitud Norte y los

meridianos 98° 21' 00" y 98° 48' 06" de longitud Occidental. Limita al norte con el municipio de Chietla e Izúcar de Matamoros, al sur colinda con los municipios de Xicotlan, Chila de la Sal y Cohetzala, al oeste colinda con los municipios de Tehuizingo y Axutla, al poniente colinda con los municipios de Huehuetlán, El Chico y Cohetzala. Cuenta con una superficie de 804.30 kilómetros cuadrados que lo ubica en el primer lugar con respecto a los demás municipios del Estado (INAFED, s.f).

3.2 Localización del estado de Oaxaca

El estado de Oaxaca se localiza en el suroeste del territorio mexicano, entre los 15°39' y 18°42' de latitud Norte, entre los 93°52' y 98°32' de longitud Oeste. Limita al norte limita con los Estados de Veracruz y Puebla, al sur con el océano Pacífico, al este con el Estado de Chiapas y al oeste con Guerrero. Este territorio ocupa el quinto lugar en extensión a nivel nacional (INAFED, s.f).

3.2.1 Geología

De acuerdo con INEGI (2004):

“el estado de Oaxaca muestra las características geológicas más complejas del país, debido a la serie de eventos tectónicos superpuestos que han ocurrido en este territorio y que en consecuencia han generado una gran diversidad de unidades litológicas aflorantes”.

Desde el Proterozoico Tardío la región fue afectada por eventos que definieron tres procesos geomorfológicos sobresalientes: el primero originó las montañas complejas de la Sierra Madre del Sur que están constituidas por rocas metamórficas, volcánicas e inclusive sedimentarias de origen marino y continental, el segundo proceso tiene que ver con montañas bajas y lomeríos de rocas sedimentarias, plegadas por el tectonismo activo de la zona, el tercer y último proceso tiene que ver con una formación de paisajes volcánicos de lomerío, producto de derrames y material piroclástico (INAFED, s.f).

Por otro lado, las sierras altas son caracterizadas por riscos y escarpes disectados por profundos cañones y barrancos. Dentro de los de origen marino se nota la presencia de un sistema kárstico que ha labrado dolinas y sumideros. En las

montañas bajas, así como en los lomeríos, presentan mesetas disectadas ocasionalmente por angostos cañones desde donde las elevaciones disminuyen en forma paulatina hasta formar planicies de origen sedimentario que constituyen la faja costera en el sur de la entidad (INAFED, s.f).

En diversas zonas del estado se presentan grandes afloramientos metamórficos, también se encuentran rocas ígneas intrusivas y extrusivas las cuales son del Paleozoico al cenozoico (INAFED, s.f).

3.2.2 Relieve

El sistema montañoso de Oaxaca está formado básicamente por la convergencia de la sierra Madre del Sur, la Sierra Madre de Oaxaca y la Sierra Atravesada, formándose de esta manera un nudo o macizo montañoso. La Sierra Madre del Sur corre a todo lo largo de la costa en dirección noroeste -sureste, teniendo, como promedio, una anchura aproximada de 150 kilómetros y una altura casi constante de 2 mil metros, no obstante que algunas elevaciones sobrepasan los 2,500. En algunas regiones es conocida como sierra de Miahuatlán y sierra de la Garza. La Sierra Madre del Sur penetra al estado por el distrito de Silacayoapan, cruza los de Huajuapán, Coixtlahuaca y Nochixtlán, para posteriormente unirse a la Sierra Madre de Oaxaca y formar el mencionado macizo montañoso conocido con el nombre de Complejo oaxaqueño (INAFED, s.f).

La Sierra Madre de Oaxaca, proviene de Puebla y Veracruz, entra en la entidad por el distrito de Tuxtepec y corre con dirección noroeste-sureste, atravesando los distritos de Teotitlán, Cuicatlán, Ixtlán, Villa Alta y Mixe. La altura promedio de la Sierra Madre de Oaxaca es de 2,500 metros, sin embargo, existen elevaciones que superan los 3 mil; su anchura media es de aproximadamente 75 kilómetros, siendo su longitud dentro de la entidad de unos 300 kilómetros. Dentro del territorio oaxaqueño y conforme se extiende hacia el istmo de Tehuantepec, recibe los nombres de Sierra de Tamazulapán, de Nochixtlán, de Huautla, de Juárez, de Ixtlán y finalmente, de los Mixe (INAFED, s.f).

La Sierra Atravesada no es más que una prolongación de la Sierra de Chiapas. Esta es una cadena de poca elevación, ya que su altura promedio apenas rebasa los 600

metros, no siendo tampoco de consideración por su extensión. En su mayor parte se localiza en el distrito de Juchitán, atravesándolo de este a oeste (INAFED, s.f.).

3.2.3 Localización del municipio de Santiago Pinotepa Nacional

Se localiza en la región costa del estado, entre las coordenadas 98°03' longitud Oeste, 16°20' latitud Norte a una altura de 200 metros sobre el nivel del mar. Colinda al norte con San Miguel Tlacamama y Santa Cruz Xoxocotlan, al noreste con Pinotepa de Don Luis y San Andrés Huaspaltepec; al este con Santa María Hutzolotitlán, al oeste con San José Estancia Grande, Santiago Llano Grande y Santo Domingo Armenta y al sur con el Océano Pacífico (INAFED, 2016).

3.2.4 Geología

De acuerdo con el Atlas de Riesgos del municipio de Santiago Pinotepa Nacional (2012):

“La geología de Santiago Pinotepa Nacional es compleja ya que incluye el contacto de paquetes metamórficos caracterizados por una historia de múltiples eventos de deformación a lo cual se suma material de origen eólico y aluvial, además de rocas ígneas intrusivas, las cuales afloran en gran parte de la entidad. Las rocas metamórficas entonces cubren 187 kilómetros cuadrados del área municipal lo que representa el 24% de la superficie de Santiago Pinotepa Nacional, representadas principalmente por gneis, roca metamórfica compuesta por minerales que también integran el granito”.

Las rocas de origen ígneo en este municipio se remontan al Terciario, concretamente al Mioceno, las cuales han aflorado a la superficie derivado del tectonismo activo que existe en la zona. El relieve tiene una expresión suavizada por la actividad erosiva, con ligeras ondulaciones en el terreno, así como elevaciones menores, en total 363 kilómetros cuadrados de la superficie municipal es decir el 45% está cubierto de estos materiales, de allí su importancia litológica. Finalmente, los procesos erosivos tanto eólicos como aluviales en las porciones sur y occidente de Santiago Pinotepa Nacional están en contacto directo con la línea de costa representando el 30%, es decir poco más de 238 kilómetros cuadrados, lo

que es un área considerable para este tipo de materiales acumulativos (Atlas Nacional de Riesgos Municipal Santiago Pinotepa Nacional, 2012).

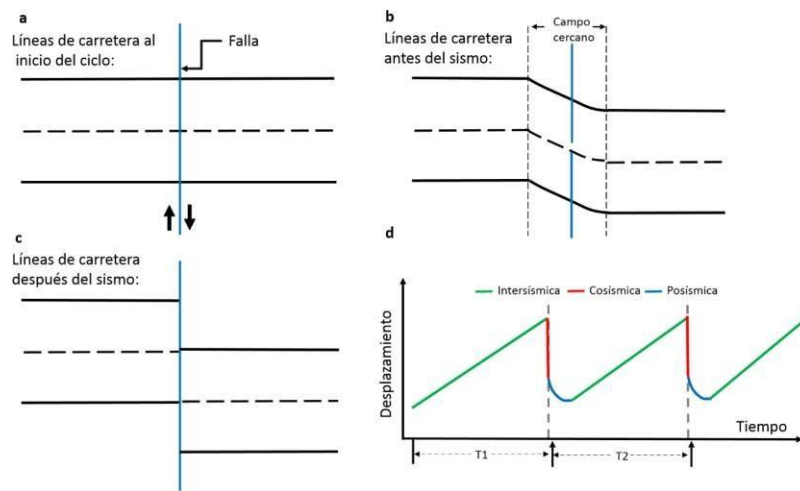
CAPITULO IV. DINSAR APLICADO A LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR EVENTOS SÍSMICOS

4.1 El ciclo sísmico

Durante el siglo XX, se creía que las rupturas en la superficie manifestadas después de un evento sísmico, eran resultado de un movimiento drástico en el terreno. Sin embargo, las observaciones realizadas por Henry Fielding Reid sobre el sismo de San Francisco, California, lo llevaron a proponer la “*teoría del rebote elástico*” (Figura 30), la cual menciona que los sismos ocurren en consecuencia de la liberación de energía elástica que se acumula en las fallas, éstas alcanzan su valor crítico y su desplazamiento tendrá que ver con las propiedades del material a lo largo de dicha falla. La energía acumulada se libera en forma de ondas sísmicas, calor y fracturas en las rocas (González, 2014; Velázquez, 2020).

Derivado de lo anterior se desarrolló el concepto de “ciclo sísmico”, refiriéndose al comportamiento de acumulación continua de deformación y liberación repentina de esfuerzo en la falla. El ciclo sísmico se divide en tres fases (Figura 27): intersísmica, cosísmica y postsísmica (González, 2014). La fase intersísmica hace referencia a la acumulación de deformación elástica de forma lenta y paulatina durante un largo periodo (Velázquez, 2020).

Figura 27. Representación de la teoría de rebote elástico. a) Carretera atravesada por una línea de falla, la cual no presenta deformación alguna. b) Fase intersísmica (acumulación de energía) por lo que la carretera se deforma paulatinamente. c) Ruptura del terreno por la liberación de energía en la falla, derivado de un evento sísmico. Representación gráfica del ciclo sísmico. Fuente Velázquez (2020).

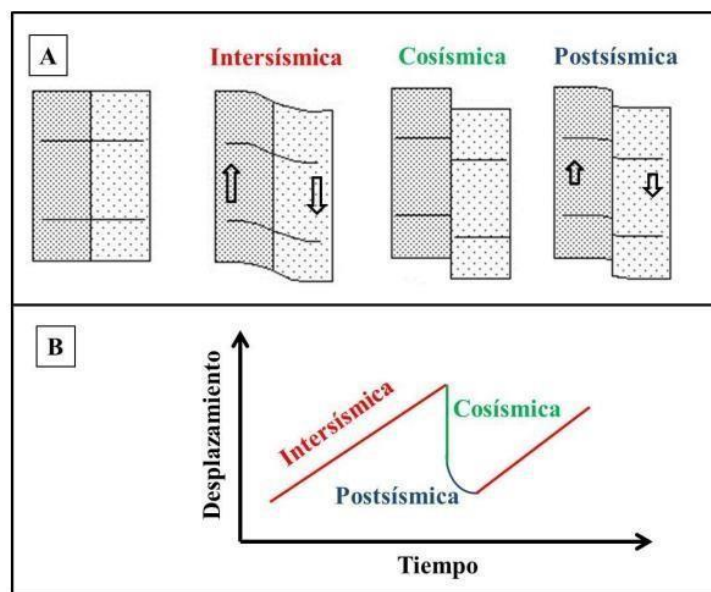


La fase cosísmica ocurre en el instante o momento del sismo donde se propaga la ruptura a través de la falla. Finalmente, en la fase postsísmica, se da un ajuste entre la corteza y la falla, debido al cambio de esfuerzos ocasionados por el sismo (González, 2014; Velázquez, 2020).

La deformación del terreno asociada a procesos sísmicos puede ser cuantificada mediante observaciones geológicas, geofísicas, pero también espaciales. Dado que los satélites de monitoreo terrestre proporcionan imágenes con gran resolución, es posible analizar regiones extensas y obtener resultados detallados sobre el cambio en la corteza terrestre a partir de un evento (González, 2014; Velázquez, 2020).

Esta tesis versa sobre la fase cosísmica, es decir, sobre el momento exacto que ocurre el sismo, con la finalidad de obtener la medición de deformación. La metodología de este trabajo, la cual se mostrará en páginas posteriores, utiliza la comparación entre imágenes de satélite previas y posteriores al momento del evento sísmico.

Figura 28. A) Representación de las tres fases del ciclo sísmico. B) Gráfica del ciclo sísmico, representada en términos de desplazamiento y tiempo. Fuente Velázquez (2020).



4.2 Interferometría Diferencial (DInSAR)

El primer estudio sobre detección de deformaciones del terreno mediante la técnica DInSAR fue publicado en 1989, utilizando imágenes SEASAT. Dicho estudio se enfocaba en las deformaciones atribuidas a la expansión de las arcillas por absorción de agua, en el Valle Imperial de California E.U.A. (Fernández, 2009).

Las investigaciones posteriores estuvieron a cargo de satélites europeos, como el ERS-1 (European Remote Sensing satellite), el cual realizó diferentes estudios para la detección de cambios en la superficie terrestre cerca de Bonn, Alemania. Pero también casos más prácticos como los realizados en Holanda en 1995 que estaban relacionadas con la aplicación de la interferometría SAR para detección de subsidencias en el terreno (Fernández, 2009).

Cabe mencionar que, en el campo de la vulcanología, la técnica DInSAR ha mostrado resultados satisfactorios para los estudios de hundimiento e hinchamiento de volcanes, tal es el caso de los primeros estudios realizados por Massonet y Sigmundsson en el año 2000, también el desarrollo de estudios glaciológicos sobre medidas de la velocidad del hielo antártico y la topografía de las capas de hielo (Fernández, 2009; González, 2014).

La evolución histórica de la técnica DInSAR comienza con la utilización de las primeras imágenes de RADAR las cuales surgen como una alternativa a las fotografías aéreas y tienen el propósito de estudiar las zonas tropicales que se encontraban frecuentemente con nubosidad. El problema que se encontraba con estas imágenes era la baja resolución espacial debido al pequeño diámetro de la antena de RADAR (Mora, 2007; Fernández, 2009).

Estos problemas desaparecieron con la llegada del Radar de Apertura Sintética (SAR) en el año 1978 con el satélite de investigaciones oceanográficas “SEASAT” de la NASA, el cual tenía tareas muy específicas, como el estudio del geoide marino, la detección de bancos de arena sumergidos, el oleaje y las corrientes oceánicas. Dicha misión tuvo un gran éxito, por lo cual se lanzaron dos satélites más con características parecidas: el SIR-A y B, en 1981 y 1984 respectivamente, dichas

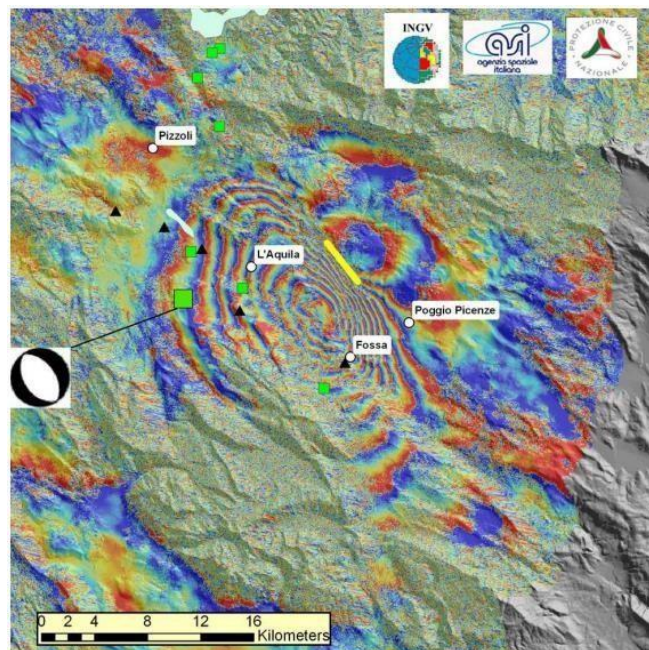
misiones dieron la pauta para realizar otros estudios de la superficie terrestre (Mora, 2007; Fernández, 2009).

La actividad sísmica es uno de los campos más estudiados por la Interferometría Diferencial, los trabajos se enfocan en deformaciones presísmicas, cosísmicas y postsísmicas. Para ello es necesario contar con imágenes de satélite previas y posteriores al evento sísmico con la finalidad de generar un interferograma donde se observe el cambio de fase, es decir, que muestre el desplazamiento o deformación ocurrido tras dicho evento (Fernández, 2009; González, 2014).

En la Figura 29, se muestra un interferograma realizado a partir de un evento sísmico; el cuadrado verde de mayor tamaño representa el epicentro del sismo de magnitud (M)= 6.3, los cuadrados más pequeños las réplicas superiores de M=5. Los triángulos negros representan las estaciones GPS usadas para la validación de los datos SAR. La línea amarilla al este muestra la localización de una superficie de ruptura cosísmica de unos 4 km de longitud observada en campo por los investigadores del Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología.

Figura 29. Se muestra el interferograma de la zona afectada por el sismo de L' Aquila, Italia en abril de 2009.

Fuente: Guerrero y Hernández (2017).



Desde 1993 hasta la actualidad se han estudiado un gran número de sismos con interferometría RADAR, realizando nuevas aportaciones a la técnica para su mejor funcionamiento. A continuación, se muestra un listado en la tabla 5, sobre cada evento sísmico, el año y el autor que desarrolló dicha investigación en el periodo de 1993 y 2000.

Tabla 5. Eventos sísmicos de gran relevancia estudiados con Interferometría RADAR, desde el año 1993 hasta el 2000. Fuente: Guerrero y Hernández (2017).

