

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN GEOFÍSICA**

***“EVALUACIÓN DE DEFORMACIÓN EN ZONA DE
FRACTURAS DEL FLANCO NO Y SE DEL COMPLEJO
VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE
RADAR PARA EL PERÍODO DE 2017 A 2021”***

PRESENTA:

BR. RODRIGO ALEJANDRO VELÁSQUEZ GARCÍA

ASESOR INTERNO:

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

LIC. GUILLERMO NAPOLEÓN MORÁN ORELLANA

ASESOR EXTERNO:

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

ING. CARLOS DEMETRIO ESCOBAR ESCOBAR

Septiembre de 2023

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN GEOFÍSICA**

***“EVALUACIÓN DE DEFORMACIÓN EN ZONA DE
FRACTURAS DEL FLANCO NO Y SE DEL COMPLEJO
VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE
RADAR PARA EL PERÍODO DE 2017 A 2021”***

PRESENTA:

BR. RODRIGO ALEJANDRO VELÁSQUEZ GARCÍA

ASESOR INTERNO

LIC. GUILLERMO NAPOLEÓN MORÁN ORELLANA:

ASESOR EXTERNO:

ING. CARLOS DEMETRIO ESCOBAR ESCOBAR:

Septiembre de 2023

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA**



**TRABAJO DE GRADUACIÓN
PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN GEOFÍSICA**

***“EVALUACIÓN DE DEFORMACIÓN EN ZONA DE
FRACTURAS DEL FLANCO NO Y SE DEL COMPLEJO
VOLCÁNICO DE SAN SALVADOR, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL DE
RADAR PARA EL PERÍODO DE 2017 A 2021”***

PRESENTA:

BR. RODRIGO ALEJANDRO VELÁSQUEZ GARCÍA

TRIBUNAL CALIFICADOR:

JURADO INTERNO

M.Sc. CÉSAR ARMANDO ALVARADO BATRES

JURADO INTERNO

M.Sc. OSCAR ARMANDO AMAYA MONTERROSA

Septiembre de 2023

*“Adoro al Señor porque él me guía; incluso en la noche, me orienta y guía mis pasos.
Siempre tomo en cuenta primero al Señor; nada me hará tambalear, pues él está a mi lado.
Por eso mi corazón y mi alma estarán llenos de alegría y hasta mi cuerpo vivirá seguro por
siempre.”*

*Porque yo sé que nunca me abandonarás en el lugar de los muertos.
Nunca dejarás que tu fiel seguidor se hunda en la muerte.
Tú me enseñas el camino que lleva a la vida.
Hay mucha alegría en tu presencia; a tu derecha hay placeres que duran para siempre.”*

Salmos 16:7-11

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR:

M.Sc. Roger Armando Arias Alvarado

VICERRECTOR ACADÉMICO:

Dr. Raúl Ernesto Azcuaga López

SECRETARIO GENERAL:

Lic. Francisco Alarcón Sandoval

FISCAL GENERAL:

Lic. Rafael Humberto Peña Martín

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

DECANO:

M.Sc. Mauricio Hernán Lovo

VICEDECANO:

M.Sc. Zoila Virginia Guerrero

DIRECTOR INTERINO DE LA ESCUELA DE FÍSICA:

M.Sc. Guillermo Napoleón Morán Orellana

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios y la Virgen por haberme guiado en este camino, mostrándome siempre la luz para poder coronar con éxito esta carrera que tanto me apasiona.

Agradezco de todo corazón a mi madre Argentina, de quien soy reflejo de todo su sacrificio, amor, cuidados y tiempo; a quien dedico hoy este título universitario y quien le debo mi vida entera.

Agradezco a mi abuela Angela, mi tío José y tío Koki por todo su apoyo, amor, cuidados y ánimos durante toda mi vida y por estar siempre pendiente de mi caminar.

Agradezco a mi papa Juan Luis, por ser mi inspiración como científico y por estar siempre pendiente de mi progreso.

Agradezco a mi eterna novia y ahora esposa Karla, por saberme levantar los ánimos y enseñarme de valentía, coraje y perseverancia, quien en mi momento de duda supo redirigirme e impulsarme a superar todos mis miedos, a ti dedico este gran logro y agradezco todo tu amor y espera.

Agradezco de sobremanera a mi asesor principal Guillermo Morán, por exigirme, por educarme, por corregirme, por confiar en mí durante toda mi vida en la universidad y por seguirme apoyando incondicionalmente, porque sin él este trabajo no tuviera la calidad que posee.

Agradezco a mi asesor externo Demetrio Escobar, por todo su tiempo, su amabilidad, su disposición y su guía para comprender el significado de que es ser un vulcanólogo al servicio del país.

Agradezco a todos los amigos con quienes he compartido este proceso, deseándoles mayores éxitos y poder coincidir con ellos hoy, mañana y siempre.

Dedico este triunfo a quienes se me adelantaron, abuelo Jorge, abuelo Chabelo y Kike, porque sé que ustedes allá en el cielo estarán festejando por mí y porque un día nos volveremos a ver para compartirles todo lo que esta vida me espera.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	23
2.	JUSTIFICACIÓN	25
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
	3.1. Necesidad de Fortalecer el Monitoreo en el CVSS	27
	3.2. La Técnica DInSAR para el Fortalecimiento de la Red de Monitoreo	28
	3.3. Probabilidad de Reactivación Volcánica	28
4.	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	29
5.	OBJETIVOS	30
	5.1. Objetivo General	30
	5.2. Objetivos Específicos	30
6.	METODOLOGÍA	31
	6.1. Planificación de la Aplicación DInSAR en el CVSS	32
	6.2. Obtención de Información de Radar	33
	6.3. Procesamientos de Datos en Sistemas de Información Geográfica	34
	6.4. Creación de Base de Datos de Deformación Temporal y Espacial	35
	6.5. Evaluación de la Deformación y Construcción de Modelos Espaciales	36
7.	MARCO GEOLÓGICO	38
	7.1. Ubicación Geográfica del Área de Estudio	38
	7.2. Geodinámica	40
	7.3. Tectónica	43
	7.4. Geología	45
	7.5. Actividad Volcánica y Sismológica del CVSS	47
	7.5.1. Vulcanismo Histórico.....	47
	7.5.2. Comportamiento Sismológico.....	49
	7.6. Escenarios de Ocurrencia de Eventos	52
	7.7. Composición del Sistemas de Monitoreo en el CVSS	54
	7.7.1. Descripción General de los Métodos de Monitoreo Volcánico.....	57
8.	MARCO TEÓRICO	59
	8.1. Deformación	59
	8.1.1. Medidas Clásicas de la Deformación	61
	8.1.2. Tipos de Deformación.....	62
	8.2. Teledetección	64
	8.2.1. Fundamentos Físicos de la Teledetección	66

8.2.2.	Sensores Remotos	69
8.2.3.	Características de los Sensores Remotos.....	70
8.2.4.	Resolución de Sensor	71
8.2.5.	Tipos de Sensores.....	72
8.3.	Sistema de Radar	73
8.3.1.	Radar de Apertura Sintética (SAR)	74
8.3.2.	Características del Radar	76
8.3.3.	Características del Objeto.....	80
8.4.	Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)	82
8.4.1.	Amplitud y Fase de Onda como Parámetro Base en la Medición InSAR	84
8.4.2.	Criterios Fundamentales para la Aplicación DInSAR.....	88
8.4.3.	Flujo de Trabajo para la Generación de Interferogramas	90
8.4.4.	Análisis de Series Temporales	94
9.	RESULTADOS	96
9.1.	Datos Utilizados	96
9.1.1.	Imágenes Satelitales Obtenidas por Trayectoria Ascendente	96
9.1.2.	Imágenes Satelitales Obtenidas por Trayectoria Descendente	97
9.2.	Baseline y Distribución Espacial de Coherencia	99
9.2.1.	Variación del Baseline Según Trayectoria	99
9.2.1.1.	Trayectoria Ascendente.....	99
9.2.1.2.	Trayectoria Descendente.....	100
9.2.2.	Distribución Espacial de la Coherencia Según su Trayectoria	101
9.2.2.1.	Trayectoria Ascendente.....	101
9.2.2.2.	Trayectoria Descendente.....	106
9.3.	Levantamiento de Reflectores Puntuales para el Monitoreo de Deformación	110
9.3.1.	Consideraciones para el Levantamiento de Puntos de Control.....	110
9.4.	Construcción de la Base de Datos de Deformación por DInSAR	114
9.4.1.	Procesos y Resultados para Construcción de la Base de Datos DInSAR	114
9.4.1.1.	Extracción de Valores DInSAR a Puntos de Control:.....	114
9.4.1.2.	Exportación de los Datos a Hojas de Cálculo:	115
9.4.1.3.	Estructura de la Base de Datos DInSAR y Consideraciones:.....	116
9.5.	Especialización de la Base de Datos de Deformación en SIG	118
9.5.1.	Parámetros Establecidos para la Construcción de Modelos Espaciales en SIG ...	118
9.5.2.	Conceptualización y Generación de los Mapas de Deformación	119
9.5.2.1.	Trayectoria Ascendente.....	120
9.5.2.2.	Trayectoria Descendente.....	122
9.5.3.	En Resumen	124

9.6.	Generación de las Series Temporales de Deformación	125
9.6.1.	Tipos de Series Temporales en Función del Punto de Monitoreo a Evaluar	126
9.6.1.1.	Clasificación de las Series Temporales.....	126
9.6.2.	Resultados	127
9.6.2.1.	Trayectoria Ascendente.....	127
9.6.2.2.	Trayectoria Descendente.....	137
9.6.3.	En Resumen	147
10.	DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	148
10.1.	Evaluación de las Deformaciones en la Zona de Fracturas del CVSS	148
10.1.1.	Variación Anual de la Coherencia	148
10.1.1.1.	Trayectoria Ascendente.....	149
10.1.1.2.	Trayectoria Descendente.....	154
10.1.1.3.	Análisis	159
10.1.2.	Variación Anual de la Deformación.....	161
10.1.2.1.	Trayectoria Ascendente.....	161
10.1.2.2.	Trayectoria Descendente.....	166
10.1.2.3.	Análisis	171
10.2.	Análisis de las Series Temporales	174
10.2.1.	Variación Anual de la Deformación en los Puntos de Monitoreo.....	174
10.2.1.1.	Trayectoria Ascendente.....	174
10.2.1.2.	Trayectoria Descendente.....	176
10.2.1.3.	Análisis	178
10.3.	Comparación Entre Trayectorias Satelitales	180
10.4.	Correlación de Resultados DInSAR con GPS Instrumental	184
10.5.	Modelo Analítico de Variaciones Topográficas por DInSAR	189
10.5.1.	Trayectoria Ascendente.....	190
10.5.2.	Trayectoria Descendente.....	192
10.6.	Propuesta de Sectorización de la Deformación sobre el CVSS	194
11.	CONCLUSIONES	198
12.	RECOMENDACIONES	201
12.1.	Para la Universidad de El Salvador y Academia	201
12.2.	Para las Instituciones de Gobierno e Investigadores Autónomos	201
12.3.	Para la Sociedad Civil	202
13.	BIBLIOGRAFÍA	203

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Flujo de Trabajo para Aplicación DInSAR dedicado al Monitoreo de Deformaciones del CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....37
- Figura 2.** Ubicación de la Zona de Estudio, Complejo Volcánico de San Salvador. Se presenta el sistema local de fallas, edificio volcánico principal y división municipal. Fuente: Elaboración Propia.....39
- Figura 3.** Marco Geodinámico del AVCA. Se muestran las tasas de movimiento de la Placa de Cocos, del antearco de la Placa Caribe y del Sistema de Fallas Motagua-Polochic (De Meets, 2001; Alvarado et al., 2008; Rodríguez et al., 2009). La tasa de divergencia al S-SE de este sistema de fallas fue determinada por Guzmán-Speziale (2006). Extraído de Ferrés, 2014.....41
- Figura 4.** Sistema de Fallas de El Salvador. Se resalta la estructura EO que atraviesa a todo el país hasta llegar a la frontera con Honduras sobre la línea norte de la cordillera volcánica de El Salvador. Se remarca el sistema de fracturas (sistema norte en dirección a El Playón de Quezaltepeque, de Jabalí hasta Laguna de Chanmico y el sistema sur en dirección a Plan de La Laguna que perturba al CVSS. Extraído de Ferrés, 2014.....43
- Figura 5.** Sistema de Fallas Locales del Complejo Volcánico de San Salvador (a). Se muestra en (b) la propagación de esfuerzos compresionales en dirección NO-SE y extensionales en dirección NE-SO. Elaboración propia de (a), (b) Extraído de Walter Hernández.....44
- Figura 6.** Formaciones Geológicas de El Salvador Se logra visualizar el dominio de la formación Bálsamo, Cuscatlán y Chalatenango sobre la cordillera volcánica del país; siendo en la región del graben el dominio de la formación San Salvador, controlado por los diferentes episodios de vulcanismo que ha tenido el territorio, presentando mayormente materiales epiclásticos, efusivos de composición basalto – andesítico. Elaboración propia con base de datos del Laboratorio de Cartografía y Geomorfología – UES.....45
- Figura 7.** Geología de El Salvador (adaptado de Bose et. al., 1976). Se logra visualizar el dominio de la formación Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador sobre la región comprendida por el CVSS, evidenciando los diferentes procesos eruptivos que ha sufrido la región, formando una distribución muy compleja de materiales piroclásticos, epiclásticos y efusivos. Elaboración propia con base de datos del Laboratorio de Cartografía y Geomorfología – UES.....46
- Figura 8.** Erupción del Volcán Boquerón en 1917 (José Panadés Vides). Dicho evento suscito posterior dos sismos de importante magnitud (6.7 y 6.4), en donde por acción del ascenso de magma, la laguna cratérica que existía en Boquerón se evaporó, finalizando el proceso con una erupción fisural en flanco norte del CVSS.....47
- Figura 9.** Delimitación de sub-zonas sísmicas en CVSS. Fuente: Marroquín, 2017.....49

Figura 10. Ubicación de los Epicentros Sísmicos de 2017 a 2021 en CVSS y Comparación de Magnitudes. Elaboración propia a partir de datos sísmicos del portal sismológico del SNET.....	50
Figura 11. Ubicación de los Epicentros Sísmicos de 2017 a 2021 en CVSS y Comparación de Magnitudes. Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Escobar, 2021.....	51
Figura 12. Modelo conceptual preliminar del sistema magmático del CVSS. Se elabora a partir de la interpretación de la actividad eruptiva de los últimos 3 mil años y la sismicidad registrada durante el periodo de 1917 a junio de 2016. Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Valeria García, Demetrio Escobar, 2021.....	52
Figura 13. Sistema de Fracturas y Bocas Eruptivas de la zona del CVSS. Los números indican la prioridad relativa de peligrosidad volcánica ya sea por flujos de lava y erupciones hidromagmáticas. Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Adaptado de Misión Italiana, 1988, por Valeria García, Demetrio Escobar, 2021.....	53
Figura 14. Composición del Riesgo. La identificación del peligro permite mitigar las condiciones de vulnerabilidad, este planteamiento teórico aplicado a la vulcanología, es relacionado homológamente al peligro o amenaza volcánico, definido como la características o riesgo cualitativo de un volcán hacia las entidades vulnerables. Elaboración propia, adaptado de Escobar, 2021.....	55
Figura 15. Métodos de Monitoreo Volcánico. se denotan los métodos de (a) deformación, (b) sísmicos, (c) sensores remotos, (d) medición de gases (e) equipo de sensores continuos volcánicos, lahares (f) y observación. Fuente: Lisa Faust, USGS.....	56
Figura 16. Esquema del desplazamiento de un cuerpo continuo desde su momento inicial K0 hasta su condición final Kt. Fuente: Nicoguardo, 2011.....	59
Figura 17. Ejemplo de red geodésica usada para determinar deformaciones cosísmicas asociadas a terremotos en El Asnam. Fuente: Ruegg, 1982.....	60
Figura 18. Componentes de esfuerzos normales y de cizalla que actúan sobre un cuerpo. Fuente: Vélez, 2011.....	62
Figura 19. Representación gráfica del módulo de elasticidad. Gráfica de esfuerzo vs deformación. Fuente: Fitzgerald, 1996.....	63
Figura 20. Componentes de los Sistemas de Teledetección. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequia”; Mayra Martínez, 2017.....	64
Figura 21. Interacciones básicas entre la energía electromagnética con la atmosfera y superficie terrestre. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequia”; Mayra Martínez, 2017.....	65

Figura 22. Espectro Electromagnético. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro. Fuente: Adaptado de NASA.....	66
Figura 23. Ejemplo de Cuantificación de Radiancia. Radiancia Espectral solar reflejada y terrestre emitida vista por un satélite. Fuente: Tomado de “Estimación de recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales”, Rodrigo Alonso Suarez, 2017.....	67
Figura 24. Diagrama de Irradiancia Fuente: CONACyT-SENER, Facultad de Arquitectura UNAM.....	67
Figura 25. Relación entre Radiación, Superficie, Reflectancia y Emitancia Fuente: Anónimo.....	68
Figura 26. Relación entre Radiación, Superficie, Reflectancia, Emitancia, Absorbancia y Transmitancia. Fuente: Anónimo.....	69
Figura 27. Ejemplo de Composición de un Sensor Remoto. Estructura física de la misión Sentinel 1 (Radar), en donde se muestra el armazón que transporta al sensor de medición. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).....	70
Figura 28. Variación de escalas de grises en función de la resolución radiométrica. Se observa que, a mayor número de bits, mayor detalle se obtiene. Fuente: Adaptado de Alfa Geomatics, El Salvador.....	72
Figura 29. Tipos de Sensores. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequía”; Mayra Martínez, 2017.....	73
Figura 30. Geometría de adquisición de escenas por un satélite SAR. Fuente: Sandwell, 2011.....	74
Figura 31. Escena de Imagen radar ortorectificada Sentinel-1 del CVSS. Fuente: Cortesía de visor web EO Browser.....	75
Figura 32. Capacidad de Penetración de las Ondas Radar. Fuente: Extraído del trabajo “Sistemas Radar Aplicados a la Investigación de Subsistencia y Movimientos de Ladera”, 2009.....	77
Figura 33. Señales vertical y horizontalmente polarizadas de transmisión (envió) y recepción (retrodispersión). Fuente: Extraído de “Remote Sensing of the Enviroment: An Earth Resource Perspective”; Jensen, 2009.....	78
Figura 34. Onda plana linealmente polarizada que se propagada de izquierda a derecha. Fuente: Anónimo, recuperado de “Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat 2”.....	79
Figura 35. Dispersión o Reflexión Especular y Difusa. Fuente: Anónimo.....	81
Figura 36. Mecanismos de interacción de la señal por reflexión especular, superficie asperea, doble rebote y de volumen. Fuente. (Podest & NASA, 2018).....	82

Figura 37. Ejemplo de Interferograma. Se ejemplifica por medio de la interacción de dos escenas radar de distintas fechas como se muestra por medio de un InSAR la propagación de la deformación de la superficie terrestre para los casos de actividad volcánica (Caldera Kilauea, Napau, Makaopuhi, Paushi, Halemaumau) y actividad sísmica (asociado al rift o zona de fallamiento extensional este de la isla); la deformación y su intensidad es distinguible por las franjas de deformación, la zona de baja coherencia hace referencia a sectores en donde los factores de decorrelación de la toma radar afectan la eficiencia de la medición en termino de ruido de la señal electromagnética. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).....	83
Figura 38. Diagrama Teórico de InSAR. Se muestra de manera ilustrativa que la diferencia de fase entre dos imágenes SAR tomadas en tiempos distintos tienen la capacidad de determinar los cambios en la superficie terrestre gracias a las variaciones en la retrodispersión de medio identificando en la vertical los cambios de las condiciones del terreno en termino de fase de onda. Fuente: Geoscience Australia.....	84
Figura 39. Esquema de onda emitida por el sensor. Fuente: Meyer, 2019.....	85
Figura 40. Sensibilidad Topográfica (a) y Sensibilidad por Deslizamiento (b). Fuente: Programa de Entrenamiento para Detección Remota SAR – NASA.....	86
Figura 41. Ilustración que explica la revisita de un satélite para la obtención de un interferograma. La primera captura corresponde la imagen maestra, se muestra la línea de visión y la medición de fase. Utilizando la posición de la segunda adquisición esclava, la línea de base perpendicular (B_{\perp}), paralela (B_{\parallel}) se forma un vector con la suma de ambas líneas de base perpendicular y paralela que definen un valor total de línea de base espacial entre imagen maestra y esclava. La porción roja de la señal representa la diferencia en las mediciones de fase. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).....	87
Figura 42. Configuración Geométrica Analítica InSAR. Fuente: Hanssen, 2002.....	87
Figura 43. Modelamiento de franjas en función de B_{\perp} . Fuente: Introducción a la Interferometría SAR – NASA.....	90
Figura 44. Flujo de Trabajo para la Generación de Interferogramas en SNAP. Fuente: Elaboración Propia.....	91
Figura 45. Resultado de enfoque PS (a) y resultado de enfoque SBAS (b) Fuente: Hopper, 2012.....	95
Figura 46. Gráfico de Distribución Anual de InSAR para el Período entre 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	97
Figura 47. Gráfico de Distribución Anual de InSAR para el Período entre 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....	98
Figura 48. Gráfico de Registro Baseline de InSAR para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Tomado de repositorio web ASF DATA Searcher.....	99

Figura 49. Gráfico de Registro Baseline de InSAR para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Tomado de repositorio web ASF DATA Searcher.....	100
Figura 50. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en El Salvador para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	102
Figura 51. Estadísticos de la Distribución de Coherencia para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente para El Salvador y Área Considerada como Apta para Aplicación de DInSAR con Coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.....	103
Figura 52. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en el CVSS para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	104
Figura 53. Estadísticos de la Distribución de Coherencia Promedio para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente para el CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	105
Figura 54. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en El Salvador para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....	106
Figura 55. Estadísticos de la Distribución de Coherencia para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente para El Salvador y Área Considerada como Apta para Aplicación de DInSAR con Coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.....	107
Figura 56. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en el CVSS para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....	108
Figura 57. Estadísticos de la Distribución de Coherencia Promedio para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente para el CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	109
Figura 58. Ejemplo de correlación entre trayectorias satelitales en SIG previo al levantamiento de puntos de control. Fuente: Elaboración Propia.....	111
Figura 59. Ejemplos del resultado obtenido por el levantamiento de puntos de control en la región del cráter (a) y sector sureste (b) del CVSS sobre la zona de convergencia entre trayectoria ascendente y descendente según coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.....	112
Figura 60. Mapa de Ubicación de los Puntos de Monitoreo para Medición de Deformaciones por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la zona de Fracturas del CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	113
Figura 61. Comparación entre herramientas de extracción de valores ráster múltiples a puntos en ARCGIS (a) y QGIS (b). Fuente: Elaboración Propia.....	115
Figura 62. Ejemplo de hoja Excel resultante del proceso de extracción y exportación de datos de shp a csv. Fuente: Elaboración Propia.....	115
Figura 63. Captura de la base de datos de deformación DInSAR para el CVSS, mostrando las deformaciones en cm para cada 12 días, promedios mensuales de deformación y	

coherencia, acumulados de la deformación y gráfico de series temporales respectivamente. Fuente: Elaboración Propia.....117

Figura 64. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....120

Figura 65. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....121

Figura 66. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....122

Figura 67. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....123

Figura 68. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....127

Figura 69. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....128

Figura 70. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....129

Figura 71. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....130

Figura 72. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....131

Figura 73. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....132

Figura 74. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	133
Figura 75. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	134
Figura 76. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	134
Figura 77. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	135
Figura 78. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	135
Figura 79. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	136
Figura 80. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	137
Figura 81. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	138
Figura 82. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	139
Figura 83. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	140
Figura 84. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600,	

para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....141

Figura 85. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....142

Figura 86. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....143

Figura 87. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....144

Figura 88. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....144

Figura 89. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....145

Figura 90. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....145

Figura 91. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....146

Figura 92. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....149

Figura 93. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....150

Figura 94. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....151

Figura 95. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	152
Figura 96. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	153
Figura 97. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	154
Figura 98. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	155
Figura 99. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	156
Figura 100. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	157
Figura 101. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	158
Figura 102. Gráfico de la variación temporal y geográfica de la coherencia, sobre la zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente para el periodo de 2017 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.....	159
Figura 103. Gráfico de la variación temporal y geográfica de la coherencia, sobre la zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente para el periodo de 2017 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.....	160
Figura 104. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	161
Figura 105. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	162
Figura 106. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	163

Figura 107. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	164
Figura 108. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	165
Figura 109. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	166
Figura 110. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	167
Figura 111. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	168
Figura 112. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	169
Figura 113. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.....	170
Figura 114. Gráfico Comparativo del Acumulado Anual de Deformación con Valor Absoluto, sobre los Puntos de Control fijados en la Zona de Fracturas del CVSS para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	172
Figura 115. Gráfico Comparativo del Acumulado Anual de Deformación con Valor Absoluto, sobre los Puntos de Control fijados en la Zona de Fracturas del CVSS para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	172
Figura 116. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	174
Figura 117. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.....	175
Figura 118. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....	176

Figura 119. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.....	177
Figura 120. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control VSSS, PC1125, PC1503, PC1555, PC1942, y PC134 para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.....	179
Figura 121. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.....	180
Figura 122. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.....	181
Figura 123. Gráfico Comparativo de la Coherencia, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.....	182
Figura 124. Gráfico Comparativo de la Coherencia, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.....	183
Figura 125. Proyección de los tres componentes de deformación sobre la línea de vista del sensor. (A) muestra la vista desde arriba de los componentes Este y Norte proyectados sobre la dirección de mirada en azimut (ALD), perpendicular a la trayectoria del satélite indicada con α_h . (B) muestra un esquema 3D incluyendo la proyección del componente vertical a la línea de vista del sensor empleando el ángulo de incidencia. Fuente: Hanssen, 2002, pág. 163.....	185
Figura 126. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación VSSS en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.....	186
Figura 127. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación CNR-1 en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.....	187
Figura 128. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación PIAM en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.....	188
Figura 129. Mapa de Ubicación de los Perfiles Topográficos y de Deformación Acumulada para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	189

Figura 130. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Ascendente y con Rumbo NO-SE, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	190
Figura 131. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Ascendente y con Rumbo EO, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	191
Figura 132. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Descendente y con Rumbo NO-SE, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	192
Figura 133. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Descendente y con Rumbo EO, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	193
Figura 134. Propuesta 1: Mapa de Sectorización por Altimetría a Partir de los Promedios de Deformación Acumulada en Valor Absoluto, Sobre Trayectoria Ascendente, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	195
Figura 135. Propuesta 2: Mapa de Sectorización por Regiones Geográficas a Partir de los Promedios de Deformación Acumulada en Valor Absoluto, Sobre Trayectoria Ascendente, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.....	196

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cronología de la Actividad Volcánica en el CVSS. Se observa que la actividad se ha caracterizado eruptiva se ha caracterizado por ser del tipo fisural en los últimos 2000 años. Tomado de portal web de la Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.....	48
Tabla 2. Satélites con servicios de Radar. Fuente: Elaboración propia, recuperado de Parker, 2016; adaptado de K. Pineda, 2019.....	76
Tabla 3. Principales bandas utilizadas en los sistemas SAR. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Silvana Vallejo, 2015.....	77
Tabla 4. Sensores SAR y polaridades disponibles. Fuente: Elaboración propia, adaptado de “Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat 2.....	80
Tabla 5. Comparación practica entre InSAR y DInSAR. Fuente: Elaboración propia, adaptado de “Programa de Entrenamiento para Detección Remota SAR – NASA”.....	86
Tabla 6. Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración propia.....	96
Tabla 7. Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración propia.....	97
Tabla 8. Parámetros para Generación de Modelos Espaciales de Deformación. Fuente: Elaboración propia.....	118

1. INTRODUCCIÓN

En este proyecto de investigación se aplicará la técnica de sensoramiento remoto conocida como Interferometría Diferencial de Radar (DInSAR), la cual ha sido utilizada para la detección de deformación o desplazamientos en la superficie terrestre y cambios geomorfológicos relacionados a la evolución del relieve y actividad antropogénica.

Esta investigación pretende detectar la evolución de la deformación, mediante mediciones del desplazamiento superficial a precisión milimétrica, sobre los flancos NO y SE del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Para el logro de lo propuesto en el párrafo anterior, se propone desarrollar una metodología y técnicas de monitoreo con información satelital en la zona de interés en los flancos del Volcán de San Salvador y complementaria a los utilizados a través de la geofísica tradicional, como la sismología, levantamiento geoquímico, uso de inclinómetros y mediciones GPS.

Para alcanzar este objetivo, se hará una evaluación de la deformación en algunas zonas del edificio volcánico basado en el análisis de datos de radar de diferentes momentos, la elaboración de una línea base temporal y evaluación en detalle sobre la zona de fracturas de los flancos NO y SE para el período de 2017 y 2021, utilizando la técnica DInSAR..

Autores como Sofield (1998), Ferrés (2014), Escobar (2021), Major (2001), Hernández (2019) e instituciones como la Dirección General del Observatorio de Amenazas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (DGOA-MARN, 2019) entre otros, hacen énfasis en la debilidad estructural de los flancos NO y SE del CVSS, relacionándolo al sistema de fracturamiento local, inestabilizado por la recurrente actividad sísmica de la zona, afectando directamente a la población residente.

El potencial, estilo e historial eruptivo del CVSS, motiva la búsqueda de metodologías complementarias a las tradicionales como: sísmica, geoquímica y trabajo de campo. Que permitan un análisis integral a mayor escala y en períodos cortos de tiempo, de parámetros físicos que indiquen cambios significativos en el estado del volcán de forma periódica.

Es debido a la resolución espacial y temporal de las tecnologías de radar de apertura sintética (SAR), que actualmente diversos profesionales e instituciones a nivel mundial han aplicado la técnica DInSAR para la investigación científica en vulcanología, obteniendo resultados satisfactorios e importantes aportes para el monitoreo de deformación por sensoramiento remoto, cubriendo grandes extensiones geográficas en periodos cortos de tiempo.

Recientemente se han hecho esfuerzos pioneros para comprender como la técnica DInSAR puede ser aplicada en el país.

La DGOA-MARN en conjunto con la Universidad de El Salvador (UES) en 2021 formularon una línea base de deformación en el volcán Chaparrastique de San Miguel (Velásquez & Villalobos, 2021), además investigadores de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS-OPAMSS) en 2020 aplicaron la técnica DInSAR para la evaluación de deformación en regiones urbanas (Chavez Hernandez, Lazecký, Šebesta, & Bakoň, 2020).

Internacionalmente se ha implementado la técnica DInSAR, para identificar posibles centros eruptivos, a partir de la migración de los hipocentros sísmicos en la isla de La Palma desde 2017 hasta la erupción en 2021 (Instituto Geográfico Nacional de España - IGN, 2021), así como también aplicaciones en Sur América por Ruyt (2003) y Muñoz (2020) para control de deformación en volcanes, zonas urbanas y rurales brindando soluciones eficientes.

Durante el presente estudio, mediante la técnica DInSAR, se evaluará el comportamiento de la deformación superficial y la respuesta del sensor de radar en momentos de aparente calma (baja o nula actividad volcánica) y en periodos de actividad sísmica detectable, (eventos sísmicos sensibles por la población y registrados por la DGOA-MARN), que sirva como una línea base para comparar las futuras mediciones de deformación en el CVSS a partir de interferogramas de la misión Sentinel-1 obtenidos del repositorio web NASA-SARVIEWS.

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación surge de la necesidad de fortalecer el actual sistema de monitoreo del CVSS a partir de una técnica de sensoramiento remoto (DInSAR), la cual debería permitir superar las deficiencias existentes a nivel local en términos de falta de equipamiento para monitoreo de deformaciones en el terreno a través de instrumental GPS y así mismo superar dificultades de acceso a zonas de peligro.

Es importante que el complejo volcánico más peligroso del país (DGOA-MARN, 2019) posea un sistema integral de monitoreo capaz de emitir sistemas de alerta temprana actualizados en base a la detección de zonas “anómalas” de deformación; que en conjunto con los actuales sistemas de monitoreo (sismológico, geodésico y geoquímico), permitan identificar de una manera eficiente cambios significativos en la actividad del volcán para ejercer así, la mejor toma de decisiones y planificación en la mitigación de riesgos volcánicos y reducción de impactos sobre la población asociada.

El mejor reconocimiento a nivel macro de las zonas de peligro propuestas por la Misión Geológica Italiana en El Salvador (1988), reforzadas por Ferrés (2014) y Escobar (2021) mediante la aplicación de la técnica DInSAR, permitirá generar información base sobre las condiciones de deformación asociadas a los cambios en la actividad del CVSS y brindará nuevos mecanismos para la evaluación y análisis de la deformación desde un punto de vista cuantitativo y temporal.

Con esta investigación se pretende aportar al establecimiento a futuro de una herramienta aplicable al monitoreo continuo de deformaciones en el CVSS de manera remota, para lo cual se propone una metodología que puede ser adaptada en otras zonas según el interés de futuros análisis, gracias a una base de datos compuesta por aproximadamente 350 interferogramas (período de 2017 a 2021) de uso libre proveniente de la misión Copernicus de la Unión Europea.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El registro histórico eruptivo establecido por la DGOA-MARN permite determinar que la actividad del CVSS ha venido en aumento. Esto se ve reflejado por los enjambres sísmicos ocurridos dentro de la zona de influencia del volcán en Antigua Cuscatlán para los meses de abril – mayo en 2017, Ciudad Capital y Boquerón en 2019 y Picacho – Boquerón para 2020, siendo la sismicidad el único parámetro físico medible con eficiencia y periodicidad por la naturaleza de la actividad latente del volcán.

Escobar (2021) con base en las observaciones de Sofield (2001), Ferrés (2014), Major (2001) y la Misión Geológica Italiana (1988), argumenta que dentro del pronóstico de actividad para los próximos 25 años, puede acontecer una erupción fisural con un IEV entre 2 a 3 preferentemente por el flanco noroeste como principal escenario de peligro volcánico, zona en donde actualmente no se tiene activo ningún método de monitoreo volcánico de deformaciones y el flanco sureste afectado recientemente por recurrente actividad sísmica e impactos asociados a importante actividad humana sobre la zona.

Los problemas instrumentales (carencia de equipo GPS sobre zonas de peligro) y de presupuesto institucional, han impedido la implementación de un sistema de monitoreo volcánico de deformaciones en el CVSS. Esto a su vez no ha permitido establecer una línea base que contribuya a la evaluación de la deformación en el volcán.

La DGOA-MARN en 2019 identificó sus deficiencias, resaltó la importancia en buscar prontas soluciones por medio de la investigación científica e inversión, pero se vieron afectados por la pandemia del COVID19, retrasando así el proceso de evolución y mejora.

Dicho lo anterior el problema de investigación es el siguiente:

Problema de Investigación:

“EXISTE UN PRONÓSTICO DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA QUE PREVE UN EPISODIO ERUPTIVO PRINCIPALMENTE EN LA ZONA DEL FLANCO NOROESTE (NO) Y EN EL SURESTE (SE) EN MENOR MEDIDA, PERO NO EXISTE UN MONITOREO Y LÍNEA BASE QUE CONTRIBUYA A LA

EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN Y CORRELACIÓN CON LOS DEMÁS MÉTODOS DE MONITOREO VOLCÁNICO APLICADOS QUE PERMITAN MAYOR PRECISIÓN EN LA VALORACION DE LA EVOLUCIÓN DE UNA ACTIVIDAD VOLCÁNICA POTENCIALMENTE PELIGROSA QUE PUEDA AFECTAR A LA POBLACIÓN, INFRAESTRUCTURA Y OTROS MEDIOS DE VIDA DEL GRAN SAN SALVAODR Y MUNICIPIOS ALEDAÑOS AL CVSS”.

El problema de investigación se refuerza mediante los siguientes argumentos:

3.1. Necesidad de Fortalecer el Monitoreo en el CVSS

Durante el año 2019 por medio del informe “Sistema Nacional de Alerta Temprana de Volcanes: Evaluación Preliminar de Amenaza Volcánica en El Salvador y Análisis de Brechas” (DGOA-MARN, 2019) se logró identificar el estado de las amenazas volcánicas, condiciones actuales del sistema de monitoreo volcánico y necesidades que este presenta para una mayor eficiencia de cara a la evaluación de peligrosidad de cada escenario.

La evaluación del sistema de monitoreo (DGOA-MARN, 2019), el cual ha permitido un buen reconocimiento y análisis de las condiciones y actividad volcánica en el país, reveló la necesidad de implementar (en el caso del CVSS) otras técnicas de monitoreo para reforzar y complementar su estado actual, haciendo énfasis en monitoreo de deformaciones y sensores remotos.

En la actualidad el CVSS no presenta un monitoreo periódico de deformaciones ni se tienen datos o registros que puedan ser usados como parámetros de validación con otros métodos (sísmico) sobre las zonas de peligro del volcán, esto debido a carencias de equipamiento como estaciones GNSS de monitoreo permanente necesarias para efectuar la vigilancia.

Dentro de las recomendaciones hechas por Escobar (2021) en el estudio “Árbol de Probables Eventos Eruptivos del Volcán de San Salvador” se menciona que para detectar precursores tempranos asociados al ascenso magmático profundo es necesario una correcta instrumentalización del CVSS; además reafirma la necesidad de fortalecer el sistema de vigilancia con equipo GPS para detectar rupturas en tiempo real, así como también la realización de más investigación geológica, geofísica, geoquímica, de deformación y sísmica para mejorar el modelo conceptual del CVSS.

3.2. La Técnica DInSAR para el Fortalecimiento de la Red de Monitoreo

Dentro de las recomendaciones hechas por la DGOA-MARN (2019), se plantea el uso de técnicas de teledetección, en donde la aplicación de la Interferometría Diferencial de Radar (DInSAR) adquiere relevancia.

DInSAR es un de las técnicas más recomendadas en la actualidad para el monitoreo de terremotos, subsidencia y deformación en la corteza terrestre debido a la buena interacción que las imágenes de radar tienen con la superficie.

La disponibilidad de información, su gratuidad y existencia desde 2016 en plataformas web como el ASF Data Search de NASA – SARVIEWS de la misión Copernicus, permite generar evaluación y monitoreo de deformaciones a nivel mundial.

Esta técnica permite analizar una mayor región geográfica para evaluar el comportamiento general de la deformación sobre la zona de interés; siendo finalmente, una herramienta que identifica puntualmente las áreas problemáticas debido a la deformación superficial.

Mediante el uso de interferogramas es posible la visualización de la deformación relacionada a sismicidad, procesos gravitacionales y actividad humana en la zona de interés, identificando cómo esto afecta desde el punto de vista de la deformación al CVSS, priorizando las zonas de peligro volcánico establecida por la Misión Geológica Italiana en El Salvador (1988).

3.3. Probabilidad de Reactivación Volcánica

Según Escobar y García (2021), la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico importante, a partir de la frecuencia de erupciones pasadas en los últimos 1500 años (preferentemente) sobre la fractura con rumbo N40°O, es muy alta y el escenario más probable a su vez para los próximos 25 años.

Dicha explicación se respalda con los análisis de peligrosidad elaborados por Ferrés (2014) y Sofield (1998), en donde se esperaría un evento parecido a lo ocurrido en 1659 y 1917, con actividad explosiva por el cráter central de Boquerón y actividad efusiva por el flanco norte.

Los escenarios de riesgo presentan probabilidad de ocurrencia alta por el flanco norte (>60%), media por el cráter central (>30%) y baja por el flanco sur (>10%).

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿ES POSIBLE MEDIANTE LA TÉCNICA DINSAR, EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN SOBRE LOS FLANCOS NOROESTE (NO) Y SURESTE (SE) DEL CVSS?