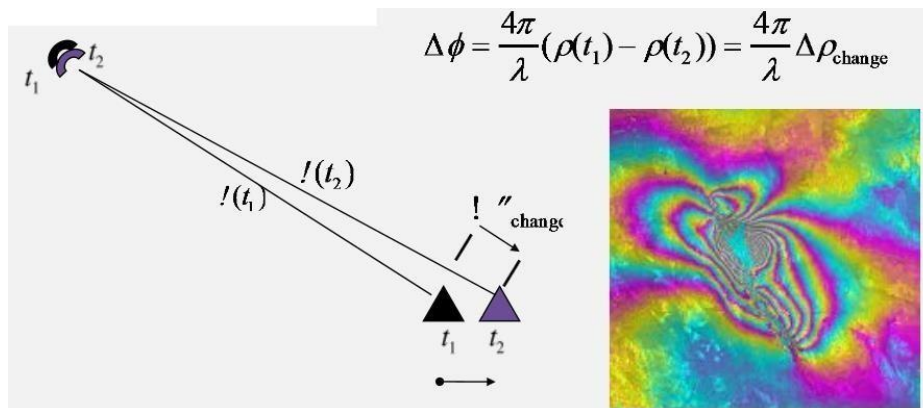
Localización	Referencias
Terremotos	
Kobe, Japón	Ozawa et al, 1997
Terremoto de Landers, California, EEUU	Massonnet et al, 1993; Massonnet and Adragna, 1993; Zebker et al, 1994; Peltzer et al, 1994; Massonnet et al, 1994; Feigl et al, 1995; Peltzer et al, 1996; Massonnet et al, 1996b; Hernandez et al, 1997; Price and Sandwell, 1998; Michel et al, 1999.
Terremoto de Hector, California, EEUU	Sandwell et al, 2000
Terremoto de Manyi, Tibet	Peltzer et al, 1999
Terremoto de Izmit, Turquía	Barbieri et al, 1999; Hanssen et al, 2000; Reilinger et al, 2000.
Valle Eureka, California, EEUU	Massonnet and Feigl, 1995; Peltzer and Rosen, 1995.
Northridge, California, EEUU	Massonnet et al, 1996a; Murakami et al, 1996; Kawai and Shimada, 1994.
Kagoshima-kenhokuseibu, Japón	Fujiwara et al, 1998
Nuweiba, Golfo de Aqaba.	Baer et al, 1999; Klinger et al, 2000.
Grevena, Grecia	Meyer et al, 1996; Clarke et al, 1996
Colfiorito, Umbria-Marche, Italia	Stramondo et al, 1999
Reptación Falla de San Andrés Parkfield, EEUU.	Rosen et al, 1998; Bürgmann et al, 2000.

4.2.1 Metodología DInSAR

El procesamiento DInSAR, se basa en la estimación del cambio de fase de la señal de radar desde dos tomas simultáneas generadas por dos antenas o en varias adquisiciones de la misma escena por la misma antena, pero en distintos periodos de tiempo (Hanssen, 2001).

Dicha técnica pretende realizar un estudio de los desplazamientos del terreno a partir de interferogramas. Dichos interferogramas recogen las diferencias de fase entre las dos imágenes que lo forman, por ello es que las diferencias infieren que el terreno se ha desplazado (Fernández, 2009).

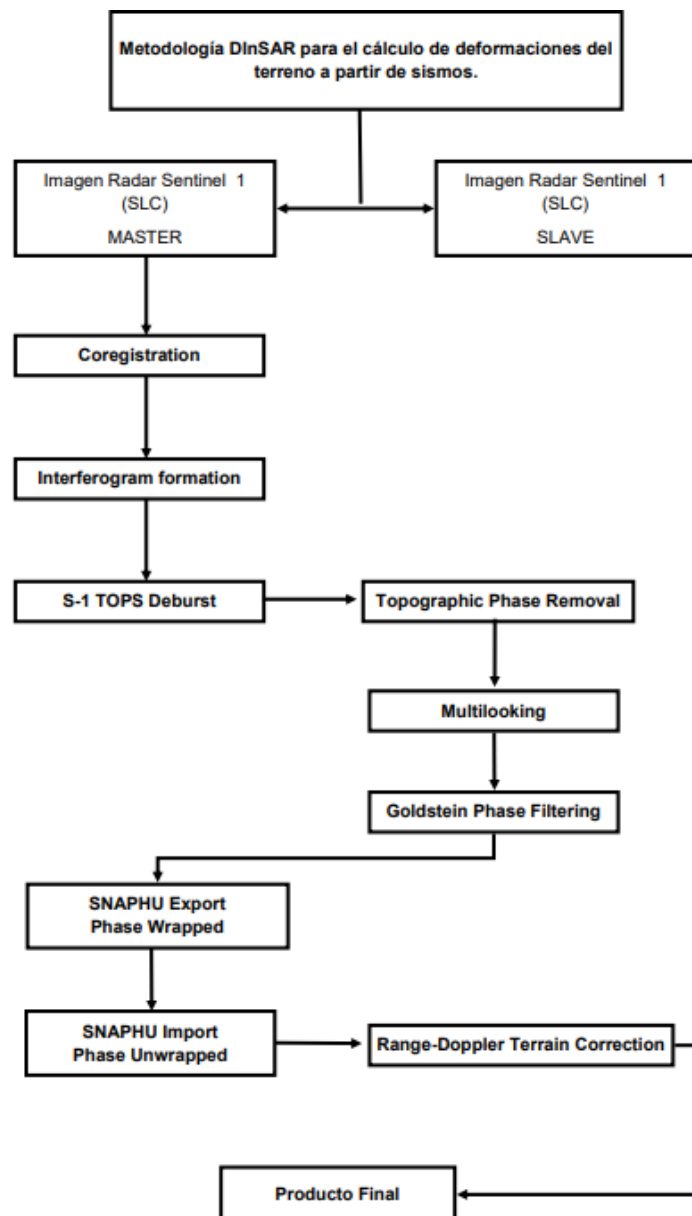
Figura 30. Se muestra un ejemplo sobre la observación de un punto en dos momentos diferentes (t_1 y t_2) pero con la misma ubicación en el espacio. La fase interferométrica es directamente proporcional a cualquier cambio en el rango del atributo de la superficie. Fuente: Fielding, J. (2018). SAR Interferometry for Earthquake Studies.



Es importante mencionar el concepto de “*coherencia*” debido a que es un término bastante utilizado para comparar las propiedades de una imagen, es decir la correlación de fase, entre un pixel específico de la imagen 1 (previa al sismo) y su similar a la imagen 2 (posterior al sismo) (González, 2014). La coherencia tiene valores entre 0 y 1, donde “0” significa que la celda se encuentra decorrelacionada, mientras que valores de “1” significan una correlación considerable o total. Dicha coherencia tendrá valores de 0, es decir, representará baja o nula correlación, si las propiedades reflectivas del terreno cambiaron entre la adquisición de la primera imagen respecto a la segunda, esto se debe a la implementación de actividades agrícolas, industriales, urbanas e inundaciones (González, 2014).

A continuación, se especifican cada una de las etapas desarrolladas en este proyecto a través de un diagrama de flujo, posteriormente se muestran los resultados de cada procesamiento, hasta la obtención del producto final.

Figura 31. Diagrama de flujo para el procesamiento metodológico del cálculo de deformaciones del terreno a partir del par de imágenes de radar Sentinel 1, utilizando la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR). Elaboración propia con base en el programa de Programa de entrenamiento aplicado a sensores remotos ARSET (2018).



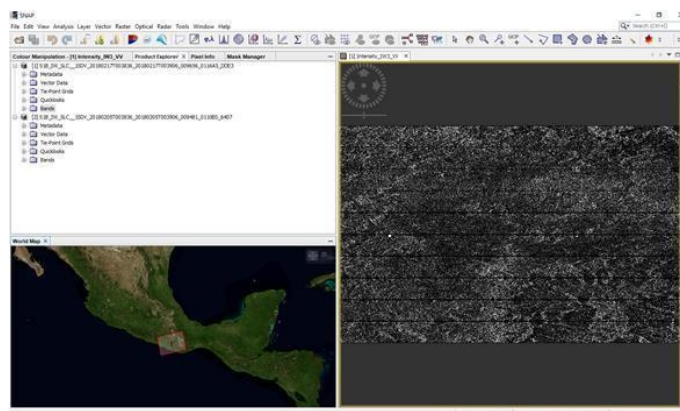
4.3 SENTINEL APPLICATION PLATFORM (SNAP)

Para el desarrollo de la metodología y el procesamiento digital de las imágenes de radar, se instaló el software SNAP en un sistema operativo Windows 10 de 64 bits, con un procesador AMD Ryzen 5 2600 Six- Core Processor y una RAM de 24.0 GB, esto debido al peso de cada imagen de satélite y su posterior tratamiento.

SNAP es un software de código abierto y de uso gratuito el cual se puede descargar directamente desde la página de la Agencia Espacial Europea: <https://step.esa.int/main/download/>, dicho software no solo se enfoca en las misiones de Sentinel, sino que está diseñada para trabajar en conjunto con otros satélites como: TerraSAR, RADARSAT, ENVISAT, MOD IS, Landsat, SPOT, ALOS; esto con la finalidad de contribuir en el desarrollo de investigaciones científicas internacionales. Dicho software incluye módulos con distintas herramientas, donde el usuario elige el paquete de acuerdo con la información que desea obtener (Guerrero y Hernández, 2017).

El módulo Sentinel-1 Toolbox (S1TBX) contiene una serie de herramientas enfocadas en el procesamiento de datos de radar incluyendo calibración, filtros, orto rectificación elaboración de orto mosaicos, polarimetría e interferometría, tiene un buen soporte a la hora de proporcionar datos de Sentinel 1, ERS-1 y 2, Envisat, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed y RADARSAT-2 (ESA, 2019). Debido a las herramientas y procesos que contiene este módulo, fue seleccionado para el tratamiento de nuestras imágenes.

Figura 32. Pantalla de inicio del Software SNAP, con dos productos agregados y la visualización de una banda. Elaboración propia a partir del software SNAP.



4.4 Cálculo de la deformación del terreno producido por el sismo del 16 de febrero de 2018 a 14 Km al sureste de Pinotepa Nacional Oaxaca, México.

Se utilizó un par de imágenes RADAR Sentinel 1-B de la costa de Oaxaca, mismas que abarcaran el epicentro del sismo del 16 de febrero de 2018. Las características específicas de cada imagen se muestran a continuación (Tabla 6).

Tabla 6. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Oaxaca, México. Elaboración propia a partir de información obtenida del sitio Copernicus Open Access Hub (2019).

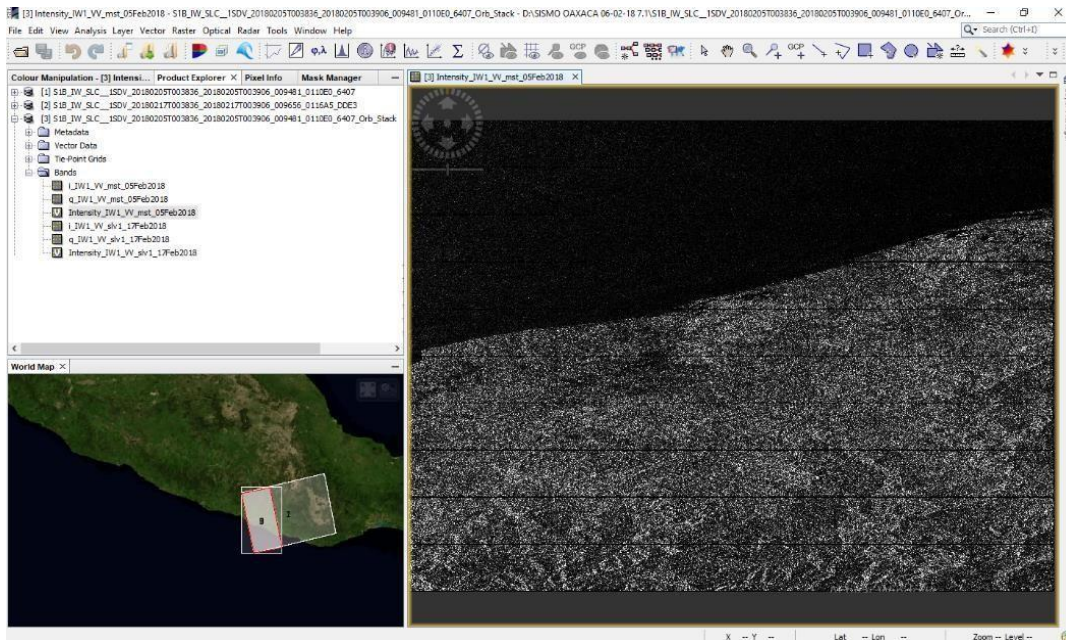
SISMO 16 DE FEBRERO DE 2018 (M.7.2)		
14 KM AL SURESTE DE PINOTEPA NACIONAL OAXACA, MÉXICO.		
CARACTERÍSTICAS	IMAGEN 1 (MAESTRA)	IMAGEN 2 (ESCLAVA)
TIPO	SAR	SAR
SISTEMA	SENTINEL 1-B	SENTINEL 1-B
FECHA DE CAPTURA	05-02-2018	17-02-2018
BANDA	C	C
MODOS	IW SLC	IW SLC
POLARIZACIÓN	V V	V V
NIVEL DE PROCESAMIENTO	SAR-L1	SAR-L1
FUENTE	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)

El primer paso que se realizó de acuerdo con nuestra metodología fue el **corregistro** de ambas imágenes. Este paso es fundamental para cualquier procesamiento interferométrico, ya que de este proceso depende la correcta determinación de la diferencia de fase. Se aplica debido a la variación de las órbitas, las cuales producen cambios en la geometría de iluminación, por lo que para hacer el promedio de varias imágenes en diferentes tiempos se requiere una co-registración de las mismas (Guerrero y Hernández, 2017).

Se tomaron las dos imágenes, denominadas “*imagen maestra*” es decir la imagen antes del evento y la “*imagen esclava*” la imagen posterior al evento. Los datos de la *imagen esclava* serán subconjuntos de la geometría de la imagen maestra, serán

georreferenciadas y superpuestas. Para ello se toma como referencia un modelo digital de elevación para la interpolación de datos (Guerrero y Hernández, 2017).

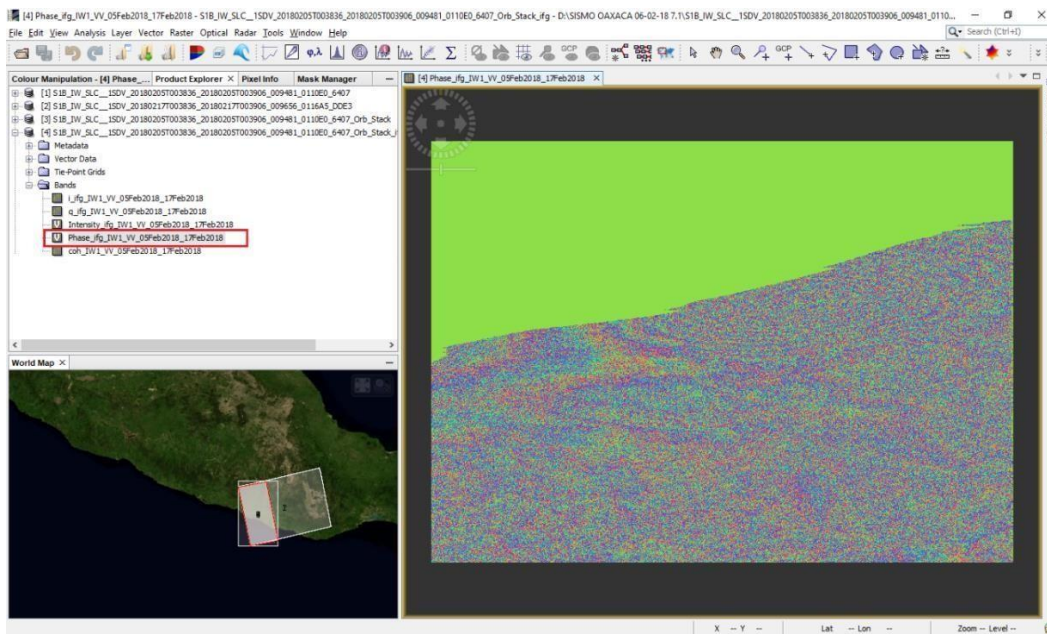
Figura 33. Corregistro del par de imágenes de radar para el evento del 16 de febrero de 2018. Elaboración propia a partir del software SNAP.



Una vez corregistradas las imágenes se formó el **interferograma**. Como ya se ha revisado anteriormente un *interferograma* es una nueva imagen resultado de la combinación de dos imágenes SAR de la misma zona, pero con temporalidad diferente (Fielding, 2018).

El objetivo de este paso fue obtener la diferencia de fase entre la imagen maestra y la imagen esclava en cada pixel, estas diferencias tienen relación con las variaciones de elevación de la escena, por lo que la interpretación gráfica de un interferograma parte del uso de una rampa cromática que varía en el color, mostrando en qué lugares la escena presenta esas diferencias de fase. Se asume que de acuerdo a la frecuencia y a la dirección de las franjas existen cambios significativos en la topografía de la escena (Guerrero y Hernández, 2017).

Figura 34. Formación del interferograma. Evento sísmico del 16 de febrero de 2018. Elaboración propia a partir del software SNAP.



Los productos Sentinel en especial los TOPSAR IW y EW SLC se crean a manera de franjas. Para eliminar estas discontinuidades en la imagen se realizó el proceso, **S1-tops deburst**, el cual combina las sub-hileras adyacentes. Mientras que, en la dirección azimutal, las ráfagas se combinan de acuerdo con su tiempo Doppler cero (Zero Doppler Time) (Guerrero y Hernández, 2017).

Figura 35. Imagen original sin corregir en la parte superior e imagen aplicando el procesamiento Deburst en la parte inferior. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.

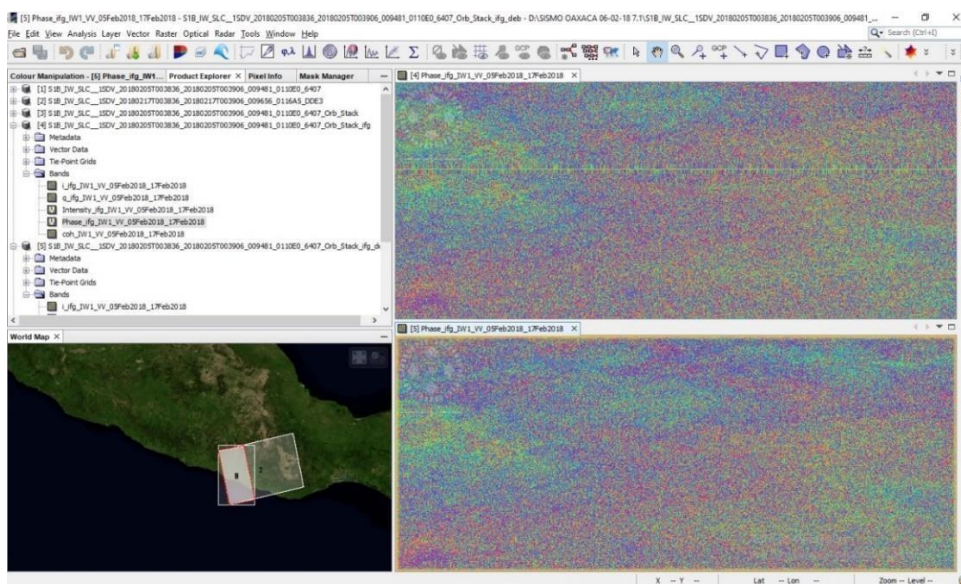
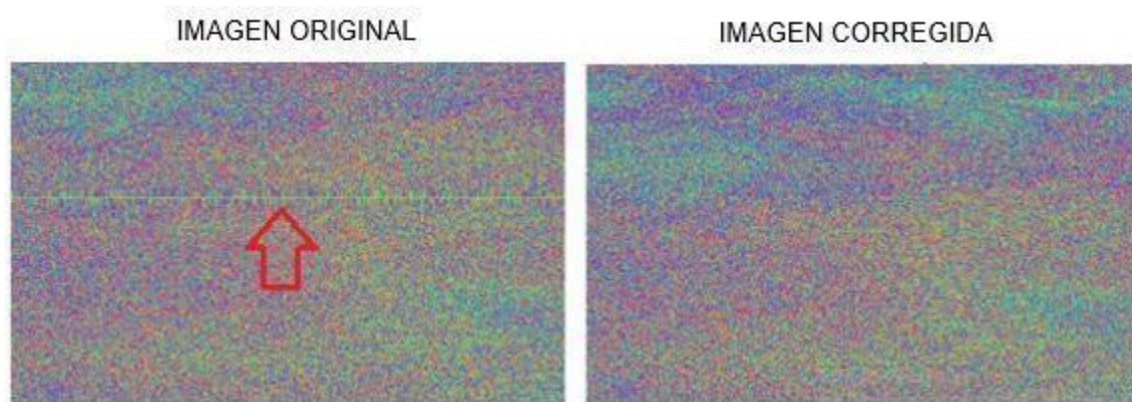
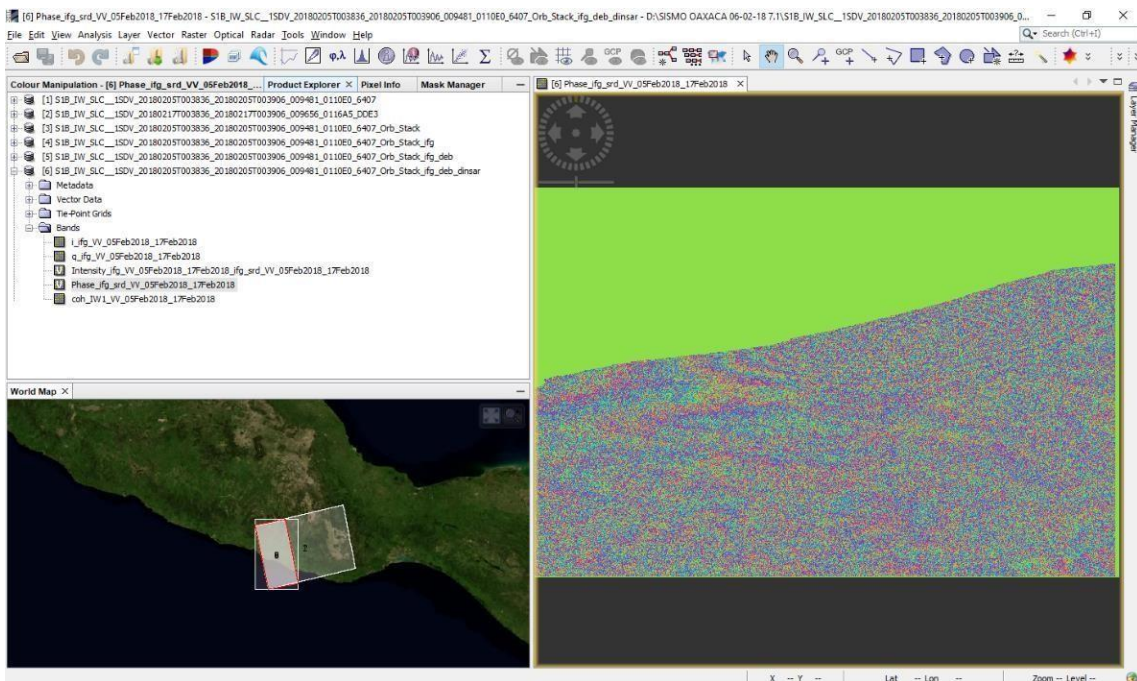


Figura 36. Imagen original sin corregir e imagen aplicando el procesamiento Deburst. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



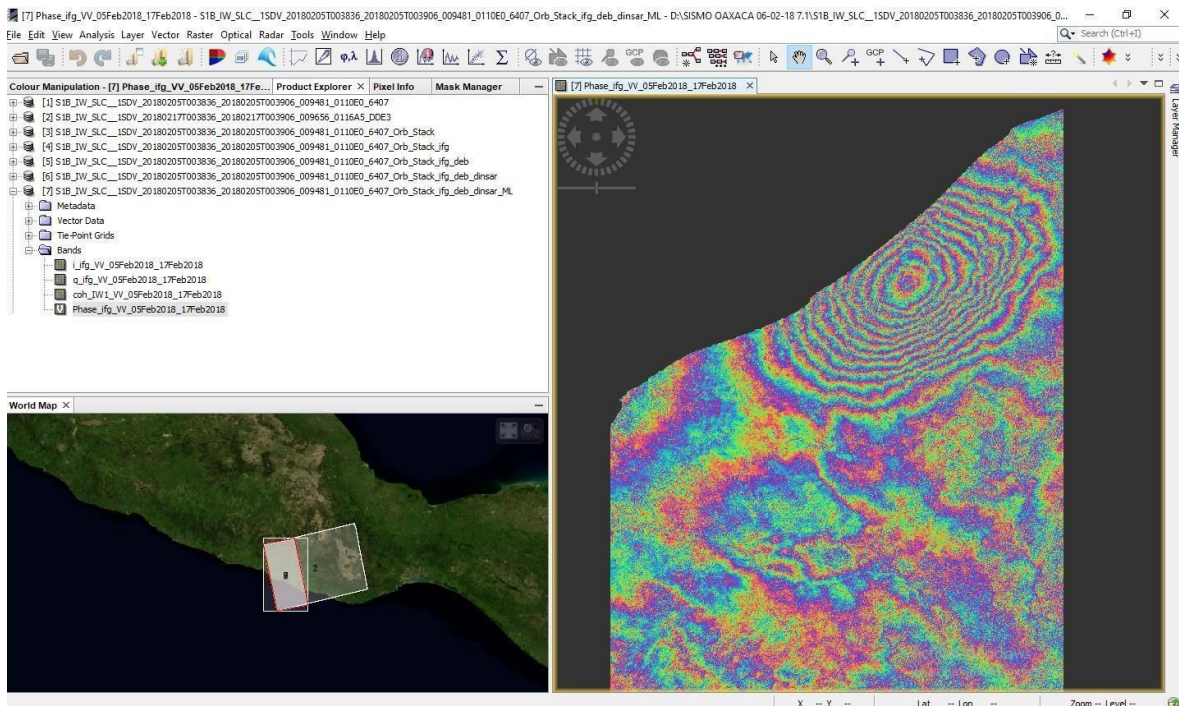
El interferograma original aún contiene la fase topográfica, por lo que se removió con la herramienta **topographic phase removal**, para obtener el interferograma diferencial. En este proceso el software selecciona el Modelo Digital de Elevación (SRTM) para hacer la sustracción topográfica de la imagen (Fielding, 2018).

Figura 37. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico del 16 de febrero de 2018. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



El siguiente proceso llamado **multilooking** es uno de los más importantes ya que utiliza los píxeles originales de la imagen y calcula el promedio de varios píxeles en cada dirección para llegar a una resolución más baja, pero a una medición más alta en calidad y con menos ruido (Fielding, 2018).

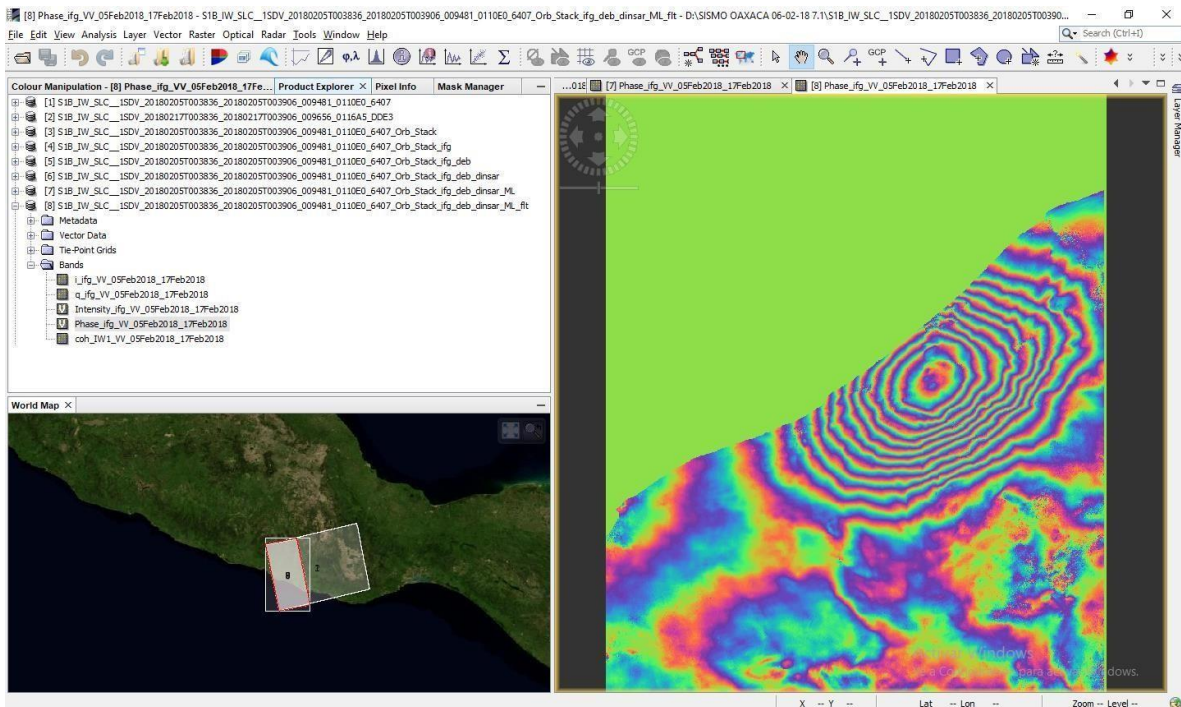
Figura 38. Multilooking aplicado a la imagen SAR para bajar la resolución y obtener una medición más alta y con menos ruido. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



Debido al ruido presentado en el interferograma a causa de interferencias y múltiples variables atmosféricas a la hora de adquisición de nuestra imagen. El siguiente proceso permitió mejorar la calidad del interferograma reduciendo el ruido, mediante un filtro interferométrico especial propuesto por Goldstein y Werner en 1998 “**Goldstein Phase Filtering**” (Guerrero y Hernández, 2017).

Este filtro mejora las señales que son coherentes y disminuye las señales incoherentes haciendo que las franjas interferométricas se acentúen y se vuelven más nítidas (Fielding, 2018; Guerrero y Hernández, 2017).

Figura 39. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



El producto obtenido fue exportado a un algoritmo computacional llamado (SNAPHU) para que resolviera de manera adecuada los siguientes pasos de nuestra metodología. Dicho algoritmo se define a continuación.

4.4.1 SNAPHU

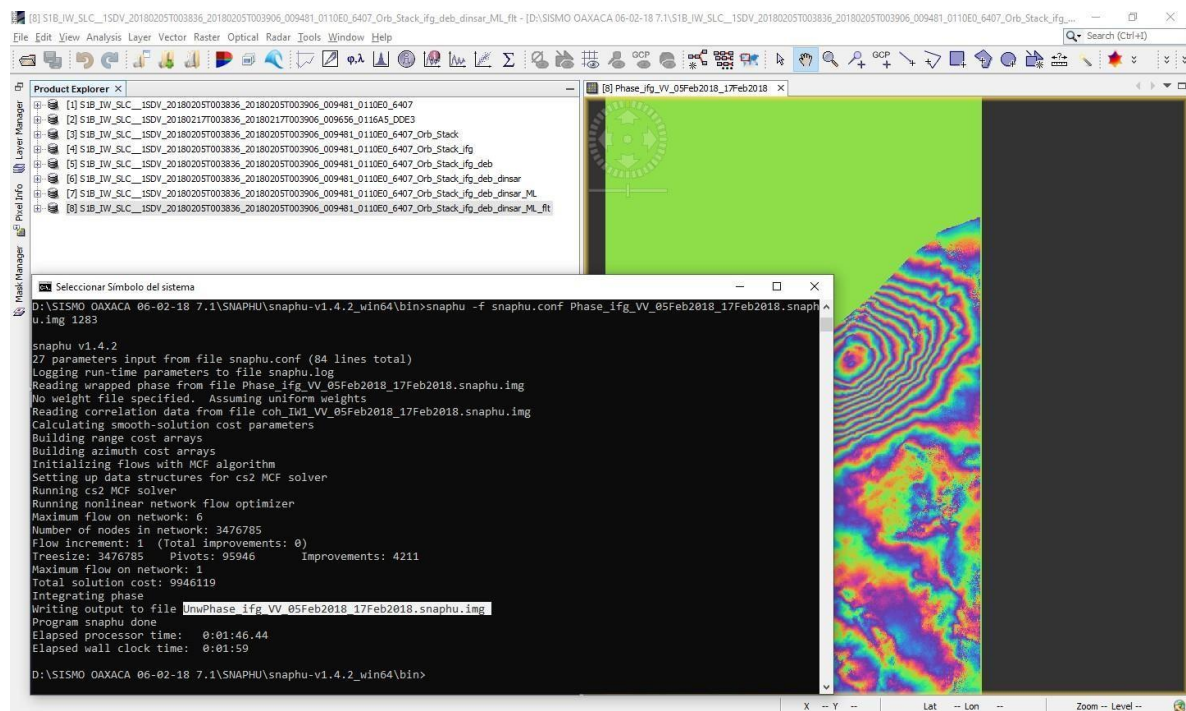
SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping) que se traduce como “algoritmo de flujo de red estadístico para el desenvolvimiento de fase”. Permite procesar la fase interferométrica a partir de un dato de entrada (interferograma) y busca estimar de manera congruente los valores que se ajusten a los máximos probables. Este algoritmo incorpora tres modelos estadísticos con diferentes enfoques: datos topográficos y datos de deformación. Se diseñó específicamente para trabajar interferometría SAR, buscando resultados sobre valores de topografía superficial, deformación o velocidad (Guerrero y Hernández, 2017).

Al iniciar el proceso de exportación de nuestro producto, se tuvo que definir una ruta de salida, misma donde se encontraba nuestro algoritmo SNAPHU, puesto que el

archi vo exportado debe copiarse allí. Una vez copiados los elementos se procedió a utilizar el símbolo del sistema en el equipo de cómputo, para encontrar dicha carpeta y añadir un comando para que el programa desarrollara la fase de nuestro interferograma.

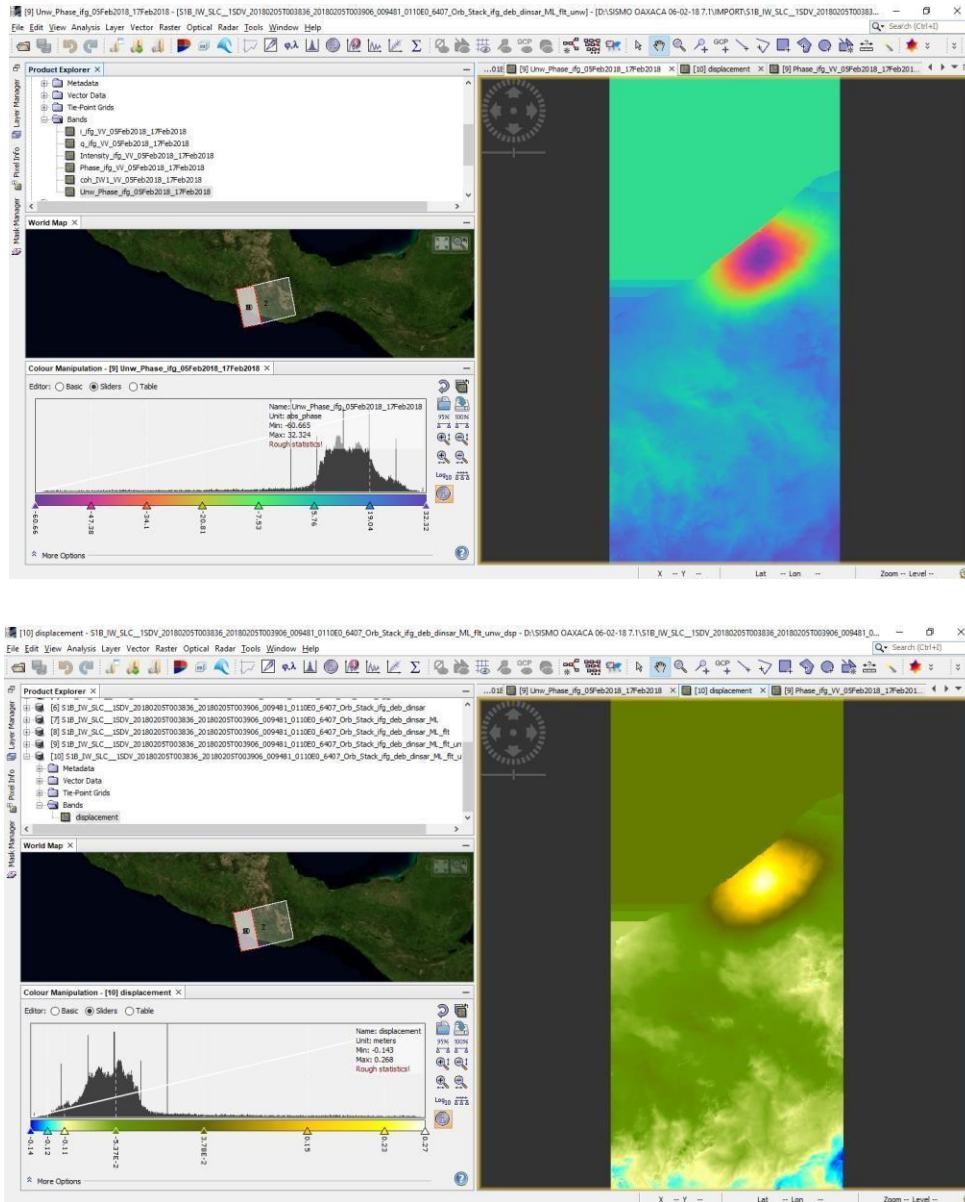
Dado que el tamaño de la imagen analizada no representaba una superficie de grandes extensiones, el programa SNAPHU logró desenvolver la fase del interferograma en menos de 2 minutos.