La deformación volcánica activa hace referencia a procesos que en el tiempo generan cambios importantes en el relieve, los cuales son graduales y medibles con una tecnología de precisión necesaria acorde a la deformación.

Con las tecnologías actuales (GPS y DInSAR), es posible identificar y cuantificar las zonas de máxima deformación en la superficie del terreno debido a la acumulación y liberación de esfuerzos. Es usando series temporales y análisis espacial en sistemas de información geográfica (SIG) que se plantea dar solución a la presente pregunta de investigación.

La distribución de los esfuerzos tectónicos extensionales (este-oeste) y compresionales (norte-sur) que ejerce la Cordillera Bálsamo y Falla Guaycume sobre el CVSS (Hernández & Jicha, 2019) generan un sistema de fracturas complejo en dirección NNO, NO y SE que desestabilizan la estructura volcánica acompañado de un sistema de fallas con dominios tectónicos oblicuos (fallas con movimientos horizontales y verticales) sobre la planicie circundante de éste, donde se ubica el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

Existe una relación directa entre la sismicidad y la actividad volcánica, investigadores como Ferrés (2014) y Escobar (2021) argumentan que los momentos de crisis sísmica están asociados a la reinyección de material por parte del manto a la cámara magmática del CVSS (ubicada entre 18 a 20 km de profundidad aproximadamente), catalogándolo como un volcán de actividad del tipo latente y de alta peligrosidad por su historial eruptivo reciente.

Con la aplicación de DInSAR se estaría dando solución al monitoreo de uno de los parámetros físicos que permitirá identificar las zonas más propensas a deformación en el tiempo con prontitud, permitiendo mejorar los modelos conceptuales del CVSS y generando información base que servirá como un parámetro de comparación con los demás métodos de monitoreo.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

- ❖ Evaluar el comportamiento de la deformación superficial a partir de la Interferometría Diferencial de Radar (DInSAR) para el fortalecimiento del monitoreo en la zona del flanco NO y SE del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS) usando interferogramas de la misión NASA-SARVIEWS para el periodo de 2017 a 2021.

5.2. Objetivos Específicos

- I. Establecer un método moderno que permita fortalecer el monitoreo del volcán a partir del procesamiento de imágenes satelitales de radar.
- II. Analizar las deformaciones asociadas con el sistema de fracturas existentes en el flanco NO y SE del volcán durante el período de 2017 a 2021.
- III. Generar una base de datos DInSAR que permita cuantificar, modelar y monitorear temporalmente la deformación en los flancos NO y SE del CVSS.

6. METODOLOGÍA

La aplicación de la técnica InSAR se ha acrecentado en los últimos años debido a su alta efectividad para la detección de deformaciones sobre la superficie terrestre.

Debido a que el control de deformaciones posee una componente temporal, autores como Ferretti (2001) y Berardino (2002) formularon las metodologías de análisis temporal InSAR, más usadas en la actualidad, conocidas como Persistent Scatterer Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS) respectivamente.

Estos métodos de análisis se basan en la detección del desfase de onda que se genera debido a los cambios de las condiciones iniciales del terreno sobre una misma ubicación, pero en tiempos distintos, en donde la metodología PSI se enfoca en la detección de cambios sobre estructuras que presentan alta coherencia de radar y geometrías estables (que no presentan cambios significativos en el tiempo), mientras que la metodología SBAS combina múltiples conjuntos de imágenes para disminuir los efectos de decorrelación espacial y temporal sobre reflectores homogéneos entre sí.

Ambas metodologías generan series temporales con respecto a una sola imagen maestra, es decir que la deformación se estima con respecto a una sola fecha en específico.

La metodología a emplear durante esta investigación integra las bases teóricas y técnicas de PSI y SBAS en donde se ha propuesto un valor mínimo de coherencia aceptable igual a 0.4, puntos de control georreferenciados sobre zonas homogéneas, pero también sobre regiones de interés particular para fines de vigilancia volcánica.

Para lograr lo anterior hay que generar series temporales a partir de múltiples imágenes maestras para asegurar estimaciones de deformación con baja decorrelación temporal y geométrica en conjunto de modelos espaciales de deformación, mediante el uso de los sistemas de información geográfica y teledetección.

La metodología propuesta se desarrolla de la siguiente manera:

1. Trabajo de gabinete por medio del sensoramiento remoto continuo.

2. Análisis estadístico.

3. Modelaje numérico espacial por medio de métodos de interpolación en un sistema de información geográfica.

En orden al correcto cumplimiento de los objetivos planteados, el proyecto se realizará en cinco fases:

1. Planificación de la Aplicación DInSAR en el CVSS
2. Obtención de información de radar.
3. Procesamiento de datos de radar a través de un sistema de información geográfica.
4. Creación de base de datos de deformación temporal y espacial.
5. Evaluación de la deformación y construcción de modelos espaciales.

6.1. Planificación de la Aplicación DInSAR en el CVSS

La presente investigación se sustenta desde un punto de vista volcanológico, a partir de estudios realizados por el Ministerio de Medio Ambiente, Misión Geológica Italiana de El Salvador y autores como: Ferrés (2014), Sofield (1998), entre otros lo que ha permitido conocer sobre el historial eruptivo, condiciones de la sismicidad, probabilidad de ocurrencia de eventos eruptivos y zonas más susceptibles a futuros eventos de crisis sobre el CVSS, los cuales delimitan la zona de intervención en conjunto con las condiciones propias de la metodología InSAR.

Desde el punto de vista DInSAR, se conocen diversos estudios a nivel internacional que demuestran la efectividad de la identificación y evaluación de la deformación tanto en zonas urbanas como rurales, teniendo incidencia en el control de subsidencia (Seppi, 2016), actividad minera y otros (Garcés Muñoz, 2020), monitoreo volcánico (De Ruyt, 2003) y determinación de nuevos centros eruptivos relacionado a la migración de hipocentros sísmicos en el volcán Cumbre Vieja en la isla de La Palma durante Septiembre a Diciembre de 2021 (Instituto Geográfico Nacional de España - IGN, 2021).

La concepción de bases teóricas DInSAR y estudios previos en el CVSS establecen los criterios operacionales óptimos para la implementación de la técnica.

Recientemente durante el año 2021, se ha llevado a cabo la construcción de una línea base de deformación sobre el flanco oeste del volcán Chaparrastique de San Miguel (Velásquez & Villalobos, 2021), en donde se logró identificar de manera temporal y cuantitativa la zona de mayor afectación por deformación superficial, estableciendo una primera propuesta metodológica para la implementación de esta técnica al monitoreo volcánico, logrando demostrar que la técnica DInSAR puede ser aplicable para el estudios similares (subsistencia, deslizamientos, deformación en zonas urbanas y estructuras) a nivel nacional.

Se consultó información de diversos talleres en línea, impartidos principalmente por personal de la NASA para lograr una puesta en común entre lo que aporta la técnica DInSAR (desde el punto de vista teórico y práctico) con las necesidades que el actual sistema de vigilancia del CVSS requiere y los objetivos planteados en la presente investigación.

6.2. Obtención de Información de Radar

La información necesaria para el trabajo DInSAR en el presente estudio consta de imágenes del tipo radar Sentinel 1. Dicha información es de acceso libre con intervalos temporales de entre 12 a 24 días por toma, generando una base de datos (entre 2016 al presente) para una correcta implementación de monitoreo temporal y espacial.

Las imágenes de satélite se obtienen gracias al programa Copernicus, dirigido en conjunto por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Unión Europea a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente con la finalidad de brindar información accesible, exacta, fiable y continua para mejorar la gestión y conservación del medio ambiente la seguridad civil.

El proyecto NASA – SARVIEWS ha desarrollado un sistema de procesamiento automático que brinda productos para el monitoreo a desastres naturales, del cual se obtienen interferogramas elaborados a partir de imágenes de radar Sentinel -1, tanto para monitoreo volcánico como de terremotos por medio de un sistema de alerta de desastres naturales.

La plataforma gestionada por el ASF Searcher de la Universidad de Alaska Fairbanks, Copernicus y NASA, brindan información base para la generación de interferogramas como también productos preprocesados en el proyecto NASA – SARVIEWS, facilitando la

recopilación diligente de datos que permiten crear líneas base de deformación de manera confiable y eficientes por medio de metodologías enfocadas al post procesamiento.

6.3. Procesamientos de Datos en Sistemas de Información Geográfica

A partir de las imágenes satelitales obtenidas por la NASA – SARVIEWS, del conjunto de tomas que se proporcionan, se hará uso para esta investigación las imágenes referentes al Factor Coherencia (valor adimensional), Fase Desenrollada (en términos de π) y Desplazamiento Vertical (en metros).

Los productos obtenidos a partir de las imágenes satelitales se dividirán por tipo (coherencia, fase desenrollada y desplazamiento vertical) y estos a su vez en subgrupos ordenados cronológicamente, separados según la trayectoria del satélite de radar (ascendente o descendente), para ordenar el flujo de trabajo dentro de un sistema de información geográfica.

Es importante aclarar que cada toma satelital cubre casi un 65% del territorio nacional, por lo que cada trayectoria brinda información específica según la línea de vista del sensor permitiendo evaluar ambas trayectorias para un análisis más integral de la región de estudio (según la coherencia lo permita) sobre la zona del CVSS.

Una vez preparada la estructura de datos dentro del SIG, se procede a la localización de “Puntos de Control”, definidos como zonas puntuales específicas y georreferenciadas de los cuales se extraerá información referente a los productos InSAR para generar un remuestreo y monitoreo puntal del territorio.

El levantamiento se hace de manera remota sobre el área de estudio en la medida que la imagen de Coherencia lo permita, este parámetro nos garantiza una medición efectiva y datos con el menor ruido posible.

Para los procesamientos antes mencionados se ha decidido la implementación de software SIG debido a la facilidad y efectividad que este brinda para cumplir con el esquema planteado en la metodología propuesta.

Se usarán herramientas de extracción de valores puntuales, procesamiento de imágenes satelitales y modelamiento numérico para la obtención de resultados óptimos en periodos de

tiempo relativamente cortos (según las características del computador en uso) sobre una grid de puntos que se construirá a partir del análisis visual de varios rásters en simultáneo.

El factor de decorrelación o coherencia mínimo admisible que se establecerá para esta investigación será de 0.4 dentro de un intervalo de 0 a 1 adimensional y un baseline no mayor a 800 metros para cada toma satelital, esto con la finalidad de reducir el error producido por la densidad de vegetación en la zona de interés y otros efectos de decorrelación.

Cuando la extracción de datos haya concluido, los resultados se exportarán con un archivo (.csv) hacia el software Excel para conformar la base de deformación y cálculos respectivos.

6.4. Creación de Base de Datos de Deformación Temporal y Espacial

La base de datos tendrá una estructura secuencial en donde:

Fase I. Llenado de datos a partir de productos obtenidos en SIG.

Los datos exportados se ordenarán según la disposición cronológica y tipológica del SIG para conservar la relación entre el proceso anterior.

Fase II. Conversión de valores de metros a centímetros o milímetros.

Esta etapa se realiza únicamente cuando se construye la base referente a la información de Desplazamiento Vertical y Coherencia para obtener (en términos de tres cifras significativas) la mayor cantidad de valores posibles diferentes de 0 en el caso que los valores de desplazamiento sean muy pequeños. Este paso exime en el caso que la base de deformación sea en términos de Fase Desenrollada y Coherencia.

Fase III. Reordenamiento de Información Según Desplazamiento Vertical (o Fase Desenrollada), Coherencia y Cálculos.

Las bases de datos tendrán por hoja Excel los cálculos en separado de 1. Promedios Mensuales y Anuales, 2. Deformación Acumulada y 3. Delta de Deformación, con valor absoluto y sin valor absoluto para establecer análisis espaciales en términos de la naturalidad (variaciones positivas y negativas) de la deformación y variaciones absolutas (considerando la deformación como un valor meramente positivo y acumulativo) en el tiempo.

Fase IV. Formulación de Base de Datos Resumida y Establecimiento Preliminar de Zonas de Mayor Deformación para la Generación de Shapes y Modelos de Interpolación en ArcGIS.

Una vez verificado los resultados, se genera la base para un nuevo archivo shape (desde un csv) comprendida por los valores naturales y absolutos correspondiente a los promedios anuales de Desplazamiento Vertical (o Fase Desenrollada) y Coherencia para el cálculo de los modelos de interpolación en ArcGIS.

6.5. Evaluación de la Deformación y Construcción de Modelos Espaciales

Durante esta etapa (discusión y análisis de resultados) a partir de la base de datos trabajada, se generan modelos interpolados para evaluar como los datos recabados se comportan y representan las condiciones de deformación en el CVSS.

Para efectuar este análisis se hará uso de modelado Kriging (regresión en procesos Gaussianos) preferencialmente, el cual calculará valores en espacios no muestreados (por las limitancia espaciales propias de la Coherencia) a partir de la información adquirida por los puntos de control procesados, permitiendo una mejor estimación para el modelado de deformación con varianza y error relativamente bajos.

Dichos modelos mostrarán los cambios en el tiempo de la deformación sobre el sistema de fracturas el CVSS, permitiendo la identificación cuantitativa, espacial y temporal de las zonas de mayor deformación. Una vez validados los modelos se procederá al cálculo de las series temporales para implementar el monitoreo continuo en las zonas de interés mediante el uso de la base de datos de deformación general.

Calculadas las series temporales y evaluadas las condiciones de deformación para la zona de intervención, se procede a definir puntos estables (zonas con cambios mínimos en el tiempo) y propuesta de zonas para control preferencial de deformación en función de la identificación de zonas de mayor deformación en el tiempo.

Se muestra el resumen de la metodología en el siguiente flujograma:

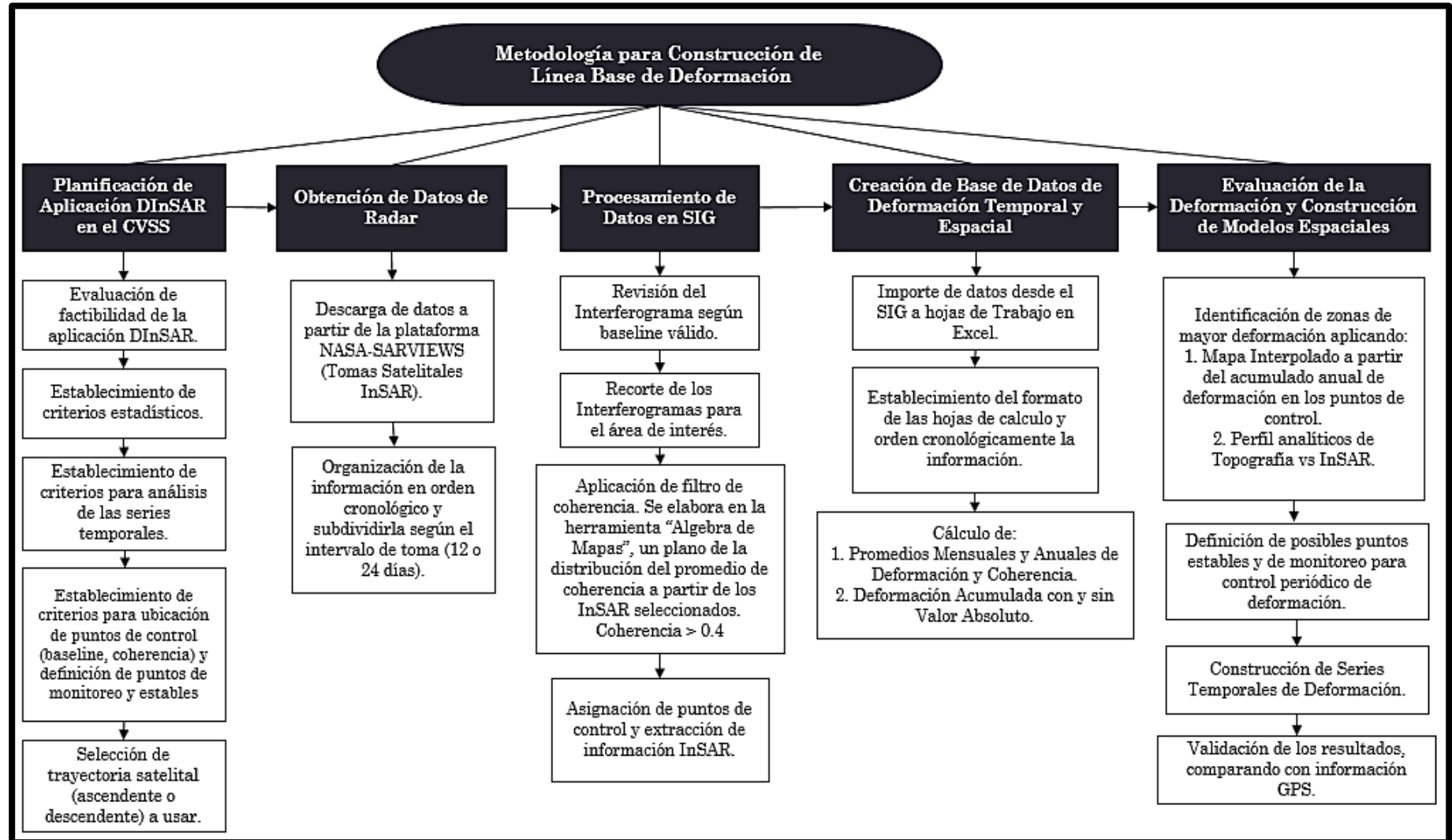


Figura 1. Flujo de Trabajo para Aplicación DInSAR dedicado al Monitoreo de Deformaciones del CVSS.

Fuente: Elaboración Propia.

7. MARCO GEOLÓGICO

7.1. Ubicación Geográfica del Área de Estudio

El Salvador está ubicado sobre el litoral del Océano Pacífico en la zona de convergencia entre las placas de Cocos y del Caribe; se ve fuertemente influenciado por actividad volcánica y tectónica, de la cual se forma el Arco Volcánico Centroamericano (AVCA) y en donde se origina el Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS). (Ferres, 2014; Sofield, 1998)

El CVSS con coordenadas geográficas $13^{\circ}44'02''\text{N}$ $89^{\circ}17'38''\text{O}$, está ubicado sobre la región centro-occidental de la Cordillera Volcánica de El Salvador, perteneciente al Arco Volcánico Centroamericano. (DGOA-MARN, 2019)

Es considerado como un estratovolcán central compuesto de edad pleistocena-holocena, comprendido por 25 edificios volcánicos monogenéticos ubicados sobre sus flancos y planicies aledañas al SE, NW y N del edificio principal y un volcán joven y activo conocido como Boquerón (VB) anidado al interior del antiguo Volcán de San Salvador (Sofield, 1998; Ferrés, 2014), con una composición basalto-andesítico e índice de explosividad volcánica (IEV) mayor a 4. (Escobar, 2019)

Delimita al Norte con los Cerros Nejapa y Guazapa, al Sur con el escarpe norte de la Cordillera del Bálsamo la cual separa la cordillera volcánica y las planicies del Graben Central del Litoral (Ferrés, 2014) , y al Este con la Caldera del Ilopango, al Oeste con la Caldera de Coatepeque perteneciente al Complejo Volcánico de Santa Ana y se ve circundado por el Área Metropolitana de San Salvador, una zona con alta densidad poblacional (2,177,432 habitantes; 2851,4 habitantes por km^2 según el censo nacional de 2007) y con un sistema de fallas locales muy activo, del cual la población ha sido víctima de diferentes procesos de inestabilidad tectónica en los años recientes (desde 2017 con un enjambre sísmico originado en Antiguo Cuscatlán) y actividad volcánica histórica, con una última erupción del tipo fisural sobre el cráter “Los Chintos” en 1917 precedida por fuertes sismos, dejando un saldo de aproximadamente 90,000 damnificados y más de 1,000 fallecidos. (Escobar, 2019)

La estructura principal del volcán (Cráter Boquerón, Cerro el Picacho y el Jabalí) bajo la división político-administrativa del país, delimita con los municipios de Quezaltepeque, San Juan Opico, Colón y Santa Tecla del departamento de La Libertad y Nejapa del departamento de San Salvador.

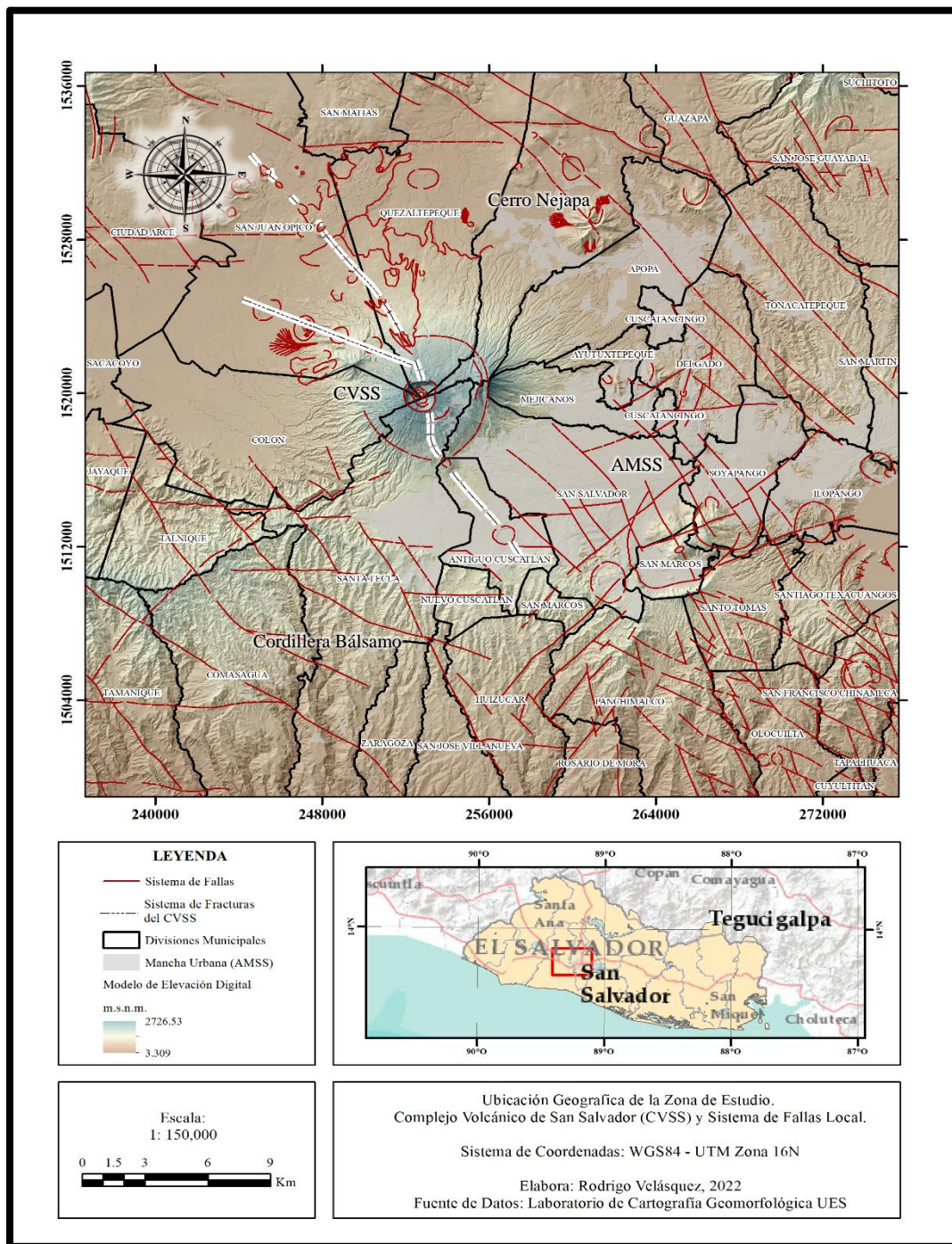


Figura 2. Ubicación de la Zona de Estudio, Complejo Volcánico de San Salvador. Se presenta el sistema local de fallas, edificio volcánico principal y división municipal. Fuente: Elaboración Propia.

7.2. Geodinámica

El territorio salvadoreño, de origen volcano-tectónico, está ubicado sobre los márgenes N y O de la Placa Caribe (Bosse et al., 1976; Carr et al., 1977; Rogers et al., 2002; Ferrés, 2014) con un espesor promedio de hasta 35 km bajo la cordillera volcánica; encontrándose en sus límites N-NO con el sistema de fallas transcurrentes sinistral Polochic-Motagua, con una razón de desplazamiento de hasta 19 mm/año, la cual conforma un punto de triple contacto entre las placas de Cocos, Caribe y Norteamérica, en donde se forma la trinchera mesoamericana debido a la subducción entre la placa de Cocos y Caribe a razón de 72-86 mm/año (De Meets, 2001; Rogers et al., 2002; Dewey et al. 2004; Ferrés, 2014).

Debido a la interacción entre placas tectónicas antes mencionadas se forma el Arco Volcánico Centroamericano (AVCA) (Stoiber y Carr, 1973; Bosse et al. 1976; Carr et al., 1977, 2004; Carr, 1984; Rose et al. 1999) comprendido en dirección NW-SE desde la zona sur de México hasta el norte de Panamá sobre una extensión de 1,100 km aproximadamente (Ferrés, 2014), y está compuesto por un conjunto de 75 volcanes de composición basálticos a andesíticos, de los cuales 31 han experimentado actividad en época histórica (Simkin et al., 2000; Carr et al., 1984, 2004; Ferrés).

La formación de los edificios volcánicos activos dentro del AVCA ocurren sobre el límite sur del Graben Central de El Salvador controlado por sistemas de fallas normales que se extienden longitudinalmente subparalelas a la costa pacífica con un ancho promedio de 10 a 20 km, para el caso de El Salvador ronda los 40 km (Meyer-Abich, 1956; Stoiber y Carr, 1973; Carr y Stoiber, 1977; Carr et al., 2004; Ferrés, 2014).

A partir de mediciones de deformación cortical y de sismicidad se indica que la convergencia entre la Placa de Cocos y del Caribe para Centro América es oblicua compuesta por una componente normal perpendicular a la cordillera volcánica y una componente horizontal reflejada por el movimiento dextral en dirección NO paralelo a la trinchera mesoamericana (De Mets, 2001; Alvarado, 2008; Correa-Mora, 2009; Ferrés, 2014).

La razón del desplazamiento de estas estructuras para la zona de El Salvador es de aproximadamente 14 mm/año; en donde Alvarado (2008) argumenta que la dirección de convergencia entre para placas para el país es ortogonal, lo que complica la explicación de la distribución de esfuerzos a nivel nacional, dando relevancia al empuje que ejerce el antearco nicaragüense sobre el territorio salvadoreño.

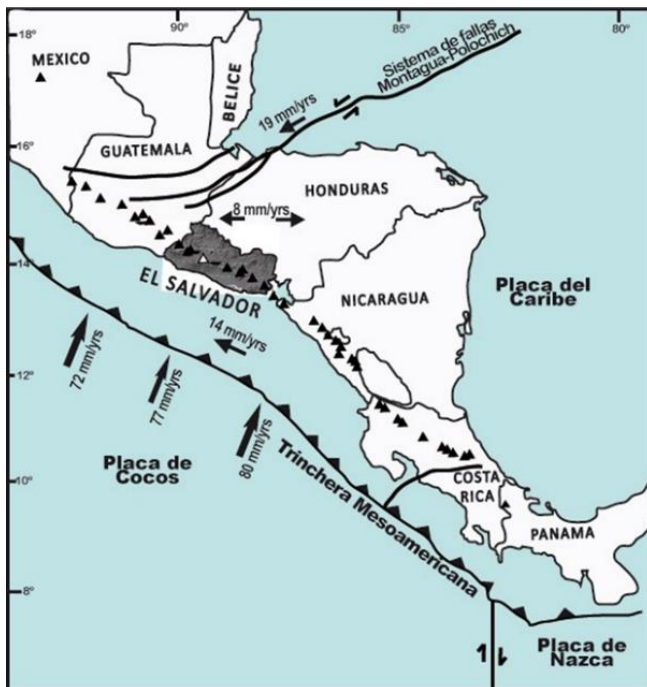


Figura 3. Marco Geodinámico del AVCA.

Se muestran las tasas de movimiento de la Placa de Cocos, del antearco de la Placa Caribe y del Sistema de Fallas Motagua-Polochic (De Meets, 2001; Alvarado et al., 2008; Rodríguez et al., 2009). La tasa de divergencia al S-SE de este sistema de fallas fue determinada por Guzmán-Speziale (2006). Extraído de Ferrés, 2014.

La deformación de la corteza es un fenómeno físico activo que depende tanto de la actividad tectónica como del vulcanismo del planeta, por lo que las razones de desplazamiento no son constantes, varían según el ángulo de buzamiento en los bordes de placas convergente cambia.

La tasa de convergencia entre Cocos y Caribe ha venido cambiando en los últimos 23 Ma, originando un aumento en ángulo de subducción de 30° iniciales a 45-50° actuales (Carr 1984; Rogers et al., 2002) originando además cambios en la tasa de efusión de magma, con esto se explica el comportamiento episódico del vulcanismo a nivel regional (Rogers et al., 2002); puesto que aunque se estimen periodos de retorno en base a los registros históricos de actividad volcánica y sísmica, no se puede inferir en la intensidad de futuros eventos.

En la actualidad, por medio de estudios de tomografía sísmica, se sabe que la zona generadora de sismos entre la interacción de placas (Benioff-Wadati) se encuentra aproximadamente entre 100 a 500 km de profundidad (Carr et al. 1984; Rogers et al., 2002; Dewey et al., 2004; Guzmán-Speziale, 2006; Ferrés, 2014).

A lo largo de la historia las razones de desplazamiento han sido muy variantes, producto de ellas ha sido la densificación de las cordilleras volcánicas regionales y nacionales formación de madures del Graben Central (Hernández, 2009; Ferrés, 2014), originando un campo de esfuerzo a lo largo del AVCA como resultado de la acción compresiva del contacto entre las Placas de Coco y Caribe en dirección NO y EO a razón de 8 mm/años (Ferrés, 2014).

A nivel de El Salvador, debido a propagación de los esfuerzos, se genera un sistema de fallas transcurrentes (corte) dextrales subparelas al norte del arco volcánico nacional, formando así la Zona de Fallas de El Salvador (ESFZ, por sus siglas en inglés; Martínez et al., 2004; Agostini et al., 2006; Corti et al., 2005; Guzmán-Speziale, 2006; Ferrés, 2014).

En resumen, a partir de la geodinámica regional y su afectación al sistema de El Salvador, se argumenta que los principales generadores de la intensa actividad sísmica del país son (Dewey et al., 2004; Martínez et al., 2004; Guzmán-Speziale, 2006; Ferrés, 2014):

1. Los movimientos de fallas asociados a los procesos del AVCA con magnitudes entre 5.7 a 5.9 hasta profundidades menores a 50 km.
2. La subducción entre la Placa de Cocos y del Caribe con sismos de magnitudes mayores a 7, capaces de inducir sismicidad al AVCA (Martínez et al., 2004).
3. La actividad volcánica originada por la fusión parcial de la cuña del manto bajo la Placa del Caribe a profundidades entre 80 a 150 km, en donde la adición de agua y elementos incompatibles con el manto reaccionan originando actividad propiamente volcánica (Ferrés, 2014).

7.3. Tectónica

La tectónica del CVSS es muy compleja, parte de las condiciones de esfuerzos diferenciales entre el AVCA, el sistema de fallas de El Salvador (ESFZ) y su relación directa con la actividad volcánica de la zona.

Diversos autores como Meyer-Abich, 1956; Bosse, 1976; Stoiber y Carr, 1973 e Italtেকna Consult, 1988; Ferrés, 2014; muestran la existencia de cuatro familias de fracturas con dirección EO, NO-SE, NS y NE-SO distribuidas por todo el país

Se distingue además un sistema de fallas principal con rumbo EO ubicado paralelo a la línea de costa, al norte de la línea de volcanes extendiéndose por casi 200 km desde el Lago de Ilopango hacia la frontera con Honduras, el cual controla la posición del Graben Central y los principales estratovolcanes activos del país (Meyer-Abich, 1956; Bosse et al., 1976).

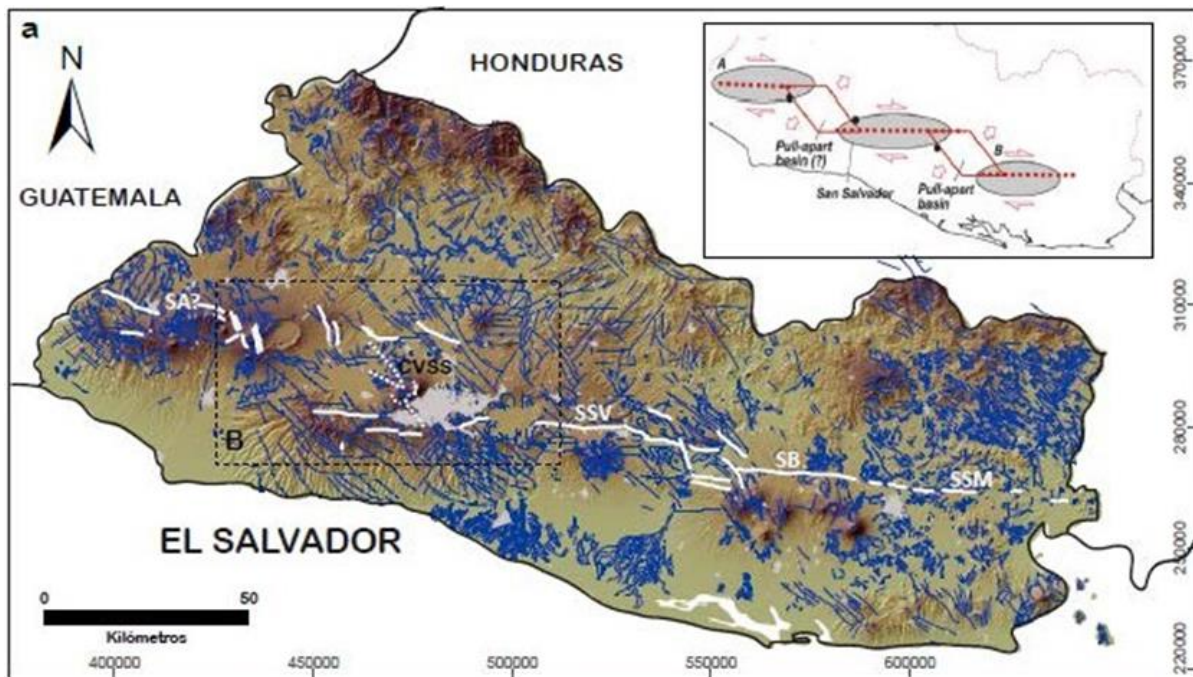


Figura 4. Sistema de Fallas de El Salvador. Se resalta la estructura EO que atraviesa a todo el país hasta llegar a la frontera con Honduras sobre la línea norte de la cordillera volcánica de El Salvador. Se remarca el sistema de fracturas (sistema norte en dirección a El Playón de Quezaltepeque, de Jabalí hasta Laguna de Chanmico y el sistema sur en dirección a Plan de La Laguna que perturba al CVSS. Extraído de Ferrés, 2014.

La dinámica de la ESFZ esta descrita como “cinemática transcurrente dextral” con rasgos de fallamiento de desgarre y drenajes hídricos desplazados horizontalmente. Dentro del conjunto de estructuras que componen al ESFZ se resalta la familia de fallas NW-SE, la cual es producto de esfuerzos tensionales y es considerada como la estructura predominante a nivel local de la posición de la mayoría de los edificios volcánicos que componen a la cordillera volcánica de El Salvador (Bosse et al., 1976; Carr 1984; Ferrés, 2014).

El CVSS se ve delimitado en el sector sur por el graben, mostrando discontinuidades tectónicas en la ladera norte de la Sierra Bálsamo y al norte del cráter principal por el sistema de fallas escalonadas con rumbo ENE-OSO (Meyer-Abich, 1956; Bosse et al., 1976).

Dentro de las estructuras tectónicas que perturban al CVSS se encuentran el sistema de fallas y/o fracturas con dirección N65W en donde se localizan volcanes monogenéticos tipo maar (Meyer-Abich, 1956; Italtekná Consult, 1988; Sofield 1998; Ferrés, 2014) y otro en dirección NS que controla la ladera oeste del Cerro El Picacho y la zona de colapso del antiguo Volcán de San Salvador (Sofield, 1998; Ferrés, 2014).

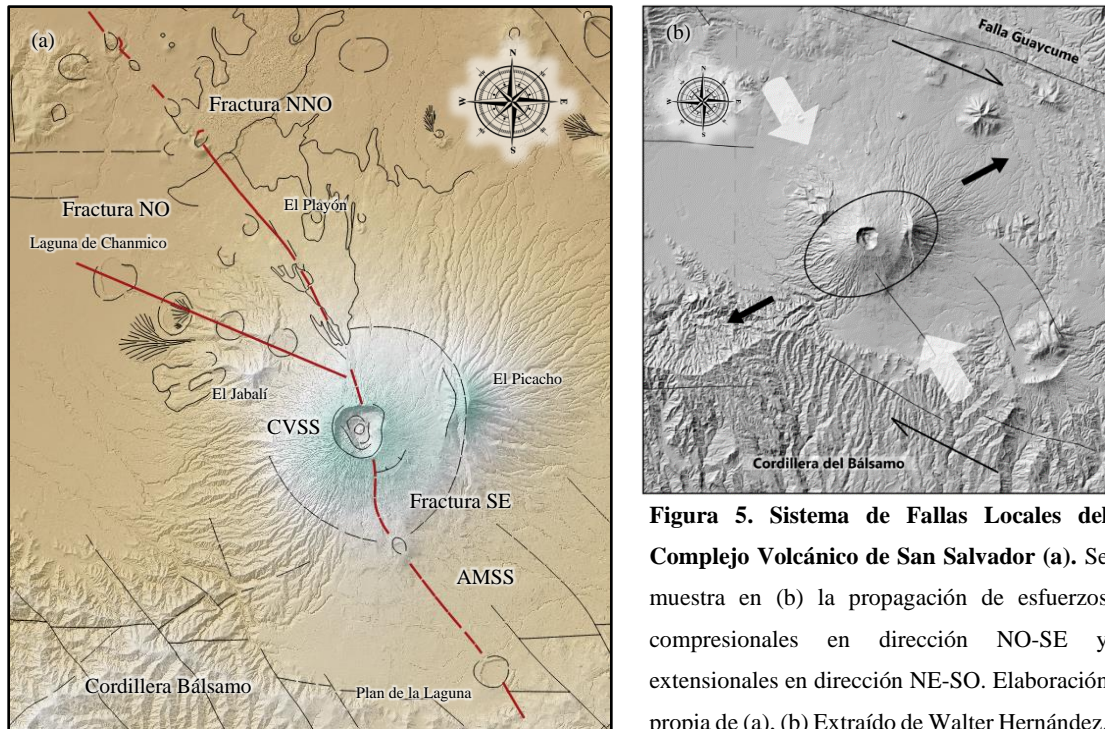


Figura 5. Sistema de Fallas Locales del Complejo Volcánico de San Salvador (a). Se muestra en (b) la propagación de esfuerzos compresionales en dirección NO-SE y extensionales en dirección NE-SO. Elaboración propia de (a), (b) Extraído de Walter Hernández.

7.4. Geología

La geología de El Salvador es casi en su totalidad de origen volcánico, presentando secuencias sedimentarias de caliza en la región noroeste (Metapán) en contacto con cuerpos intrusivos que han originado procesos de metamorfismo interesantes; siendo esta región, una de las particularidades del territorio salvadoreño.

La cordillera volcánica del país está compuesta por materiales de la formación Chalatenango y Morazán prioritariamente, con cierta alternancia de depósitos efusivos y piroclásticos (Ferrés, 2014) de composiciones basálticas a andesitas de manera general.