Figura 40. Se muestra el resultado de la fase desenvuelta en el símbolo del sistema. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



Con la fase desenvuelta de la imagen, solo quedaba regresar al programa SNAP e importarla para visualizar los datos de desplazamiento. Sin embargo, la imagen importada nos mostró resultados del desplazamiento en números radianes, lo cual complicaría la interpretación del análisis, para ello el software SNAP a través de su barra de herramientas permite realizar una conversión de la imagen de fase desenvuelta en una imagen con el desplazamiento en unidades métricas. Esto permitió identificar el desplazamiento del terreno en el orden de centímetros para el evento sísmico del 16 de febrero de 2018.

Figura 41. En la imagen superior se muestra el interferograma desenvuelto con datos en radianes; una vez aplicada la conversión de la imagen de fase desenvuelta a desplazamiento, se muestra una nueva imagen (inferior) donde se visualizan los datos en unidades métricas. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



Finalmente se concluyó la metodología asignándole un sistema de coordenadas geodésicas a la imagen SAR (Figura 44). Para geocodificar la imagen, se utilizó el modelo digital de elevación (SRTM 3 sec) mismo que es asignado por el software SNAP en la herramienta “**Range Doppler Terrain Correction**” (Caballero, *et al.*, 2018). Una vez realizada la georreferenciación de la imagen se comenzó con el

análisis de la superficie que había presentado mayor deformación del terreno identificando los valores máximos y mínimos (Figura 42).

Figura 42. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.

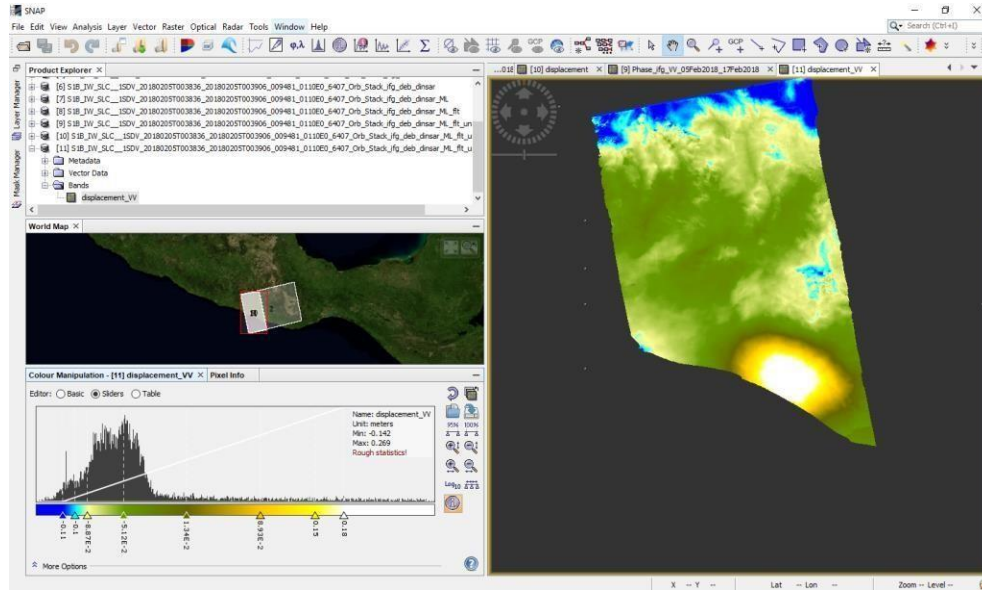
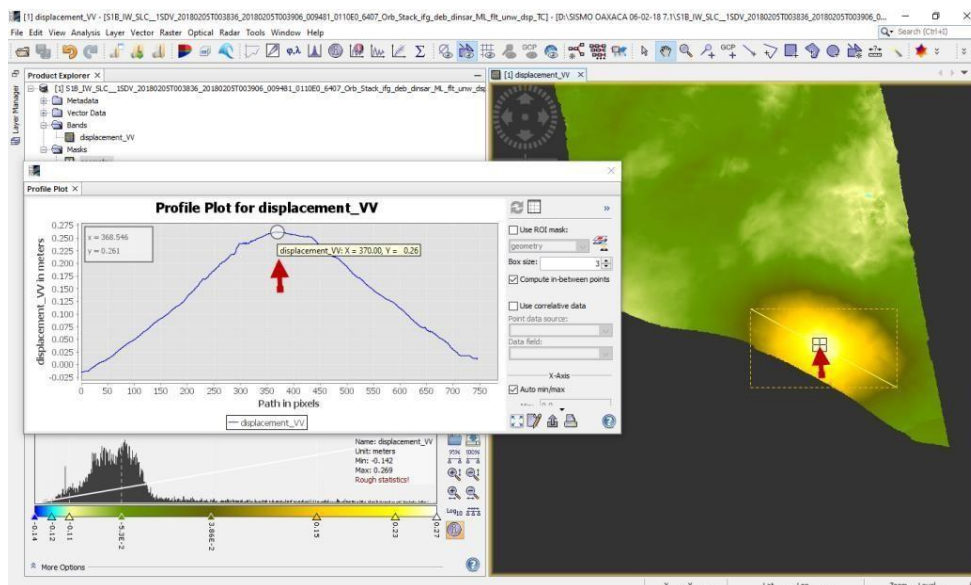


Figura 43. Se trazó un perfil en el área de mayor desplazamiento para identificar los valores máximos y mínimos. La posición de la flecha roja en el perfil y en la imagen indican el mismo lugar en el terreno, el cual presenta la mayor deformación. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



Como seguimiento de la aplicación metodológica D InSAR al caso de fenómenos sísmicos, se recuperaron los dos pares de imágenes de RADAR del Satélite Sentinel 1 previas y posteriores a las fechas de ocurrencia del fenómeno, esto para los eventos del 19 de septiembre de 2017 y 23 de junio de 2020, los cuales presentaron magnitudes considerables en el territorio.

Por ello con la finalidad de continuar trabajando con el software SNAP para desarrollar los procesamientos y así obtener los mapas de desplazamiento, se aplicaron los pasos previamente enlistados para identificar los parámetros de deformación del terreno.

A continuación, se muestran los pasos que se realizaron para cada evento sísmico.

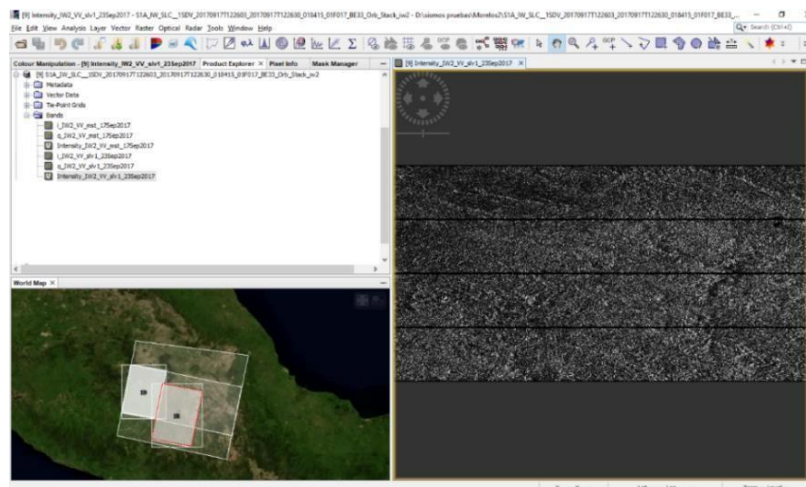
4.5 Cálculo de deformación del terreno producido por el sismo del 19 de septiembre de 2017 a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia Puebla, México.

Tabla 7. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Puebla y Morelos. Elaboración propia a partir de información obtenida del sitio web Copernicus Open Access Hub (2019).

SISMO 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017 (M.7.1)		
8 KM AL NOROESTE DE CHIAUTLA DE TAPIA PUEBLA, MÉXICO.		
CARACTERÍSTICAS	IMAGEN 1 (MAESTRA)	IMAGEN 2 (ESCLAVA)
TIPO	SAR	SAR
SISTEMA	SENTINEL 1-A	SENTINEL 1-B
FECHA DE CAPTURA	17-09-2017	23-09-2017
BANDA	C	C
MODOS	IW SLC	IW SLC
POLARIZACIÓN	VV	VV
NIVEL DE PROCESAMIENTO	SAR-L1	SAR-L1
FUENTE	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (ESA)

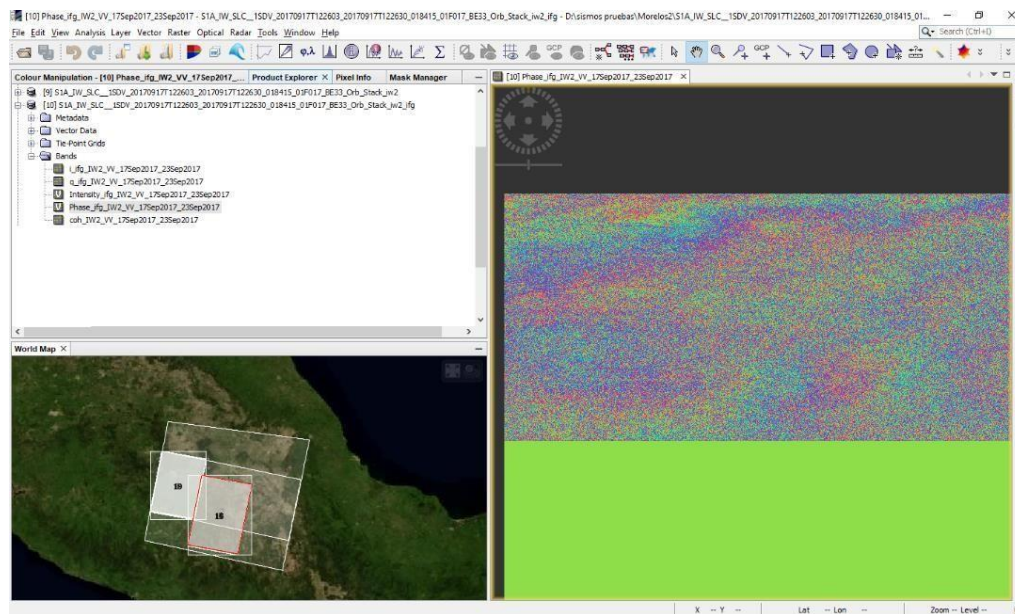
CORREGISTRATION

Figura 44. Corregistro del par de imágenes de radar. Evento sísmico del 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir del software SNAP.



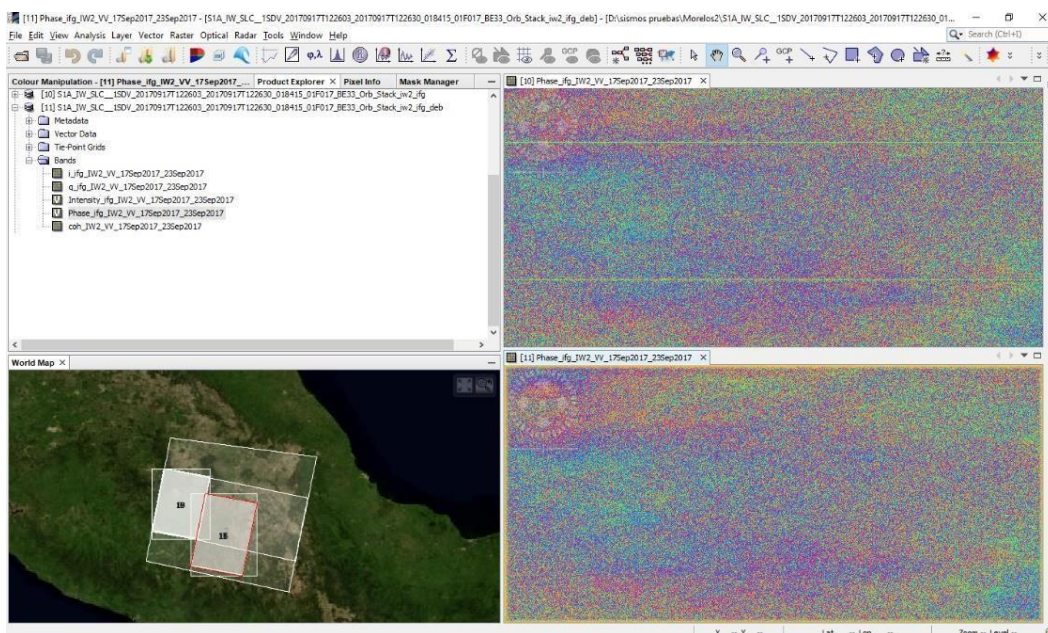
INTERFEROGRAM FORMATION

Figura 45. Formación del interferograma. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir del software SNAP.



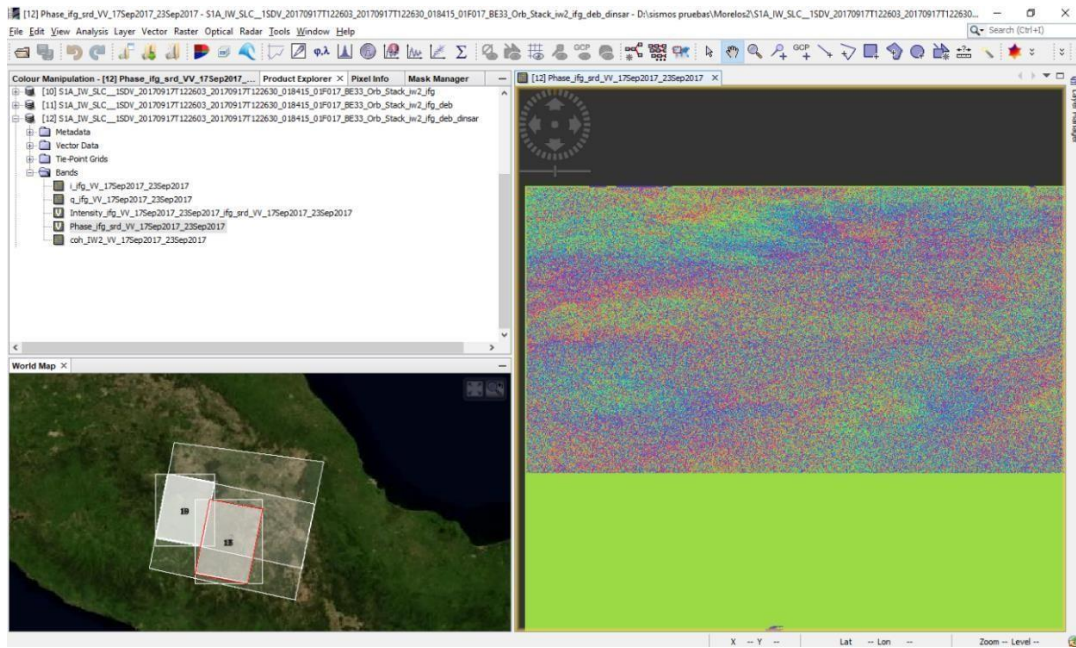
S1-TOPS DEBURST

Figura 46. Imagen original sin corregir en la parte superior e imagen aplicando el procesamiento Deburst en la parte inferior. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



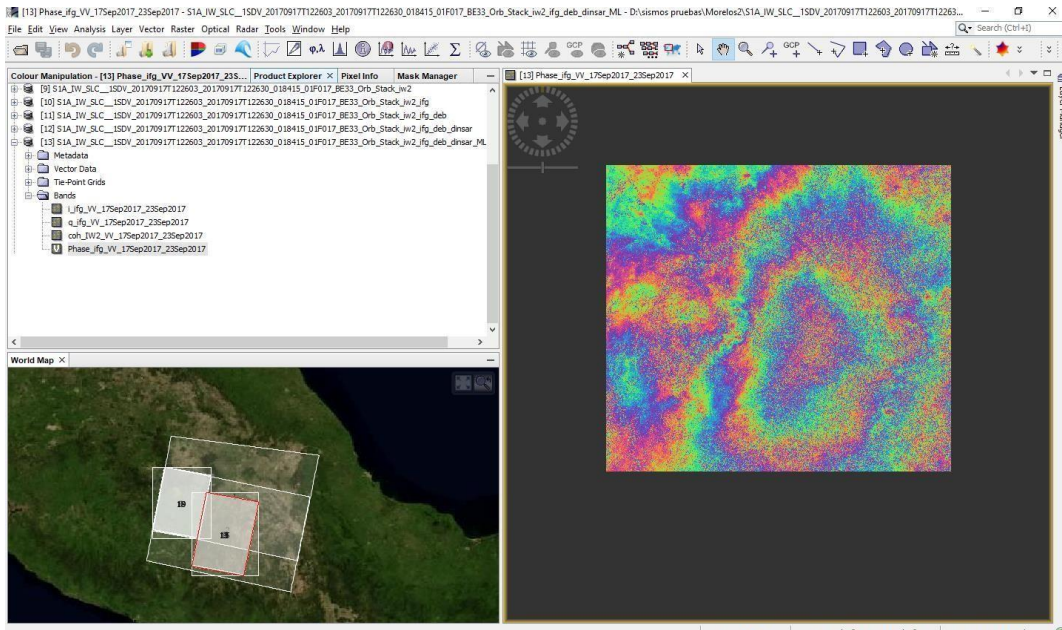
TOPOGRAPHIC PHASE REMOVAL

Figura 47. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



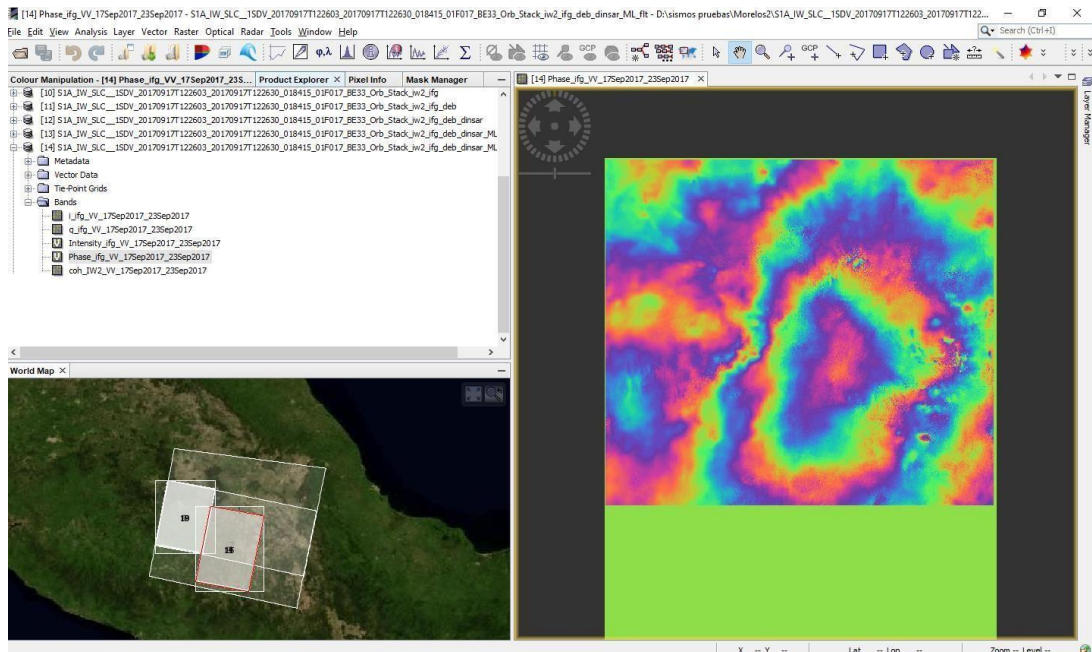
MULTILOCKING

Figura 48. Multilocking aplicado a la imagen SAR para obtener una medición más alta y con menor ruido. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



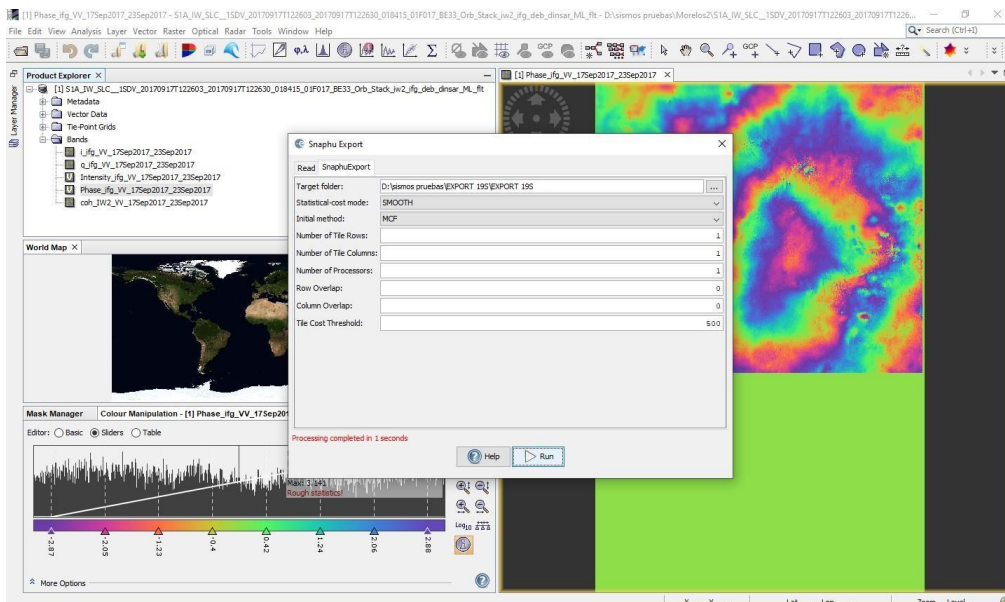
GOLDSTEIN PHASE FILTERING

Figura 49. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP



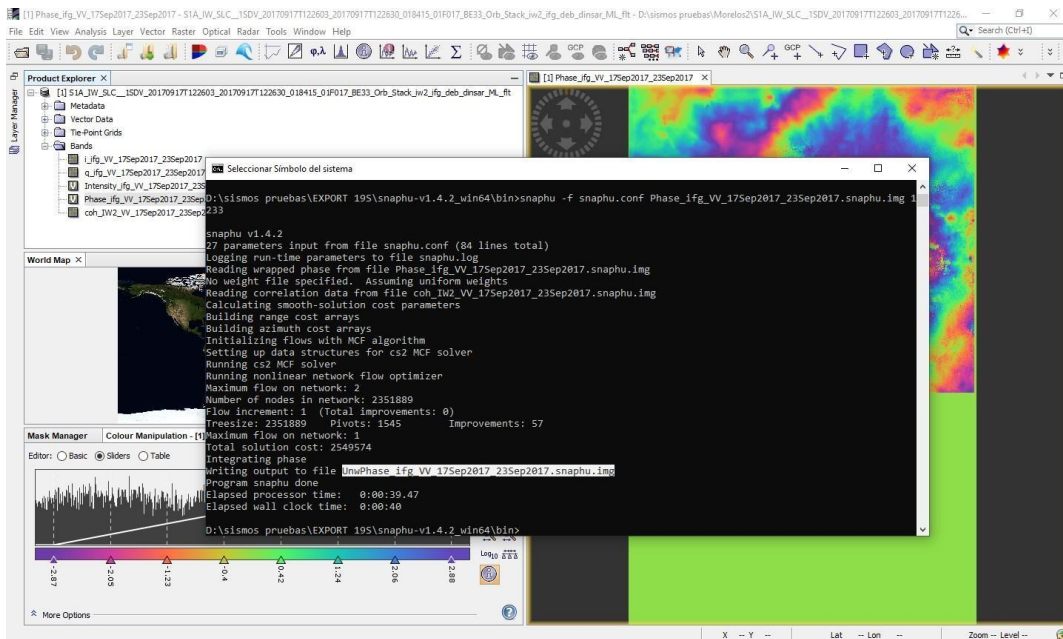
EXPORTAR FASE ENROLLADA DEL INTERFEROGRAMA

Figura 50. Fase enrollada del interferograma siendo exportada para su posterior manejo en el algoritmo SNAPHU. Evento sísmico 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



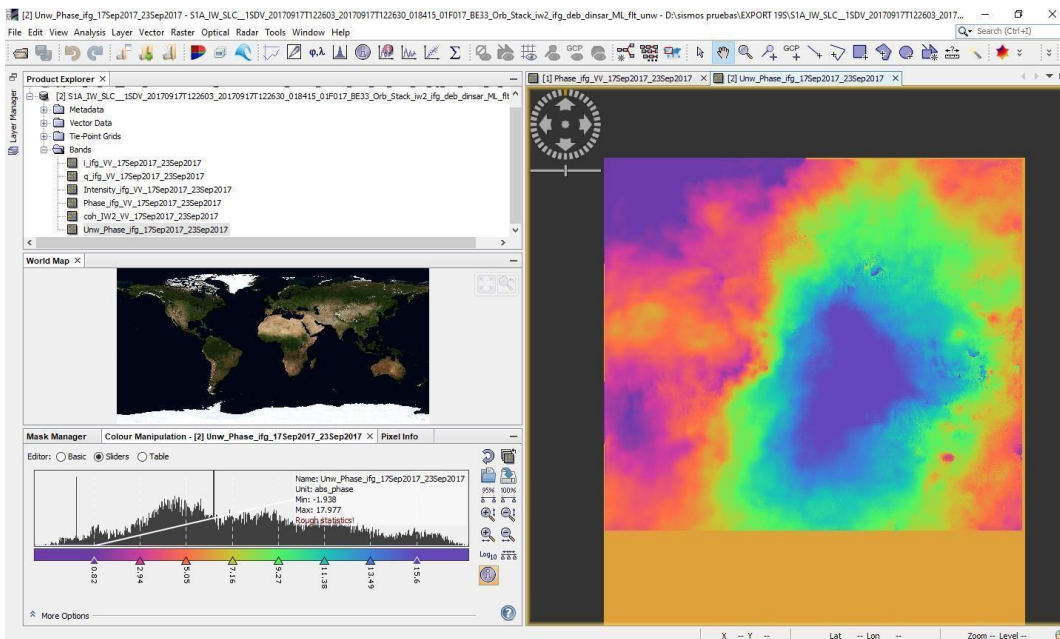
PROCESAMIENTO SNAPHU

Figura 51. Se muestra la imagen que ha creado SNAPHU en el símbolo del sistema (interferograma desenrollado). Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



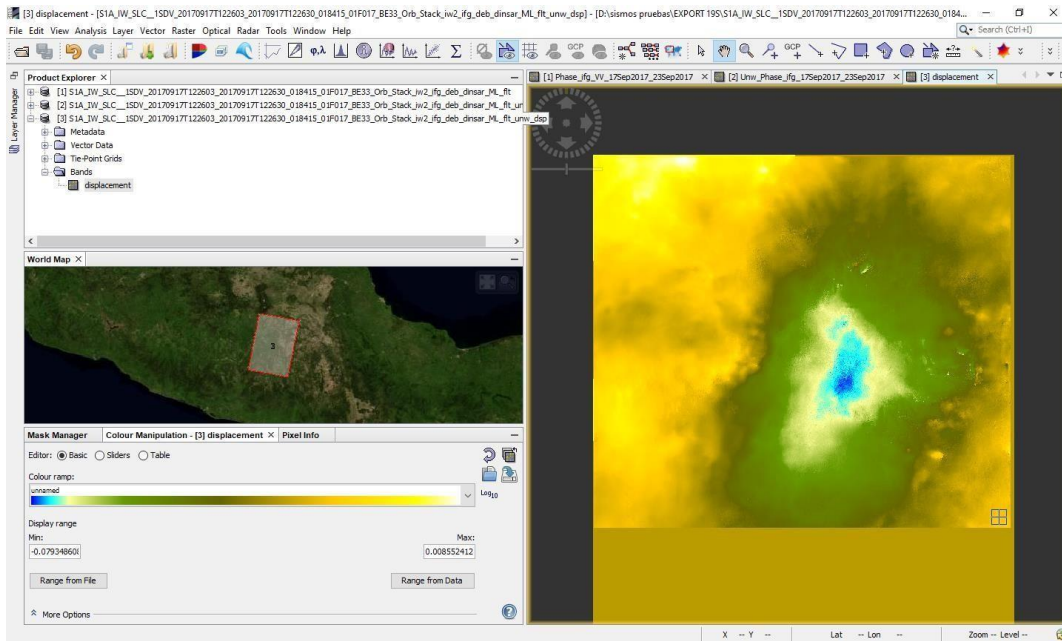
IMPORTAR FASE DESENROLLADA DEL INTERFEROGRAMA

Figura 52. Se muestra el interferograma desenrollado que ha sido importado de vuelta al SNAP. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



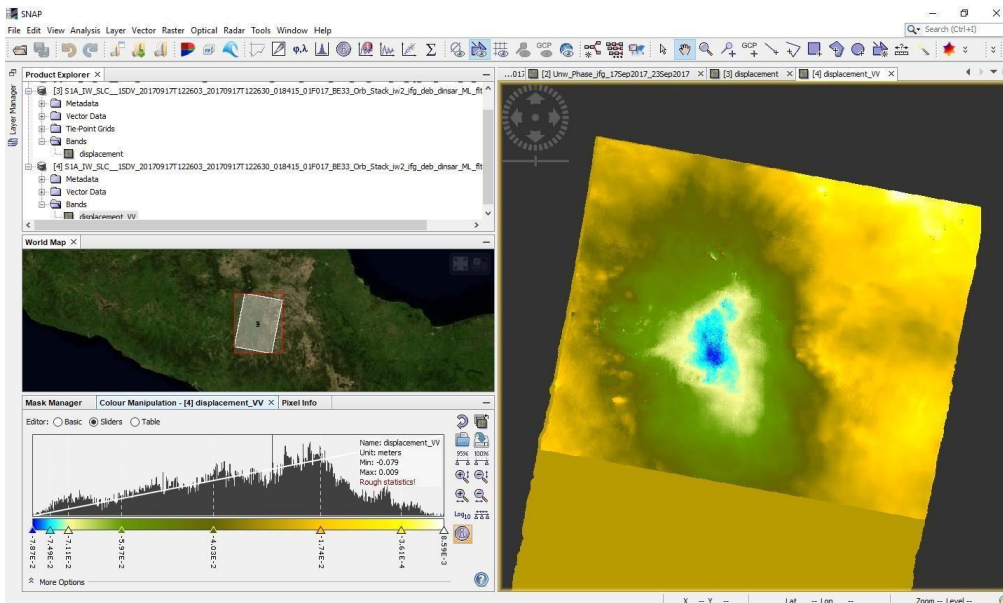
CONVERSIÓN A DESPLAZAMIENTO

Figura 53. Imagen convertida a desplazamiento, la cual muestra mediciones en metros para identificar la deformación que se ha presentado en la zona tras el evento sísmico del 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



RANGE DOPPLER TERRAIN CORRECTION

Figura 54. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas. Evento sísmico del 19 de septiembre de 2017. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



4.6 Cálculo de la deformación del terreno producido por el sismo del 23 de junio de 2020 en las cercanías de la Crucecita, en las costas del Estado de Oaxaca.

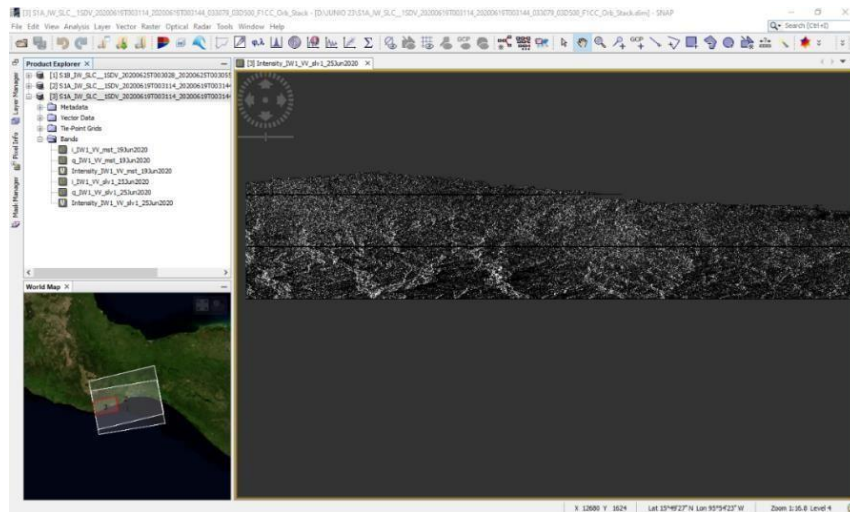
Tabla 8. Características de las imágenes de satélite utilizadas para la zona de Crucecita, Oaxaca, México. Elaboración propia a partir de información obtenida del sitio web Copernicus Open Access Hub (2020)

SISMO 23 DE JUNIO DE 2020 (M.7.4)		
4 KM AL NORTE DE CRUCECITA OAXACA, MÉXICO.		
CARACTERÍSTICAS	IMAGEN 1 (MAESTRA)	IMAGEN 2 (ESCLAVA)
TIPO	SAR	SAR
SISTEMA	SENTINEL 1-A	SENTINEL 1-B
FECHA DE CAPTURA	19-06-2020	25-06-2020
BANDA	C	C
MODOS	IW SLC	IW SLC
POLARIZACIÓN	V V	V V
NIVEL DE PROCESAMIENTO	SAR-L1	SAR-L1
FUENTE	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA	AGENCIA ESPACIAL EUROPEA

CORREGISTRATION

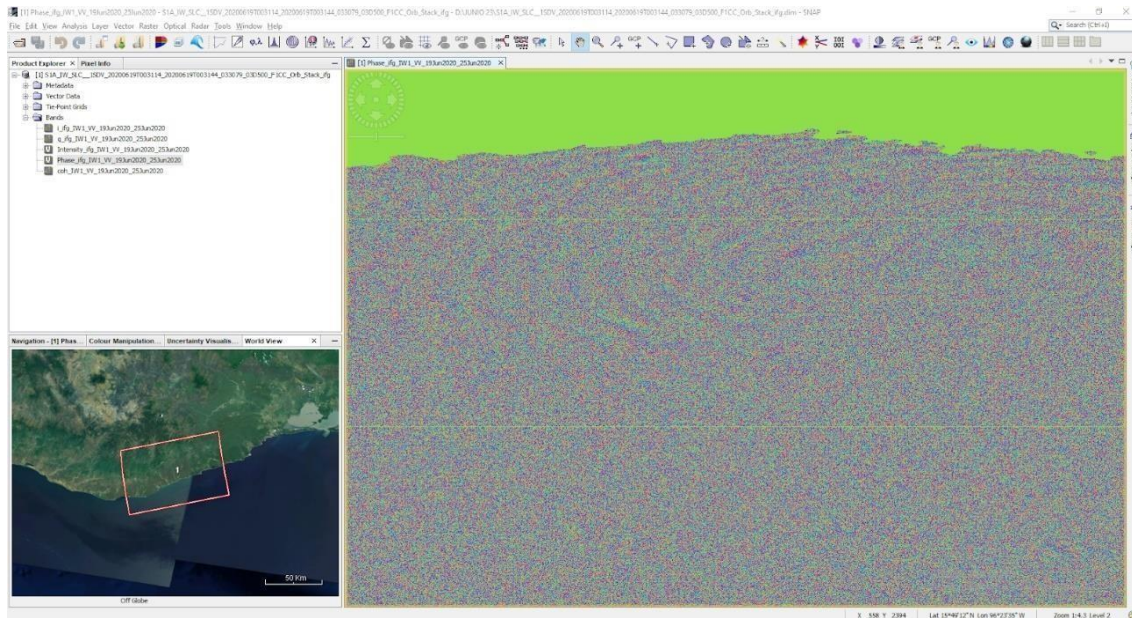
Figura 55. Corregistro del par de imágenes de radar para el evento sísmico del 23 de junio del 2020.