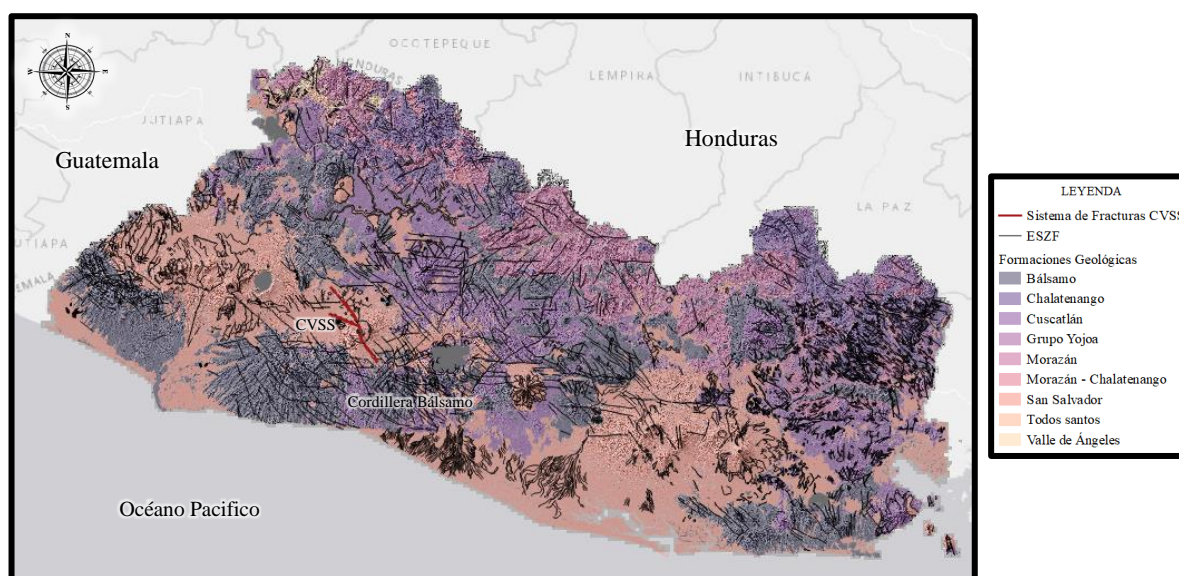
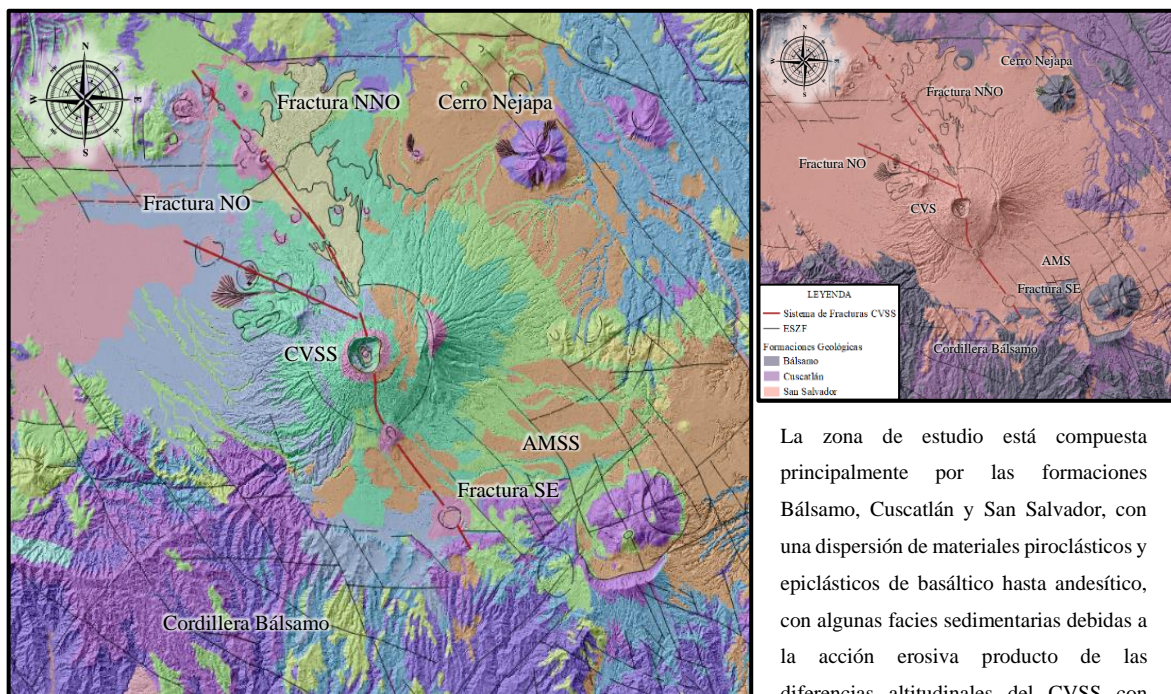


Figura 6. Formaciones Geológicas de El Salvador Se logra visualizar el dominio de la formación Bálamo, Cuscatlán y Chalatenango sobre la cordillera volcánica del país; siendo en la región del graben el dominio de la formación San Salvador, controlado por los diferentes episodios de vulcanismo que ha tenido el territorio, presentando mayormente materiales epiclásticos, efusivos de composición basalto – andesítico. Elaboración propia con base de datos del Laboratorio de Cartografía y Geomorfología – UES.

Cada formación geológica presenta características particulares en concepto de granulometría, coloración y textura, permitiendo caracterizar los posibles escenarios que les originaron; Ferrés (2014) describe que los materiales de la formación Bálamo se caracterizan por su dispersión en términos de tobas brechadas a piroclásticas de composición basalto-andesíticas sobre el sur del CVSS, Cerro Guazapa y Cordillera Bálamo.

La formación Cuscatlán presenta composiciones más ácidas (lavas riolíticas) con presencia de secuencias sedimentarias volcanoclásticas, dispersos por toda el área del CVSS y AMSS, siendo producto de erupciones volcánicas caldericas en el interior del Graben Central.

La formación San Salvador está compuesta por series piroclásticas y epiclásticas (tobas) de tonos amarillentos a cafés con espesores de hasta 25m (Ferrés, 2014), en donde las formaciones más someras (jóvenes) se presentan de composición basalto andesíticas en alternancia con depósitos piroclásticos y epiclásticos claros félsicos (comportamiento riolítico, formación de Tierras Blancas).



La zona de estudio está compuesta principalmente por las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador, con una dispersión de materiales piroclásticos y epiclásticos de basáltico hasta andesítico, con algunas facies sedimentarias debidas a la acción erosiva producto de las diferencias altitudinales del CVSS con

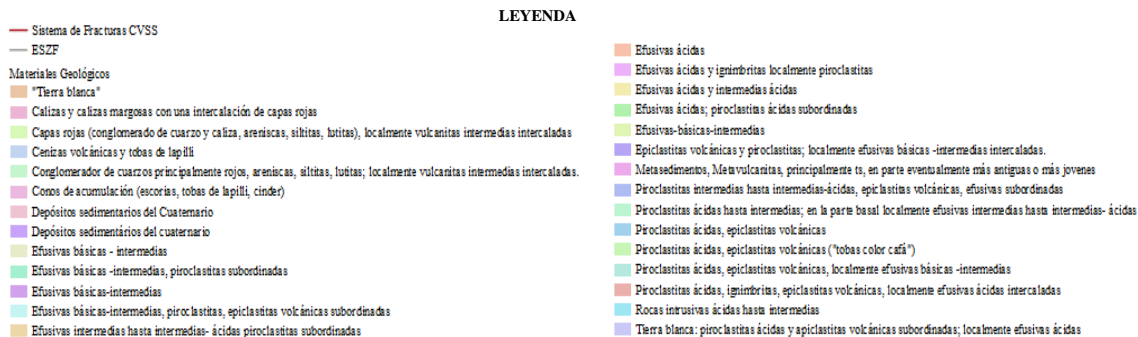


Figura 7. Geología de El Salvador (adaptado de Bose et. al., 1976). Se logra visualizar el dominio de la formación Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador sobre la región comprendida por el CVSS, evidenciando los diferentes procesos eruptivos que ha sufrido la región, formando una distribución muy compleja de materiales piroclásticos, epiclásticos y efusivos. Elaboración propia con base de datos del Laboratorio de Cartografía y Geomorfología – UES.

Autores como Pullinger (1998), Sofield (1998), Escobar (2003) y Ferrés (2014) mencionan que la mayor parte de los estratovolcanes holo genéticos y caldericos del país han presentado actividad eruptiva en los últimos 2000, por lo que se puede decir que El Salvador es un territorio volcánicamente activo por los continuos aportes que recibe del manto debido a la convergencia entre placas, evidencia de ello la compleja distribución de materiales presenten en la zona de estudio y de manera regional (haciendo referencia a territorio salvadoreño).

7.5. Actividad Volcánica y Sismológica del CVSS

7.5.1. Vulcanismo Histórico

El Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS) ha presentado distintos episodios de vulcanismo intenso en el tiempo, desde eventos altamente explosivos identificados por medio del análisis de las secuencias litológicas y depósitos volcánicos que componen al CVSS (Sofield, 1998 y Ferrés, 2014), colapsos multisectoriales del edificio volcánico para dar paso a nuevas estructuras (Hernández y Jicha, 2019) y erupciones diversas para la época histórica actual, pasando por eventos eruptivos explosivos en la estructura principal y flancos (Hart, 1983; Mayer-Abich, 1956; Larde, 1997; Larde y Larín, 1950; Sapper, 1926; Palacio, 1576).

El CVSS está activo, respaldado por la recurrente actividad sísmica de la zona de Boquerón relacionada a procesos magmáticos internos, suscitando una última erupción en 1917.



Figura 8. Erupción del Volcán Boquerón en 1917 (José Panadés Vides). Dicho evento suscito posterior dos sismos de importante magnitud (6.7 y 6.4), en donde por acción del ascenso de magma, la laguna cratérica que existía en Boquerón se evaporó, finalizando el proceso con una erupción fisural en flanco norte del CVSS.

Es debido a la geodinámica y tectónica de la zona, que la actividad volcánica y sísmica está íntimamente relacionada, por lo que cualquier alteración en sus condiciones de equilibrio debe de verse como un cambio neto en el sistema, la erupción de 1917 es un claro ejemplo de ello (sismos fuertes que preceden una erupción volcánica).

Tabla 1. Cronología de la Actividad Volcánica en el CVSS. Se observa que la actividad se ha caracterizado eruptiva se ha caracterizado por ser del tipo fisural en los últimos 2000 años. Tomado de portal web de la Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.

Cronología de Actividad Volcánica Histórica del CVSS		
Año	Evento	Fuente
1917	Erupción fisural por el flanco NW del volcán de San Salvador. Que dio inicio el 7 de junio de 1917. La actividad evaporó el lago existente en el cráter central El Boquerón y se formó el Boqueroncito.	Meyer-Abich, 1956
1671	Erupción del volcán El Playón. (NW de Volcán de San Salvador)	Global Volcanism Program
1659	Erupción del volcán El Playón, al norte del volcán de San Salvador. Erupción de escorias y emisión de lavas hacia el noreste, en una extensión de 10 km ² , que alcanzaron el Río Sucio, provocando su represamiento. El pueblo de Nejapa fue afectado por las lavas, sus habitantes se salvaron y trasladaron la población a su ubicación actual.	Larde, 1917; Larde y Larín, 1950; Sapper, 1926; Meyer-Abich, 1956
1575	Presencia de una fumarola en el cráter del Boquerón. Se menciona también la existencia de lava y escorias frescas, supuestamente producto de una erupción reciente, en las cercanías del pueblo de Nejapa, ubicado por aquel entonces en el lugar donde hoy se ubica el cono de escorias de El Playón.	Palacio, 1576; Meyer-Abich, 1956
1050	Erupción explosiva freatomagmática del Boquerón que dio lugar al depósito conocido como Talpetate	Hart, 1983
590	Erupción del volcán Loma Caldera, ubicado al noroeste del volcán de San Salvador. Emisión de piroclastos que dan lugar a la tefra de Joya de Cerén	Hart, 1983

Sofield (1998), argumenta que “la actividad histórica reciente del CVSS se ha caracterizado por ser erupciones del tipo estromboliana de magmática a freatomagmáticas, inclusive por los flancos en donde ha sido actividad mayormente monogenética”.

Ferrés (2014) atendiendo a criterios litológicos e históricos, argumenta que la actividad de los últimos 3000 años ha sido por los flancos, en donde Sofield (1998) había argumentado con anterioridad que este proceso venia iniciándose hace 10,000, periodo en donde se han formado hasta 25 volcanes monogenéticos; siendo la mitad de ellos a partir de actividad freatomagmáticas (de mayor intensidad y peligrosidad).

7.5.2. Comportamiento Sismológico

La reinyección de magma hacia las cámaras magmáticas propicia la reactivación de actividad volcánica debido a la necesidad de liberar volátiles y el excedente de presión dentro de las mismas; por lo que, en esta liberación energética, el magma se comporta como un fluido capaz de viajar por el sistema de fracturas locales generando sismos de magnitudes considerables (Mogi, 1958; Lisowski, 2006). En el AMSS han acontecidos sismos de hasta 5.2 en escala Richter para la región de dominio del sistema de fallas y/o fracturas del CVSS.

Se sabe por Marroquín (2017) a través del análisis temporal de la sismicidad (el cual es un método de monitoreo volcánico en MARN), que existen cinco subzonas sísmicas en donde se observa que la mayor recurrencia de eventos sísmicos corresponde a las subzonas de la estructura principal del CVSS y a la componente Antiguo Cuscatlán - San Salvador - Mejicanos.

Se detecta que las zonas más activas (sísmicamente) en la actualidad son Boquerón y el Flanco Sureste, relacionado muy probablemente a la dinámica de deformación del sistema de fallas propio de Boquerón, así como también a la actividad volcánica (magmatismo) interna del CVSS (ascensión de magma y volátiles en la actualidad por medio de las fracturas existentes al interior de la estructura).

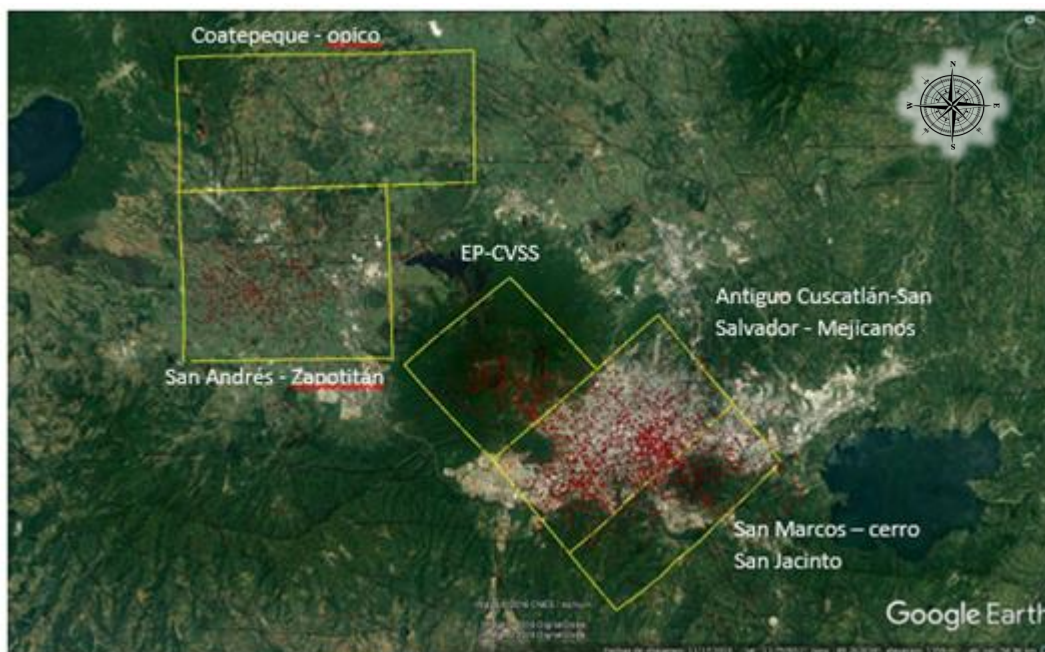


Figura 9. Delimitación de sub-zonas sísmicas en CVSS. Fuente: Marroquín, 2017

Dentro del mismo análisis elaborado por Marroquín (2017); se detalla un cambio general en la tendencia de los hipocentros sísmicos, generando a partir del 2011 una migración bien definida de la sismicidad hacia el cráter de Boquerón, por lo que este fenómeno acompañado con una alta densidad de población viviendo sobre las laderas del volcán y la componente de peligrosidad propias del CVSS (lahares, flujos de lava) eleva considerablemente su nivel de riesgo.

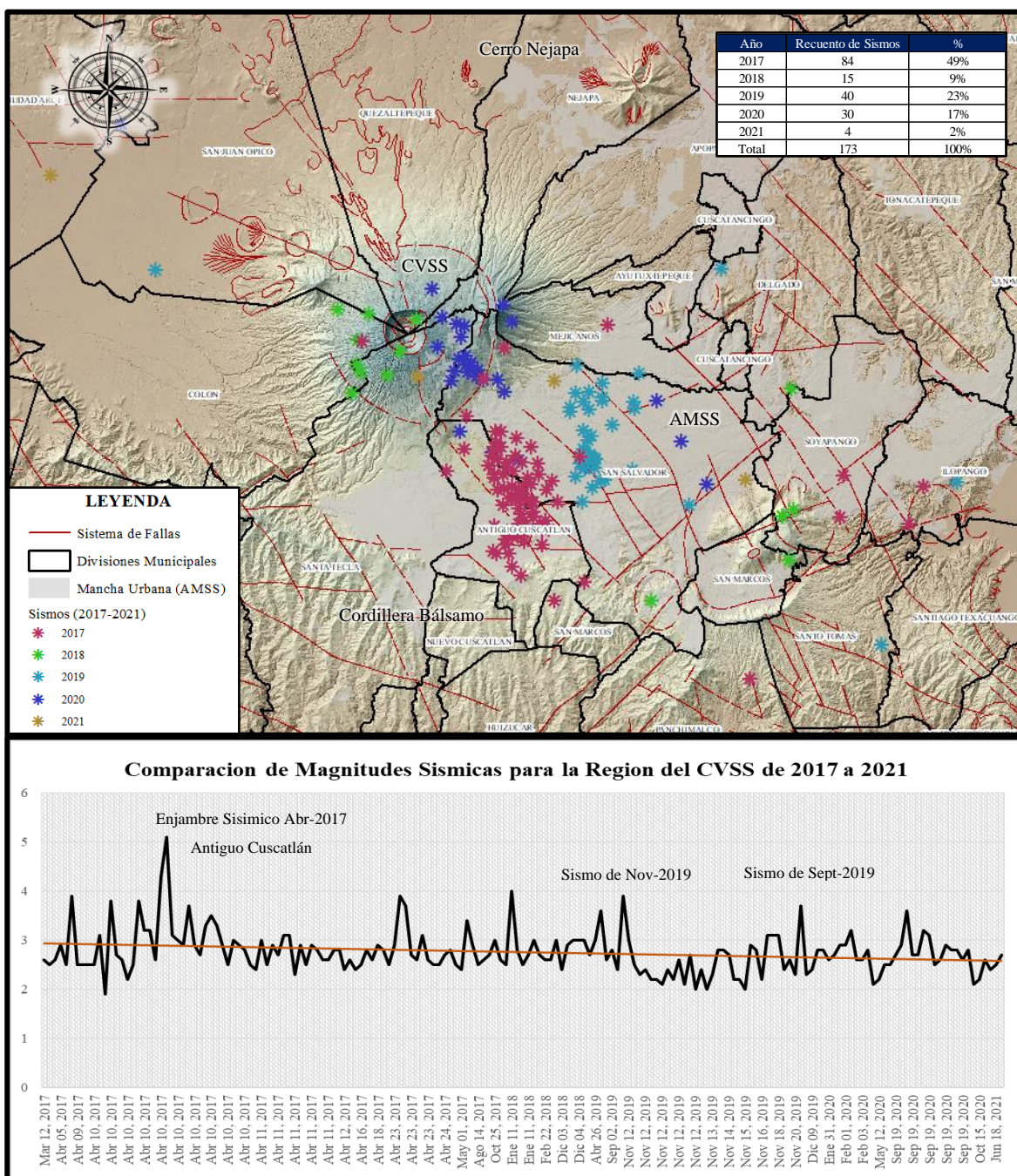


Figura 10. Ubicación de los Epicentros Sísmicos de 2017 a 2021 en CVSS y Comparación de Magnitudes.

Elaboración propia a partir de datos sísmicos del portal sismológico del SNET.

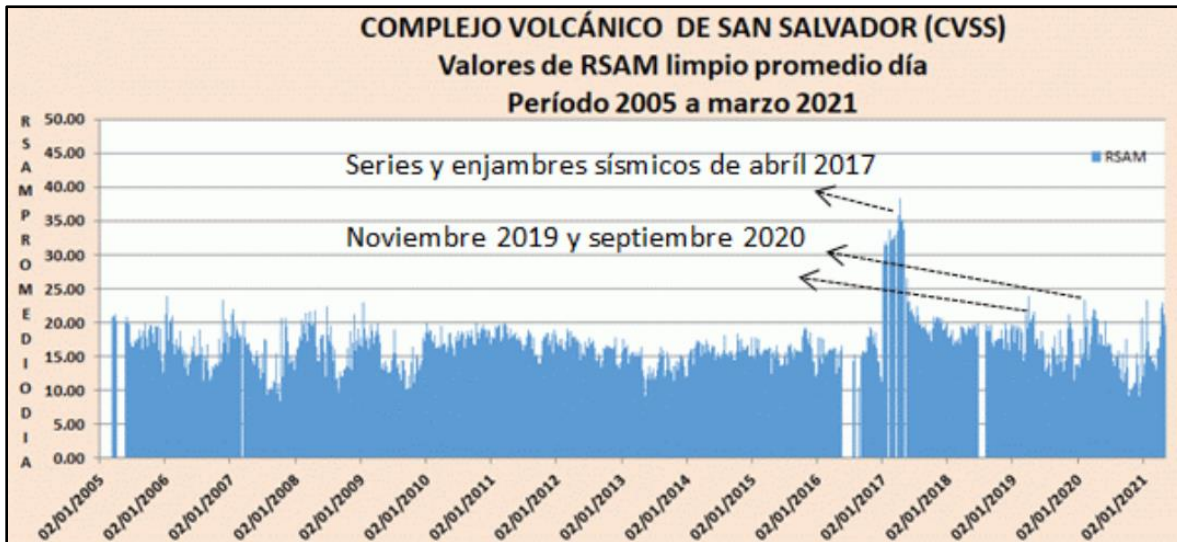


Figura 11. Ubicación de los Epicentros Sísmicos de 2017 a 2021 en CVSS y Comparación de Magnitudes.

Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Escobar, 2021

Es notable que al evaluar el comportamiento sismológico a partir de sus magnitudes en Richter e intensidades RSAM, se logra evidenciar que desde 2005 (en relación a los datos que el DGOA-MARN posee) el CVSS viene presentando actividad característica de regiones volcano-tectónicas activas (valores promedios entre 10 a 25 unidades RSAM diarios). Escobar (2021) argumenta que, de manera general, la zona donde se encuentra la estación Boquerón presenta un umbral máximo de vibración natural del suelo de 38 unidades RSAM en promedio sin manifestar cambios importantes en el sistema interno del volcán.

En la figura 10 se logra observar que la sismicidad del CVSS ha venido disminuyendo a partir del enjambre sísmico suscitado en abril de 2017 tanto en magnitud como en cantidad de sismos por año. En 2017 el dominio sísmico lo obtuvo la zona sur del CVSS, sobre el sistema de fractura SE y colindancias, representando entre 2017 y 2021 el 49% de los sismos para dicho periodo, consecuente a ello el dominio sísmico se desplaza a Boquerón en un ritmo menor y con disminución en su valor promedio de magnitud (de un 5 a 3.8 Richter en promedio anual) para el 2018.

Para los años 2019 y 2020 se repite la dinámica de desplazamiento de los dominios sísmicos desde la zona SE (40 sismos para 2019) hacia Boquerón (30 sismos en 2020) pero con una importante caída en la magnitud sísmica hasta un 3 en escala Richter; siendo 2021 un año aparente calma (únicamente 4 sismos, 2 de ellos para las zonas del CVSS).

7.6. Escenarios de Ocurrencia de Eventos

Según Marroquín (2017) y Escobar (2021), el 92% de los sismos dentro de las zonas sísmicas definidas para el CVSS (figura 9) ocurren con magnitudes menores a 3.5, de los cuales el 70.3% tienen magnitudes menores a 2.5 y el 11% mayores a 3.5, siendo estos sismos pequeños y someros en donde ocurren pequeñas intrusiones de magma.

Escobar (2021) argumenta que los sismos con magnitudes menores a 3.5 están relacionados a rupturas de pequeñas fallas en el AMSS, los sismos menores a 2.5 están relacionados a fisuras o fracturamiento de roca frágil del magma de 1917 enfriado dentro del conducto principal, así como también el reacomodo estructural del volcán, diques, fisuras y microfracturas en la zona del conducto principal y base del volcán inducidas por esfuerzos tectónicos y magmáticos que debido a la acumulación de esfuerzos volcano-tectónicos en el cono, conducto y basamento del volcán debilitan estructuralmente al edificio.

Los sismos con magnitudes mayores a 3.5 a profundidades de 10 a 20 km, están relacionados a rupturas por esfuerzos transtensionales y movimientos dextrales de fallas en el AMSS y de las componentes de Bálsamo y Guaycume (Mulas, 2012; Escobar, 2021).

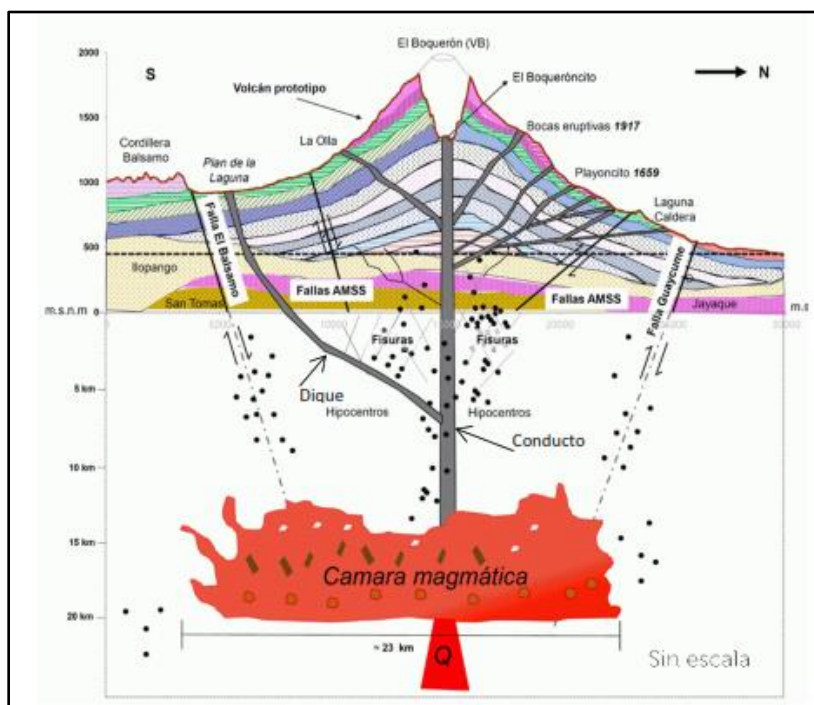


Figura 12. Modelo conceptual preliminar del sistema magmático del CVSS. Se elabora a partir de la interpretación de la actividad eruptiva de los últimos 3 mil años y la sismicidad registrada durante el periodo de 1917 a junio de 2016. Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Valeria García, Demetrio Escobar, 2021

En base al historial eruptivo y sísmico se establecen tres escenarios de peligro volcánico por parte de la Misión Italiana Salvadoreña (1988), el cual investigadores como Sofield (1998), Ferrés (2014), Escobar (2021) y otros respaldan, en donde:

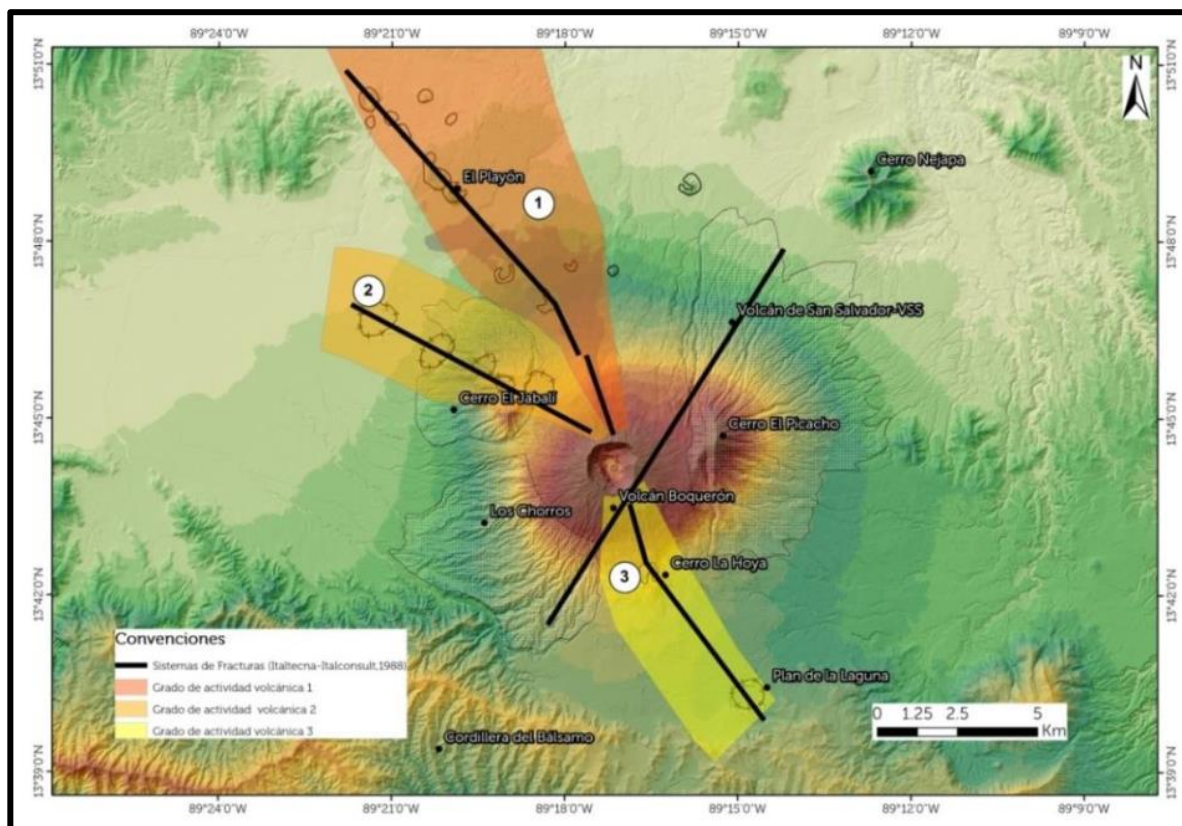


Figura 13. Sistema de Fracturas y Bocas Eruptivas de la zona del CVSS. Los números indican la prioridad relativa de peligrosidad volcánica ya sea por flujos de lava y erupciones hidromagmáticas. Extraído de “Árbol de Probables Eventos Eruptivos en la Zona del CVSS”. Adaptado de Misión Italiana, 1988, por Valeria García, Demetrio Escobar, 2021.

Escenario 1. Alta Tasa de Ocurrencia en el Historial Eruptivo.

Definida como una erupción de pequeña magnitud de tipo estromboliano con VEI (índice de explosividad volcánica) de 1 a 3, parecido a lo acontecido en 1917. Este evento es capaz de dejar productos como flujos de lava, caída de piroclastos, cenizas y emisión de proyectiles balísticos.

Se estiman periodos de recurrencia de entre decenas a centenas de años debido al tipo de actividad volcánica reciente (fisural).

Escenario 2. Tasa de Ocurrencia Intermedia en el Historial Eruptivo.

Definida como una erupción de moderada a gran magnitud, de tipo estromboliano violento (o vulcaniano) con un VEI de 3 a 5; similar a lo que genero el depósito B1 del volcán Boquerón o a lo acontecido el 1 de octubre de 2005 en el volcán Ilamatepec de Santa Ana (Ferrés, 2014).

Se esperarían fases magmáticas, freatomagmáticas o freáticas en caso que hubiese un cuerpo de agua importante, produciendo caída de piroclásticos, ceniza, emisión de balísticos, oleadas piroclásticas y algunos flujos piroclásticos de pequeño volumen.

El periodo de recurrencia estimado es de cientos a miles de años.

Escenario 3. Baja Tasa de Ocurrencia en el Historial Eruptivo.

Definida como una erupción de gran a extrema magnitud, del tipo subpliniano a pliniano como la que origino los depósitos Talpetate I y G2 con un VEI entre 5 6.

Se estiman fases magmáticas a freatomagmáticas produciendo caída de piroclastos y cenizas de amplio recorrido, emisión de proyectiles balísticos y corrientes de densidad piroclástica (con depósitos de oleada y flujo piroclástico) y flujos piroclásticos de mediano recorrido.

El periodo de recurrencia se calcula de miles a decenas de miles de años.

7.7. Composición del Sistemas de Monitoreo en el CVSS

De manera general, el vulcanismo de El Salvador se ha caracterizado por presentar erupciones de magmáticas a freatomagmáticas, las cuales a lo largo de la historia han originado cuantiosas pérdidas materiales, económicas, culturales y vitales.

El desarrollo urbano desordenado, baja concepción del riesgo y variedad de desastres naturales inherentes en el territorio exige un alto nivel en la composición de los sistemas de monitoreo tanto terrestre como meteorológico; para el caso de estudio el volcanológico.

Como parte fundamental de la reducción del riesgo hacia las entidades afectadas, se plantean metodologías que permitan la caracterización del peligro e identificación de los agentes vulnerables asociados a su nivel de exposición y resiliencia.

El CVSS como se ha venido argumentando, representa un complejo sistema multiamenaza por los factores de peligrosidad volcánica (lahar, flujos de lava, flujos piroclásticos, etc.), dinámica de la sismicidad, factores de debilidad estructural del volcán, deslizamiento en las laderas con altos volúmenes de materiales y la acción antrópica; en donde, sumado a la desconceptualización del peligro por parte de la población se eleva día con día el riesgo.



Figura 14. Composición del Riesgo. La identificación del peligro permite mitigar las condiciones de vulnerabilidad, este planteamiento teórico aplicado a la vulcanología, es relacionado homológicamente al peligro o amenaza volcánico, definido como la características o riesgo cualitativo de un volcán hacia las entidades vulnerables. Elaboración propia, adaptado de Escobar, 2021.

Según Ferres (2014) el CVSS puede volver a entrar en erupción antecedida por un momento de agitación sismo-tectónica. Escobar (2021), menciona dentro del diagnóstico de actividad volcánica del estudio “Árbol de Eventos Eruptivos del Volcán de San Salvador”, que el CVSS se caracteriza por una significativa variabilidad en sus estilos y centro eruptivos (Rodríguez, 2015), siendo el flanco norte de Boquerón la zona con mayor susceptibilidad de aperturar flancos eruptivos según la historia eruptiva reciente (Bevilacqua et al, 2020).

Dentro del mismo informe, Escobar (2021) argumenta que, aunque el CVSS no haya manifestado erupciones en los últimos 105 años, el volcán esta activo; siendo de índole latente endógena, por lo que cualquier cambio en las condiciones de equilibrio de la cámara

magmática asociado a un ascenso de material del manto, puede originar aumentos importantes en la actividad de CVSS, potenciando así la ocurrencia de eventos histórico enlistados en la tabla 1 y como los descritos en la figura 13.

Los sistemas de monitoreo volcánico son un conjunto de técnicas que permiten la medición de parámetros físicos y químicos que ayudan a definir el estado actual (tanto interno como externo) de la actividad en un volcán, con la finalidad de optimizar la mitigación del riesgo volcánico mediante la detección de anomalías en los parámetros medidos.

Para un buen monitoreo volcánico se utilizan diversas técnicas las cuales brindan información de distintos parámetros físicos medibles con el fin de obtener un modelo confiable de las condiciones de actividad volcánica actual.

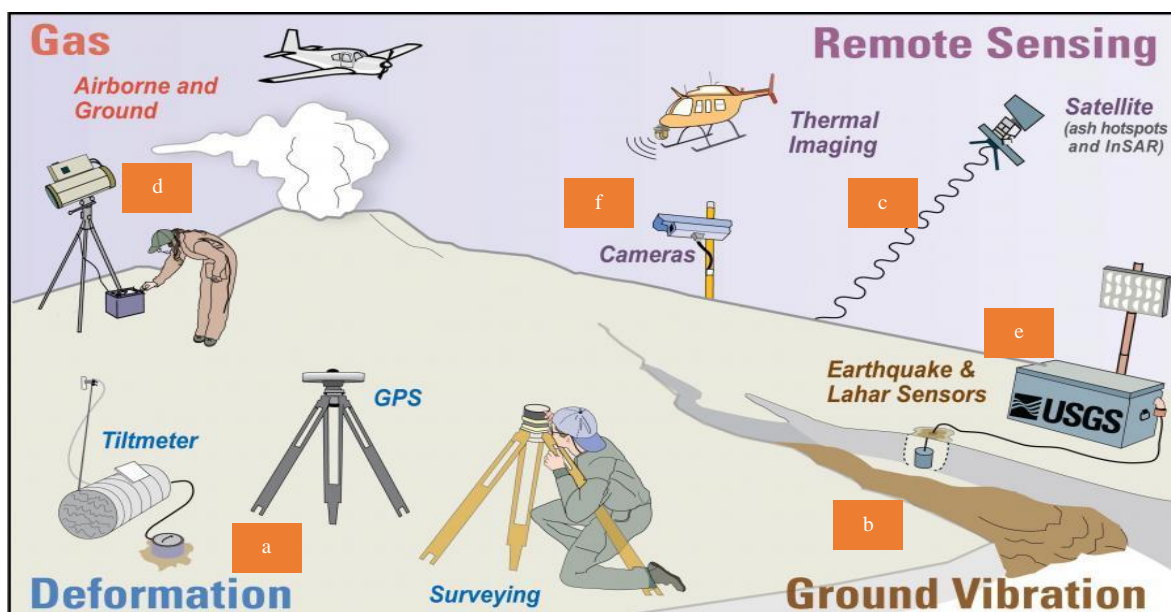


Figura 15. Métodos de Monitoreo Volcánico. se denotan los métodos de (a) deformación, (b) sísmicos, (c) sensores remotos, (d) medición de gases (e) equipo de sensores continuos volcánicos, lahares (f) y observación. Fuente: Lisa Faust, USGS.

En el monitoreo volcánico se emplea el uso de sensores continuos (estaciones o equipos midiendo parámetros constantemente), sensores remotos (uso de imágenes satelitales) y sensores discontinuos (equipo de uso presencial para el caso en que se asignen trabajos en campo).

Las señales generadas por las estaciones, a menudo requieren ser digitalizadas, transmitidas por un módem, amplificadas por una antena y recibidas en un centro de monitoreo y recolección de datos.