Elaboración propia a partir del software SNAP



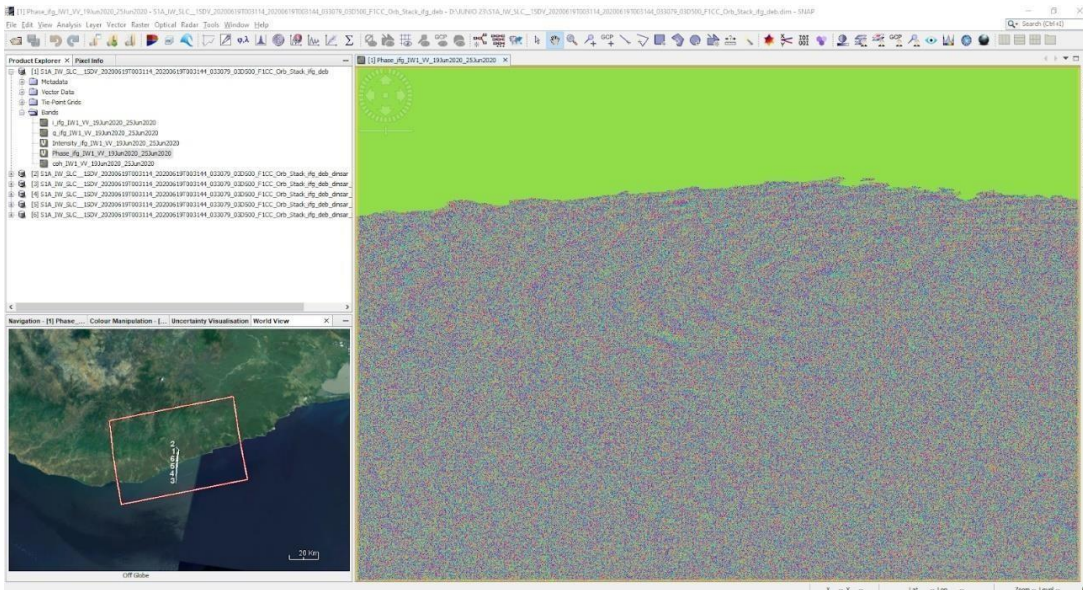
INTERFEROGRAM FORMATION

Figura 56. Formación del interferograma. Evento sísmico 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir del software SNAP.



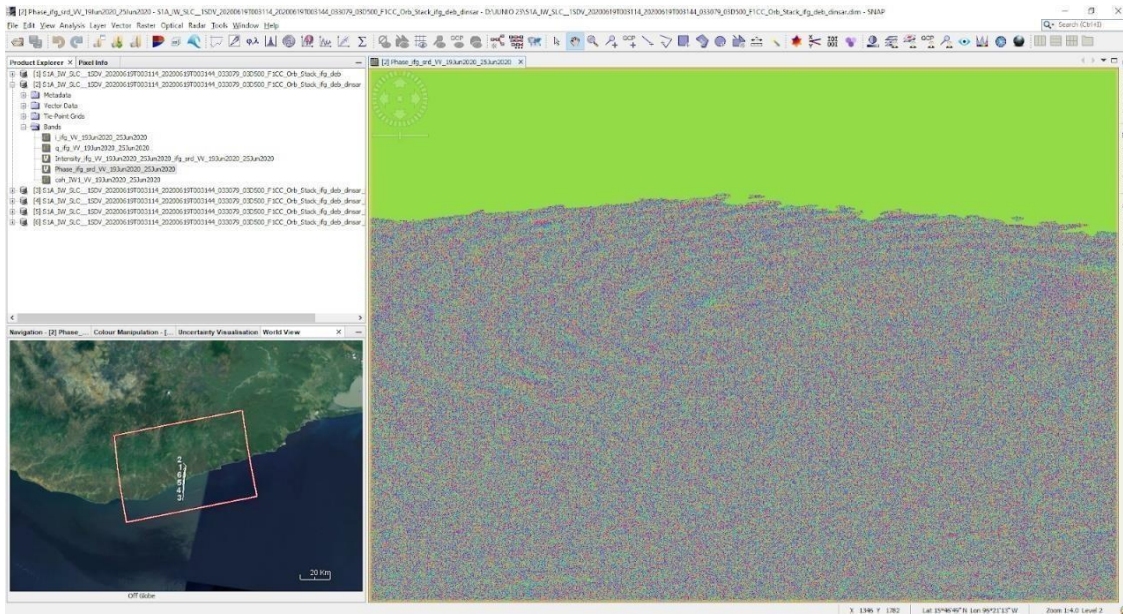
S1-TOPS DEBURST

Figura 57. Aplicación del procesamiento Deburst, para eliminar las discontinuidades en la imagen. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



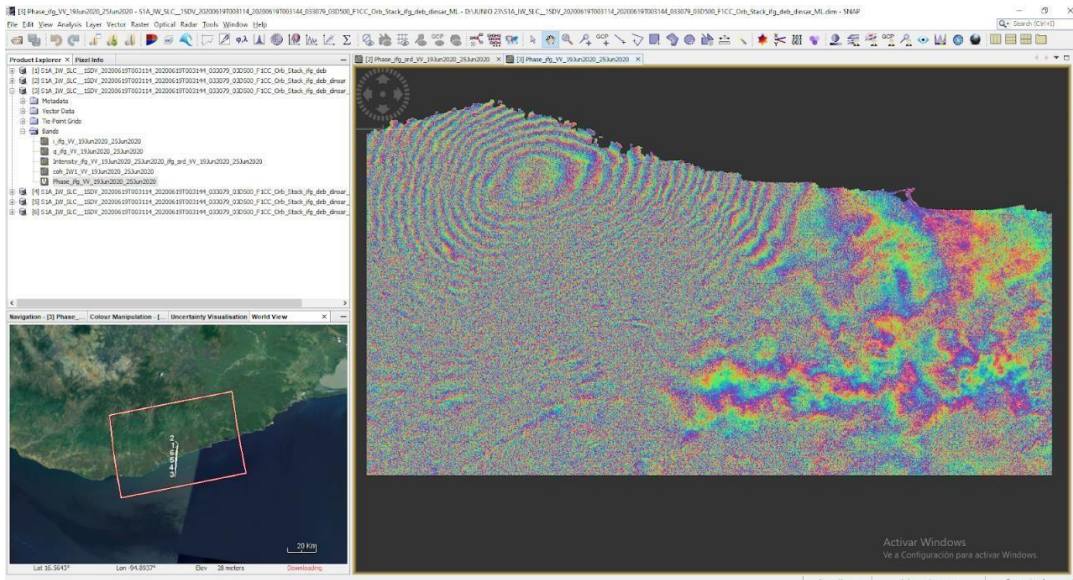
TOPOGRAPHIC PHASE REMOVAL

Figura 58. Fase topográfica removida para obtener el interferograma diferencial. Evento sísmico 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



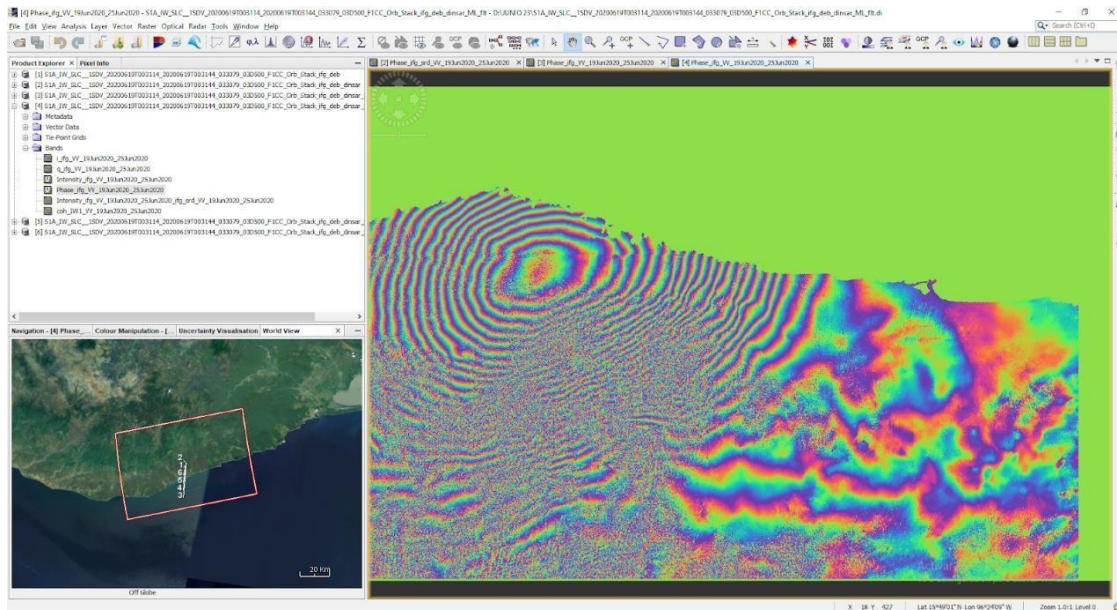
MULTILOCKING

Figura 59. Multilocking aplicado a la imagen SAR para obtener mediciones más precisas, así como la eliminación de una gran parte del ruido. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



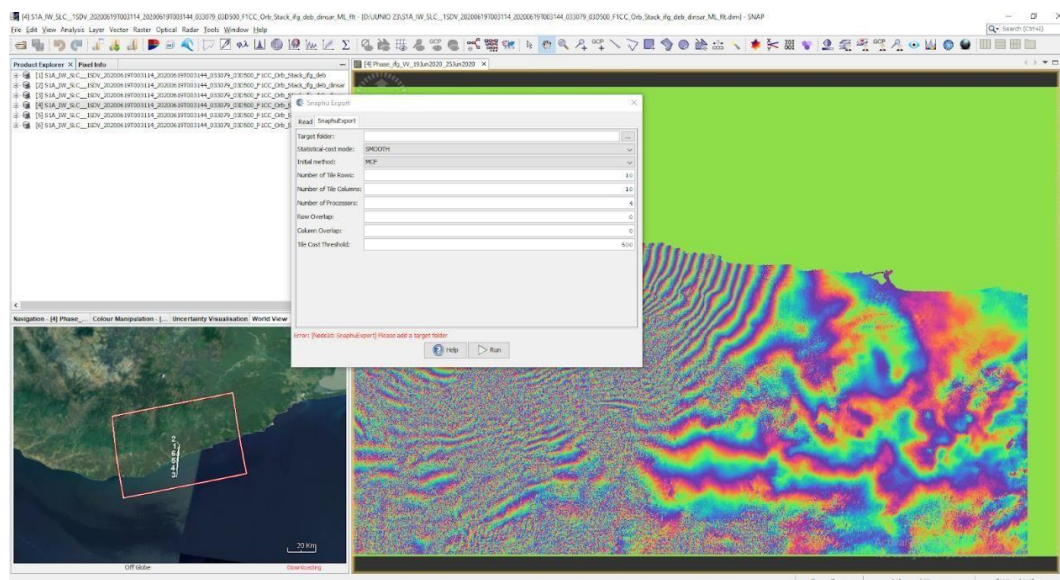
GOLDSTEIN PHASE FILTERING

Figura 60. Aplicación del proceso Goldstein Phase Filtering en el interferograma. Evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



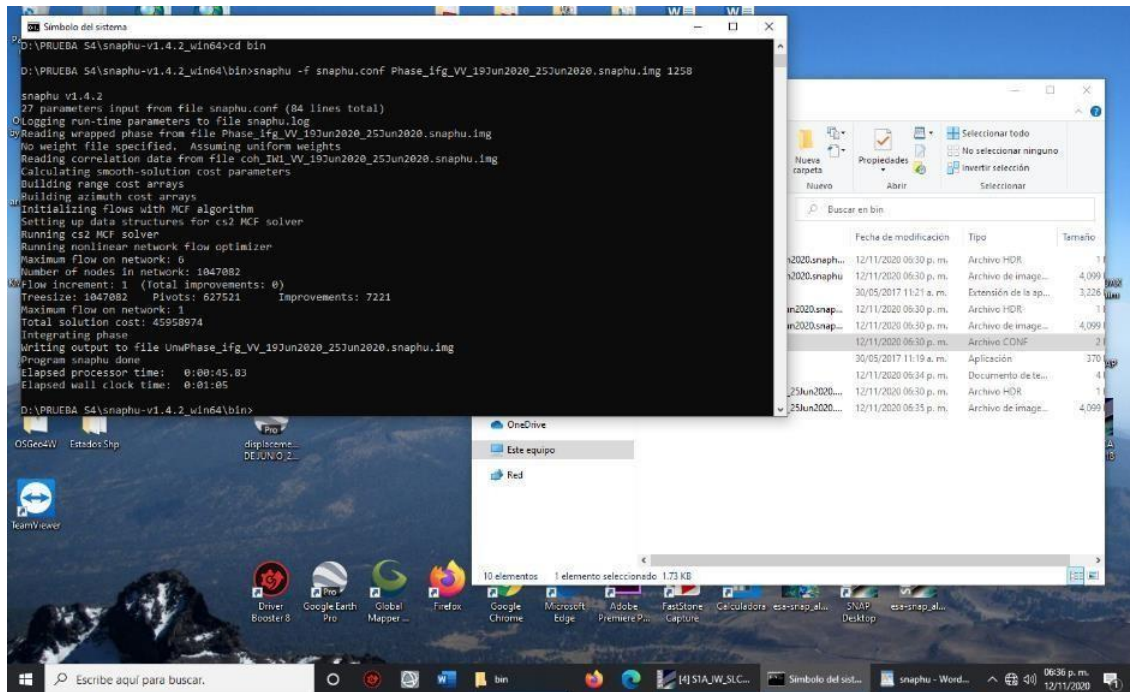
EXPORTAR FASE ENROLLADA DEL INTERFEROGRAMA

Figura 61. Fase enrollada del interferograma siendo exportada para su posterior manejo en el algoritmo SNAPHU. Evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



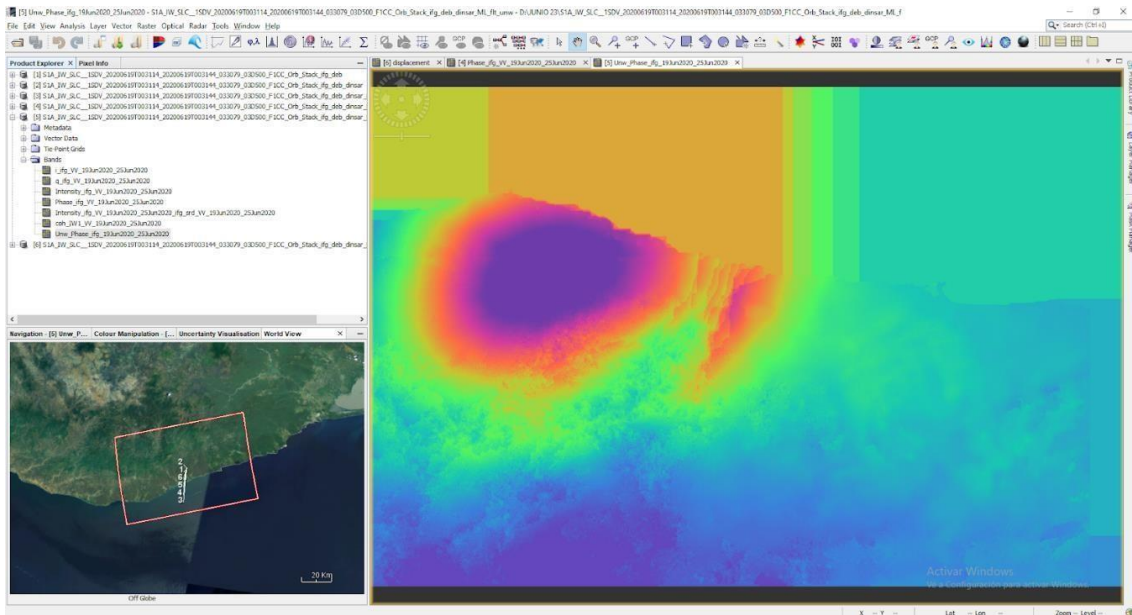
PROCESAMIENTO SNAPHU

Figura 62. Se muestra la imagen que ha creado SNAPHU en el símbolo del sistema (interferograma desenrollado). Evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



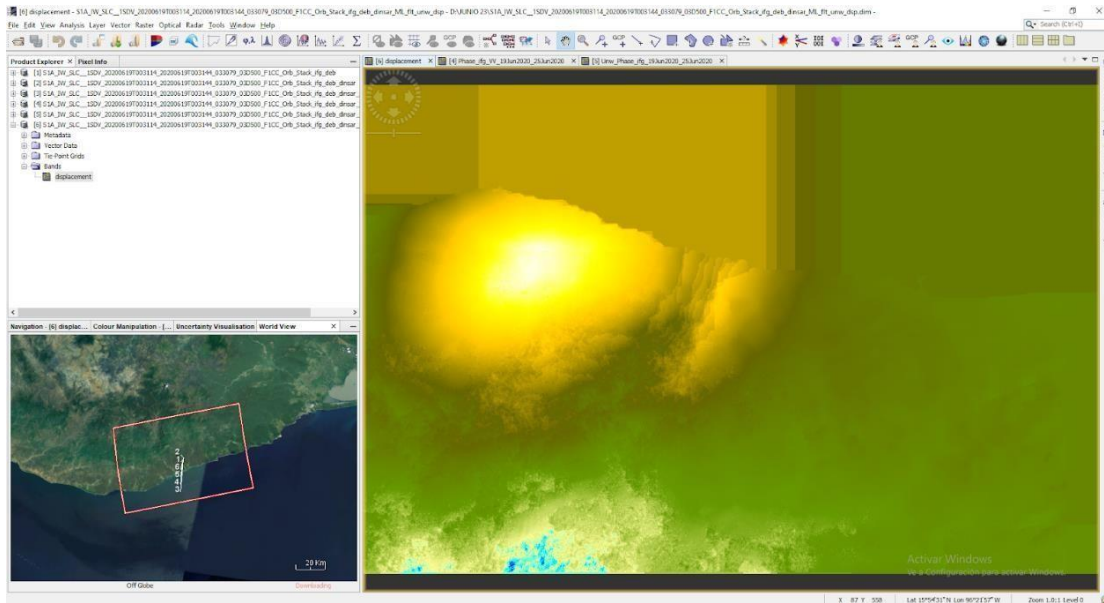
IMPORTAR FASE DESENROLLADA DEL INTERFEROGAMA

Figura 63. Se muestra el interferograma desenrollado que ha sido importado de vuelta al SNAP. Evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



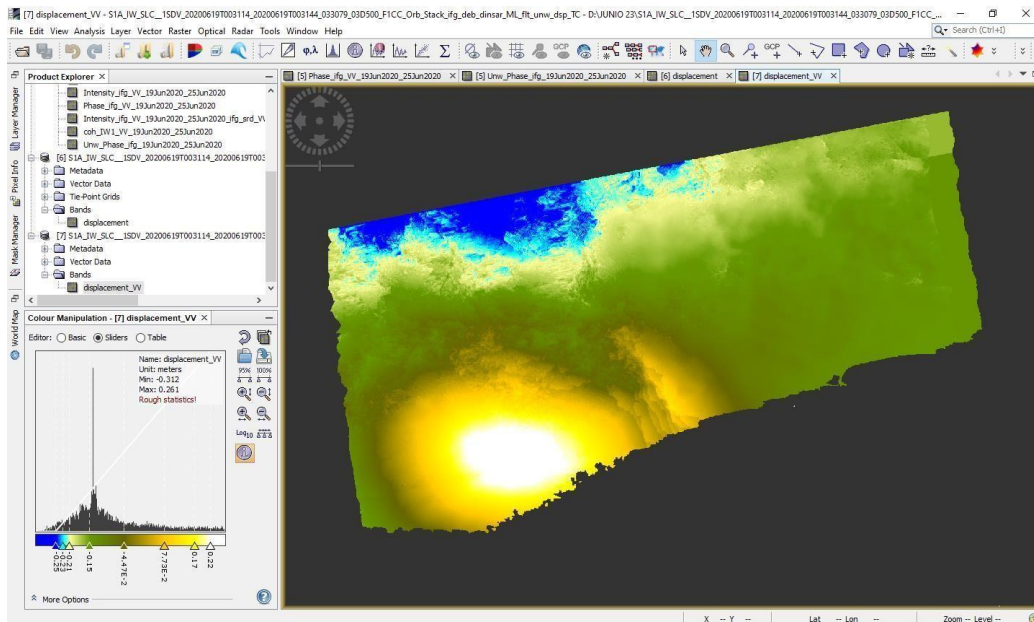
CONVERSION A DESPLAZAMIENTO

Figura 64. Imagen convertida a desplazamiento, la cual muestra mediciones en metros para identificar la deformación que se ha presentado en la zona, tras el evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



RANGE DOPPLER TERRAIN CORRECTION

Figura 65. Imagen final una vez asignado el sistema de coordenadas geodésicas. Evento sísmico del 23 de junio del 2020. Elaboración propia a partir de información obtenida del software SNAP.