7.7.1. Descripción General de los Métodos de Monitoreo Volcánico.

A partir de diversos autores se ha obtenido información que permite detallar los sistemas de monitoreo complementarios para dar seguimiento a la actividad volcánica:

1. **Monitoreo Sísmico:** Debido al movimiento del magma en el interior del volcán se pueden producir sismos de baja energía (si se le compara con sismos por tectónica) los cuales se distinguen en base a criterios geofísicos midiendo la frecuencia (en Hercios, Hz) y pudiendo ser del tipo endógeno (se generan a partir de la actividad magmático-interna del volcán) y exógenos (actividad sísmica superficial, ya sea por lahares, flujos piroclásticos y de lava).
2. **Monitoreo Visual:** De manera directa mediante entrenamiento previo se es capaz de identificar cambios superficiales del comportamiento del volcán como también de una erupción reportando de manera inmediata los mismos.
3. **Monitoreo Geoquímico:** Es la medición de gases o volátiles como SO₂, CO₂, HCL, HF, CH₄ (dióxido de azufre, dióxido de carbono ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico, metano) como indicadores del movimiento y estado actual del magma.
4. **Monitoreo por Deformación:** Mide las deformaciones debido al paso y acumulación de magma a través de las fracturas del volcán.
5. **Monitoreo Hidrometeorológico:** Medición en tiempo real de precipitaciones y eventos de inundaciones para áreas susceptibles.
6. **Monitoreo por Sensoramiento Remoto:** Mediciones de parámetros físicos como deformación, desgasificación, columnas eruptivas, temperatura, etc., mediante el uso de imágenes satelitales.

Es en conjunto de todos los métodos de monitoreo que se describe con mayor precisión las condiciones de peligrosidad volcánica; claro esta sus aplicaciones dependen de factores geográficos, tipo de actividad del volcán y económicos.

Según del informe “Árbol de Eventos Eruptivos del Volcán de San Salvador” (Escobar; MARN, 2021) y “Evaluación preliminar de Amenaza volcánica en El Salvador y Análisis de Brechas (TAGA)” (Área de Vulcanología DGOA-MARN, 2019), el CVSS presenta monitoreo del tipo sísmico, térmico e hidrogeoquímico, argumentando que:

Sísmico:

Las condiciones del reservorio magmático del CVSS a partir de valores RSAM se han mantenido estables debido a la identificación de presión inferior al medio circundante; se evidenciada actividad significativa para los periodos de febrero y noviembre de 2004, julio-agosto de 2007, febrero 2011, febrero-mayo de 2012, julio y octubre de 2015, abril 2016, abril 2017, noviembre 2019 y septiembre 2020 (Escobar, 2021).

Térmico:

Escobar (2021), menciona que los valores de temperatura tomados en el Cerro La Hoya (único sitio en el CVSS que presenta emanaciones hidrotermales) se han mantenido estables, se observan algunas disminuciones en las temperaturas, las cuales se pueden relacionar a la saturación (humedad) del suelo.

Hidrogeoquímico:

Los valores de acidez (pH) y temperatura alrededor del CVSS se han mantenido dentro de umbrales aceptables, observando que los acuíferos que alimentan a los pozos productores de agua (Universidad de El Salvador y Ciudad Merliot) presentan mayor porcentaje de bicarbonatos y cloruro, mientras que Laguna de Chanmico es dominada por Sulfatos.

Se aclara que la clasificación de aguas en el CVSS hace referencia a aguas periféricas y no volcánicas; se esperarían ante un episodio volcánico que su composición físico-química muestre cambios significativos (Escobar, 2021).

8. MARCO TEÓRICO

Se explica en esta unidad las bases físicas y teóricas de conceptos como la deformación desde la física clásica y vulcanológica, teledetección, radares e interferometría diferencial de radar.

8.1. Deformación

Desde el punto de vista de la mecánica clásica, la deformación se define como el cambio lineal o volumétrico de un cuerpo debido a la aplicación de un esfuerzo por unidad de área (tensión mecánica) bajo un dominio de intensidad definida o arbitraria.

$$\text{Esfuerzo de Tensión} = \sigma = \frac{\text{Fuerza Perpendicular}}{\text{Área}} = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\text{Deformación por Tensión} = \frac{\text{Razón de Alargamiento}}{\text{Longitud Original}} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Ec. 2})$$

Relacionando ambas magnitudes se sabe que, si el esfuerzo es lo suficientemente pequeño, el esfuerzo y la deformación son proporcionales, por lo que se origina una relación física conocida como el módulo de Young (Y), que explica el comportamiento elástico del medio ante un esfuerzo.

$$Y = \frac{(F_{\perp}/A)}{(\Delta l/l_0)} = \frac{F_{\perp} \Delta l}{A l_0} = \text{Modulo de Young} \quad (\text{Ec. 3})$$

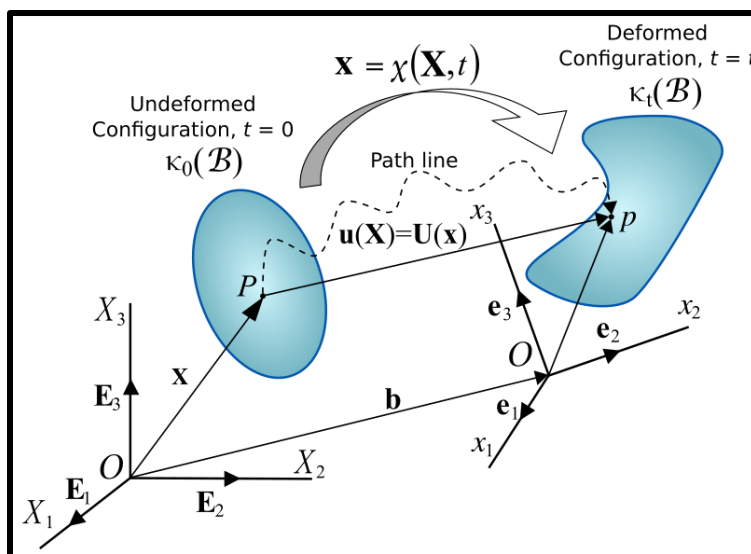


Figura 16. Esquema del desplazamiento de un cuerpo continuo desde su momento inicial K_0 hasta su condición final K_t . Fuente: Nicoguardo, 2011.

Si se relacionan estos términos al campo de la geología, vulcanología física y geodesia, según Ruegg (1994) es posible determinar las deformaciones a nivel de corteza mediante la “comparación directa de elementos geométricos obtenidos en diferentes periodos de tiempo o por comparación de coordenadas bajo un mismo sistema de referencia”, dando como resultado en el primer caso una solución parcial y en el segundo caso una solución más completa debido a que es posible describir un “campo de deformación” a partir de puntos definidos espacialmente con mediciones instrumentales que permiten correlacionar de mejor manera los esfuerzos geométricos entre datos.

Además, Ruegg (1994) argumenta que para una correcta estimación de la deformación sobre la corteza terrestre se debe de establecer una red de medición instrumental base con una eficiente interconexión entre los puntos de medición.

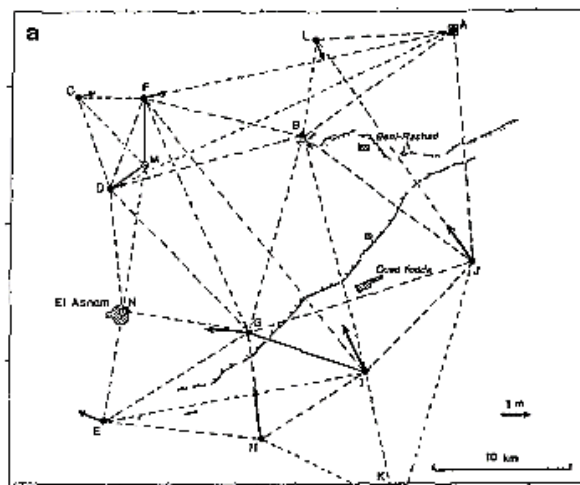


Figura 17. Ejemplo de red geodésica usada para determinar deformaciones cósmicas asociadas a terremotos en El Asnam. Fuente: Ruegg, 1982

Es importante aclarar que la medición de la deformación en la corteza asociada a terremotos y vulcanismo ha dependido en gran manera de equipos topográficos de precisión, los cuales son la base fundamental de correlación entre información satelital y ramas auxiliares de información primaria como la sismología.

Según Vélez (2011) en base a los argumentos de Lisowski (2006) afirma que posterior a la construcción de un edificio volcánico, los procesos de magmatismo internos generadores de ascensión de magma hacia la superficie “desplaza e interactúa con la roca circundante y con

fluidos generando nuevas vías de escape”, representadas como fallas o fracturas dentro del volcán; por lo que, a partir de la formación de estas nuevas estructuras geológicas y cambios en la presión interna en los reservorios, es que se produce la deformación volcánica; más específicamente en la roca caja del reservorio inicialmente.

Lisowski (2006) argumenta que “el patrón y la tasa de deformación superficial alrededor de los volcanes refleja los procesos tectónicos y volcánicos transmitidos a superficie a través de las propiedades mecánicas de la corteza”.

Vélez (2011) asevera que, en momentos previos a una erupción o actividad sísmica significativa, el patrón de deformación tiende a la “inflación”, es decir un levantamiento sobre la vertical debido a la acumulación de esfuerzos o ingreso de material magmático proveniente del reservorio. En momentos de estabilidad volcánica (sin erupciones, actividad cosísmica o de desplazamientos) el patrón de deformación tiende a la “deflación”, es decir subsidencia o hundimientos por liberación de esfuerzos o presión acumulada dentro de la estructura geológica.

8.1.1. Medidas Clásicas de la Deformación

Vélez (2011) a partir de lo argumentado por Kiyoo Mogi (1958) observa que debido a las características físicas naturales y complejas de las zonas volcánicas, los mecanismos ideales para la construcción de modelos numéricos deben basarse en la mecánica del medio continuo, es decir asumiendo cuerpos homogéneos, isotrópicos y continuos, los cuales poseen propiedades bien definidas en todos los puntos del espacio a nivel macro.

Lisowski (2006) argumenta que deben ser considerados como “cuerpos elásticos semi-infinitos”, es decir que poseen una superficie planar que se extiende hacia el infinito y obedecen a la ley de Hooke.

Basado en conceptos físicos, la ecuación 2 hace referencia a la “deformación axial o unitaria”, la cual es la forma unidimensional de análisis de deformaciones a partir de un esfuerzo.

Sin embargo, a partir de la concepción que la corteza se comporta como un medio continuo y elástico, se considera que los esfuerzos actúan en todas las direcciones (normales o de

cizalla), lo que se origina una “deformación de cuerpo” (Ortiz Berrocal, 2017) en donde interviene la aplicación del “Tensor de Deformación”, el cual está definido como “la combinación de las derivadas del campo de desplazamientos en todos los puntos del cuerpo” descrito por Berrocal (2017) y tomado de Jaeger y Cook (1979).

Además, se hace uso del “Tensor de Esfuerzos” descrito por Atkin y Fox (1980) como la combinación de las componentes esfuerzos normales (σ) y de cizalla (τ) actuantes sobre un cuerpo para definir la distribución de tensiones y esfuerzos dentro de un medio continuo.

$$\text{Tensor de Deformación} = \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{Tensor de Esfuerzos} = \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 5})$$

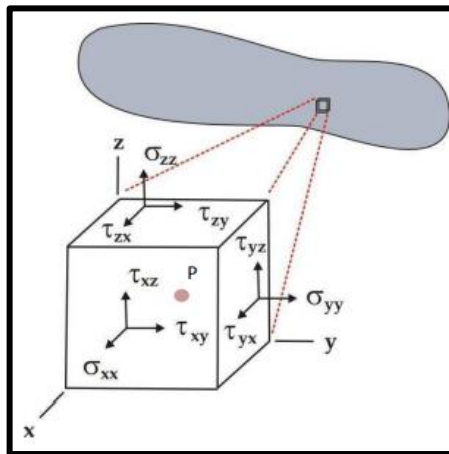


Figura 18. Componentes de esfuerzos normales y de cizalla que actúan sobre un cuerpo. Fuente: Vélez, 2011.

8.1.2. Tipos de Deformación

Partiendo que la aplicación del esfuerzo sea en una o varias direcciones, la deformación resultante puede clasificarse como:

- I. Deformación Elástica:** Es un proceso reversible y no permanente, en el cual un cuerpo tiende a recuperar sus dimensiones originales si se deja de aplicar una fuerza. Según Berrocal (2007), a partir de la aplicación de esfuerzos tensionales se aumenta la energía interna en forma de “energía potencial elástica”, fenómeno que suscita únicamente en procesos termodinámicos reversibles.
- II. Deformación Plástica o Dúctil:** En un proceso irreversible y permanente, en el cual un cuerpo no regresa a sus condiciones originales. Según Berrocal (2007), esto se debe a que se ha superado el límite de elasticidad (proceso termodinámico irreversible) debido a la significativa cantidad de energía potencial elástica acumulada. Al sobrepasar el “umbral de plasticidad” se procede al fracturamiento del cuerpo.

Desde un punto de vista geológico; según lo planteado por Tarbuck y Lutgens (2005) y retomado por Peña (2014), cuando los esfuerzos actúan perpendicularmente a un plano, este se considera como un esfuerzo normal (ya sea compresivo o extensional), si el mismo actúa paralelamente a un plano es un esfuerzo de cizalla (fracturamiento o desplazamiento). En el caso de los esfuerzos oblicuos existen dos componentes, una perpendicular y otra paralela a un plano

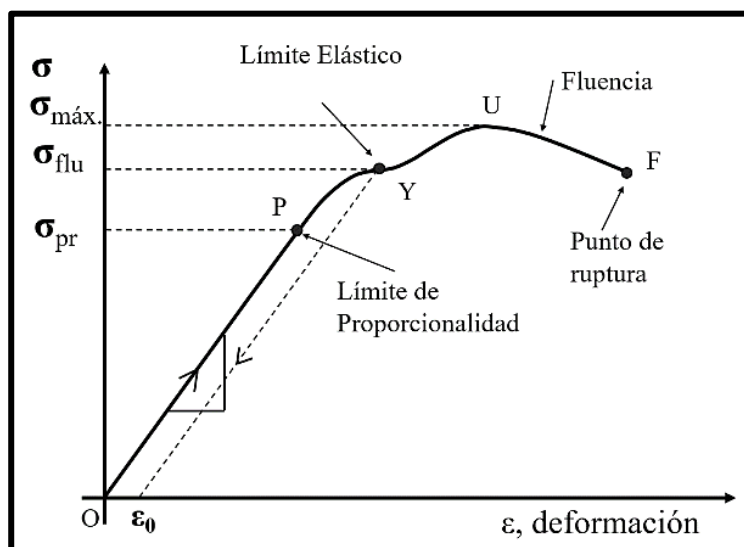


Figura 19. Representación gráfica del módulo de elasticidad. Gráfica de esfuerzo vs deformación.

Fuente: Fitzgerald, 1996.

8.2. Teledetección

La Teledetección es un conjunto de técnicas que permiten la toma de datos geospaciales de la superficie terrestre por medio de sensores transportados por plataformas aerotransportables (avionetas, globos, etc.) u orbitales (satélites) de manera remota.

Estas técnicas facilitan la adquisición de datos en zonas de alto riesgo o difíciles de acceder gracias a la intervención de los satélites, permitiendo el desarrollo de aplicaciones como monitoreos forestales, climáticos, cambio de usos de suelos, inundaciones, etc., en escalas temporales y espaciales muy amplias.

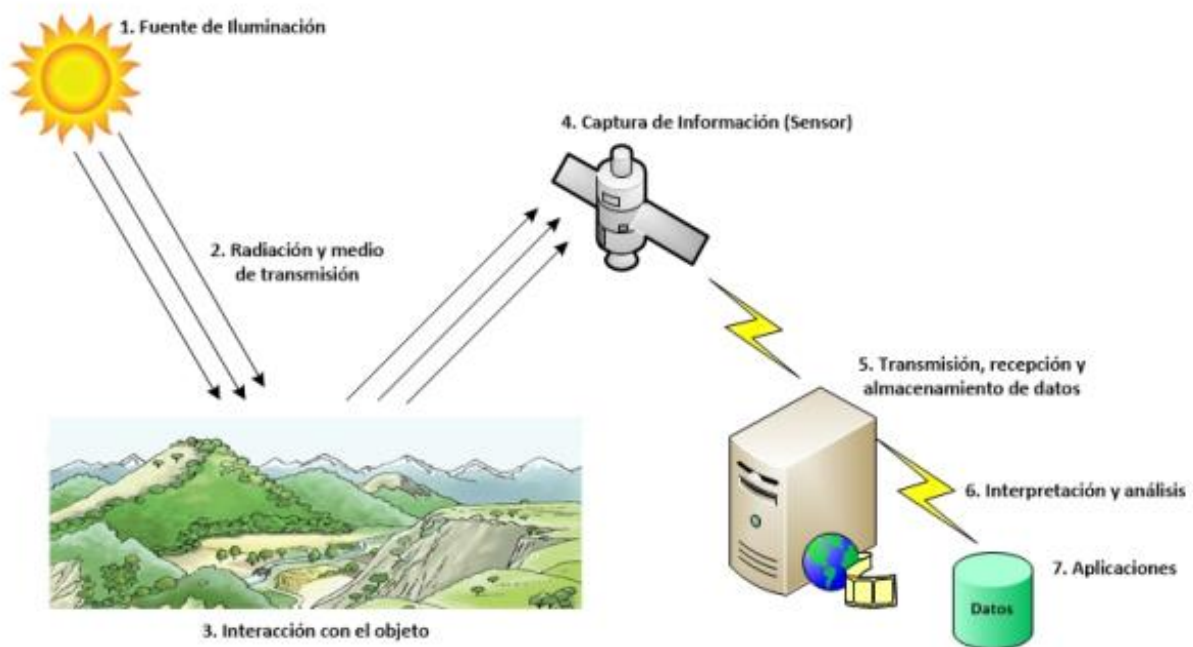


Figura 20. Componentes de los Sistemas de Teledetección. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequia”; Mayra Martínez, 2017.

Según lo argumentado por Martínez (2017), las técnicas de teledetección brindan diversas ventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- I. Según la fuente información y estaciones aeroespaciales (LANDSAT, SENTINEL, QUICKBIRD, MODIS, ASTER, METEOSAT, NOAA, SPOT, IRS, IKONOS, etc.), se dispone de un importante número de imágenes satelitales que permiten realizar predicciones estadísticas de evolución y tendencia de los recursos naturales y demografía.

- II. Permite realizar estudios a nivel atmosférico (radiación recibida y reflejada, temperatura y humedad, agua en sus diferentes estados, viento, ozono, dióxido de carbono, aerosoles, etc.) y a nivel de la superficie terrestre (topografía, humedad, temperatura, oleaje, corrientes marinas, etc.).
- III. Aporta información de manera más exacta, a tiempo real y fiable que los métodos tradicionales de fotogrametría, permitiendo evaluar y determinar el desarrollo y avance de potenciales amenazas naturales.

Los fundamentos físicos de las técnicas de teledetección hacen referencia a la medición de la radiación electromagnética emitida o refleja por los objetos como respuesta a la incidencia de una radiación natural o artificial, por lo que es de vital importancia entender los términos físico base de dichas aplicaciones.

La interacción del medio con los sensores en base a la cantidad de energía (electromagnética) que se emite (por el sensor o de manera natural) con respecto a la cantidad de energía que se absorbe y refleja, es lo que hace posible la caracterización de parámetros físicos en la naturales por medio de los sensores remotos.

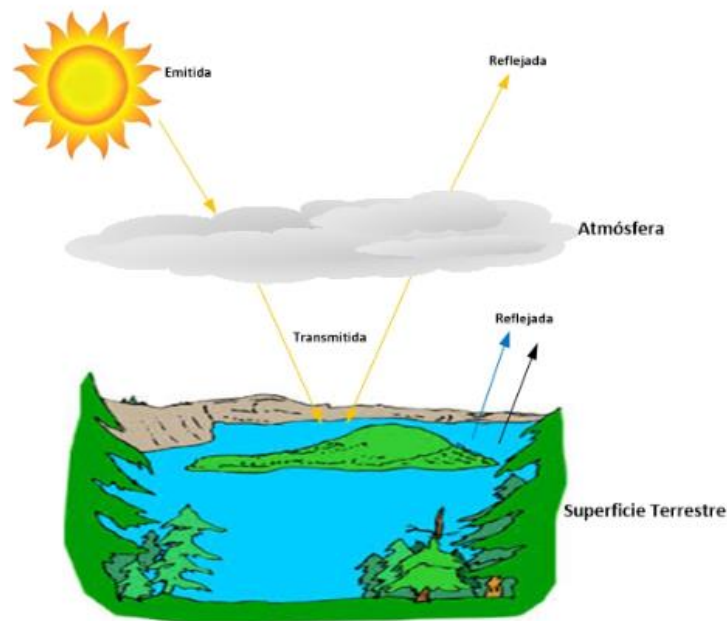


Figura 21. Interacciones básicas entre la energía electromagnética con la atmósfera y superficie terrestre. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequia”; Mayra Martínez, 2017.

8.2.1. Fundamentos Físicos de la Teledetección

I. Espectro Electromagnético

Se define como una distribución energética del conjunto de longitudes de onda, subdividiéndose en grupos de longitudes de onda homogéneas en donde el primer grupo es aquel en que la radiación solar tiene más importancia que la terrestre y el último grupo es aquel donde la radiación terrestre debida al calor de la Tierra es más importante que la solar.

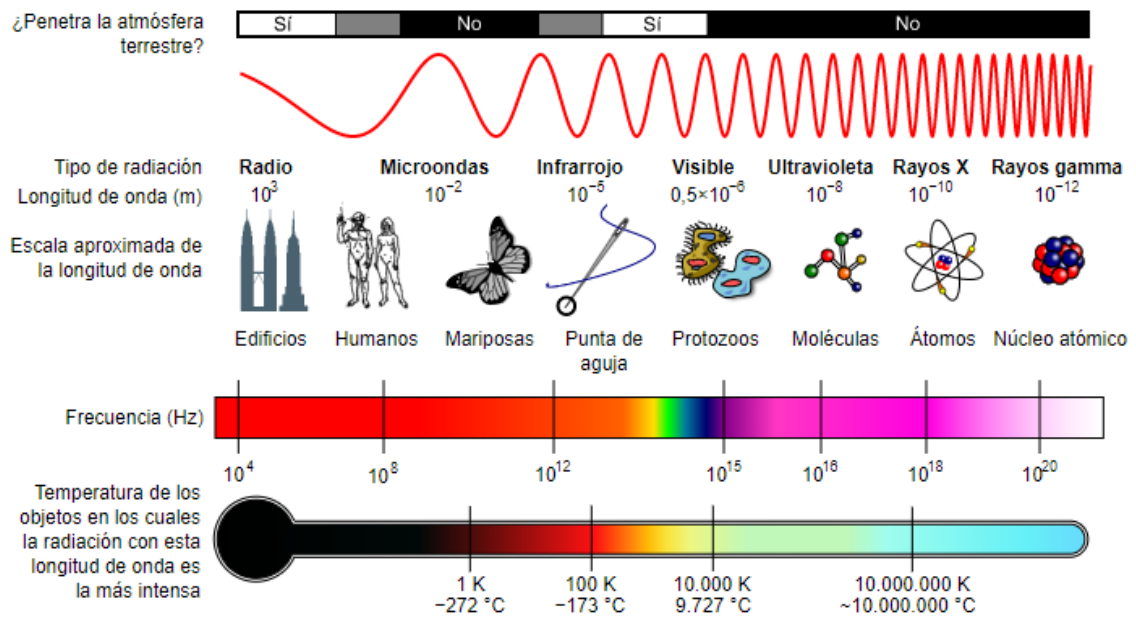


Figura 22. Espectro Electromagnético. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro. Fuente: Adaptado de NASA

II. Radiancia (L)

Flujo radiante (ϕ) que abandona una unidad de área en una dirección particular siguiendo un ángulo sólido particular. Posee unidades de $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$; su importancia recae en que esta es la magnitud energética que detecta el sensor, cuando la radiancia depende de una porción bien definida del espectro electromagnético, se denomina radiancia espectral (L_λ)

$$L = \frac{\phi}{\Omega \cos \theta A} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde θ es el ángulo que forma la dirección el flujo radiante y el vector perpendicular a la superficie receptora de tamaño A.

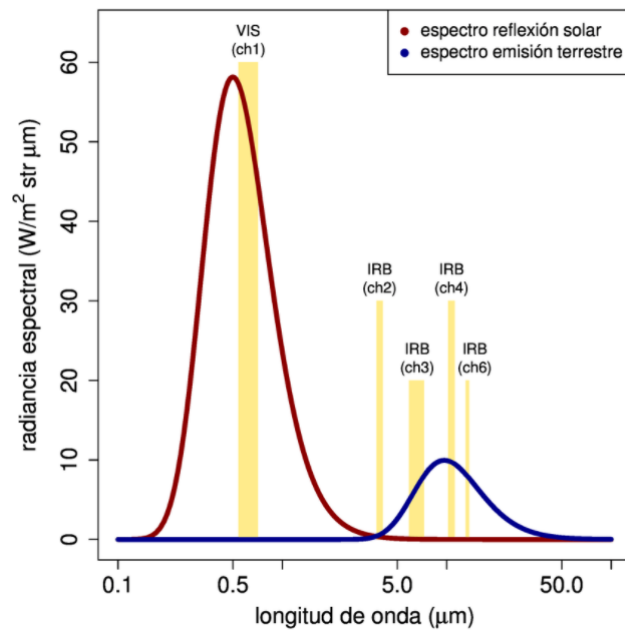


Figura 23. Ejemplo de Cuantificación de Radiancia. Radiancia Espectral solar reflejada y terrestre emitida vista por un satélite. Fuente: Tomado de “Estimación de recurso solar en Uruguay mediante imágenes satelitales”, Rodrigo Alonso Suarez, 2017.

III. Irradiancia (I)

Magnitud que describe la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética, es la cantidad promedio de energía que incide por unidad de tiempo sobre una superficie en unidades radiométricas Wm^{-2} . Si la irradiancia es estimada sobre una longitud de onda en concreto se conoce como Irradiancia Espectral.

$$I = \int Ld\Omega \quad (\text{Ec. 7})$$

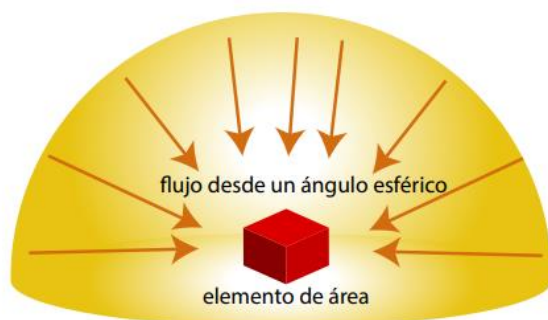


Figura 24. Diagrama de Irradiancia Fuente: CONACyT-SENER, Facultad de Arquitectura UNAM.

IV. Reflectancia (ρ)

Fracción de la Irradiancia que refleja la superficie receptora, se considera una magnitud adimensional y es diferente para cada superficie y cuerpo receptor. El cálculo de la reflectancia se puede efectuar teniendo a consideración una semiesfera superior de superficie (reflectancia hemisférica ρ_h) definida, en donde:

$$\rho_h = \frac{\pi L}{I} \quad (\text{Ec. 8})$$

En donde I es la Irradiancia que llega a la superficie terrestre desde el sol y L la parte energética que abandona la Tierra como Radiancia.

V. Emitancia (M)

Energía emitida por la radiación desde una superficie por unidad de tiempo y de superficie con unidades $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}$ o Wm^{-2} , se habla de emitancia espectral cuando se realiza la estimación sobre una longitud de onda definida, sus unidades cambian a $\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\mu^{-1}$ o $\text{Wm}^{-2}\mu^{-1}$.

$$M = \frac{\varphi}{A} = \frac{Q}{tA} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde φ es el flujo radiante (energía radiante transferida por radiación de una superficie a otra por unidad de tiempo Q/t en unidades Js^{-1} o W) y Q es la energía radiante (energía total radiada por un cuerpo en todas direcciones en unidades Joules).



Figura 25. Relación entre Radiación, Superficie, Reflectancia y Emitancia Fuente: Anónimo.

VI. Absorbancia (α)

Parte de la Irradiancia que absorbe la superficie receptora.

VII. Transmitancia (τ)

Parte de la Irradiancia que transmite la superficie receptora.

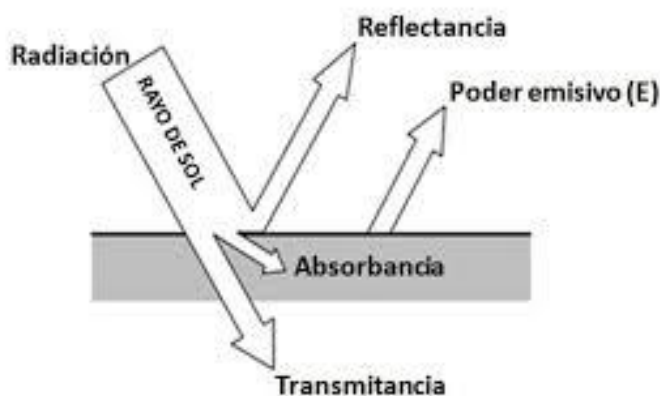


Figura 26. Relación entre Radiación, Superficie, Reflectancia, Emitancia, Absorbancia y Transmitancia. Fuente: Anónimo.

Se aclara que la porción energética (en términos de radiancias) que se refleja desde la superficie de la Tierra hasta el sensor depende de factores como la irradiancia solar (en donde el sol es el principal aporte energético), condiciones atmosféricas y meteorológicas, propiedades singulares en la capacidad de reflectancia del medio y las características del sensor transportado por el satélite.

8.2.2. Sensores Remotos

La Teledetección, se define como el conjunto de aplicaciones, técnicas y procedimientos para la identificación de parámetros biofísicos en el medio, gracias al uso de satélites y sensores orbitando a distancias remotas de la zona de análisis o punto de visión.

Los Sensores Remotos son el instrumento que detecta una señal electromagnética (tanto por radiación reflejada como emitida) debida a la interacción del espectro lumínico, Tierra y atmosfera, para transformarla en una magnitud física que puede ser operable y registrada.

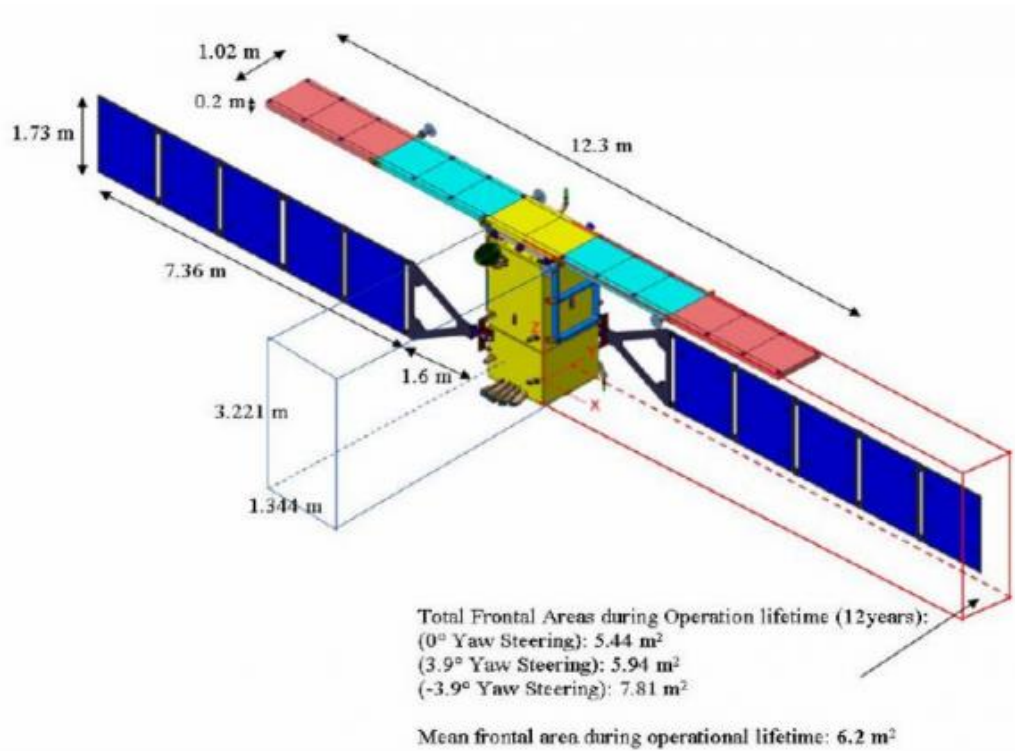


Figura 27. Ejemplo de Composición de un Sensor Remoto. Estructura física de la misión Sentinel 1 (Radar), en donde se muestra el armazón que transporta al sensor de medición. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).

8.2.3. Características de los Sensores Remotos.

Según lo argumentado por Martínez (2017), se menciona que las características espaciales del sensor hacen referencia a la fracción de la superficie terrestre de donde se obtiene información, y lo determinan magnitudes como:

I. Campo de Visión Instantánea.

Depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor y define las dimensiones máximas de la superficie terrestre que pueda observar el sensor. Es expresado en radianes, pero suele utilizar la longitud que forma el ángulo de visión sobre la superficie, coincidente con las dimensiones del píxel.

II. Campo Total de Observación.

Está definido para sensores de barrido (aerotransportables), depende del ángulo de oscilación o rotación del espejo y del tiempo de barrido. Es en términos de la altitud del satélite que se obtiene la longitud de línea del barrido, expresada en metros o kilómetros.

III. Píxel

Determina el tamaño de la muestra, esto se debe a que la señal de salida del detector experimenta un remuestreo a una frecuencia que depende del sistema de adquisición de datos, es decir la velocidad de barrido.

Dentro de esta magnitud, se resalta el termino de “Resolución”, es cual se refiere a una medida de la capacidad que tiene un sistema óptico para distinguir señales espacialmente cercanas o espectralmente similares (en términos de radiancia y reflectancia).

8.2.4. Resolución de Sensor

Como se mencionó anteriormente, el término de “resolución” está relacionado con la capacidad del componente tecnológico para registrar y distinguir información con un determinado nivel de detalle, la cual depende de la capacidad del sensor en identificar y diferenciar variaciones del registro de energía electromagnética, detalle o dimensiones del espacio capturado y el número y ancho de bandas que componen a la toma.

El término de resolución dentro de los sensores remotos se puede subdividir en:

I. Resolución Espectral

Establece el número y ancho de bandas espectrales que el sensor puede detectar al momento de realizar la lectura de la toma. El mayor número de bandas espectrales posible y su menor cercanía dentro del espectro electromagnético (en términos de longitud de onda y frecuencia) garantiza una alta resolución en el muestreo de toma facilitando así la caracterización espectral de los elementos.

II. Resolución Espacial

Está definida por las dimensiones del píxel y se relaciona directamente al nivel de detalle de la imagen; a menor área muestreada por el píxel mayor detalle puede ser revelado en la toma.

III. Resolución Radiométrica

Comprende la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe el sensor en términos de los niveles de grises detectados. A mayor resolución radiométrica mejor será la interpretación de la toma.

El nivel de grises de una toma se rige por la siguiente ecuación:

$$\text{Número de grises} = 2^n \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde n es el número de bit de una imagen.



Figura 28. Variación de escalas de grises en función de la resolución radiométrica. Se observa que, a mayor número de bits, mayor detalle se obtiene. Fuente: Adaptado de Alfa Geomatics, El Salvador.

IV. Resolución Temporal

Es la capacidad de los sensores remotos para generar imágenes de una misma área geográfica en diversos periodos de tiempo, indicando la frecuencia de cobertura y se relaciona con la altura de observación y velocidad de la órbita satelital, así como el campo de visión del sensor.

8.2.5. Tipos de Sensores

En función de la fuente energética que emplea el sensor para detectar el medio (terrestre o atmosférico) se dividen en:

I. Sensores Pasivos

Registran la radiancia reflejada o emitida por la superficie terrestre usando todo el rango espectral, basándose en detectar características reflectantes del medio observado; es decir que el sensor detecta la radiación solar reflejada.

Entre los sensores pasivos se encuentran los fotográficos (cámaras), ópticos electrónicos (exploradores de barrido y empuje, cámaras de vidicon) y de antena (radiómetros de microondas). (Martínez Mena, 2017)

II. Sensores Activos

Se caracterizan por ser ellos mismos los que generan la radiación que miden posterior a la reflexión del medio hacia el sensor, siendo esto una doble función ejecutada debido a que el sensor actúa activamente produciendo un señal o tren de onda electromagnética definida.

El producto generado es una relación entre la señal emitida y la señal reflejada. Entre los sensores activos actuales se mencionan el Radar, el cual trabaja en la región de las microondas y el Lidar, el cual operada con luz polarizada láser (Martínez Mena, 2017).

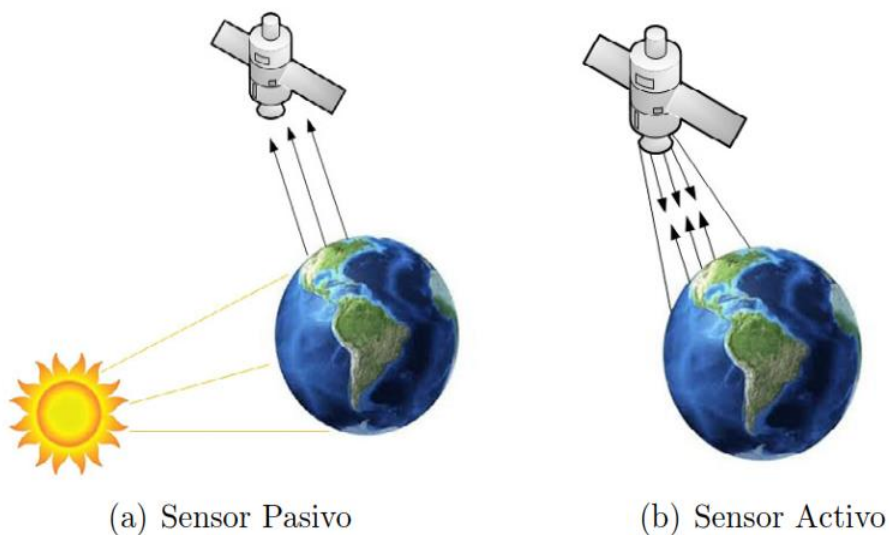


Figura 29. Tipos de Sensores. Fuente: “Detección de Cambios en Reservorios Acuíferos Basados en el Índice Espectral de Sequía”; Mayra Martínez, 2017.

8.3. Sistema de Radar

Según lo descrito por la Agencia Espacial Europea (ESA), el Radar (Radio Detection and Ranging) es un sistema activo que ilumina la superficie terrestre para medir una señal reflejada que describe el medio de dispersión bajo cualquier tipo de condición atmosférica y meteorológica debido a que no depende la luz solar.

Los sistemas de radar mapean la Tierra con señales electromagnéticas de una longitud de onda microonda definida (dentro del espectro electromagnético) brindando información de las propiedades geométricas y dieléctricas de la superficie y volumen estudiado (ESA, 2011), las cuales dependen de propiedades como la rugosidad, tipo de material y contenido de humedad.

Lo importante de estos sistemas es que permiten identificar características no visibles dentro del espectro electromagnético por el ojo humano, una vez el sistema de radar emita una señal de microondas, el equipo mide la potencia con que el objeto refleja la señal obteniendo productos inafectados por condiciones atmosféricas severas y revelando características de la superficie en alta resolución.

8.3.1. Radar de Apertura Sintética (SAR)

El Radar de Apertura Sintética (SAR) es un avanzado sistema de radar que utiliza técnicas de procesamiento de imágenes para sintetizar una antena virtual grande, la cual provee una mayor resolución espacial de apertura real (Lu & Dzurisin, 2014).