4.7 Mapas de Desplazamiento del Terreno

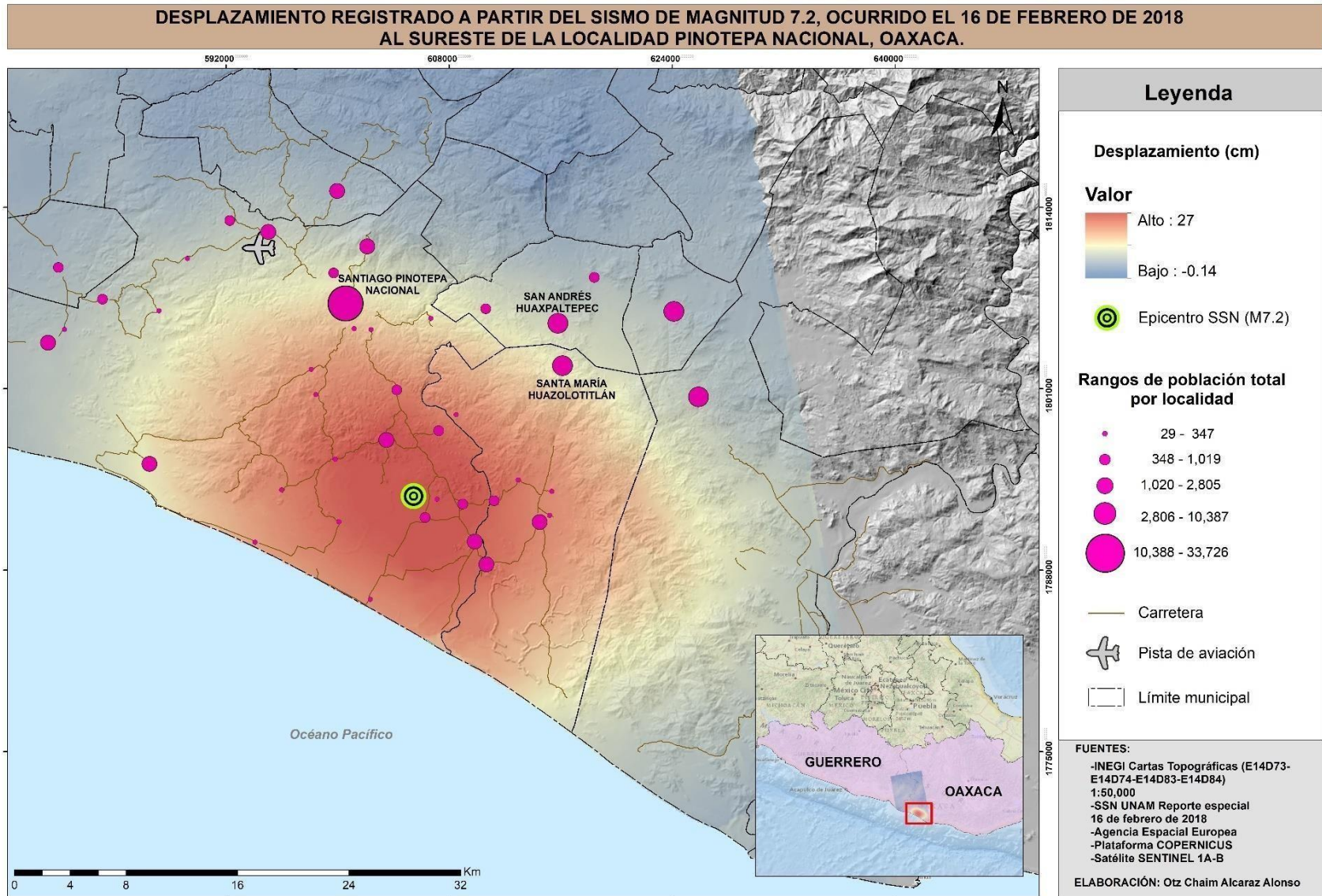


Figura 66. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 16 de febrero de 2018 (m. 7.2), al sureste de Pinotepa Nacional, Oaxaca, México.

**DESPLAZAMIENTO REGISTRADO A PARTIR DEL SISMO DE MAGNITUD 7.1, OCURRIDO EL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017
AL NOROESTE DE CHIAUTLA DE TAPIA, PUEBLA.**

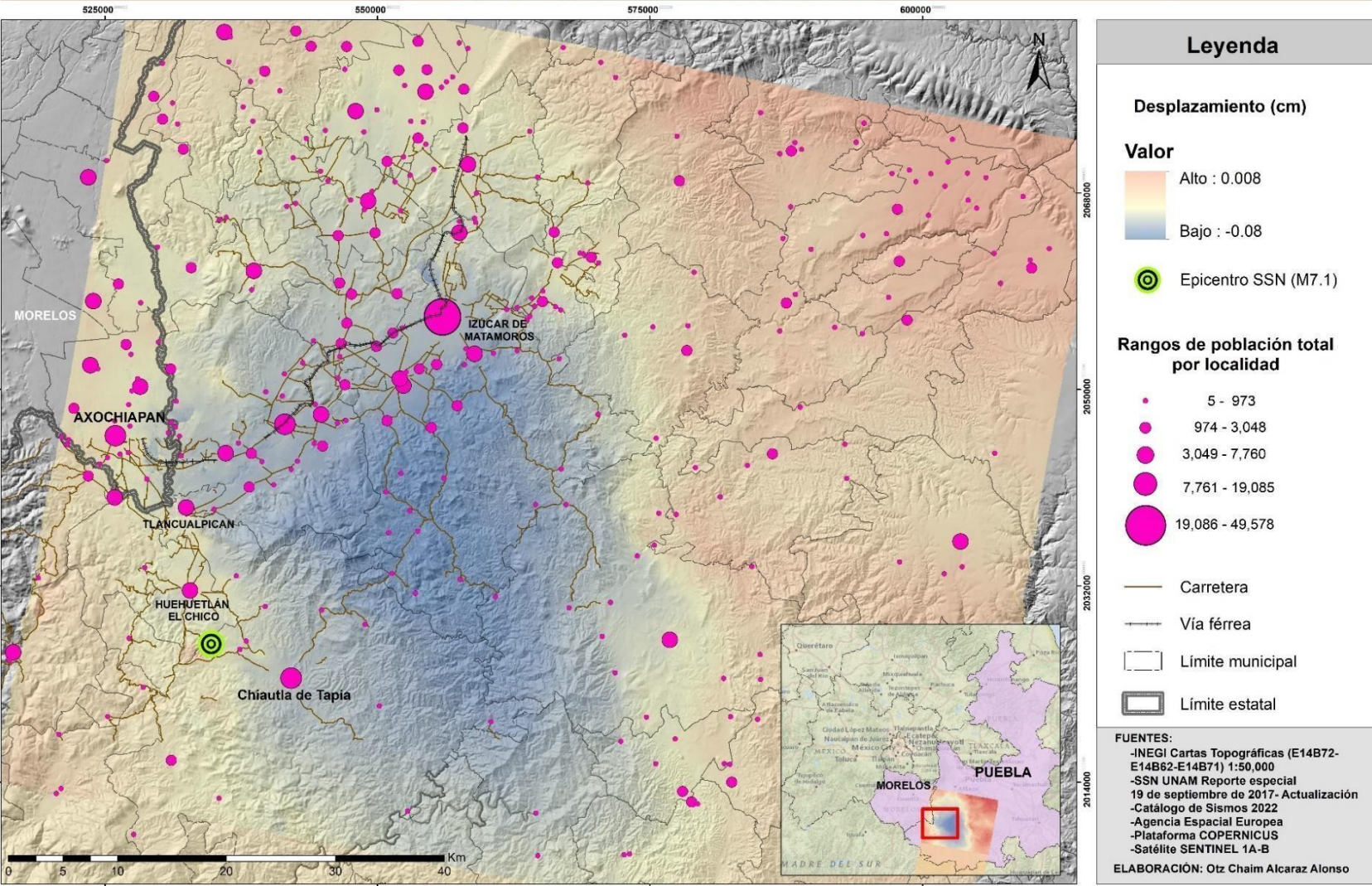


Figura 67. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 19 de septiembre de 2017 (m. 7.1), al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla.

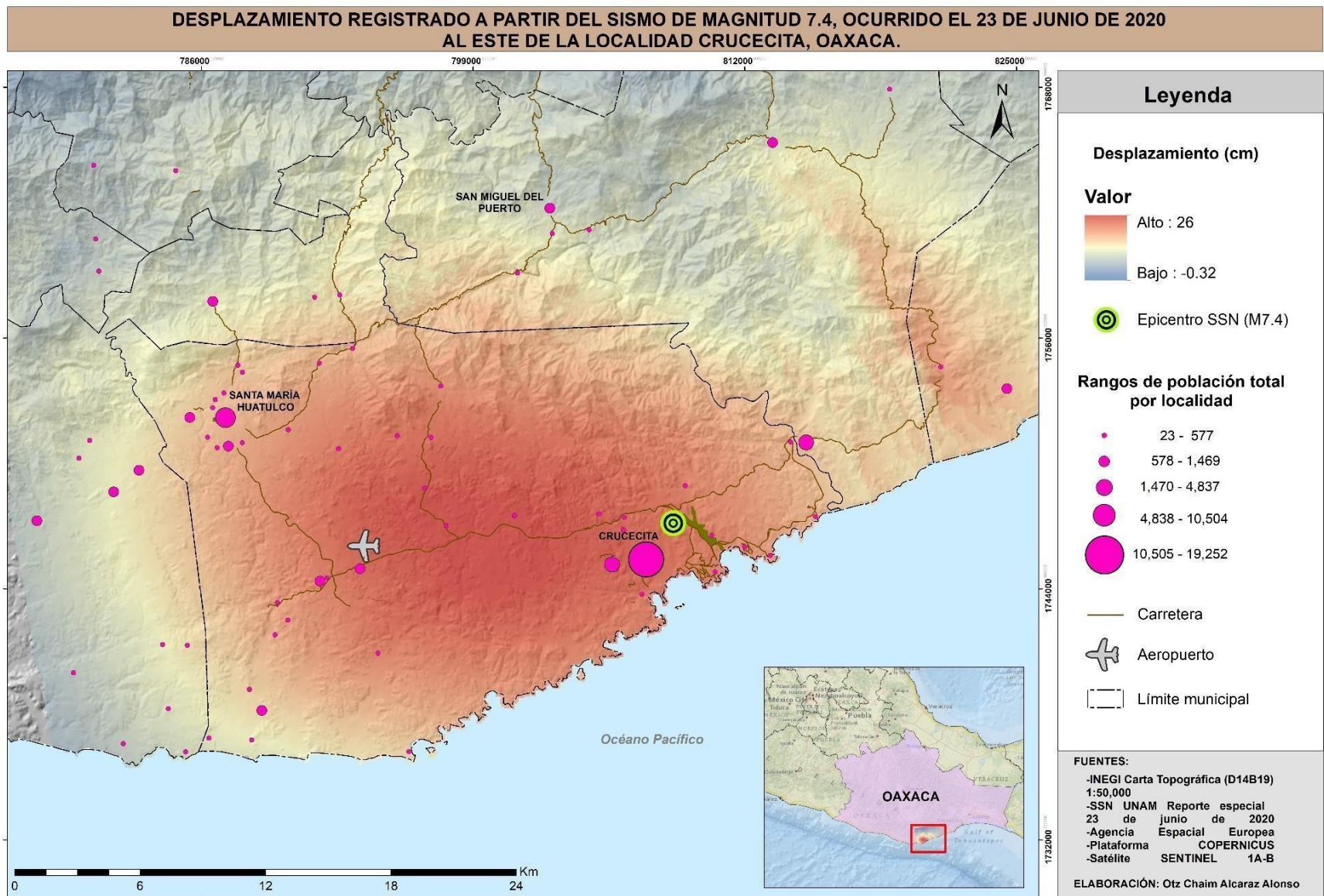


Figura 68. Mapa de desplazamiento ocasionado por el evento sísmico del 23 de junio de 2020 (M. 7.4), cerca de la localidad de Crucecita Oaxaca, México.

DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

La metodología DInSAR a través del software SNAP versión 7.0, permitió realizar la combinación de las imágenes de RADAR del satélite Sentinel 1, adquiridas en fechas previas y posteriores a cada evento sísmico, formando una nueva imagen conocida como “interferograma” la cual permitió cuantificar el desplazamiento del terreno.

El manejo de las imágenes de satélite comenzó desde su selección y descarga en la plataforma *Copernicus*, el cual demandó una gran capacidad de almacenamiento en el equipo de cómputo, esto con la finalidad de reducir los tiempos de descarga y almacenar cada proceso que se empleó en la metodología; posteriormente se equiparon procesadores de alta gama lo que permitió acelerar los tiempos de ejecución y obtener resultados con mayor rapidez.

La aplicación de dicha metodología se realizó sin cambios en parámetros para ninguno de los tres sismos. Ya que esencialmente el procedimiento solo requiere formar un interferograma y realizar una serie de filtros y cálculos que permitan extraer con mayor precisión los datos de deformación que se presentaron en el terreno.

Los resultados fueron georreferenciados en el software SNAP, y transportados a un sistema de información geográfica (ArcGis 10.5) para construir los mapas de desplazamiento y representarlos mediante una rampa de colores que van desde el rojo representando los valores más altos de deformación, hasta el azul con los valores más bajos.

Para el fenómeno sísmico del 19 septiembre de 2017 se obtuvieron valores de desplazamiento máximos del orden de 0.008 mm y mínimos del orden de -0.08 mm. Lo que refiere a un evento con pocas dimensiones de desplazamiento al momento de ocurrir el sismo. En el interferograma es posible notar los anillos concéntricos con amplios espacios entre ellos, además, en su conversión a desplazamiento muestra los valores más bajos al centro y los mayores valores se encuentran

alrededor. Siendo un caso particular puesto que los ejercicios subsecuentes aplicados a los otros dos eventos sísmicos, marcaron una distinta representación.

En el caso del evento sísmico del 16 de febrero de 2018 los resultados arrojaron desplazamientos máximos del orden de 27 cm y valores mínimos del orden de apenas -0.14 cm. Este fenómeno sísmico mostró una gran deformación y sus anillos concéntricos se notaron muy uniformes, lo que permitió que el procesamiento pudiera notar y calcular de mejor manera la diferencia o el segmento de cambio ocurrido entre la imagen previa y posterior al sismo.

En el mapa de desplazamiento es posible notar que el epicentro se encuentra justo en medio de los valores máximos de deformación, es decir a partir del epicentro los valores al interior se encuentran representados en color rojo y los valores de deformación van disminuyendo conforme se alejan de dicho epicentro y son representados en color azul.

A este análisis se sumó de forma adicional algunos componentes territoriales como localidades urbanas, rurales, e infraestructura como caminos, carreteras, áreas deportivas e instalaciones aeroportuarias. Dentro de los parámetros máximos de deformación se identificaron aproximadamente 25 localidades rurales y una serie de carreteras que comunican hacia las localidades de la costa, además se contabilizaron 3 centros urbanos entre los que destaca la ciudad de Pinotepa Nacional por su mayor extensión. Sin embargo, su ubicación y la de las otras dos localidades se encuentran entre los valores medios de deformación.

Finalmente, para el evento sísmico del 23 de junio de 2020 se obtuvieron valores de deformación máximos del orden de 26 cm y mínimos del orden de -0.32 cm. Este sismo mostró en el territorio al igual que el evento pasado un cambio casi notable entre la imagen previa y posterior, lo que permitió calcular de mejor forma la diferencia de fase y obtener los resultados de deformación antes mencionados.

El análisis territorial para este evento identificó un aproximado de 45 localidades rurales y dos centros urbanos importantes: la localidad de Crucecita y Santa María Huatulco, asimismo se encontró una instalación deportiva y un aeropuerto, además

de una serie de carreteras principales, esto dentro de la zona de parámetros máximos de deformación.

Se confirmó que el software SNAP de acuerdo con la metodología establecida para la deformación del terreno, obtuvo resultados satisfactorios en cada etapa del procesamiento, así como del algoritmo SNAPHU que ayudó en una de las etapas más importantes del trabajo, teniendo como resultado el producto de la deformación del terreno para cada evento sísmico.

La aplicación metodológica DInSAR para tres eventos sísmicos, permitió visualizar el comportamiento del fenómeno en el territorio y establecer parámetros de deformación tras la combinación de un par de imágenes de satélite del mismo lugar, pero en distintas temporalidades.