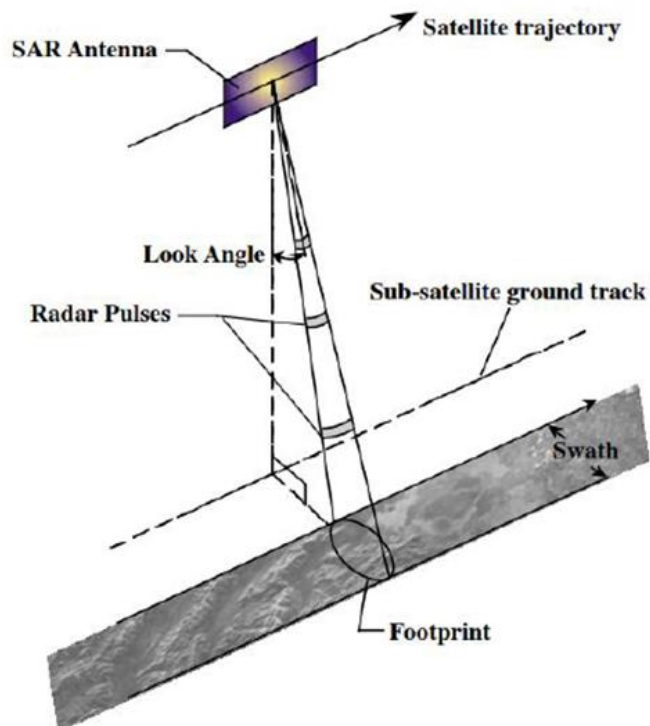


Figura 30. Geometría de adquisición de escenas por un satélite SAR. Fuente: Sandwell, 2011

El SAR posee un sensor de “Radar”, el cual es un sistema de teledetección activo que emite ondas de microondas con frecuencias de entre 1 GHz a 300 GHz, permitiendo realizar tomas que atraviesen nubosidad o condiciones de poca iluminación, así como también realizar tomas en estructuras vegetales y suelo.

Segunda la ESA, este tipo de sistema radar permite obtener imágenes de alta resolución a largas distancia usando microondas y enviando pulsos lateralmente. Es gracias a la oblicuidad de la señal electromagnética que usa el sistema SAR que se devuelve al sensor señales de distintos objetos, en tiempos distintos de la superficie terrestre en forma de ecos.

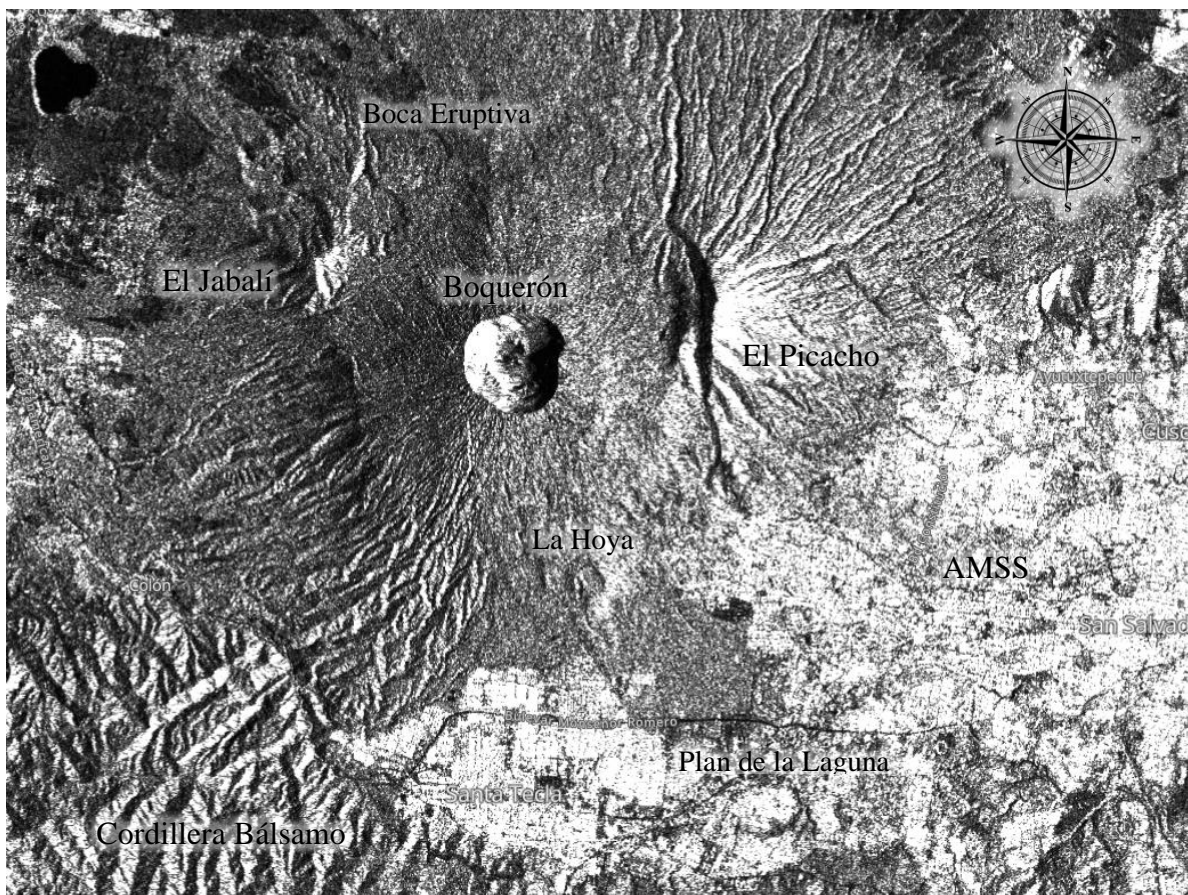


Figura 31. Escena de Imagen radar ortorectificada Sentinel-1 del CVSS. Fuente: Cortesía de visor web EO Browser.

El término “apertura” hace referencia a que el rastro producido en el suelo es inversamente proporcional al tamaño de la antena, por lo que, al ser la antena de pequeño tamaño, las coberturas son amplias y todos los objetos son iluminados por cientos de pulsos electromagnéticos permitiendo determinar pequeños cambios en la corteza.

Según Parker (2016), los satélites SAR viajan en una órbita cuasi-polar del tipo ascendente (Sur-Norte) y descendente (Norte-Sur), realizando barridos en geometría lateral como se ejemplifica en la figura 28 con el propósito de eliminar ambigüedades entre puntos a la izquierda y derecha del satélite. El satélite observa la superficie terrestre con un ángulo oblicuo (aproximadamente de 10° a 50°) para obtener información sobre la línea de visión del sensor.

8.3.2. Características del Radar

La intensidad de reflexión se ve influenciada por las características del radar y el objetivo escaneado por lo que es importante definir algunas características del radar:

I. Longitud de Onda

Los radares de SAR operan dentro de las bandas microondas del espectro electromagnético, las cuales rondan en longitudes de onda (λ) entre 1m a 1mm a frecuencias (f) de 300 MHz a 300 GHz respectivamente.

En función del uso, se presentan los distintos satélites disponibles con información radar en términos de resolución temporal, bandas espectrales, resolución espacial y fechas de funcionamiento.

Tabla 2. Satélites con servicios de Radar. Fuente: Elaboración propia, recuperado de Parker, 2016; adaptado de K. Pineda, 2019

Satélite	Operador	Resolución Temporal (días)	Banda	Resolución Espacial (m)	Fechas de Funcionamiento
ERS 1/2	ESA	35	C	30	1992-2000
ENVISAT	ESA	35	C	10	2002-2012
ALOS	JAXA	46	L	10	2007-2011
SENTINEL-1A	ESA	12	C	5x5	2014-presente
ALOS 2	JAXA	14	L	3-10	2014-presente
TerraSAR-X	DLR	11	X	3	2008-presente
COSMO-SkyMed	ASI	16	X	3x3	2008-presente
RADARSAT 2	CSA	24	C	1x3	2008-presente

Las variaciones de la longitud de onda cambian la interacción entre señal y el medio, siendo esto lo que genera los cambios en la retrodispersión, la penetración de las ondas electromagnéticas es el factor clave para la selección de banda pertinente al motivo de estudio.

Tabla 3. Principales bandas utilizadas en los sistemas SAR. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Silvana Vallejo, 2015

Banda	Frecuencia Mínima	Frecuencia Máxima	λ máxima (cm)	λ mínima (cm)
L	1 GHz	2 GHz	30	15
S	2 GHz	4 GHz	15	7.5
C	4 GHz	8 GHz	7.5	3.75
X	8 GHz	12.4 GHz	3.75	2.42
Ku	12.4 GHz	18 GHz	2.42	1.66
K	18 GHz	26.5 GHz	1.66	11.1
Ka	26.5 GHz	40 GHz	11.1	7.5
mm	40 GHz	300 GHz	7.5	0.1

La longitud de onda es un parámetro de gran importancia debido a que incide directamente en cuanto y como la señal SAR interactúa con el medio. De manera general, la penetración de la señal sobre la vegetación y suelo aumenta cuando mayor sea la longitud de onda.

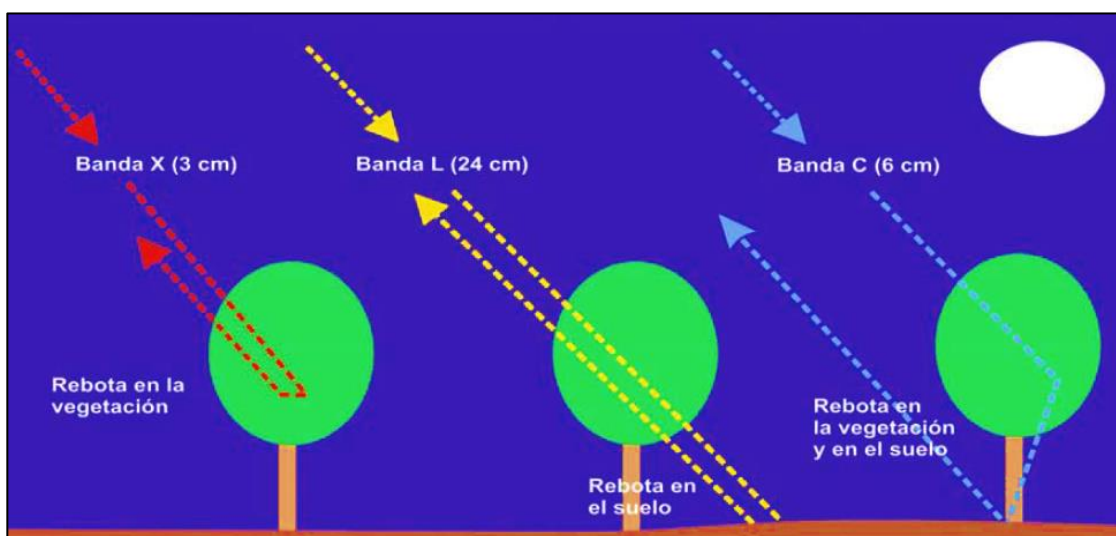


Figura 32. Capacidad de Penetración de las Ondas Radar. Fuente: Extraído del trabajo “Sistemas Radar Aplicados a la Investigación de Subsistencia y Movimientos de Ladera”, 2009.

II. Polarización

Este término hace referencia a la capacidad de las señales electromagnéticas en ser transmitidas y/o recibidas en función de la polaridad de transmisión.

Según lo descrito por Jensen (2009), las ondas electromagnéticas son transversales, es decir que sus vibraciones son perpendiculares a la dirección de propagación de onda.

En un radar, las ondas están polarizadas en un plano tanto vertical como horizontal; según su transmisión y recepción pueden existir las siguientes polaridades:

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

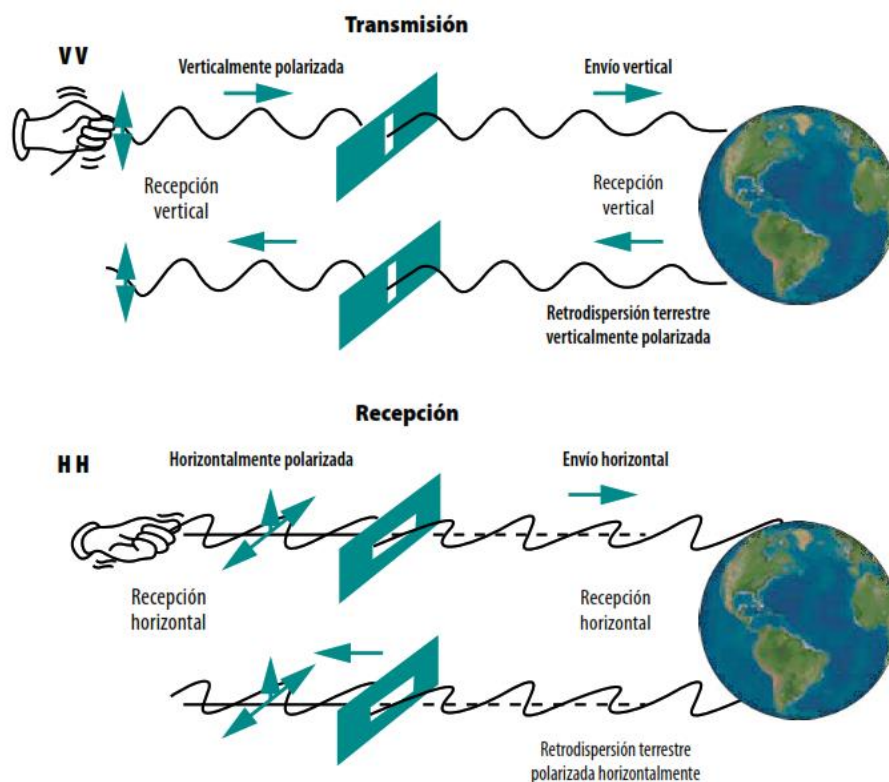


Figura 33. Señales vertical y horizontalmente polarizadas de transmisión (envío) y recepción (retrodispersión). Fuente: Extraído de “Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective”; Jensen, 2009.

Según lo descrito por Fernández Ordoñez, Soria Ruíz, Leblon y otros en el estudio de “Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat 2”; la polarización estudia el uso de múltiples retornos de la señal devuelta o rebotada para inferir información sobre una superficie.

La polarización en instrumentos SAR se define en términos del campo eléctrico (E) denotado por Y el campo magnético (B) denotado por X. Se visualiza en la imagen 32 que tanto E como B están en fase uno con respecto al otro, es decir alcanzan sus máximos y mínimos de forma simultánea, es gracias a ello que existen diferentes combinaciones de polaridad por el SAR, es decir que la transmisión puede ser vertical u horizontal y el retorno horizontal o vertical.

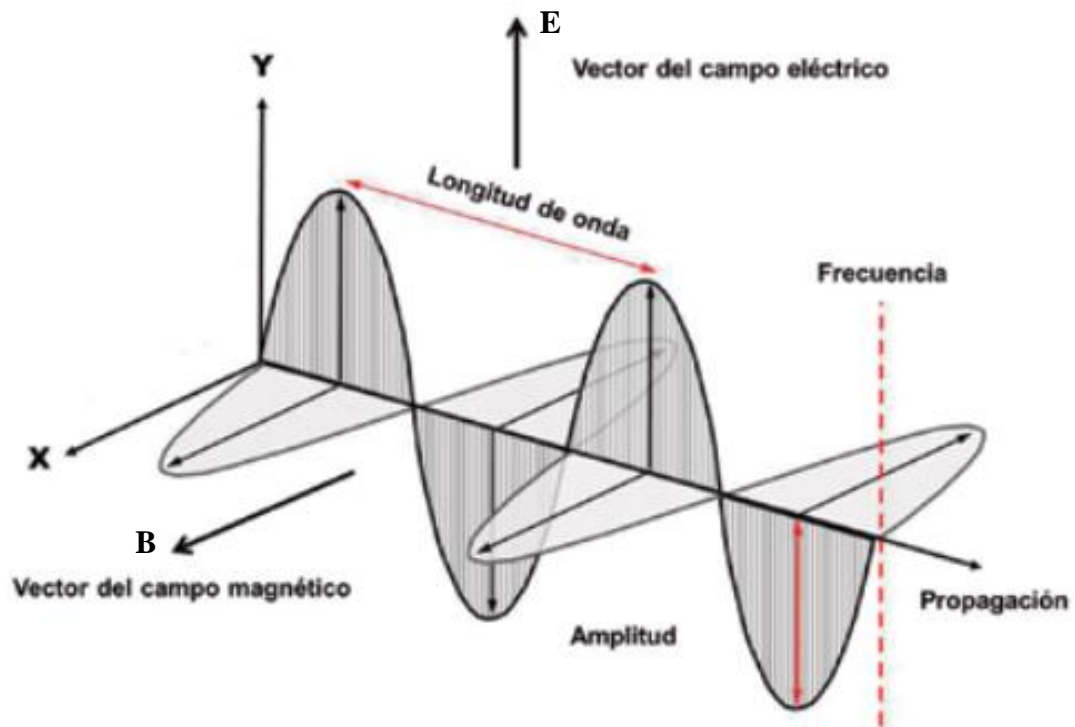


Figura 34. Onda plana linealmente polarizada que se propaga de izquierda a derecha. Fuente: Anónimo, recuperado de “Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat 2”.

Existen sensores que ofrecen polarizaciones simples como las antes descritas y múltiples (dobles y cuádruples en configuración Quad-Pol), las cuales permiten identificar múltiples objetos debido a la diferencia en la intensidad de la señal dispersada.

Tabla 4. Sensores SAR y polaridades disponibles. Fuente: Elaboración propia, adaptado de “Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel 1A y Radarsat 2.

Sensor	Banda	Frecuencia	Polarización
TerraSAR-X	X	12.5 GHz	HH, VV, HV, VH, HH+HV, VV+VH, HH+VV+HV+VH
Sentinel 1	C	5.4 GHz	HH, VV, VV+VH, HH+HV
Radarsat	C	5.4 GHz	HH, VV, HH+HV, VV+VH, HH+VV+HV+VH

III. Angulo de Incidencia

Está definido como el ángulo de incidencia que forma el pulso provocado por el radar y la línea perpendicular a la superficie en el punto de incidencia, los mecanismos de dispersión pueden ocurrir en diferentes direcciones (ángulos) debido a la complejidad propia de la interacción de las microondas sobre la superficie terrestre.

Según ESA (Agencia Espacial Europea, 2007) las señales reflejadas debido a la dispersión de la superficie son normalmente intensas para ángulos de incidencia pequeños y disminuyen con el aumento del ángulo de incidencia.

8.3.3. Características del Objeto

I. Características Geométricas

La interacción entre las ondas emitidas por el sensor de radar y el objetivo de estudio se ven fuertemente influenciados por las variaciones que experimenta el equipo al momento de realizar la toma de datos y por la geometría propia del terreno.

Según lo descrito por Parker (2017), las zonas oscuras y brillantes son el resultado de diferentes propiedades del terreno sobre un rango de ángulos de incidencia.

En relación a lo antes mencionado, se pueden describir tres tipos de dispersión del radar sobre el medio:

- **Especular**

Se da sobre superficies lisas y suscita sobre terrenos planos como carreteras o cuerpos de agua, en dichos casos la energía del pulso electromagnético es muy baja debido a la mayor parte de la energía es reflejada lejos del sensor.

- **Difusa**

Se da sobre superficies rugosas como suelos agrícolas y vegetación, la dispersión energética suscita de forma aleatoria en todas direcciones regresando una parte de dicha energía hacia el sensor (mayor en comparación con las superficies lisas).

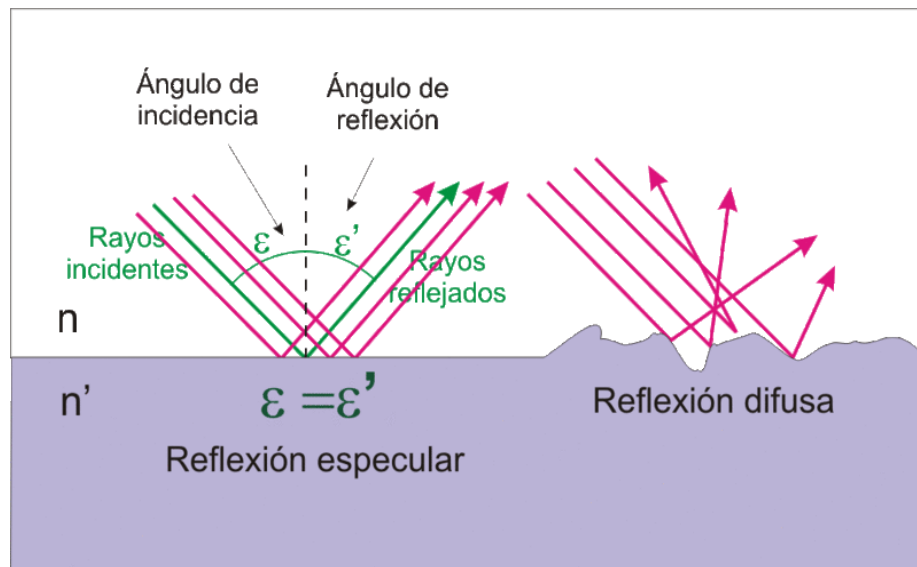


Figura 35. Dispersión o Reflexión Especular y Difusa. Fuente: Anónimo.

- **Doble Rebote**

Suscita sobre estructuras antropogénicas o perpendiculares al punto de mira del sensor, es la reflexión que mayor energía devuelve al sensor debido a que los pulsos electromagnéticos interactúan simultáneamente entre el emisor (objeto) y receptor (sensor).

▪ **Dispersión por Volumen**

Es la dispersión de la señal radar dentro de un volumen o medio y consiste en multiplex rebotes y reflexiones de los diferentes componentes o capas dentro del volumen, puede ocurrir tanto en nieve o vegetación.

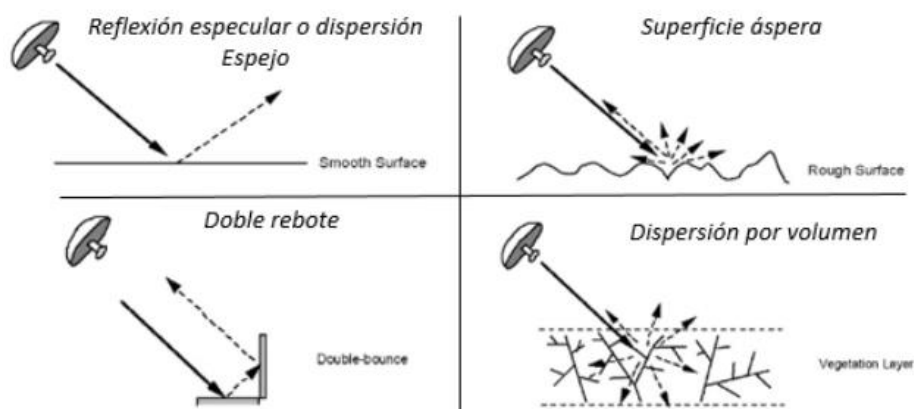


Figura 36. Mecanismos de interacción de la señal por reflexión especular, superficie áspera, doble rebote y de volumen. Fuente. (Podest & NASA, 2018)

II. Constante Dieléctrica

Las propiedades eléctricas del medio interactúan con las propiedades geométricas del mismo, lo que influye en las variaciones de la intensidad de la señal que recibe el sensor.

Este parámetro indica la reflectividad y conductividad de distintos materiales; valores bajos de constante dieléctrica se atribuyen a objetos secos, si la humedad aumenta el valor de la constante dieléctrica aumenta, por ende, la reflectividad también aumenta.

8.4. Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR)

Basado en las tecnologías de detección remota activa, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) se presenta como una metodología novedosa capaz de detectar variaciones en la componente altitudinal de terrenos y desplazamientos en el orden de milímetros para extensiones grandes de la superficie terrestre.

Según Parker (2017) la metodología InSAR tiene la capacidad de capturar la extensión total y complejidad de una zona deformada, permitiendo la medición de dicho parámetro en sitios inaccesibles, remotos o peligrosos, siendo esto una gran ventaja sobre los métodos clásicos de técnicas geodésicas basadas en GPS. Burgmann et al (2000) afirma que mediante la combinación de dos imágenes SAR es posible producir un interferograma capaz de revelar información sobre una tercera dimensión (altura) del área objetivo.

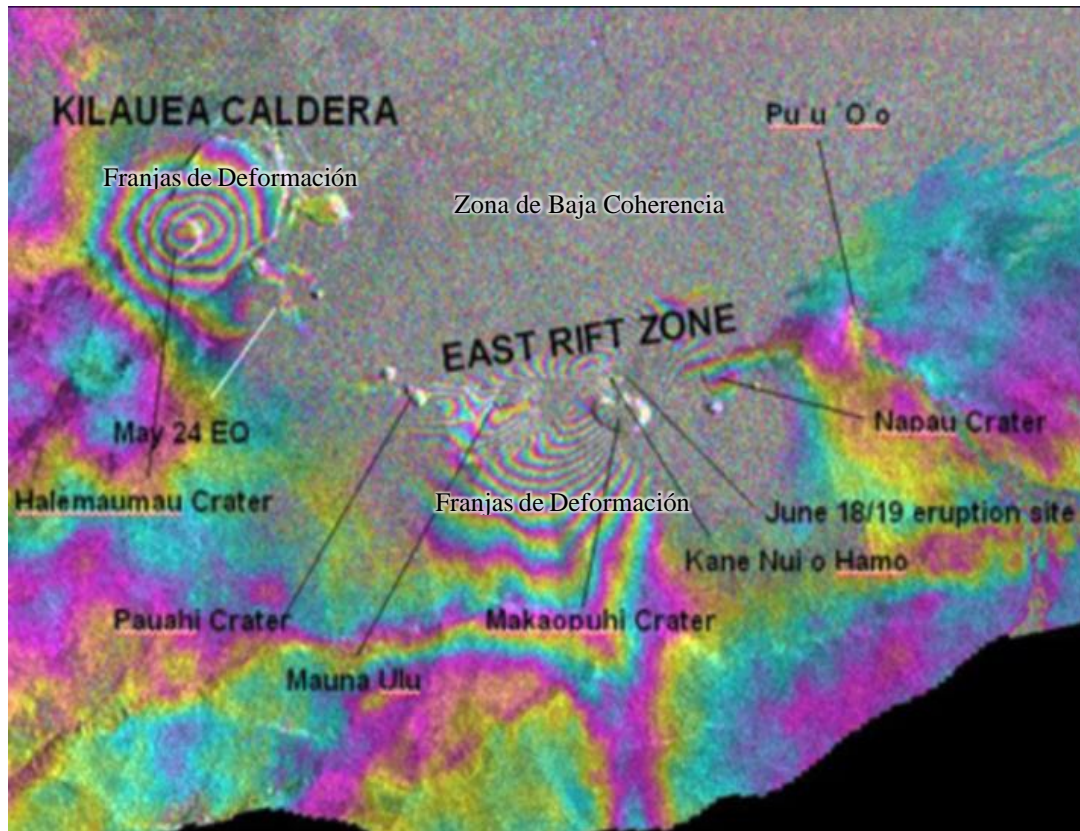


Figura 37. Ejemplo de Interferograma. Se ejemplifica por medio de la interacción de dos escenas radar de distintas fechas como se muestra por medio de un InSAR la propagación de la deformación de la superficie terrestre para los casos de actividad volcánica (Caldera Kilauea, Napau, Makaopuhi, Paushi, Halemaumau) y actividad sísmica (asociado al rift o zona de fallamiento extensional este de la isla); la deformación y su intensidad es distinguible por las franjas de deformación, la zona de baja coherencia hace referencia a sectores en donde los factores de decorrelación de la toma radar afectan la eficiencia de la medición en termino de ruido de la señal electromagnética. Fuente: Agencia Espacial Europea (ESA).

La técnica InSAR permite mediante el uso de imágenes de radar evaluar la tendencia del desplazamiento de la superficie terrestre (Zhou , Chang , & Li, 2009) a partir del análisis del cambio de fase entre dos tomas SAR.

El producto de la interacción de las imágenes radar se conoce como “Interferograma” (figura 35), el cual a partir de una imagen “master” (imagen de referencia temporal primaria, es decir momento inicial) y una imagen “slave” (imagen de referencia temporal secundaria, es decir momento final) que se encuentran alineadas en función de la trayectoria satelital (ascendente o descendente), pixel y área de cobertura forma franjas con valores iguales de fase de onda permitiendo evaluar las condiciones y estado de deformación del terreno.

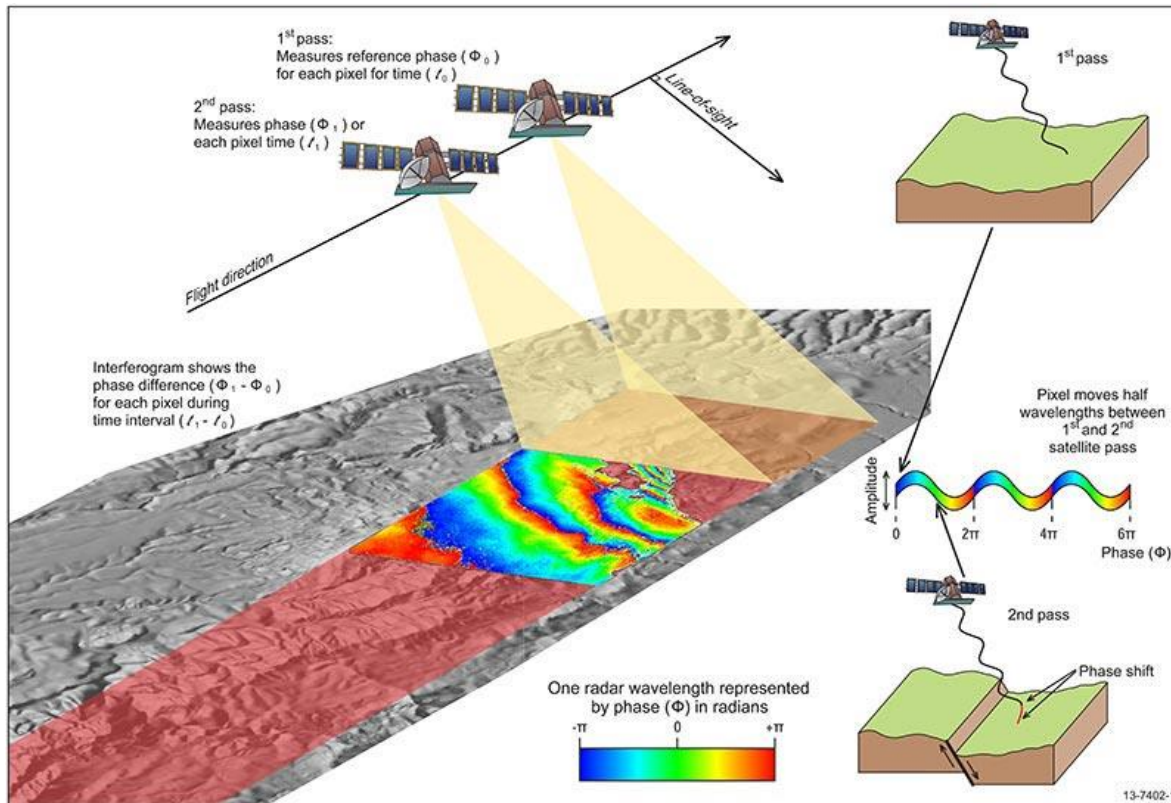


Figura 38. Diagrama Teórico de InSAR. Se muestra de manera ilustrativa que la diferencia de fase entre dos imágenes SAR tomadas en tiempos distintos tienen la capacidad de determinar los cambios en la superficie terrestre gracias a las variaciones en la retrodispersión de medio identificando en la vertical los cambios de las condiciones del terreno en termino de fase de onda. Fuente: Geoscience Australia.

8.4.1. Amplitud y Fase de Onda como Parámetro Base en la Medición InSAR

Los sistemas SAR emiten radiación de microondas coherentes, lo que significa que estas ondas electromagnéticas poseen patrones de radiación sinusoidal con amplitudes entre mínimos y máximos bien definidas, cada longitud de onda corresponde a 2π radianes.

La longitud de onda define la distancia unitaria para cada medición de fase SAR, por tanto, la amplitud es la fuerza de la onda electromagnética dispersada, mientras que la fase es la distancia de onda recorrida.

Hay que aclarar que en InSAR se considera fundamentalmente la fase, siendo ello el número de ciclos de oscilación que la onda efectúa entre el radar y la superficie.

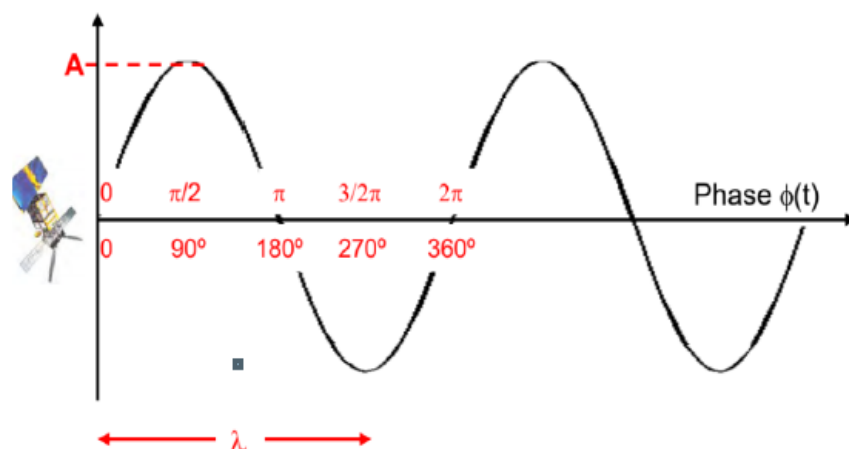


Figura 39. Esquema de onda emitida por el sensor. Fuente: Meyer, 2019

La fase Interferométrica presenta sensibilidad especial a factores como la topografía y desplazamiento, según lo planteado por *Nicolás A. Grunfeld Brook* (Introducción a la Interferometría SAR – NASA), se muestra que:

I. Sensibilidad Topográfica

Propia del InSAR, en donde un mismo objetivo es identificado desde distintas posiciones, se puede asociar la fase Interferométrica a una altura “z” del objetivo monitoreado, a una distancia R del sensor al terreno, distancia perpendicular entre la posición uno y dos del satélite y un ángulo de visión θ asumiendo además que la fase ambos objetivos es la misma tenemos que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin \theta} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\phi = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin \theta} z + \phi_{\text{referencia}} \quad (\text{Ec. 12})$$

II. Sensibilidad al Desplazamiento

Se da cuando se observa un objetivo en dos tiempos distintos, pero en exactamente la misma posición, además supondremos que el objetivo sufre un desplazamiento horizontal, podremos definir el desplazamiento “d” (en la dirección de la vista de radar) como:

$$\phi = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin\theta} z - \frac{4\pi}{\lambda} d + \phi_{referencia} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} d + \phi_{referencia} \quad (\text{Ec. 14})$$

Debido a que el punto o zona de visión es exactamente el mismo en los dos momentos, la sensibilidad topografía es nula; por lo que se obtiene la ecuación de la “Fase Interferométrica” para el cálculo del desplazamiento o deformación superficial del terreno, siendo esto la base de la Interferometría Diferencial de Radar (DInSAR).

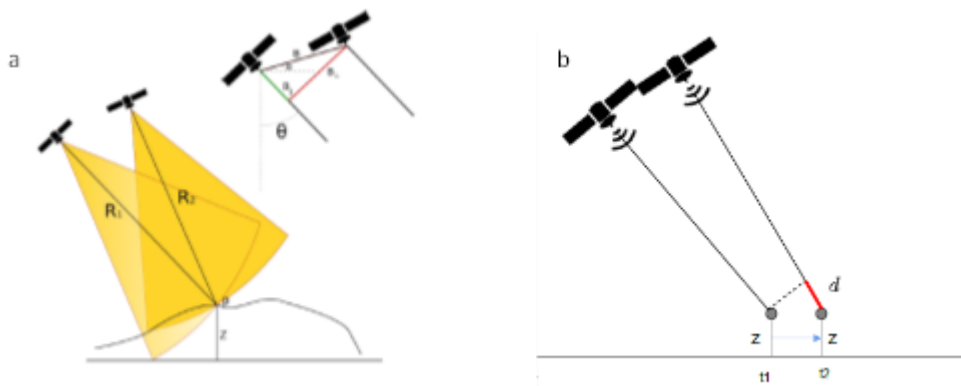


Figura 40. Sensibilidad Topográfica (a) y Sensibilidad por Deslizamiento (b). Fuente: Programa de Entrenamiento para Detección Remota SAR – NASA

Tabla 5. Comparación práctica entre InSAR y DInSAR. Fuente: Elaboración propia, adaptado de “Programa de Entrenamiento para Detección Remota SAR – NASA”

Comparación entre InSAR (Ec. 10) y DInSAR (Ec. 12)		
Sensor	InSAR	DInSAR
Producto	Mapa de Elevaciones (DEM)	Mapa de Desplazamientos
Elección de Tomas	Adquisiciones simultaneas y consecuentes	Adquisición de imágenes que engloben temporalmente el evento a estudiar
Precisión	Metros	Milímetros

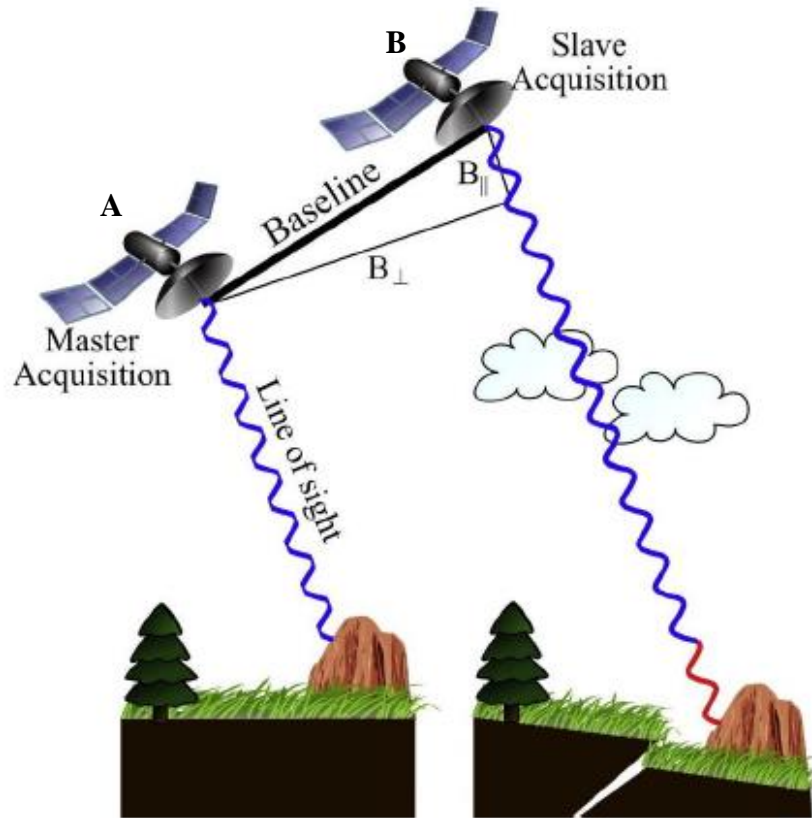


Figura 41. Ilustración que explica la revisita de un satélite para la obtención de un interferograma. La primera captura corresponde la imagen maestra, se muestra la línea de visión y la medición de fase. Utilizando la posición de la segunda adquisición esclava, la línea de base perpendicular (B_{\perp}), paralela (B_{\parallel}) se forma un vector con la suma de ambas líneas de base perpendicular y paralela que definen un valor total de línea de base espacial entre imagen maestra y esclava. La porción roja de la señal representa la diferencia en las mediciones de fase. Fuente: Osmanoglu et al. (2016).

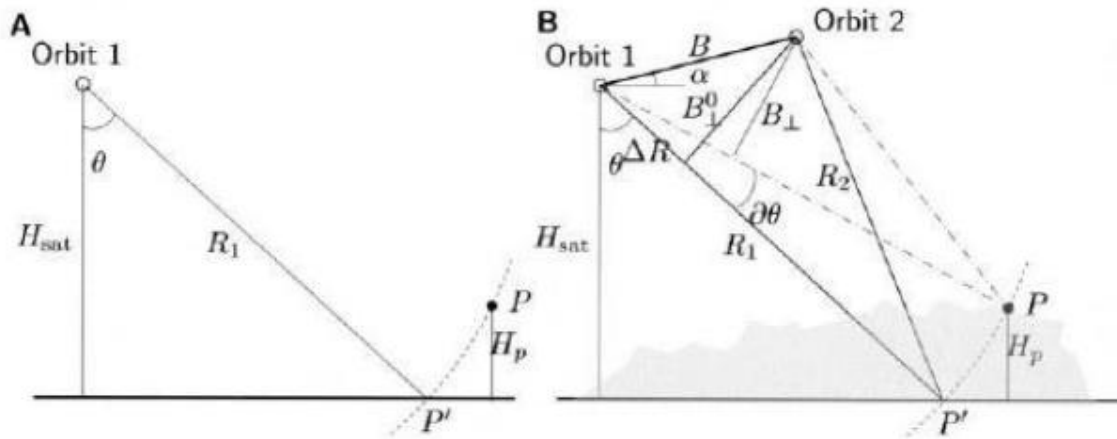


Figura 42. Configuración Geométrica Analítica InSAR. Fuente: Hanssen, 2002.

La amplitud de la onda se relaciona con la forma, orientación y propiedades eléctricas de los objetos, la fase de la onda varía entre 2π y -2π a medida esta se propaga en el aire por cada longitud de onda recorrida.

Esto hace que las mediciones InSAR posean mucha sensibilidad a factores topográficos, desplazamientos, condiciones atmosféricas, separación espacial de los satélites y propiedades eléctricas del suelo; por lo que la señal de fase InSAR corresponde a la suma de las variaciones en los factores mencionados y según el uso algunos pueden clasificarse como ruido.

Ferretti (2001) y Colensanti (2003) describen que la diferencia de la fase interferométrica ($\Delta\phi$) está compuesta por las siguientes contribuciones:

(Ec. 15)

$$\Delta\phi = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{orbit} + \phi_{defo} + \phi_{tropo} + \phi_{iono} + \phi_{scat} + \phi_{noise}$$

- $\Delta\phi$: Diferencia de fase interferométrica
- ϕ_{flat} : Fase de tierra plana
- ϕ_{topo} : Fase topográfica
- ϕ_{orbit} : Fase asociados a imprecisiones en la información de orbita
- ϕ_{defo} : Fase inducido por deformación del suelo
- ϕ_{tropo} : Contribución de fase de la troposfera.
- ϕ_{iono} : Contribución de fase de la ionosfera
- ϕ_{scat} : Contribución fase asociada a las propiedades dieléctricas del terreno.
- ϕ_{noise} : Ruido de la fase

8.4.2. Criterios Fundamentales para la Aplicación DInSAR

Para garantizar una correcta ejecución de la medición DInSAR, se debe de tomar en cuenta dos criterios fundamentales al momento del análisis de los datos.

Estos criterios permiten establecer un umbral de datos validos en términos de eficiencia de medición instrumental.

I. Coherencia

Es la estimación cuantitativa de la precisión y validación de medida en función de la contribución de fase interferométrica entre imágenes de radar y el medio de retrodispersión.

La coherencia es una de las medidas de mayor importancia en InSAR debido que esta metodología funciona solo bajo condiciones coherentes (tamaño de pixel, cantidad admisible de energía reflejada hacia el sensor).

La pérdida de coherencia conocida como “Decorrelación” se define como el ruido de la fase presente en los interferogramas, la cual se subdivide de la siguiente manera:

Ecuación de Valor de Fase (Ferretti et al., 2007)

$$\phi = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R_1 \sin\theta} z - \frac{4\pi}{\lambda} d + \alpha + \eta \quad (\text{Ec. 16})$$

En donde el primer y el segundo termino corresponden a la sensibilidad topográfica y del desplazamiento respectivamente, α es la contribución de fase debida a retrasos en los tiempos de arribos de la onda electromagnética por factores atmosféricos y η las fuentes de ruido compuestas por:

(Ec. 17)

$$\eta = \eta_{\text{Geométrica}} + \eta_{\text{Doppler}} + \eta_{\text{Térmica}} + \eta_{\text{Volumétrica}} + \eta_{\text{Temporal}} + \eta_{\text{Procesamiento}}$$

- **Decorrelación Geométrica:** Causada por la diferencia en los ángulos de incidencia entre adquisiciones.
- **Decorrelación Doppler:** Causada por la diferencia en los centroides Doppler entre adquisiciones.
- **Decorrelación Térmica:** Inherente al sistema (por ejemplo, antenas).
- **Decorrelación Volumétrica:** Causada por la penetración de la onda en un medio dispersivo (banda dependiente).
- **Decorrelación Temporal:** Causada por cambios físicos en el terreno que afectan las características de dispersión (banda dependiente).
- **Decorrelación por Procesamiento:** Corregistración, interpolación, etc.

II. Baseline

Es la distancia perpendicular entre la posición de dos satélites con respecto a un mismo centro de mira que define la precisión de medición.

A menor distancia entra la posición uno y dos del satélite al momento de tomar la imagen de radar, menor decorrelación ejerce este parámetro sobre la medición.

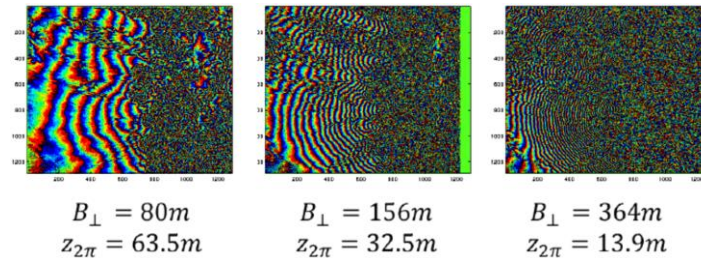


Figura 43. Modelamiento de franjas en función de B_{\perp} . Fuente: Introducción a la Interferometría SAR – NASA.

En donde mayor sea la línea base B_{\perp} más franjas se mostrarán para un mismo salto de alturas, pero mayor decorrelación es visible en el interferograma.

8.4.3. Flujo de Trabajo para la Generación de Interferogramas

El apoyo de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés) en las diferentes aplicaciones de la teledetección, con la constante generación de imágenes satelitales de alta resolución es de gran importancia e impacto para el estudio de la Tierra.

Uno de los productos más destacados desarrollado por ESA, es el software libre “SNAP”, el cual permite el procesamiento de imágenes satelitales generadas por las misiones Sentinel-1 (radar), Sentinel-2 y Sentinel-3 (visible), tanto para aplicaciones clásicas como el álgebra de bandas del espectro visible e infrarrojos, como para el tratamiento de imágenes de radar.

A su vez, debido a que la información base necesaria para la generación de los interferogramas son subproductos de las imágenes de radar generadas por la misión Sentinel-1, existe un flujo de trabajo general para la generación de los mismos en el software SNAP, el cual se muestra a continuación.

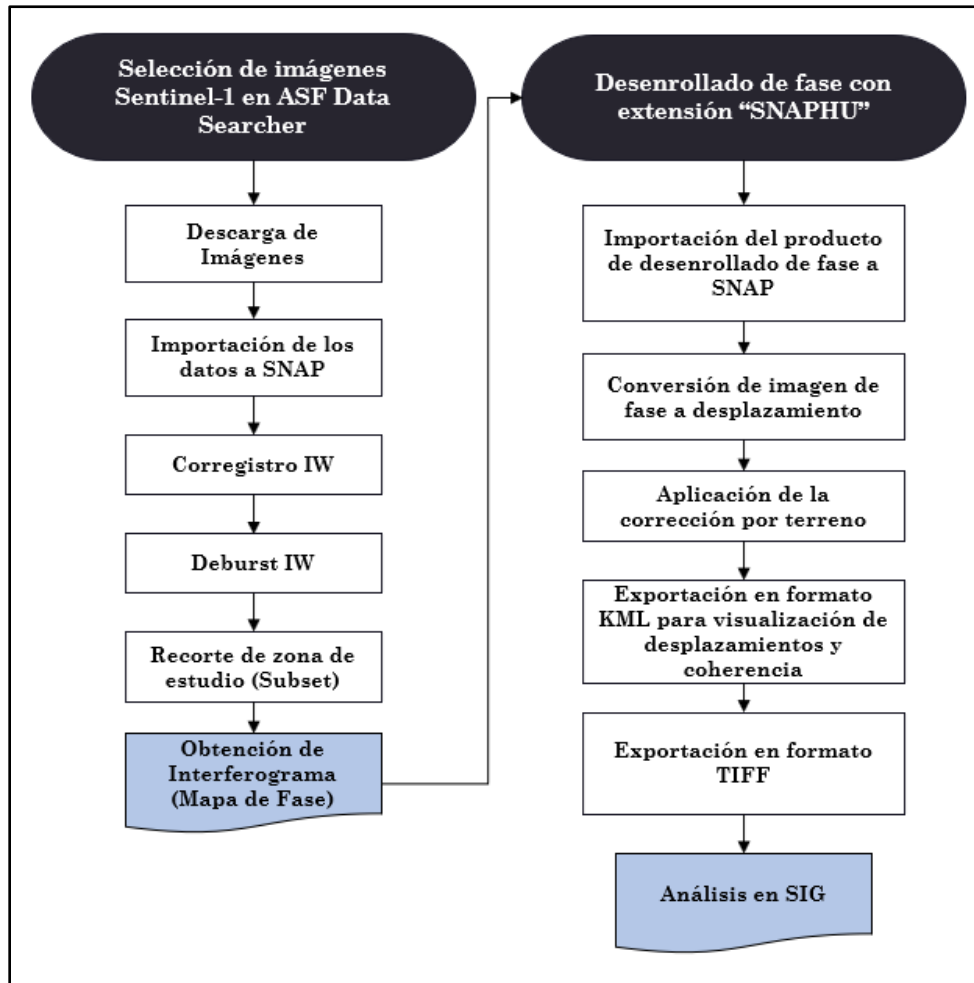


Figura 44. Flujo de Trabajo para la Generación de Interferogramas en SNAP

Fuente: Elaboración Propia.

Se detallan a continuación las definiciones claves en el proceso de generación de un interferograma:

- I. **Selección de las imágenes:** En esta etapa inicial, se selecciona el par de imágenes de radar que conformarán al interferograma según el intervalo temporal y región de interés, descargando las imágenes de radar el formato SCL, para el presente caso la región de interés es el CVSS y sectores aledaños, tomando a consideración las imágenes en trayectoria ascendente, descendente y que no tengas intervalos temporales muy distantes entre la tomas para una evaluación más completa y certera con alta coherencia.

- II. Corregistro de las imágenes:** Es un proceso fundamental el procesamiento de las imágenes de radar, puesto que genera la coincidencia entre los píxeles de las imágenes que componen al interferograma. En esta etapa se selecciona una imagen de referencia (la más antigua) denominada “master” para establecer una relación espacial y temporal con la toma más reciente, denominada “slave”.

El software SNAP permite la obtención de información de referencia como datos orbitales y un modelo de elevación digital con 30 metros de resolución por píxel para efectuar la corrección, eliminando la contribución de la curvatura de la tierra y en donde comúnmente se elige dentro de SNAP la opción MDE SRTM 3sec, generado por la misión espacial Shuttle Radar Topography.

- III. Deburst:** También conocido como “eliminación de ráfagas”, corrige la presencia de líneas de separación entre algunos sectores levantados por la toma satelital, garantizando una visualización continua de todos los elementos capados por el sensor.
- IV. Subset:** Esta opción permite sectorizar la toma satelital en un espacio más específico sobre la región de interés, mejorando notablemente los tiempos de procesamiento según el equipo con el que se cuente.
- V. Remoción de la Fase Topográfica:** Debido a que el principal interés de la interferometría es la de definir el valor de desplazamiento real de la superficie, se sustrae la contribución de la topografía al valor de desplazamiento usando el modelo de elevación digital de MDE SRTM 3sec siempre y cuando que la base perpendicular (base line) entre las imágenes de satélite sea la menor posible.

Finalizado este proceso se obtiene un interferograma diferencial que representa los desplazamientos reales de la corteza.

Es importante mencionar que al haber eliminado la contribución de la curvatura de la Tierra y la fase topografía, falta corregir la contribución por las condiciones atmosféricas (climatológicas) y ruido remanente de la señal, ya sea por factores temporales o falta de precisión en las geometrías receptadas por la retrodispersión. Por lo tanto, para minimizar los factores antes mencionados se hace la aplicación de los siguientes filtros:

A. Filtro de Goldstein: Desarrollado por Goldstein y Wener (1998), permite analizar la imagen de radar por pixel con la finalidad de reducir el ruido de la fase interferométrica a partir de una asignación de valores no lineales para aumentar la coherencia de la imagen.

B. Filtro de Multilooking: Este filtro reduce el ruido a partir de una reducción en el tamaño del pixel original, disminuyendo la resolución espacial, pero proporciona facilidades de interacción para el desenvolvimiento de la fase, obteniendo mejores resultados.

VI. Desenvolvimiento de la Fase: A partir de la variación en la longitud de onda de la señal se permite calcular la fase total del interferograma, la cual es la distancia entre la ida y la vuelta de la señal retrodispersada entre la antena y el objeto, la cual será calculada por la fase almacena más un numero entero de ciclos.

Este proceso se efectúa con la extensión SNAPHU (Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping), el cual ha sido desarrollado por Curtis Chen y Howard Zebker de la Universidad de Stanford.

VII. Conversión de Fase a Desplazamiento: Este proceso permite calcular a partir de la fase interferométrica desenrollada los desplazamientos verticales obtenidos a partir de la diferencia de fase previamente filtrada sobre las regiones de alta coherencia definidas según el interés de la investigación.

VIII. Geocodificación: Este proceso concede referencias geoespaciales para un sistema de coordenadas cartográfico preciso para la región en la que se trabaje.

Esto es posible por medio del uso de un modelo de elevación digital en sistema WGS84 por defecto, exportando finalmente los resultados en formato TIFF o KML.

8.4.4. Análisis de Series Temporales

Debido a la relevancia que esta técnica a presentado, se han elaborado algoritmos para el análisis de series temporales, entre ellos se tiene el PS (Ferreti et al., 2001) y SBAS (Berardino et al., 2002).

Estas técnicas se aplican para detectar o definir la evolución temporal de las deformaciones superficiales permitiendo superar dificultades como los efectos atmosféricos, problemas de la línea base, causas de Decorrelación, aumento de Coherencia y robustez de datos con respecto a posibles errores en los DEM.

Según Garcés Muñoz (2020) las metodologías PS Y SBAS pueden ser definidas como:

I. PS (Persistent Scattering) (Ferreti et al., 2001).

Se basa en la identificación de reflectores puntuales persistentes, como estructuras antropogénicas y rocas, presentando alta coherencia durante el periodo de observación y proporcionando una estimación de desplazamiento puntual para los objetivos detectados como estables.

Debido a esta característica, la técnica PS explota todos los pares interferométricos, esto es, aquellos caracterizados por largas líneas de base.

La principal limitación del enfoque PS está dado por la heterogeneidad de la técnica identificando objetivos sobre áreas con diferentes coberturas de suelo, mayor densidad en zonas urbanas, incluso en áreas con nula vegetación

II. SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002)

Consiste en la combinación de múltiples imágenes, para limitar los efectos de la decorrelación espacial y temporal. Esta técnica permite seguir la evolución del

desplazamiento en el tiempo, para esto los diferentes interferogramas deben estar conectados en el tiempo.

El desplazamiento de la superficie se genera sobre dispersores distribuidos con características homogéneas, tales como áreas de poca vegetación, escombros o áreas desérticas. (Vassileva et al, 2017).

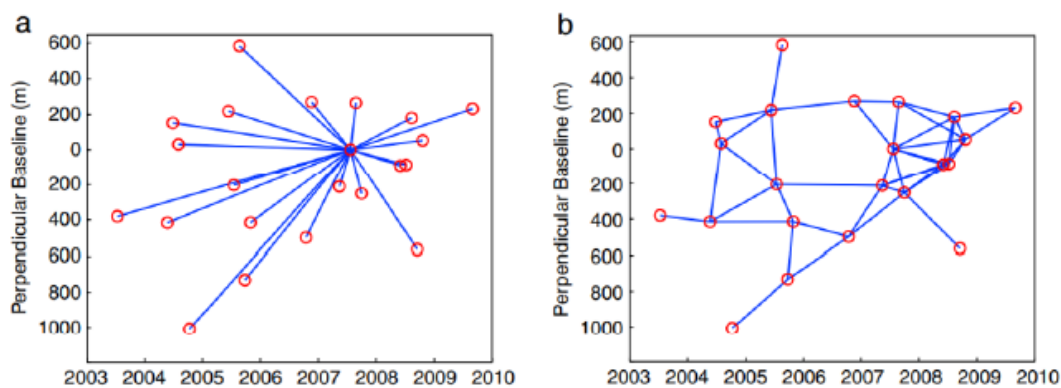


Figura 45. Resultado de enfoque PS (a) y resultado de enfoque SBAS (b) Fuente: Hopper, 2012.

9. RESULTADOS

9.1. Datos Utilizados

Para el desarrollo metodológico de la técnica DInSAR durante esta investigación, se ha trabajado con un set de 550 imágenes de radar de uso libre alojadas en la plataforma ASF Data Searcher de la NASA, las cuales han permitido la generación de 275 InSAR para el período comprendido entre 2017 a 2021, usando flujos de trabajo automatizados en la nube digital del servicio NASA-SARVIEWS.

Esta herramienta web, junto con los procesos de generación y validación de interferogramas utilizando el software de uso libre SNAP desarrollado por la Misión Espacial Europea, ha hecho posible el procesamiento de la base de datos recopilada, la cual es detallada a continuación según la trayectoria satelital de adquisición:

9.1.1. Imágenes Satelitales Obtenidas por Trayectoria Ascendente

Tabla 6. Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración propia.

Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Ascendente					
Mes	Año				
	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	1	2	3	2	3
Febrero	1	3	2	3	2
Marzo	3	2	1	2	3
Abril	2	3	2	3	1
Mayo	3	2	3	2	3
Junio	2	3	2	3	2
Julio	3	2	3	2	3
Agosto	3	3	2	3	2
Septiembre	2	1	3	2	3
Octubre	2	3	2	3	2
Noviembre	1	3	3	2	3
Diciembre	3	2	3	3	2
Total	26	29	29	30	29
Total de InSAR en Trayectoria Ascendente				143	

Se muestra que la sucesión de datos tabulada, tiene como mínimo un interferograma por mes, siendo la moda (estadístico que más se repite) durante todo el periodo de análisis, de tres interferogramas por mes; catalogando a la trayectoria satelital ascendente como base de datos confiable para la formulación de una línea base de deformación con 143 InSAR.

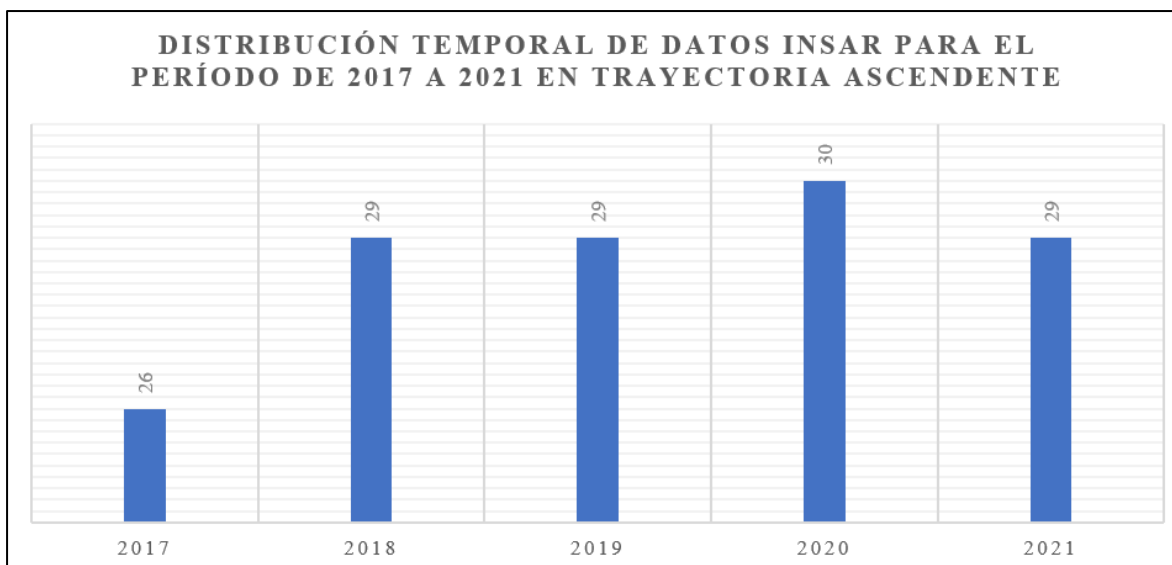


Figura 46. Gráfico de Distribución Anual de InSAR para el Período entre 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente.

Fuente: Elaboración Propia.

Es posible observar en la figura 46, la consistencia en la información recabada por el sensor Sentinel 1, siendo el año de 2017 el que menos información aporta debido a factores ajenos al procesamiento InSAR.

La falta de información puede relacionarse a momentos extraordinarios en donde el sensor no pudo obtener información confiable para la aplicación de DInSAR o a la imposibilidad de acceder a dicha información temporalmente en el servidor web; sin embargo, la trayectoria satelital ascendente se posiciona como una fuente confiable de datos por su consistencia temporal de adquisición para el periodo de interés.

9.1.2. Imágenes Satelitales Obtenidas por Trayectoria Descendente

Tabla 7. Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración propia.

Recuento de Datos InSAR Utilizados para Trayectoria Descendente					
Mes	Año				
	2017	2018	2019	2020	2021
Enero	0	3	2	3	2
Febrero	0	2	3	2	3
Marzo	1	3	2	3	2
Abril	3	2	3	2	1
Mayo	3	3	0	3	1
Junio	2	2	1	2	1
Julio	3	3	2	3	1
Agosto	1	2	3	3	3

Septiembre	3	2	3	2	2
Octubre	2	3	2	3	3
Noviembre	3	2	3	2	2
Diciembre	1	3	2	3	2
Total	22	30	26	31	23
Total de InSAR en Trayectoria Descendente				132	

En contraposición, la trayectoria satelital descendente presenta momentos en donde no ha podido registrar información, sin embargo, la moda sigue manteniendo el valor de 3 InSAR por mes, generando un total de 132 InSAR para el periodo de análisis, pero disminuyendo su eficiencia notoriamente para los años 2017 y 2021.

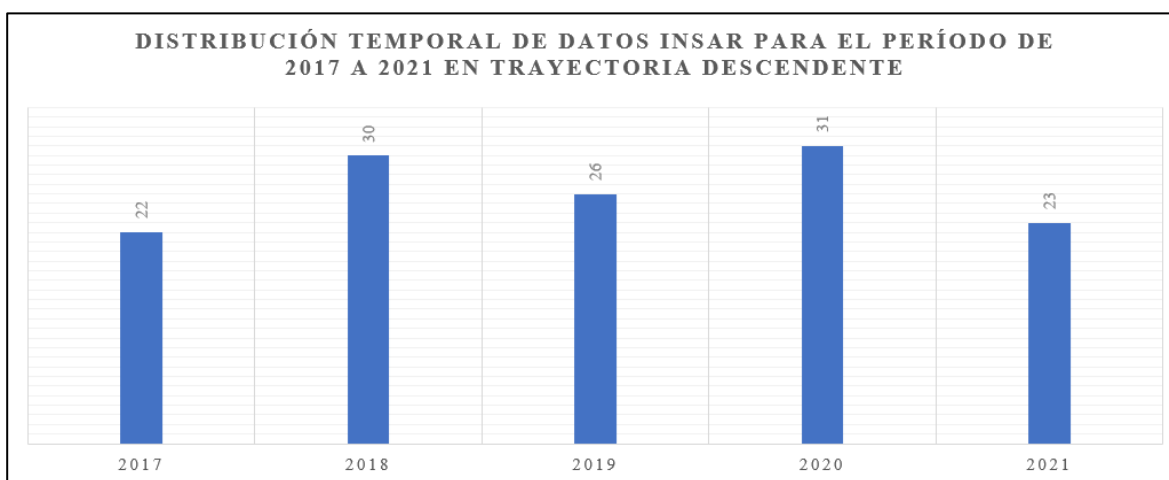


Figura 47. Gráfico de Distribución Anual de InSAR para el Período entre 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente.

Fuente: Elaboración Propia.

Según lo visualizado en la figura 47, a pesar de tener una cantidad importante de datos, se elige tomar como fuente de datos prioritaria la trayectoria satelital ascendente; sin embargo, la trayectoria satelital descendente cumplirá la función de base de datos de correlación y validación.

Esto se debe a que por la naturaleza de la técnica DInSAR, al ser una aplicación de sensoramiento remoto que depende directamente de la línea de visión del sensor, se necesita analizar ambas trayectorias satelitales para inferir de manera más certera sobre el comportamiento de los desplazamientos relativos de la corteza, puesto que esta magnitud dependerá del marco de referencia espacial del cual haya sido tomado el dato.

9.2. Baseline y Distribución Espacial de Coherencia

Como se mencionó con anterioridad en la sección 8.4.2, los criterios fundamentales para la aplicación de la técnica DInSAR permiten delimitar espacialmente la zona de intervención, validar el instrumento de medición y minimizar los factores que pueden ocasionar decorrelación durante el procesamiento de los datos.

9.2.1. Variación del Baseline Según Trayectoria

Con la finalidad de garantizar que esta aplicación metodológica brinde resultados certeros, el primer paso a ejecutar es la revisión del “baseline”, el cual citando a la sección 8.4.2, hace referencia a la distancia perpendicular entre el punto de mira del satélite con respecto a la posición en la que el sensor captura la imagen en un momento x_0 y x_{final} , este último haciendo alusión a la posición que toma el sensor cuando regresa al punto de mira pasado un tiempo t (figura 41).

9.2.1.1. Trayectoria Ascendente

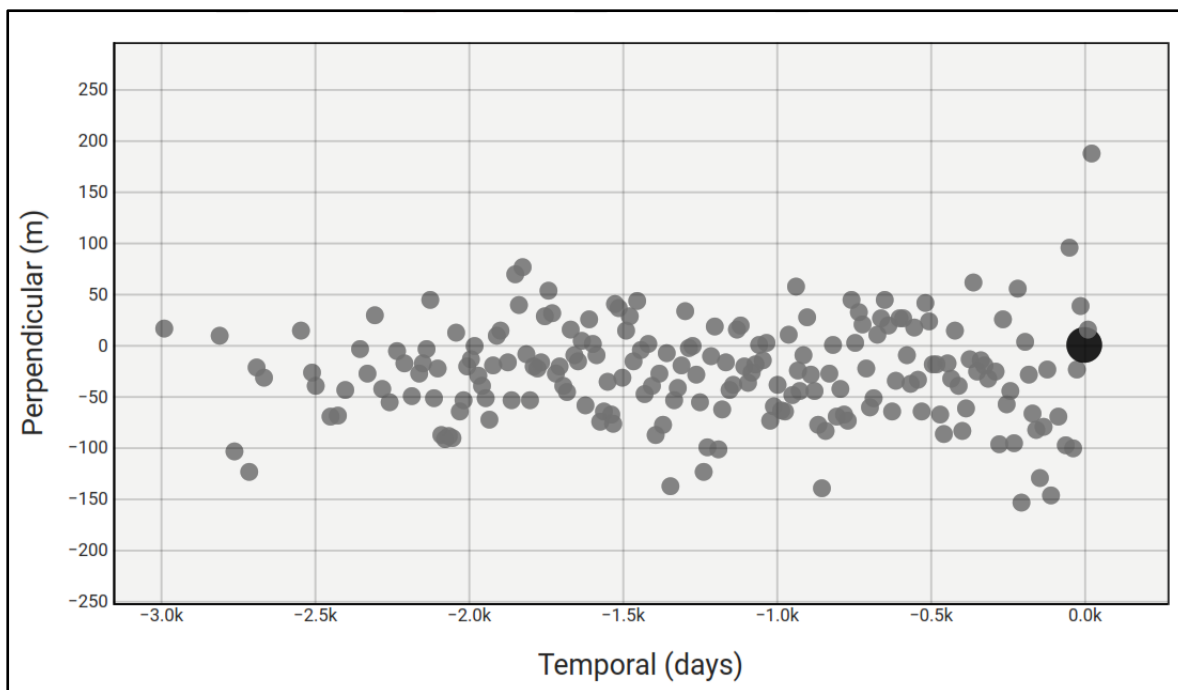


Figura 48. Gráfico de Registro Baseline de InSAR para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente.

Fuente: Tomado de repositorio web ASF DATA Searcher.

Según la literatura de Bürgmann, Rosen, & Fielding (2000), Seppi (2016), entre otros; es recomendado que las imágenes de radar seleccionadas para la generación de interferogramas

ronde el intervalo entre -200 a 200 metros de separación entre el punto de vista del paso 1 y paso 2 del sensor.

Como se puede apreciar en la figura 48, el set de datos del Sentinel-1 en trayectoria ascendente cumple con esta condición, esto se debe a que es un sensor activo que ha sido diseñado específicamente para la vigilancia de los movimientos de tierra, glaciares y contaminación como apoyo a la gestión de desastres naturales, presentando intervalos entre -150 a 100 metros de separación perpendicular, garantizando así una importante base de datos para el procesamiento DInSAR.

9.2.1.2. Trayectoria Descendente

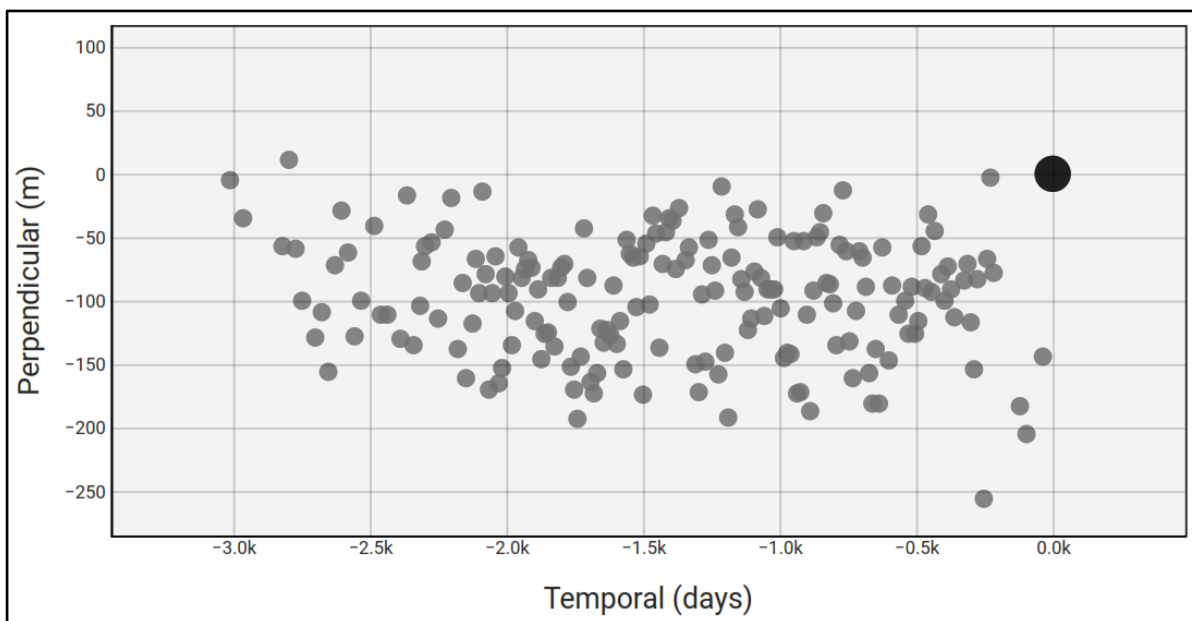


Figura 49. Gráfico de Registro Baseline de InSAR para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente.

Fuente: Tomado de repositorio web ASF DATA Searcher.

Al igual que en la figura 48, la figura 49 muestra inclusive una mejor correlación de los datos con respecto a la forma de adquisición en la trayectoria ascendente, presentando para la trayectoria descendente un intervalo de distancia perpendicular en paso 1 y paso 2 de entre -200 a 10 metros, lo que asegura la funcionalidad de todo el set de datos para los objetivos de esta investigación.

Este parámetro asegura que, aunque la sucesión de tomas de radar en la trayectoria descendente tenga ciertas inconsistencias temporales, esta debe de ser considerada como un

parámetro de comparación y validación obligatorio al momento de analizar la deformación superficial por DInSAR en nuestra región de interés, puesto que los desplazamientos relativos deben de ser evaluados desde cualquier marco de referencia posible por la línea de visión del satélite.

9.2.2. Distribución Espacial de la Coherencia Según su Trayectoria

El factor de coherencia, el cual es un valor adimensional que acumula todos los posibles efectos de decorrelación y delimita el área de aplicación para la técnica DInSAR, presenta resultados significativos para la región de El Salvador (ESA).

Se calcularon mapas del promedio de coherencia para cada año correspondiente al periodo de análisis 2017-2021, obteniendo así estadísticos generales que permiten evaluar y valorar la eficiencia de la técnica DInSAR para la medición de las deformaciones superficiales del terreno y la cobertura que se puede alcanzar con el set de imágenes adquirido.

La finalidad de ello es el de analizar y evaluar por año, como varía en promedio la distribución espacial de la coherencia, permitiendo sectorizar con mayor precisión las regiones en donde se podrá levantar información con baja incertidumbre.

Puesto que durante este proyecto se evalúa la zona competente al CVSS, es necesario analizar también como este factor se distribuye en todo el territorio para conceptualizar primariamente su potencial.

Se mostrarán a continuación los mapas resultantes del promedio aritmético calculado en el software SIG para el periodo comprendido entre 2017 - 2021 en trayectoria ascendente y descendente, tanto para ESA como para el CVSS; exponiendo los correspondientes a 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 en la sección 10.1.1 de discusión y análisis de resultados.

9.2.2.1. Trayectoria Ascendente

Como primeros resultados importantes, mediante el uso de los sistemas de información geográfica (SIG), se calcularon mapas del promedio entre 2017 – 2021 de coherencia sobre la zona de influencia del CVSS y ESA usando la herramienta “álgebra de mapas”, la cual permite realizar operaciones aritméticas sobre cada pixel que compone la imagen satelital.

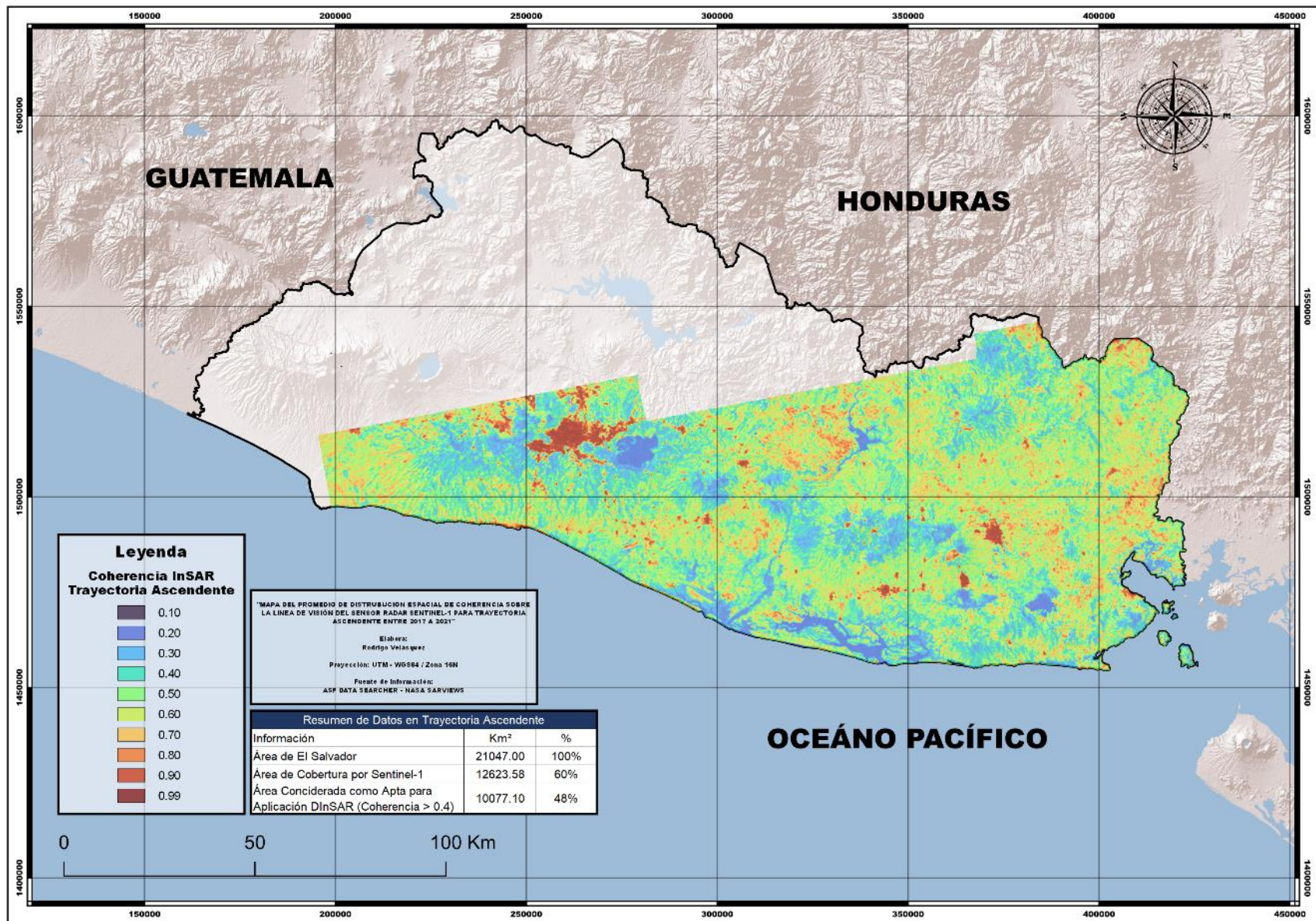


Figura 50. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en El Salvador para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

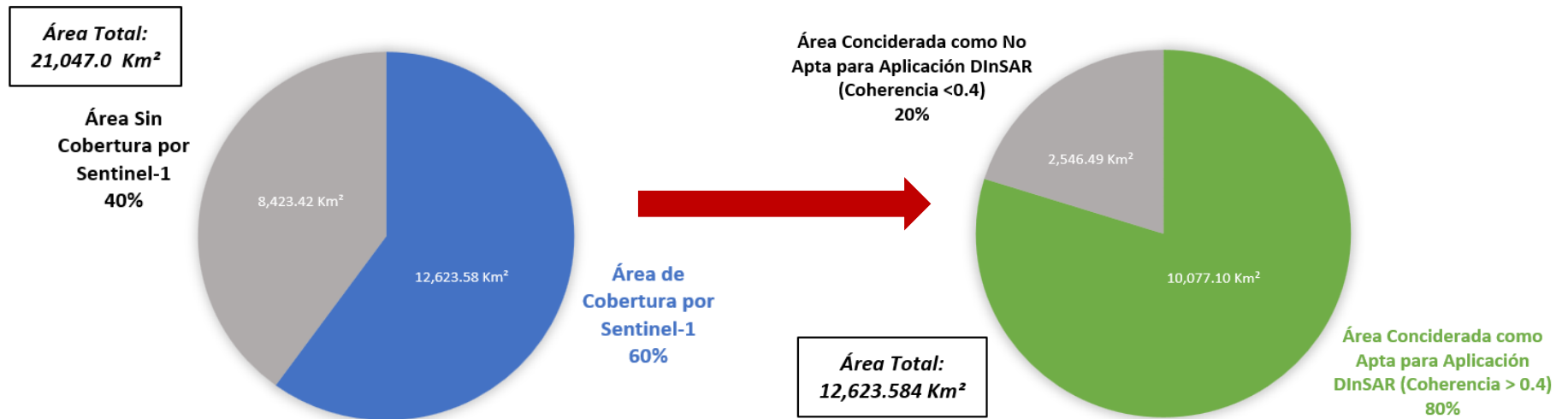


Figura 51. Estadísticos de la Distribución de Coherencia para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente para El Salvador y Área Considerada como Apta para Aplicación de DInSAR con Coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que bajo la línea de visión del sensor radar Sentinel-1 en trayectoria ascendente para el periodo de 2017 – 2021, se tiene la capacidad de barrer el territorio salvadoreño en un 60% de su extensión total, es decir 12,628.58 Km² aproximadamente.