Para los dos sismos acontecidos en las costas del Pacífico (16 de febrero de 2018 con magnitud de 7.2 a una profundidad de 12 km y el 23 de junio de 2020 con magnitud de 7.4 a una profundidad de 22.6 km) se pudo observar que la formación del interferograma fue casi evidente en el sitio que es marcado como el epicentro del sismo, esto se demuestra en los anillos que van marcando la diferencia de fase y se espacializan de forma concéntrica en las imágenes. Es posible que estos dos casos mostraran mejores resultados ya que la profundidad a la que se manifestaron fue menor en comparación al sismo del 19 de septiembre de 2017, el cual tuvo una profundidad mucho mayor (51.2 km). Hay que recordar que el satélite Sentinel 1 con su longitud de onda puede llegar a identificar ciertos centímetros en superficie y que por ende si la propagación del sismo es más o menos superficial, el satélite podría recoger más o menos información en las imágenes.

Dicho análisis fue comprobado ya que los dos sismos con profundidades entre 12 y 22 km mostraron una deformación más evidente del terreno que el sismo del 19 de septiembre de 2017 que tuvo una profundidad de 51 km. Por lo que se podría inferir que los sismos a mayor profundidad son menos perceptibles en los cálculos de deformación del terreno utilizando el software SNAP aplicado a las imágenes de satélite Sentinel 1 de banda C.

CONCLUSIONES

Como se ha expuesto anteriormente en este trabajo, se obtuvieron los desplazamientos relacionados con los sismos del 19 de septiembre de 2017 (M.7.1), 16 de febrero de 2018 (M.7.2) y 23 de junio de 2020 (M.7.4) a partir de la técnica DInSAR, la cual fue aplicada con éxito a los 3 pares de imágenes del satélite Sentinel 1-A y 1-B.

La técnica de DInSAR, ha demostrado ventajas importantes dado su bajo presupuesto para el seguimiento y monitoreo del fenómeno, en comparación con el despliegue y establecimiento de redes de observación directa o instrumentaciones específicas, las cuales no llegan a implementarse en zonas de difícil acceso. Sin embargo, no se habla de reemplazar una técnica por otra, sino de complementar los estudios de monitoreo de fenómenos, en este caso sísmicos. Por lo que la implementación de nuevas tecnologías permitirá realizar una comparativa de los resultados obtenidos y así llegar a una mayor precisión en datos y mediciones.

Aunque desde hace décadas existen imágenes de RADAR, éstas no se obtenían de forma sistemática o periódica ya que solo se encontraban en regiones específicas del planeta. Por lo que el lanzamiento del satélite Sentinel 1, de la Agencia Espacial Europea, marcó un parteaguas en la obtención periódica de imágenes SAR de cualquier parte del mundo, en distintas temporalidades y de forma gratuita, lo que ha permitido a esta plataforma posicionarse como una de las más utilizadas a nivel mundial para temas de investigación y monitoreo terrestre.

El desarrollo de programas libres para procesamientos de imágenes de satélite de tipo RADAR es otra de las ventajas que permiten al usuario interactuar con mayor rapidez y obtener resultados preliminares de múltiples análisis como la técnica que se ha desarrollado en este trabajo.

Pese a ello, como se ha mencionado en párrafos anteriores, la capacidad de almacenamiento que se requiere para descargar las imágenes de satélite y los procesos que se van generando podrían significar una desventaja, en primer lugar por el costo de los componentes que se deben añadir al equipo de cómputo con la

finalidad de mejorar su rendimiento y aumentar su eficiencia al momento de ejecutar las metodologías de análisis; esto influye en acortar el tiempo de obtención de resultados e ir realizando pruebas para mejorar la calidad de los resultados. En segundo lugar, la aplicación de esta técnica requiere de conocimientos previos en cuanto al comportamiento de las imágenes de satélite de tipo RADAR ya que, de no tener los conceptos básicos, podría resultar complicado interpretar los procesos y el producto final. Por lo que es importante tomar en cuenta estos puntos con el objetivo de vislumbrar las ventajas y desventajas de implementar esta tecnología espacial.

La importancia de generar un mapeo con parámetros de deformación, radica en entender cuál ha sido el comportamiento del fenómeno en el territorio y las posibles repercusiones que se generan, principalmente en las zonas de asentamientos humanos donde se concentran grandes edificaciones e infraestructura pública importante como hospitales, escuelas etc.; que, de verse dañados, significaría un grave problema para las autoridades de gobierno. Por lo que los resultados de esta metodología funcionan en un primer momento para dimensionar la presencia del fenómeno y posteriormente el de ubicar las regiones o sitios donde se debería atender con mayor urgencia. Esto con el propósito de ser más eficiente a la hora de desplegar los recursos humanos y materiales una vez ocurrido el evento natural.

Las herramientas espaciales son cada vez más utilizadas para el estudio y análisis de fenómenos naturales, donde los geógrafos han ido desarrollando y aportando valiosas investigaciones de este campo en instituciones del sector público y privado. Ya que la formación integral que te da esta disciplina, no solo te permite comprender el origen, desarrollo y propagación de un fenómeno específico, sino que también analiza los agentes que interactúan en el espacio geográfico como es la población y sus componentes, los cuales son inherentes en cada proceso de análisis y van formando parte del estudio general del territorio.

Finalmente, cabe destacar que la aplicación de esta técnica en sismos de profundidad somera, identifica con mayor precisión la deformación que se ha presentado en el terreno, sin embargo, para los sismos ocurridos a profundidades

mayores, esta técnica no alcanza a proporcionar cifras relevantes en cuanto a la deformación presentada en superficie.

REFERENCIAS

1. Caballero, G.R., Delegido, J., Pasqualotto y N., Pereira M. (noviembre, 2018). Descarga y tratamiento de las imágenes SENTINEL-1,2 y 3 con el software SNAP de la ESA. XVIII Simposio Internacional SELPER. Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial. Cuba, 2018.
2. Catuna, N. (1995). La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía. Vol. 5. Núm. 2. Colombia. 83-106 pp.
3. CIRES. (30 de mayo de 2014). Los sismos de la antigüedad “los primeros registros históricos”. [Blog]. Recuperado de: <https://blogcires.mx/2014/05/27/historia-de-la-sismologia/>
4. Collado Torres, R.A; Gama Campillo, I.M y Díaz López, H.M. (2015). Percepción remota: elementos básicos. *Kuxulkab´*, XXI (40): 23-29, enero-junio.
5. Comisión Federal de Electricidad. (2008). Manual de Diseño de Obras Civiles, Sección C. Estructuras Tema 1. Criterios de diseño. Cap.3 Diseño por sismo. México. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Recuperado de: https://www.academia.edu/11081062/Manual_de_Dise%C3%B1o_de_Obras_Civiles
6. Copernicus Open Acces Hub. (2018). Annual Report 2018. Europa. European Spacial Agency. Recuperado de: <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/AnnualReport2018>
7. Duarte, C. (2014,11 de abril). INTRODUCCIÓN A LOS SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA. *Hacia el espacio*. Recuperado de <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=77>
8. Duarte, C. (2017). El Radar de Apertura Sintética. Complemento a los sensores ópticos para la observación de la Tierra. *Hacia el espacio*. Recuperado de: <http://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=507>
9. ESA. (2018). Copernicus Sentinel Data Access 2018 Reporte Anual. *SERCO*. (pp.71-77). Frascati, ITALIA. Recuperado de: https://scihub.copernicus.eu/twiki/pub/SciHubWebPortal/AnnualReport2018/COPE-SERCO-RP-19-0389_-_Sentinel_Data_Access_Annual_Report_Y2018_v1.0.pdf
10. ESA. (2021). Copernicus Sentinel Data Access 2020 Reporte Anual. *SERCO*. (pp.21-28). Frascati, ITALIA. Recuperado de: https://scihub.copernicus.eu/twiki/pub/SciHubWebPortal/AnnualReport2020/COPE-SERCO-RP-21-1141_-_Sentinel_Data_Access_Annual_Report_Y2020_final_v2.3.pdf

11. ESA. (s.f). El programa Copérnico. *Eduspace*. Recuperado de: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/El_programa_Copernico
12. ESA. (s.f). Guía de usuario Sentinel 1 SAR. Recuperado de: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
13. ESA. (s.f). Radar de Apertura Sintética (SAR). *Eduspace*. Recuperado de: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_ES/SEMKXF64RH_0.html
14. Fernández, M.P. (2009). Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría RADAR DInSAR. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Civil. Área de Ingeniería del Terreno. España.
15. Fernández, O., Escalona, M., Valdez, L. (2015). Avances y perspectivas de Geomática con Aplicaciones Ambientales, Agrícolas y Urbanas. 37-43 pp.
16. Fernández, Y., y Soria, J. (2015). Imágenes de Radar de Apertura Sintética y conceptos básicos de polarimetría. En Fernández, Y. *et al* (Eds.), *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas* (pp. 37-66). México. Editorial. Colegio de Postgraduados. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/301247047_Imagenes_SAR_y_Conceptos_Basicos_de_Polarimetria
17. Fielding, E.J. (2018, agosto 23). Introduction to SAR Interferometry [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=9T1IBnta9P0&t=2359s>
18. Fielding, E.J. (2018, agosto 16). SAR Interferometry for Earthquake Studies [Archivo de video]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=P8lQ7pjkRIw>
19. Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R y Romero, I. (2005). El Espectro Electromagnético y sus aplicaciones. Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. Universidad de Los Andes. 151 pp.
20. Frontera, T., Blanco, P., Concha, Aline., Goula, Xavier., Pérez, Fernando y Marturia, Jordi. (2012). Medidas de deformaciones cosísmicas con DInSAR para el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. *Física de la Tierra*, vol. (24), 151-169.
21. Godínez, L. (2016). Propuesta de un plan de acción para optimizar el traslado de víctimas después de un terremoto. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de maestría y doctorado en ingeniería.
22. González, J. (2014). Análisis sismo-geodésico del sismo el Mayor-Cucapah (Mw=7.2) del 4 de abril de 2010, Baja California. (Tesis Doctoral). Centro De Investigación Científica y de Educación Superior De Ensenada Baja California,

23. González, J. (2017). La percepción remota. Noche de las estrellas. Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.2pp. Recuperado de: https://www.nochedelasesestrellas.org.mx/docs/Articulos/2017/5_1_PercepcionRemota.pdf
24. Guerrero, C., y Hernández, P. (2017). Determinación de un Modelo Digital de Elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría SAR. (Tesis de Ingeniería Catastral y Geodesta). Universidad de Caldas, Colombia.
25. Gutiérrez C., Quaas W., Ordaz, M., Guevara, E., Muria, D y Krishna Shri. (2005). Serie fascículos Sismos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. 5ta Edición. México.44pp.
26. Gutiérrez C., Martínez, A., Gómez, A., De la Cruz, S., Hernández, T., Mendoza, M., y Domínguez, L. (2014). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Geológicos. Serie Atlas Nacional de Riesgos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México. 280pp.
27. Guido, S y Hans, P. (2014). Potential of remote sensing- a study based on natural disasters occurred during the last 5 years in Chile. *Boletín de Ciencias Geodésicas*, 20 (1). Recuperado de: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-21702014000100013+
28. Hernández O. (2008). Cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú-San Jacinto a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico. Informe de proyecto No.1. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 60pp.
29. Instituto Estatal de Protección Civil. (2010). Actualización del Atlas de riesgos del Estado de Oaxaca en los fenómenos geológicos e hidrometeorológicos. Recuperado de: http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFAtlasEstatales/OAXACA_2010.pdf
30. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). Anuario estadístico y geográfico de Morelos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
31. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). Prontuario de información geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Axochiapan, Morelos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

32. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2004). Síntesis de información Geográfica del Estado de Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
33. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). Síntesis de información Geográfica del Estado de Puebla. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
34. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Chiautla, Puebla. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21047a.html>
35. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (s.f). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Oaxaca Medio Físico. México. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/index.html>
36. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2006). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Santiago Pinotepa Nacional. Oaxaca. México. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20482a.html>
37. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2010). Estado de Puebla. Secretaria de Gobernación. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/index.html>
38. Infrared Processing and Analysis Center. (21 de septiembre de 2000). ¿Qué es el infrarrojo? [Blog]. Recuperado de: <http://legacy.spitzer.caltech.edu/espanol/edu/ir/infrared.html>
39. Kostoglodov, V y Pacheco, J.F. (2000). Cien años de sismicidad en México. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
40. Labrador, M., Évora, J.A y Arbelo, M. (2012). Satélites de Teledetección para la Gestión del Territorio. Proyecto SATELMAC, programa de Cooperación Transnacional Madeira- Azores- Canarias. 7-63 pp.
41. Lewis, G. y Collins, C. (ed.) 2014. Earthquakes –Teacher notes and student activities. 2nded.revised2016. Record 2014/06. Geoscience Australia, Canberra. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.11636/Record.2014.006>
42. Maldonado, Y. (S.F). Limites convergentes, divergentes y transformantes de placas tectónicas. *Geología Web*. Recuperado de: <https://geologiaweb.com/planeta-tierra/limites-placas-tectonicas/>

43. Mieza, M.S., Kovac, F.D y Martínez D.E. (2012). Imágenes satelitales y aéreas en aplicaciones sitio específicas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria 10-14pp. Recuperado de: https://inta.gov.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-agricultura_por_ambientes_liviano.pdf
44. Misión Sentinel. (s.f). Aplicaciones de la misión sentinel. *European Space Agency*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4
45. Mora, O.; Palà, V.; Arbiol, R.; Adell, A yTorre, M. (2007, julio). Medidas de deformación del terreno a vista de satélite. *REVISTA CATALANA DE GEOGRAFÍA, Vol.XII (31)*. Recuperado de: <http://www.rcg.cat/articles.php?id=97>
46. NASA. (s.f). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. *Applied Remote Sensing Training*. Recuperado de: <https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session1-SAR-Spanish.pdf>
47. NASA. (s.f). Procesamiento y Análisis de imágenes SAR. *Applied Remote Sensing Training*. Recuperado de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session2-SAR-Spanish_0.pdf
48. Navarro, V.D. (2014). Satellite Polarimetric Differential SAR Interferometry. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Departamento de Ciencia de la Computación e inteligencia Artificial. España.
49. Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Creative Common Atribución. 798 pp. Recuperado de: <https://volaya.github.io/libro-sig/index.html>
50. Parra, J; Tiberio J; De la Rosa M. (2015). Study of noise reduction in SAR images for the Analysis of Floods. *INGENIUM, No.32*, 9-18 pp.
51. Pérez, J.J, Aguirre, J y Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública México. Vol.60* Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/f6e6/e3db4fae908cdd9be6f09c053a811c96c87d.pdf>
52. Podest, E. (29 de noviembre de 2017). Synthetic Aperture Radar or SAR. [Archivo de video]. Recuperado de: <https://youtu.be/YshNd9jql58>
53. Redondo, M. (11 de marzo de 2021). La gran lección que dejó a la Ciudad de México el terremoto de 1985. *Hipertextual*. Recuperado de: <https://hipertextual.com/2017/09/gran-leccion-que-dejo-ciudad-mexico-terremoto-1985>
54. Regiones Sísmicas en México. (10 de agosto de 2019). *Antisísmico*. Recuperado de: <https://hoffman-latam.com/blog/regiones-sismicas-en-mexico/>

55. Rosenblueth, E., García, V., Rojas, T., Núñez, F.J y Orozco, J. (1994) *Macrosismos: aspectos físicos, sociales, económicos y políticos*. Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. México. 55pp.
56. Sagripanti, G.L., Bettiol, A y Seitz, C. (2007). *Terremotos: nuestro planeta vibra bajo el poder de su energía*. Programa de Divulgación Científica para las enseñanzas de las Ciencias, *CORDOBENSIS*. Argentina. 27 pp. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/312187650_TERREMOTOS
57. Secretaria de Desarrollo Social. (2012). *Atlas de Riesgos del municipio de Santiago Pinotepa Nacional Oaxaca*. México. Secretaria de Desarrollo Social. Recuperado de: <http://www.proteccioncivil.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2019/03/SantiagopinotepanacionalAR.pdf>
58. Seppi, S. (2016). *Uso de Interferometría Diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, provincia de Bolzano, Italia*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. Recuperado de: <https://www.famaf.unc.edu.ar/documents/1350/42-Seppi.pdf>
59. Servicio Geológico Minero Argentino. (2018). *Sensores Remotos*. Recuperado de: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>
60. Servicio Geológico Mexicano. (02 de octubre de 2017). *Sismos: Causas, características e impactos*. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e-impactos?idiom=es>
61. Servicio Sismológico Nacional. (2014). *Reporte de sismo del día 8 de mayo de 2014, Guerrero (M 6.4)*. Recuperado de: http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/8mayo2014_Guerrero.pdf
62. Servicio Sismológico Nacional. (2017). *Reporte especial Sismo del 19 de septiembre de 2017, Puebla- Morelos (M 7.1)*. Recuperado de: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf
63. Servicio Sismológico Nacional (2018). *Reporte especial Sismo del día 16 de febrero de 2018, costa de Oaxaca (M 7.2)*. Recuperado de: http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2018/SSNMX_rep_esp_20180216_Oaxaca_M72.pdf
64. Silva, L.M. (2019). *Crónica de seis siglos de sismos en México: Lecciones aprendidas y perspectivas*. Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros A.C. México. 331pp.
65. Soria, J y Ramírez, S. (2016). *Percepción Remota y tecnología satelital como apoyo a los sistemas de alerta temprana en México: Conceptos y herramientas que*

sustentan el Sistema Nacional de Alertas sobre Eventos Bióticos y Abióticos nocivos para la agricultura.

- 66.** USAID. (1993). Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales Organización de Estados Americanos. Washington, D.C. 568 pp. Recuperado de: <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea65s/oea65s.pdf>
- 67.** Valdés, C. (2018). Hacia una cultura de prevención ante los sismos. Revista Ciencia Volumen 69, número 3. 18 – 23 pp.
- 68.** Velázquez, A. (2020). Tasas de deslizamiento de las principales fallas del valle de Mexicali, Baja California, México, utilizando datos de GPS. (Tesis de Maestría). Centro De Investigación Científica Y De Educación Superior De Ensenada Baja California, México. Recuperado de: https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3056/1/Tesis_Velazquez%20Zaguilan%20Arisai%20_05_dic_2019.pdf
- 69.** Villegas, H. (2008). Introducción a la Percepción Remota y sus aplicaciones geológicas. Ministerio de minas y energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá, Colombia. 60 pp.