Del área antes mencionada, según los parámetros establecidos para la ejecución de la propuesta metodológica, se considera como área apta para la aplicación de la técnica DInSAR un total de 10,077.10 Km², por lo que es posible realizar mediciones de la deformación en un 80% de la línea de visión del Sentinel-1 con una coherencia mayor al 0.4, lo que equivale el 47.89% de la extensión total del país.

En resumen, con tan solo la trayectoria satelital ascendente es posible levantar información en casi toda la cordillera volcánica y zonas de fallas responsables de generar deformaciones en el país, teniendo a excepción la región noroccidental para el presente caso.

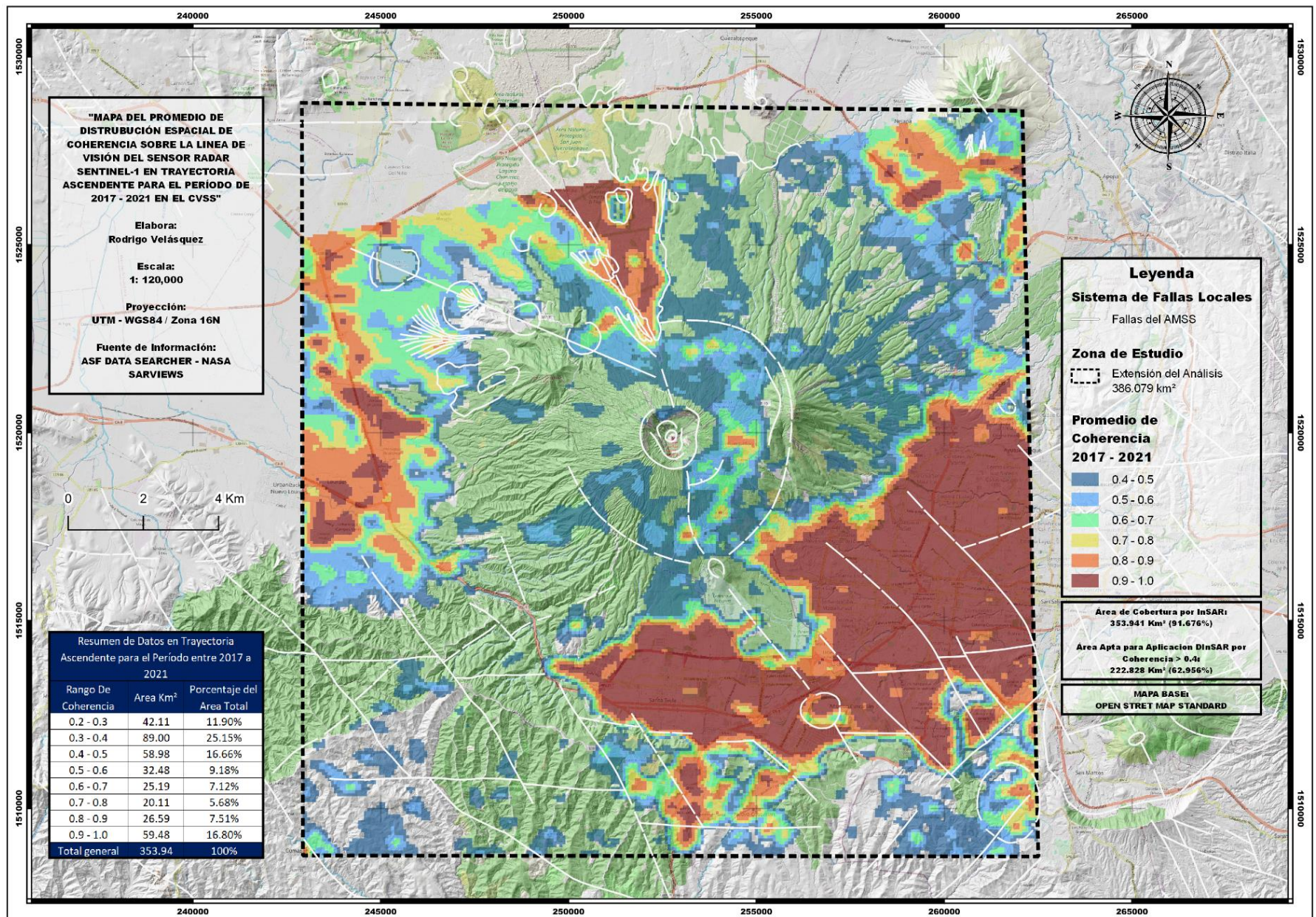


Figura 52. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en el CVSS para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

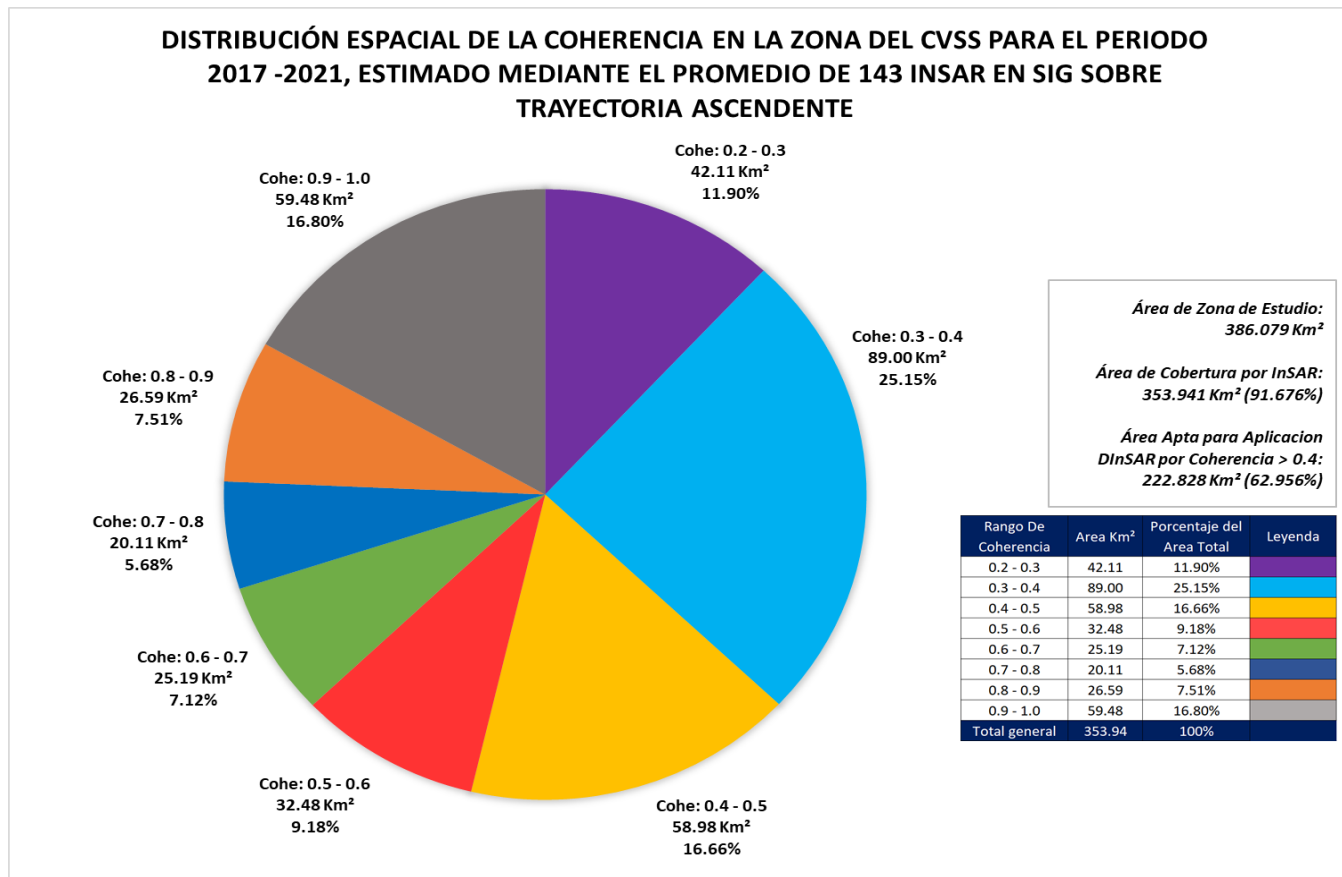


Figura 53. Estadísticos de la Distribución de Coherencia Promedio para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Ascendente para el CVSS.

Fuente: Elaboración Propia.

Es importante observar que en la región del CVSS, el radar logra una cobertura de hasta un 91.676% de la zona de estudio, siendo el área óptima para la aplicación de la técnica DInSAR de un 62.956%, es decir 222.828 Km² con una coherencia mayor al 0.4.

Este resultado demuestra que para el periodo de 2017 - 2021, si es factible generar un monitoreo de deformaciones sobre la zona de fracturas del volcán aplicando DInSAR, sin embargo, es fundamental la correcta distribución de los puntos de monitoreo para aprovechar al máximo la información contenida en los InSAR y evitar así la acumulación de errores para generar modelos espaciales certeros.

9.2.2.2. Trayectoria Descendente

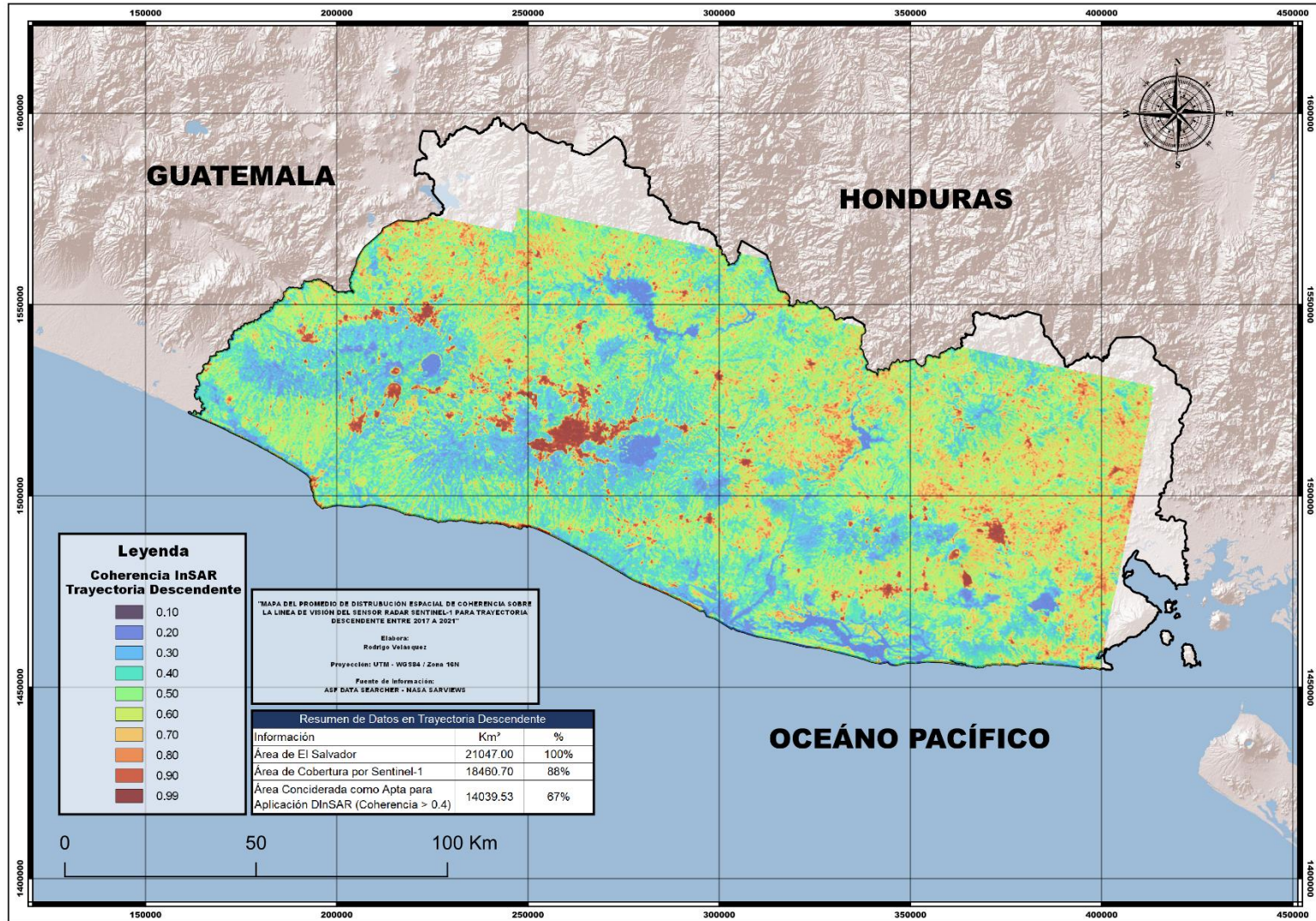


Figura 54. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en El Salvador para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración

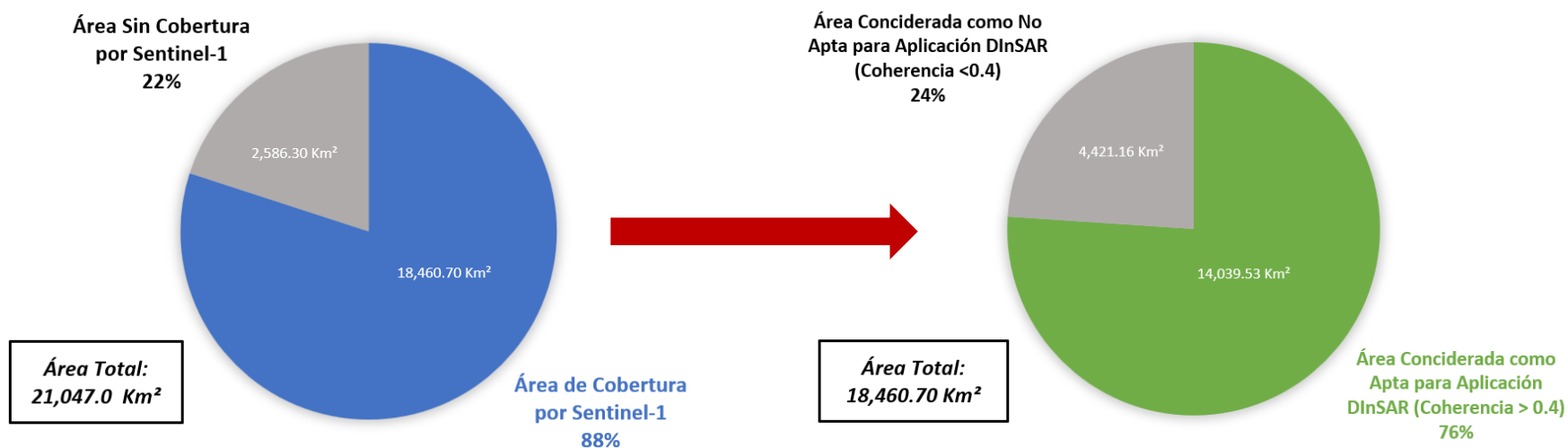


Figura 55. Estadísticos de la Distribución de Coherencia para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente para El Salvador y Área Considerada como Apta para Aplicación de DInSAR con Coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que bajo la línea de visión del sensor radar Sentinel-1 en trayectoria descendente para el periodo de 2017 – 2021, se tiene la capacidad de barrer el territorio salvadoreño en un 88% de su extensión total, es decir 18,460.70 Km² aproximadamente.

Del área antes mencionada, según los parámetros establecidos para la ejecución de la propuesta metodológica, se considera como área apta para la aplicación de la técnica DInSAR un total de 14,039.53 Km², por lo que es posible realizar mediciones de la deformación en un 76% de la línea de visión del Sentinel-1 con una coherencia mayor al 0.4, lo que equivale el 66.71% de la extensión total del país.

En resumen, con la trayectoria satelital descendente es posible levantar información en un 30% más área que en la trayectoria ascendente, sin embargo, en función de áreas aptas según coherencia mayor a 0.4, la cobertura es aproximadamente igual y consistente entre trayectorias (80% en trayectoria ascendente y 76% en trayectoria descendente), por lo que ambos sets de imágenes son complementarios entre sí, brindando información confiable desde diferentes marcos referenciales para validar con solidez las mediciones sobre el CVSS.

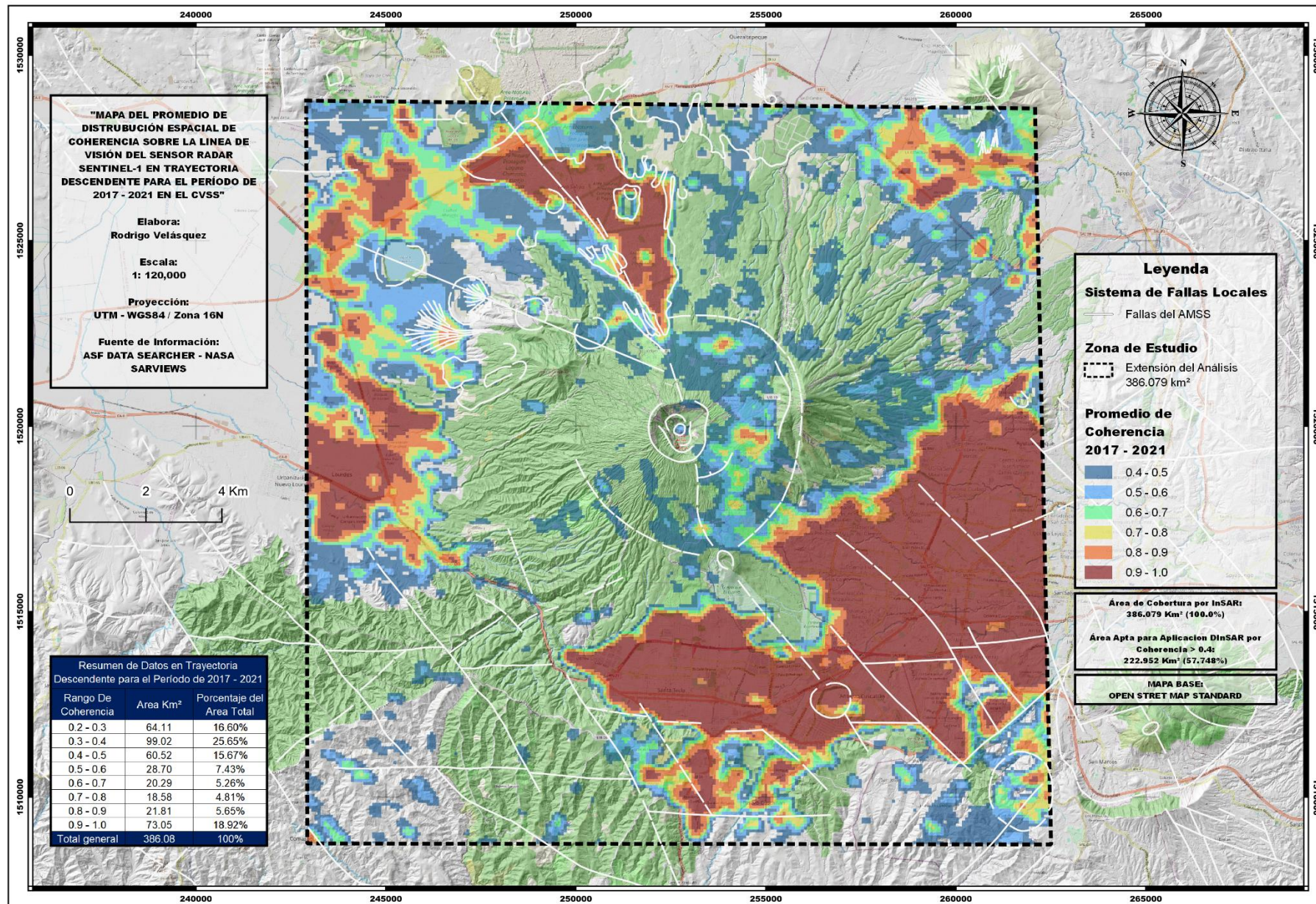


Figura 56. Mapa del Promedio de Distribución de Coherencia en el CVSS para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.

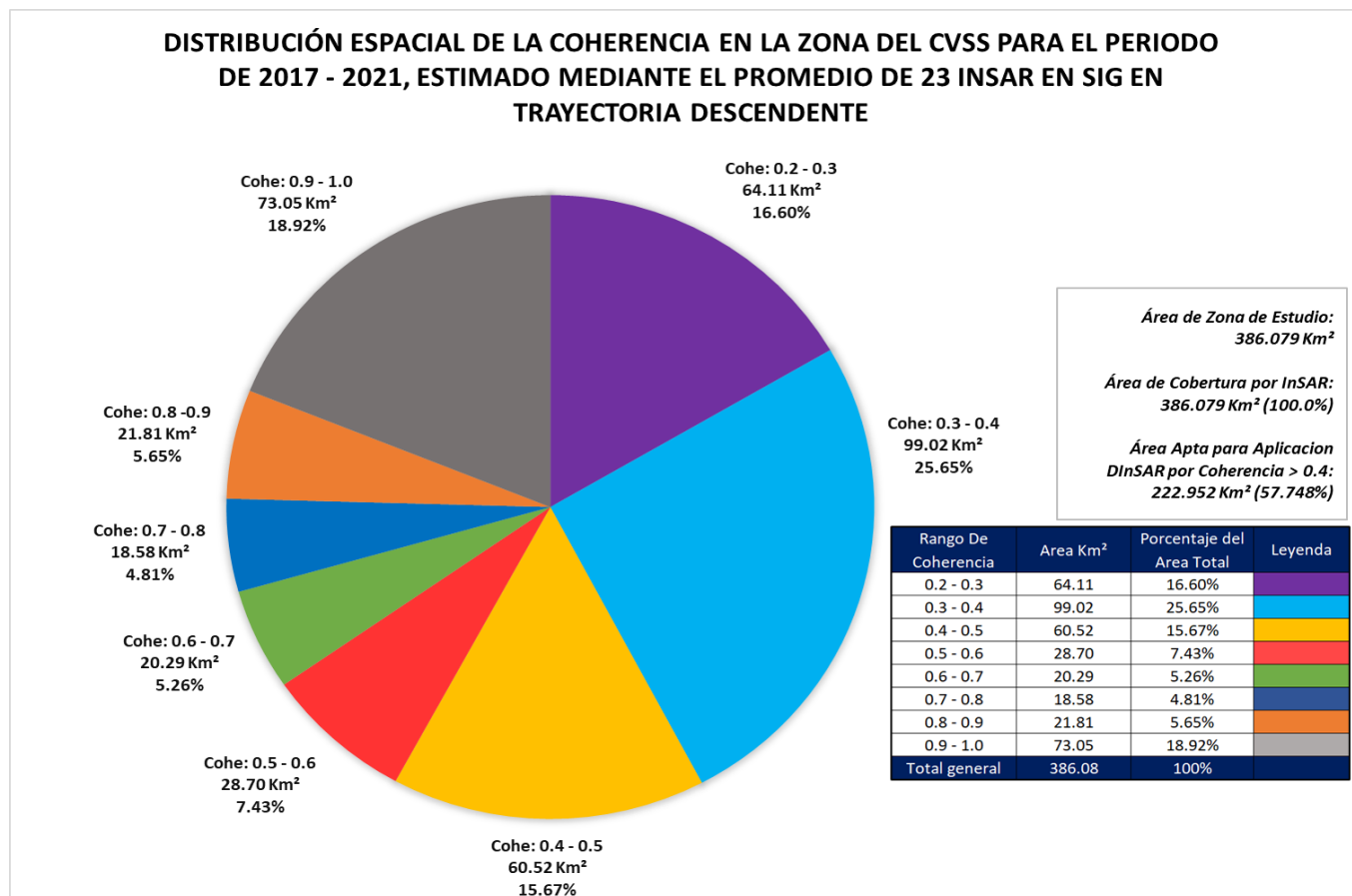


Figura 57. Estadísticos de la Distribución de Coherencia Promedio para el Período de 2017 a 2021 en Trayectoria Descendente para el CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que en la región del CVSS, el radar recubre en un 100% de la zona de estudio, siendo el área óptima para la aplicación de la técnica DInSAR un total 222.952 Km² con coherencia mayor al 0.4, es decir un 57.748% del área total de estudio.

Este resultado demuestra que para el periodo de 2017 - 2021, si es factible generar un monitoreo de deformaciones sobre la zona de fracturas del volcán aplicando DInSAR, y que la región de cobertura entre trayectorias según coherencia mayor a 0.4 es aproximadamente igual (222.828 Km² en trayectoria ascendente y 222.952 Km² en trayectoria descendente) por lo que deben analizarse simultáneamente.

9.3. Levantamiento de Reflectores Puntuales para el Monitoreo de Deformación

Una vez establecida la factibilidad para la aplicación de la técnica DInSAR sobre la zona del CVSS mediante los parámetros de Baseline y Coherencia, se procedió a realizar el levantamiento de reflectores puntuales o puntos de monitoreo de forma remota sobre la región de cobertura por coherencia mayor a 0.4, tomando en cuenta las siguientes consideraciones.

9.3.1. Consideraciones para el Levantamiento de Puntos de Control

1. La zona designada para la colocación de un punto de control (PC) no debe de encontrarse recubierta por vegetación muy densa, puesto que en la zona del CVSS la vegetación es el factor de decorrelación dominante.
2. Colocar como puntos de referencia, la ubicación de posibles estaciones GPS de medición continua para correlacionar datos en las etapas de análisis y medir sobre los mismos por DInSAR.
3. No colocar PC sobre cuerpos de agua ni copa de árboles, puede hacerse una medición sobre techos, tanques de agua, silos, antenas y similares si la región de cobertura por coherencia es irregular o muy dispersa.
4. No asignar puntos de control a sectores que no presenten convergencia en el factor de decorrelación entre trayectorias satelitales; de hacerlo, justificarlo con estadística.
5. Los PC deben de ubicarse sobre zonas reflectantes fijas y permanentes, es decir sobre estructuras que no cambien constantemente su ubicación, como por ejemplo sobre estructura gris vital, calles, terrenos baldíos, terrenos sin vegetación o con vegetación dispersa, etc.
6. Tomar a consideración que los PC ubicados en laderas muy pronunciadas pueden presentar baja coherencia debido a desplazamientos relativamente rápidos que el sensor registre como errores temporales y geométricos, por lo que debe tomarse en cuenta al momento de analizar dicho punto.
7. Si la finalidad del levantamiento es generar modelos espaciales mediante interpolación, asegurar un sentido de proximidad entre puntos, puesto que los modelos de interpolación como el Kriging e IDW aumentan su incerteza cuanto los PC se encuentran muy distantes entre sí.

Citando la explicación de la figura 57, se tiene la ventaja que la cobertura por coherencia mayor a 0.4 es aproximadamente igual en ambas trayectorias desde un punto de vista global, sin embargo, al levantar información, es posible observar cómo ciertos sectores en específico no van a converger entre trayectoria, por lo que es de vital importancia desde un aspecto metodológico seguir las consideraciones antes citadas.

De manera breve e ilustrativa se muestra el proceso seguido en software SIG para el levantamiento de los puntos de control, atendiendo a las consideraciones previamente listadas:

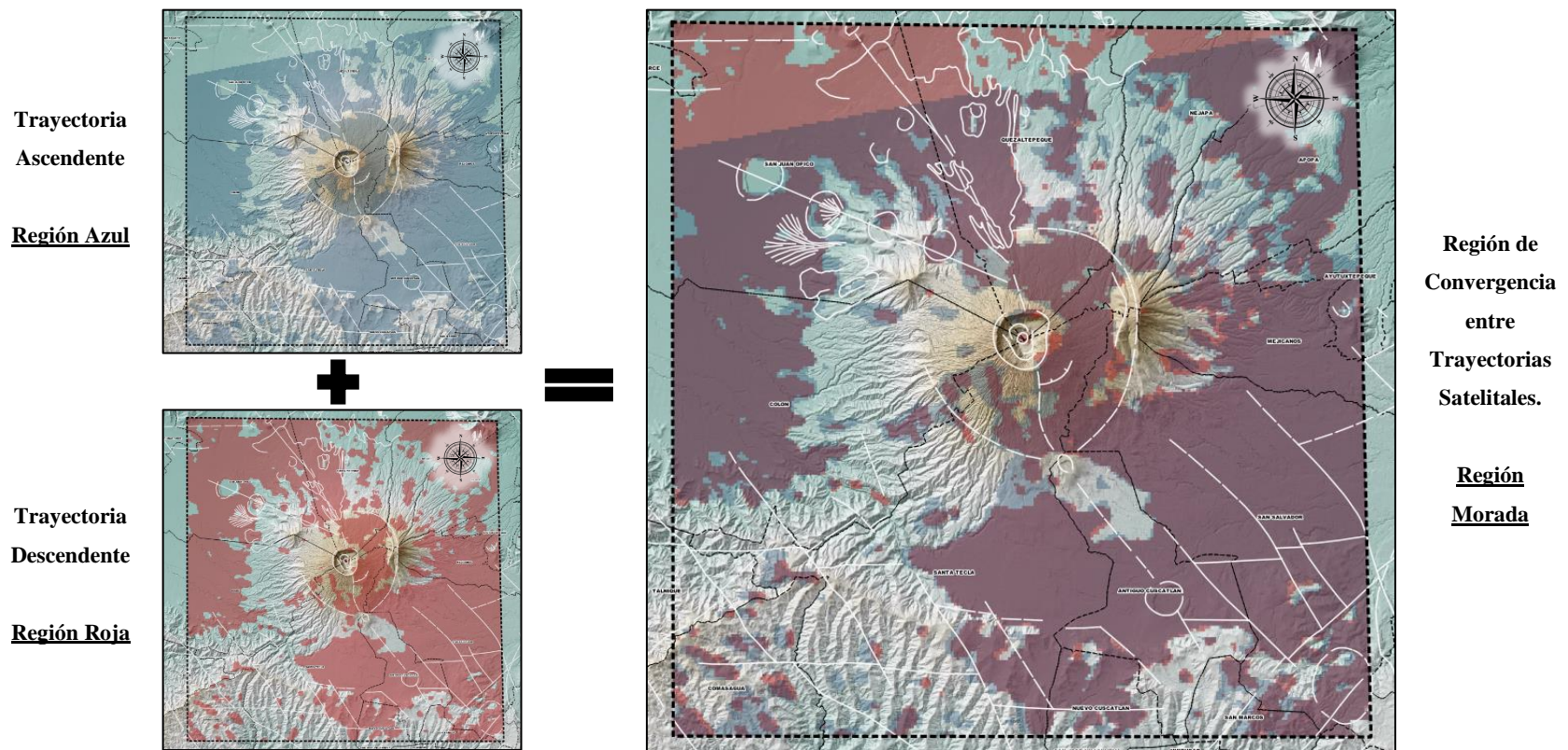


Figura 58. Ejemplo de correlación entre trayectorias satelitales en SIG previo al levantamiento de puntos de control. Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la figura 58, el ejercicio consta en montar un ráster sobre otro con cierto ajuste de opacidad para visualizar en que zonas las trayectorias convergen, y sobre ellas levantar la información.

El proceso de asignación de puntos se lleva a cabo mediante la herramienta de “crear archivos shape” en un SIG, bajo una geometría de “puntos” y ajustado a un sistema coordinado de referencia. Una vez creada la capa, se procede a activar el modo edición, seleccionar la zona de interés y agregar el punto de monitoreo basándose en las consideraciones antes listadas.

Este proceso es cíclico hasta llegar a la cobertura permitida por las trayectorias satelitales, obteniendo los siguientes resultados para el presente caso de estudio:

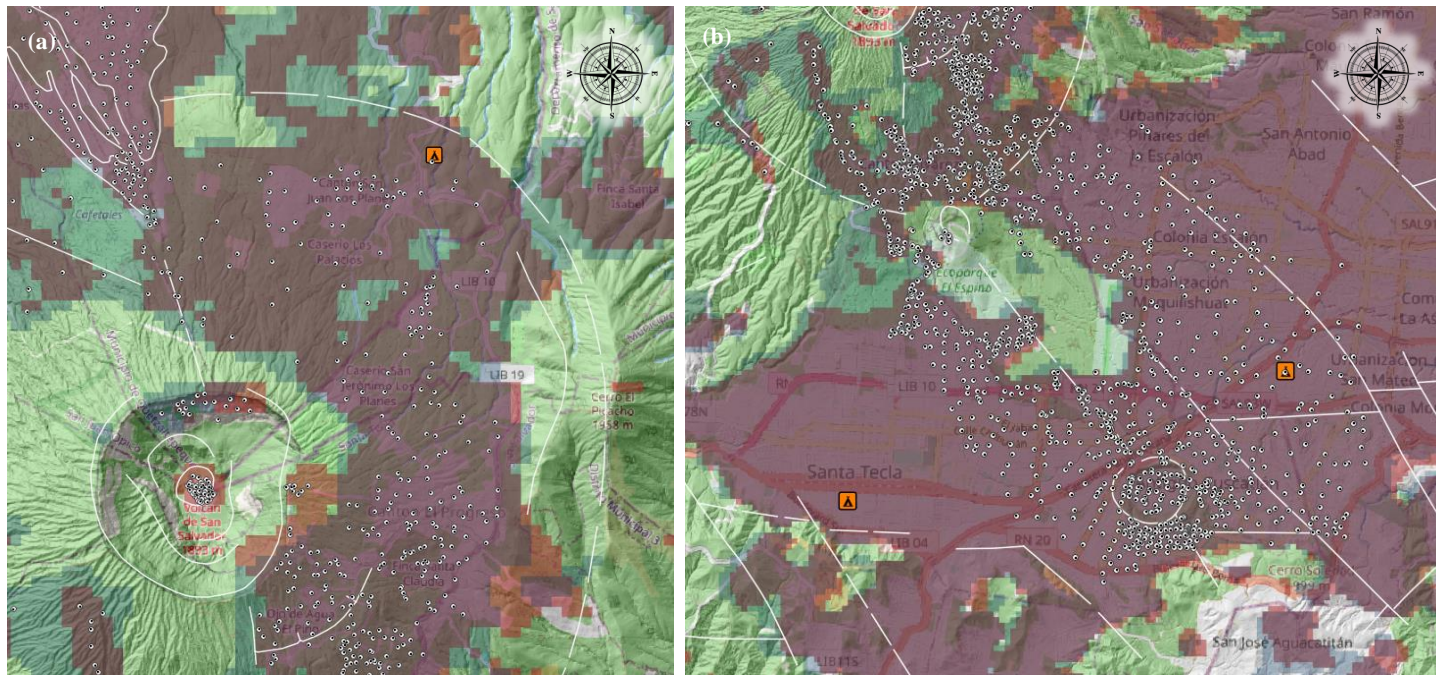


Figura 59. Ejemplos del resultado obtenido por el levantamiento de puntos de control en la región del cráter (a) y sector sureste (b) del CVSS sobre la zona de convergencia entre trayectoria ascendente y descendente según coherencia mayor a 0.4. Fuente: Elaboración Propia.

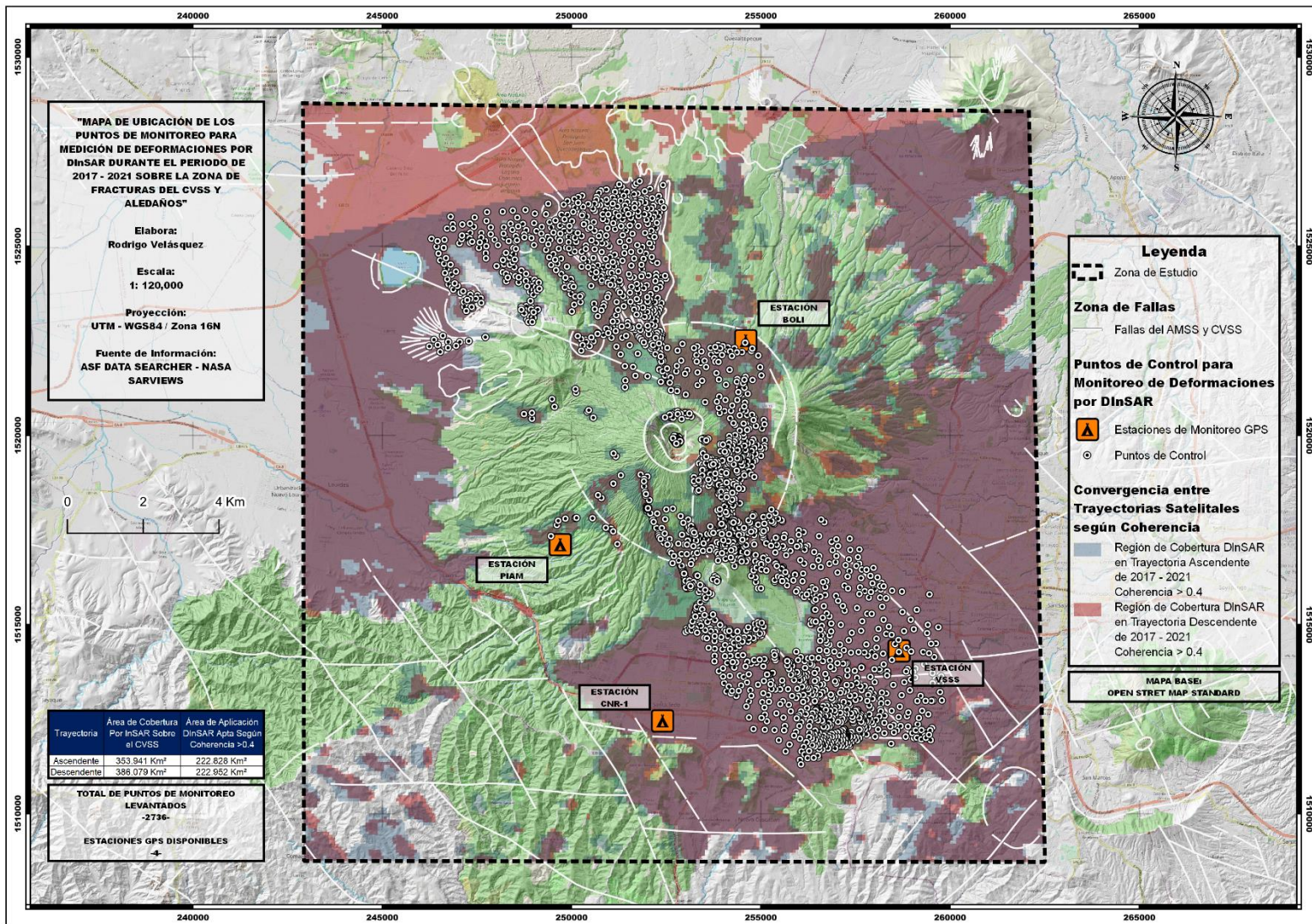


Figura 60. Mapa de Ubicación de los Puntos de Monitoreo para Medición de Deformaciones por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la zona de Fracturas del CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

Con el objetivo de monitorear la zona de fracturas del volcán, se obtiene una grid de 2736 puntos de monitoreo, los cuales permitirán evaluar el comportamiento de la deformación por DInSAR; comprobado así la importancia del factor de coherencia como delimitador espacial en el CVSS.

9.4. Construcción de la Base de Datos de Deformación por DInSAR

La construcción de la base de datos de deformación parte del uso de herramientas propias de un SIG, como lo es la función “extracción de valores múltiples a puntos”; la cual, por medio de los puntos de control previamente levantados, registra los valores asociados a los pixeles que conforma el ráster o toma satelital a cada reflector o coordenada geográfica especificada, exportando los resultados a hojas de cálculo para su posterior análisis.

Validando previamente en el capítulo 9.2 la aplicación de la técnica DInSAR en el CVSS y con la obtención de los puntos de monitoreo detallados en el capítulo 9.3, se detallan a continuación los pasos y resultados obtenidos para conformar la base de datos de deformación por DInSAR:

9.4.1. Procesos y Resultados para Construcción de la Base de Datos DInSAR

9.4.1.1. Extracción de Valores DInSAR a Puntos de Control: Una vez cargados todos los interferogramas, mapas de coherencia y grid de puntos dentro del software SIG, se procede a la extracción de la información, con la función que, según el software de preferencia, permita asignar la información del pixel al punto con coordenadas.

Para dicho proceso, se seleccionaron todos los interferogramas previamente montados en el proyecto SIG junto con los puntos de monitoreo y se aplicaron tanto en QGIS como en ARCGIS las herramientas de “Point Sampling Tool” y “Extracción de Valores a Multipuntos” respectivamente, obteniendo los mismos resultados en ambos casos y registrando valores únicos de deformación de cada interferograma sobre cada punto de monitoreo establecido en la región de interés.

El resultado de este proceso fue el de obtener por punto de control, un valor de deformación por cada interferograma, es decir que cada punto tendrá 143 medidas de deformación en trayectoria ascendente y 132 en trayectoria descendente, generando así un monitoreo temporal continuo de deformación sobre cada punto; de la misma manera se trabajó para la obtención de los valores de coherencia.

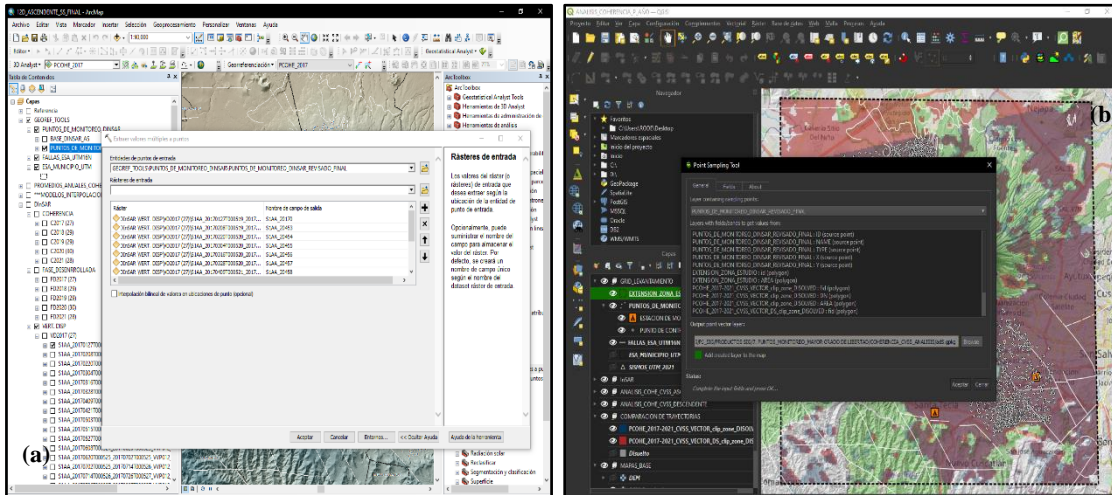


Figura 61. Comparación entre herramientas de extracción de valores ráster múltiples a puntos en ARCGIS (a) y QGIS (b). Fuente: Elaboración Propia.

9.4.1.2. Exportación de los Datos a Hojas de Cálculo: Una vez el proceso de extracción finalizó, el archivo shape (“shp”) que contiene la ubicación de los puntos de monitoreo y datos DInSAR es exportado en formato “csv”, para ser leído como un documento delimitado por comas en las hojas de cálculo de Excel, y efectuar así los cálculos respectivos. El resultado de dicho proceso es una hoja de cálculo con los valores previamente detallados, incluyendo las coordenadas geográficas de cada punto.

Figure 62 shows an Excel spreadsheet titled 'EXTRACT_LEVANTAMIENTO - Excel'. The spreadsheet contains a table with columns labeled 'NAME', 'VSS5', 'PIAM', 'BOLI', 'CNR1', 'PC1', 'PC2', 'PC3', 'PC4', 'PC5', 'PC6', 'PC7', 'PC8', 'PC9', 'PC10', and 'PC11'. The rows represent different monitoring points, starting with 'X' and 'Y' coordinates, followed by points labeled 'DEL_20170', 'SIAA_20171', 'SIAA_20172', etc., up to 'SIAA_20201'. Each row contains numerical values for each of the 12 columns.

NAME	VSS5	PIAM	BOLI	CNR1	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10	PC11
X	258650.486	249698.18	254601.513	252402.019	259051.871	259045.081	259003.864	258887.869	258859.844	258827.061	258690.479	258672.141	258639.618	258592.735	258
Y	1514300.21	1517109.16	1522499.35	1512449.55	1512212.79	1511998.88	1512126.99	1512303.1	1512572.63	1512034.09	1512314.69	1512827.28	1512533.95	1512202.24	151
DEL_20170	-0.015026	-0.038885	-0.038452	-0.025622	-0.003955	-0.004274	-0.004417	-0.005071	-0.007631	-0.007131	-0.011412	-0.007131	-0.011412	-0.006606	-0.006602
SIAA_20171	0.000518	0.078794	0.090813	0.077144	0.066732	0.067381	0.068018	0.069447	0.072509	0.067514	0.070335	0.074571	0.073506	0.070031	0.070031
SIAA_20172	-0.022091	-0.015831	-0.022976	-0.017877	-0.026201	-0.024887	-0.023852	-0.026329	-0.027448	-0.024204	-0.025561	-0.026842	-0.026599	-0.025113	-0.025113
SIAA_20173	-0.056125	-0.064673	-0.0785	-0.061903	-0.066606	-0.067941	-0.067231	-0.065941	-0.062674	-0.069007	-0.066744	-0.058376	-0.062673	-0.062673	-0.062673
SIAA_20174	-0.007937	-0.012809	0.023088	-0.011938	0.009934	0.011743	0.010551	0.009107	0.005086	0.012119	0.005474	-0.001955	0.002899	0.008863	0.008863
SIAA_20175	-0.002372	0.010828	0.001387	0.002968	-0.011727	-0.012031	-0.011876	-0.011293	-0.010774	-0.011319	-0.010316	-0.008944	-0.008528	-0.009376	-0.009376
SIAA_20176	0.014392	-0.009341	-0.004313	0.023551	0.024999	0.023623	0.024602	0.025212	0.023857	0.022268	0.024793	0.025861	0.024653	0.024195	0.024195
SIAA_20177	0.00741	0.029315	0.020414	0.01562	0.002899	0.003501	0.002936	0.002444	0.001481	0.00325	0.001869	0.000862	0.001177	0.001471	0.001471
SIAA_20178	-0.009003	0.003067	0.012193	-0.005767	-0.017857	-0.017153	-0.017762	-0.017179	-0.015065	-0.016941	-0.015835	-0.011127	-0.013069	-0.01381	-0.01381
SIAA_20179	0.003565	-0.023738	-0.019017	-0.007566	0.006424	0.004821	0.005866	0.005549	0.00529	0.005054	0.004785	0.003091	0.003277	0.003744	0.003744
SIAA_20180	-0.022218	-0.026171	-0.013834	-0.018676	-0.022406	-0.019114	-0.021164	-0.0227	-0.023998	-0.020799	-0.022756	-0.0243	-0.023906	-0.022556	-0.022556
SIAA_20181	0.006237	0.006359	0.056798	0.070218	0.066978	0.064717	0.065881	0.067485	0.069112	0.065773	0.068629	0.068841	0.069339	0.068556	0.068556
SIAA_20182	-0.014042	-0.011115	-0.001789	-0.019997	-0.01591	-0.014909	-0.013796	-0.016297	-0.013595	-0.013383	-0.017297	-0.016506	-0.016595	-0.017055	-0.017055
SIAA_20183	-0.000818	-0.023459	-0.004445	-0.008714	-0.001805	-0.002934	-0.001845	-0.002767	-0.003455	-0.003671	-0.003275	-0.002766	-0.002845	-0.003097	-0.003097
SIAA_20184	-0.020947	-0.005334	-0.036173	-0.013197	-0.024435	-0.023287	-0.024509	-0.023162	-0.024639	-0.021301	-0.022433	-0.023395	-0.022996	-0.021563	-0.021563
SIAA_20185	0.012576	-0.012619	0.008671	0.004314	0.007553	0.005611	0.007515	0.007066	0.0094	0.004786	0.007139	0.00896	0.008273	0.006024	0.006024
SIAA_20186	-0.040355	-0.067511	-0.054109	-0.064829	-0.05521	-0.056307	-0.055548	-0.054548	-0.053172	-0.055712	-0.054487	-0.051081	-0.053065	-0.054837	-0.054837
SIAA_20187	0.005049	0.038862	0.029061	0.042142	0.021268	0.02313	0.02222	0.020448	0.019219	0.022741	0.019613	0.016342	0.017934	0.019565	0.019565
SIAA_20188	-0.07207	-0.09921	-0.109594	-0.078692	-0.065314	-0.064375	-0.065574	-0.06574	-0.067017	-0.063987	-0.065971	-0.067929	-0.067272	-0.065192	-0.065192
SIAA_20189	-0.019029	-0.012085	-0.000345	-0.011916	-0.011361	-0.012033	-0.01116	-0.012166	-0.010796	-0.013146	-0.011117	-0.009711	-0.009642	-0.011127	-0.011127
SIAA_20190	-0.000327	-0.01341	-0.003403	-0.009428	0.00574	0.004571	0.005509	0.006673	0.00667	0.004958	0.007078	0.007078	0.007078	0.006782	0.006782
SIAA_20191	-0.012592	0.005459	0.006392	0.010009	-0.01622	-0.01551	-0.016417	-0.015873	-0.015651	-0.016168	-0.015595	-0.015468	-0.016761	-0.016599	-0.016599
SIAA_20192	-0.01496	-0.015105	-0.000343	-0.021263	-0.011951	-0.012204	-0.01289	-0.012994	-0.01273	-0.01299	-0.01299	-0.01455	-0.013724	-0.012973	-0.012973
SIAA_20193	-0.017282	-0.079882	-0.095842	-0.07568	-0.083635	-0.086299	-0.084396	-0.081122	-0.080109	-0.082828	-0.079159	-0.078366	-0.07791	-0.07864	-0.07864
SIAA_20194	-0.011953	-0.009221	0.003256	-0.009892	-0.006947	-0.005472	-0.006207	-0.006083	-0.006448	-0.008162	-0.010216	-0.010831	-0.009983	-0.011121	-0.011121
SIAA_20195	0.089188	0.08731	0.089493	0.087435	0.087872	0.087509	0.088002	0.089081	0.089059	0.088158	0.089908	0.08954	0.090035	0.090237	0.090237
SIAA_20196	-0.029319	0.027221	0.022763	0.013792	0.022885	0.021128	0.022987	0.022931	0.023034	0.022204	0.022466	0.024366	0.023163	0.022228	0.022228
SIAA_20197	-0.011917	0.002476	-0.057961	-0.003017	-0.077514	-0.076577	-0.07712	-0.078187	-0.079164	-0.077038	-0.078967	-0.082096	-0.080646	-0.079843	-0.079843
SIAA_20198	0.006458	-0.006037	-0.010579	0.001633	0.000719	0.000457	0.000626	0.001042	0.001839	0.000723	0.001182	0.003292	0.001948	0.000619	0.000619
SIAA_20199	-0.02899	-0.018414	-0.048367	-0.047882	-0.030102	-0.030062	-0.029913	-0.031123	-0.031429	-0.02997	-0.031343	-0.030721	-0.030814	-0.031019	-0.031019
SIAA_20200	-0.07995	-0.08838	-0.045062	-0.057226	-0.031787	-0.036919	-0.070117	-0.069909	-0.070666	-0.068944	-0.069407	-0.072992	-0.071856	-0.069601	-0.069601
SIAA_20201	-0.001129	0.025315	0.004914	0.001723	-0.003749	-0.005492	-0.004387	-0.003446	-0.003021	-0.005556	-0.003885	-0.002155	-0.002455	-0.004487	-0.004487

Figura 62. Ejemplo de hoja Excel resultante del proceso de extracción y exportación de datos de shp a csv. Fuente: Elaboración Propia.

9.4.1.3. Estructura de la Base de Datos DInSAR y Consideraciones: Como parte fundamental del análisis de deformaciones en el CVSS, a partir de los datos recabados por ambas trayectorias satelitales, se tiene como resultado principal de este apartado la formulación y estructura de la primera línea base de deformación DInSAR en la zona de fracturas del CVSS a nivel nacional.

Para esta base de datos, con el objetivo de formular una herramienta de impacto para el monitoreo volcánico de deformaciones, se han considerado los siguientes aspectos para su respectivo seguimiento:

1. Priorizar la componente temporal de los interferogramas como marco referencial base para la correlación con otros métodos de monitoreo volcánico.
2. Desarrollar una hoja de cálculo que sea adaptable a incorporaciones futuras de datos DInSAR.
3. Establecer como filtros de análisis, el cálculo de promedios mensuales, promedios anuales y acumulados de deformación y coherencia con la finalidad de analizar e inferir acerca del comportamiento de la deformación superficial sobre el CVSS.
4. Al poseer la técnica DInSAR una componente direccional, la cual hace referencia a los movimientos relativos del terreno con respecto al sensor (valores positivos si la deformación es hacia el sensor y valores negativos si el desplazamiento es de alejamiento), se propone como paso fundamental el análisis de las deformaciones aplicando valor absoluto a los datos con la finalidad de cuantificar en totales acumulativos los desplazamientos del terreno.
5. Ser la línea base de deformación trabajada, tanto en trayectoria ascendente como descendente la fuente de datos que alimente las series temporales y análisis del estado de la deformación en la zona de fracturas del CVSS, la cual puede correlacionarse eficientemente con registros sísmicos, de anomalías térmicas y cualquier otro parámetro de monitoreo volcánico instrumental.

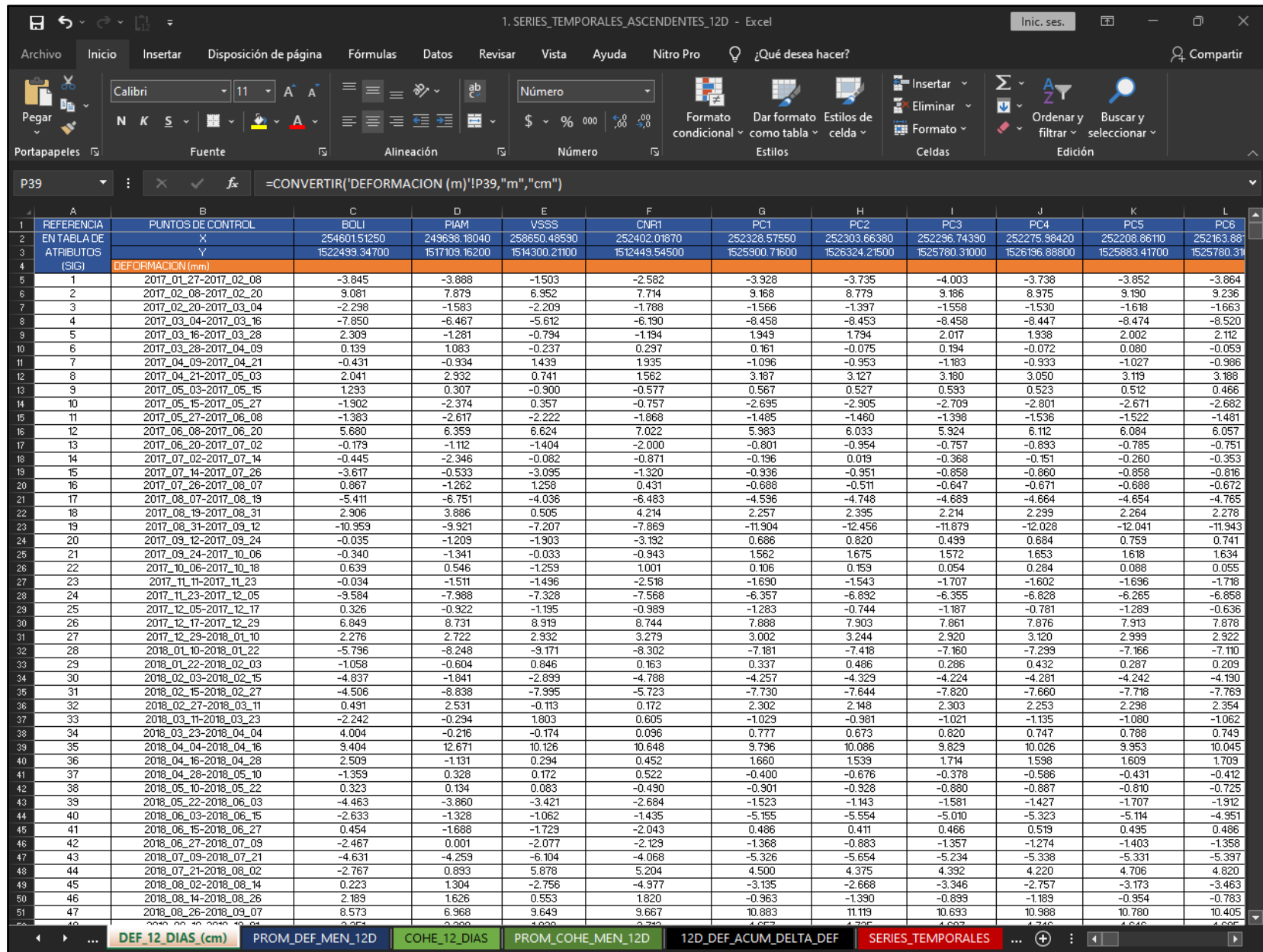


Figura 63. Captura de la base de datos de deformación DInSAR para el CVSS, mostrando las deformaciones en cm para cada 12 días, promedios mensuales de deformación y coherencia, acumulados de la deformación y grafico de series temporales respectivamente. Fuente: Elaboración Propia.

9.5. Espacialización de la Base de Datos de Deformación en SIG

Llegado al punto de tener una línea base de deformación, es necesario formular mecanismos de representación y análisis geográfico, que permitan evaluar y definir como la deformación ha venido actuando sobre la zona de fracturas del CVSS.

Por ello, con la finalidad de cumplir con los objetivos propuestos para la presente investigación, se establece que dicha tarea sea efectuada mediante las herramientas de interpolación espacial que los SIG proporcionan.

Para la correcta ejecución de los mapas, se hace uso del complemento “Geostatistical Wizard” del software SIG ARGGIS, el cual ha sido elegido por su alto rendimiento y fidelidad en los modelos espaciales ejecutados.

9.5.1. Parámetros Establecidos para la Construcción de Modelos Espaciales en SIG

Los parámetros establecidos para la construcción de los modelos en la herramienta SIG, permitirán que la distribución espacial sea lógica, puesto que los modelos de interpolación recrean isocontornos basados en el principio de mínima distancia y magnitudes semejantes en función de la distribución aritmética de las muestras.

Por lo antes mencionado, en función de la grid de puntos y el tipo de información a procesar, se definen los siguientes parámetros:

Tabla 8. Parámetros para Generación de Modelos Espaciales de Deformación. Fuente: Elaboración propia.

Parámetros para Generación de Modelos Espaciales de Deformación por DInSAR	
Método Geoestadístico	Kriging
Tipo	Simple
Método de Aproximación	Kernel Gaussiano
Tipo de Aproximación	Suave
Vecinos Máximos	5
Vecinos Mínimos	2
Error Máximo Permitido	10%

La tabla 8 resume los valores a digitar dentro del software SIG, por lo que estos se consideran dentro del marco del presente estudio, como parámetros base para la generación de cartografía de deformación en ambas trayectorias satelitales según la metodología propuesta.

9.5.2. Conceptualización y Generación de los Mapas de Deformación

De manera que, se logre la visualización de como la topografía en la zona de fracturas del CVSS ha evolucionado durante el periodo de 2017 a 2021, se emplean los cálculos del acumulado de deformación en la base de datos previamente formulada.

Es importante la siguiente explicación:

Analizando a Lisowski (2016) y Mogi (1958), se determina que la deformación por efectos directamente volcánicos tiende a la inflación o deflación, haciendo alusión a movimientos de elevación o hundimientos del terreno respectivamente.

Reforzando la explicación con lo planteado por Parker (2017) y Seppi (2016), se argumenta que la tecnología DInSAR permite hacer análisis con componente temporal, componente espacial y componente direccional, todo esto al ser tratada la deformación como un vector físico, el cual el satélite logra calcular conforme el terreno se “aleje o aproxime” al sensor de radar, estimando así que las deformaciones sean negativas o positivas respectivamente.

Por lo tanto:

Como un mecanismo de análisis en esta investigación, se presentan los mapas resultantes del acumulado para el periodo de 2017 a 2021, tanto en su componente direccional original (con la fluctuación normal periódica debida a la interacción de valores positivos y negativos), como modificada mediante el uso del valor absoluto sobre los datos.

Con ello se logra que: para el caso 1, se evalué la distribución del acumulado de los esfuerzos basado en el movimiento natural de la deformación del terreno, y en el caso 2, la visualización de los desplazamientos netos sobre el terreno debido a los procesos vulcano-tectónicos en la zona de fractura del CVSS.

Se presentarán a continuación los resultados obtenidos tanto en trayectoria ascendente como descendente para el periodo de 2017 a 2021, los cuales surgen a partir de un shape construido con los cálculos previamente obtenidos por la base de datos de deformación antes presentada, los mapas correspondientes a 2017, 2018, 2019, 2020 y 2021 en ambas trayectorias se presentarán en la sección 10.1.2.

9.5.2.1. Trayectoria Ascendente

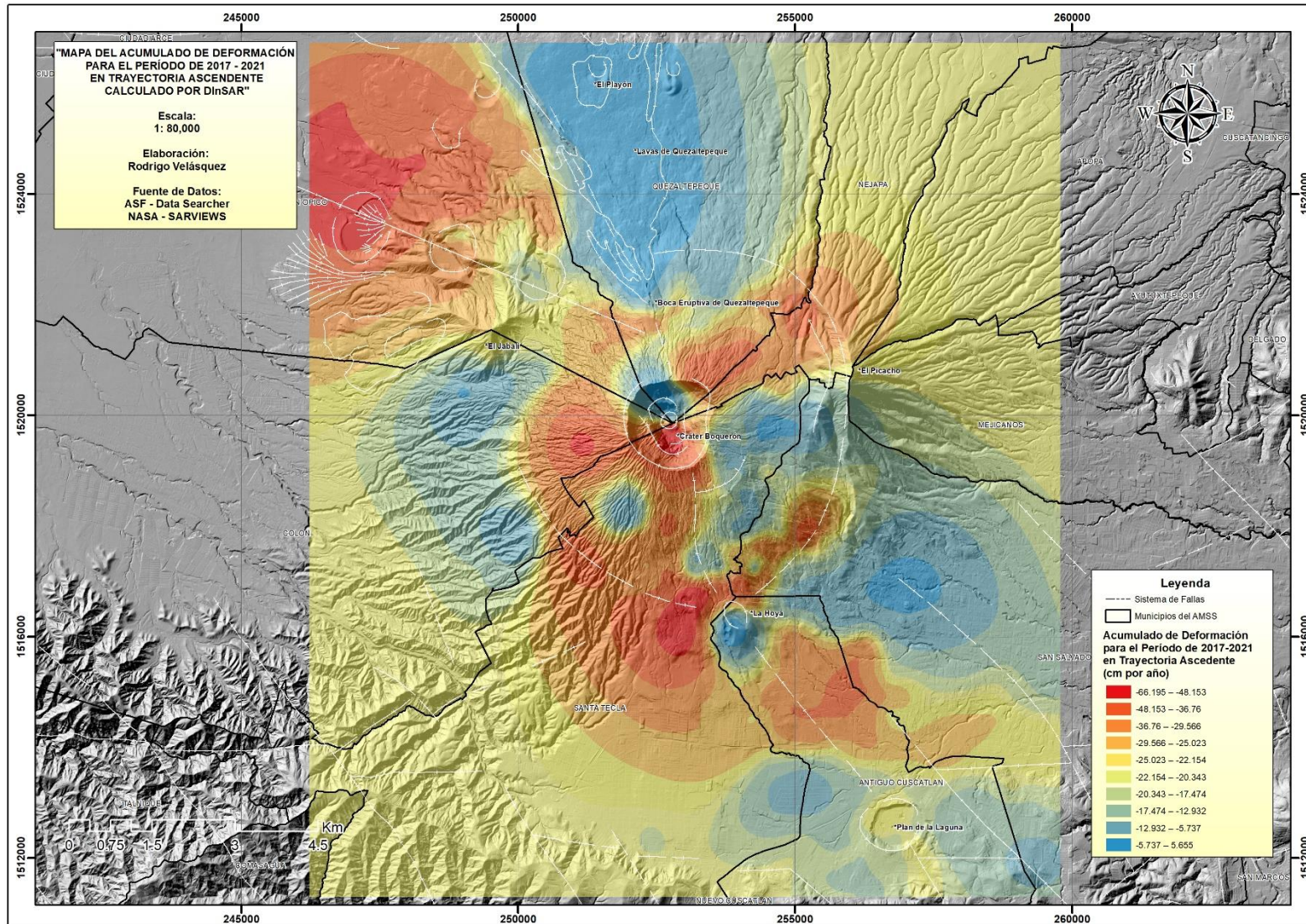


Figura 64. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

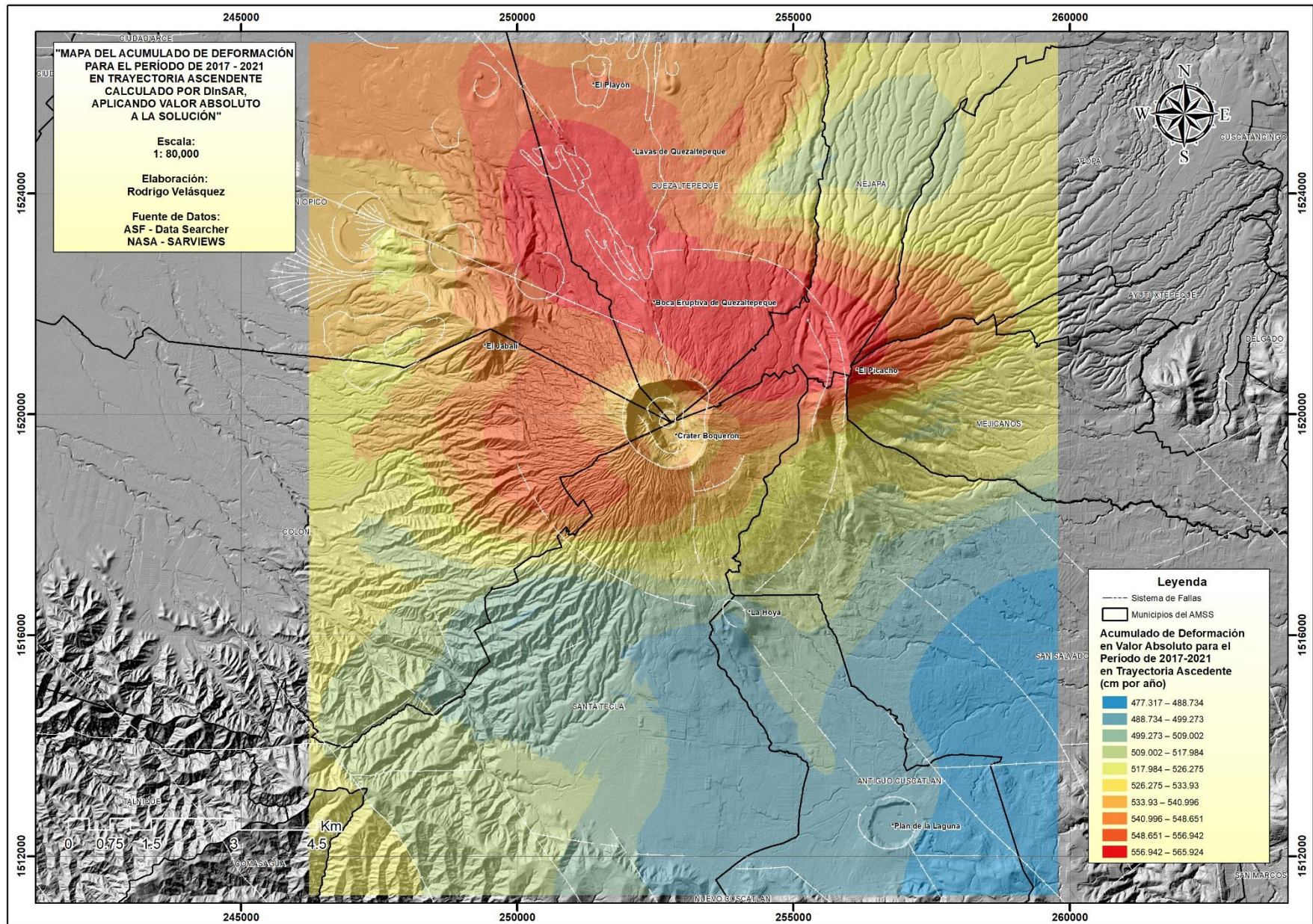


Figura 65. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Período de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

9.5.2.2. Trayectoria Descendente

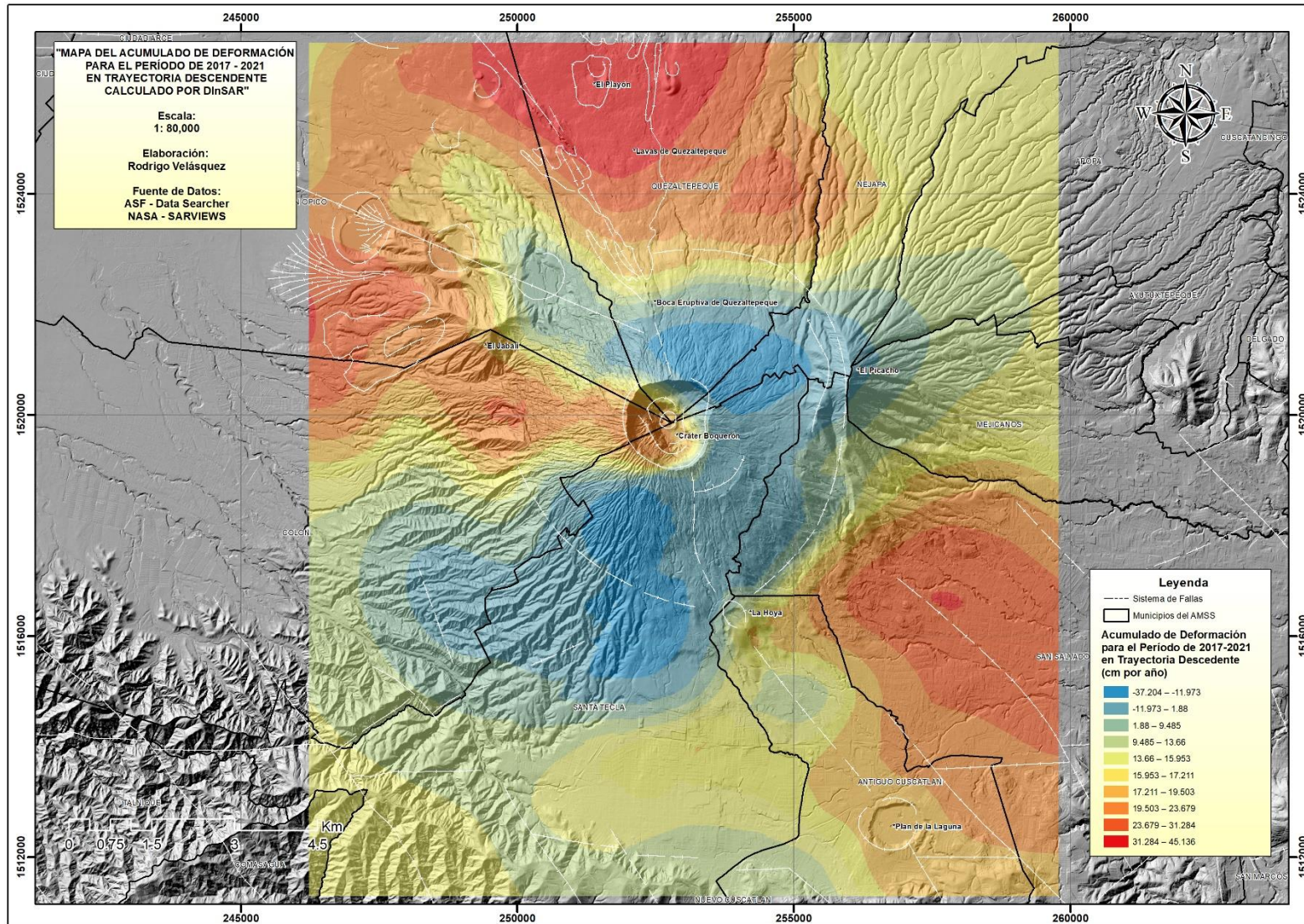


Figura 66. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.

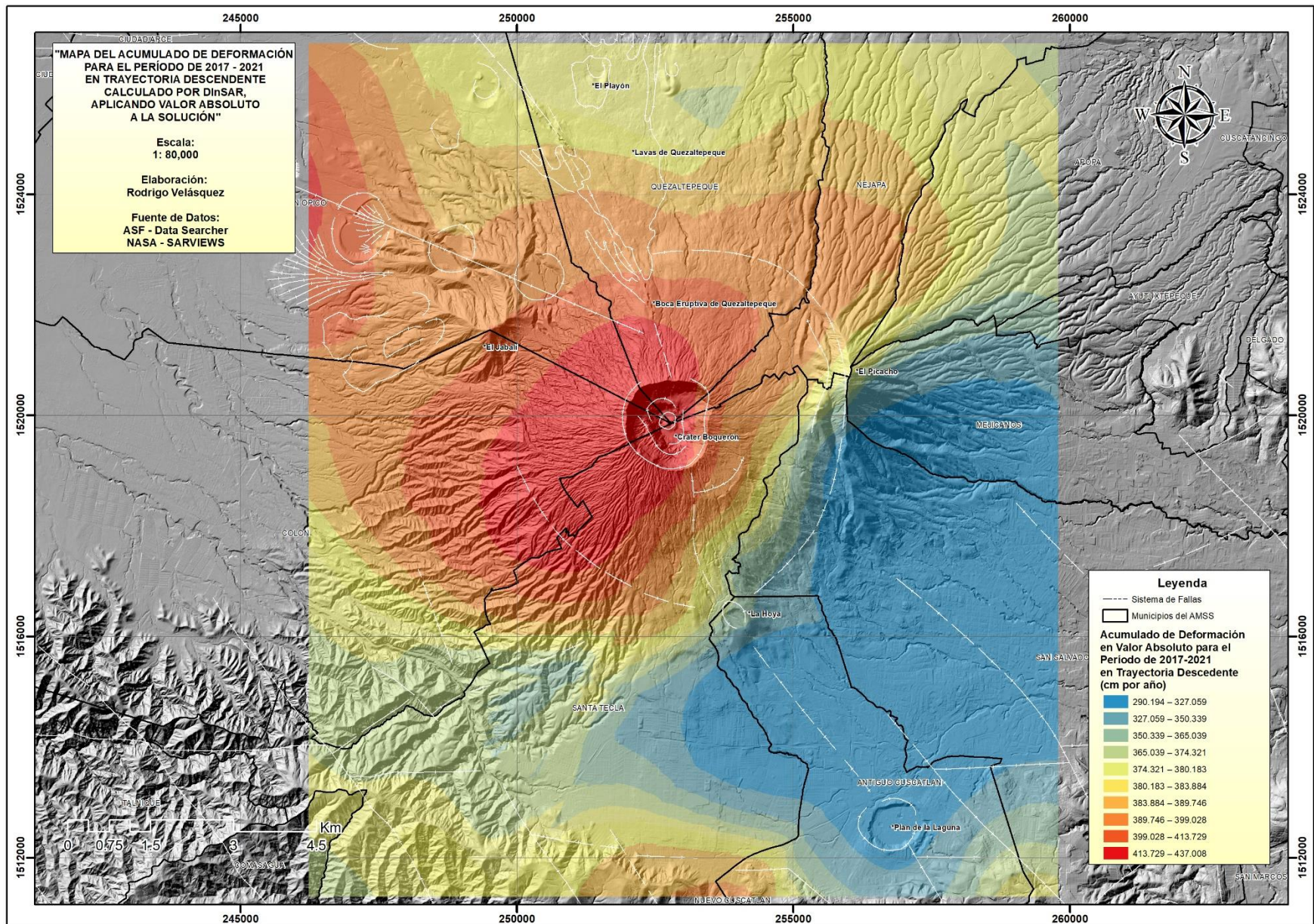


Figura 67. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

9.5.3. En Resumen

- I. Los mapas del acumulado de deformación sin valor absoluto tienen la capacidad de identificar la presencia de estructuras geológicas como fallas o regiones de importante acumulación o liberación de esfuerzos debido a los saltos abruptos que se dan entre las franjas de deformación o curvas trazadas por la interpolación.
- II. Los mapas del acumulado de deformación en valor absoluto pierden la componente direccional, pero revelan las zonas que se han visto más susceptibles en el tiempo a la deformación, cuantificándola de forma neta y siendo consistente con los demás mapas, que es la zona norte y central del CVSS la que se ve mayormente influenciada por los procesos de deformación relativos al DInSAR.
- III. Las figuras 64 y 66, la cuales muestran los acumulados de la deformación sin valor absoluto, denotan saltos importantes en los valores de deformación entre el sector de lavas y sector NE en sentido de laguna de Chanmico y actual Ciudad Marsella, lo que demuestra que la medición de DInSAR es sensible a cambios originados por procesos de construcción, cambios debidos a procesos geomorfológicos y posiblemente sobreexplotación de recurso hídrico.
- IV. Es observable que, según los acumulados en ambas trayectorias satelitales, la zona de laderas del CVSS es un elemento altamente expuesto debido a sus pendientes y debilidad geoestructural, por lo que el acumulado de las deformaciones es relativamente mayor en dichas regiones.
- V. La zona SO, aunque es considerada como el tercer escenario de riesgo por actividad volcánica, posee importantes rangos de deformación acumulada, la cual al ser un sector de transición geológico entre planicie a elevaciones y poseer centros eruptivos como La Hoya y Plan de la Laguna, representa una zona de debilidad estructural muy importante que se ve directamente influenciada por la actividad antropogénica y tectónica, la cual se ve bien delimitada por los acumulados de las figuras 65 y 67.
- VI. Aunque en términos de magnitudes, ambas trayectorias difieren, la distribución espacial demuestra que la propagación de los esfuerzos es consistente entre trayectorias satelitales para la zona de fracturas del CVSS.

9.6. Generación de las Series Temporales de Deformación

El principal objetivo de la línea base de deformación, es el de brindar un registro temporal y cuantitativo de como el terreno en la zona de fracturas del CVSS ha evolucionado en el tiempo.

Con la finalidad de incidir en nuevos análisis sobre el monitoreo vulcanológico de deformaciones sobre el CVSS, se presenta la estructura de las series temporales que la base de datos de deformación por DInSAR es capaz de modelar.

Es importante aclarar que, según lo propuesto en la sección 9.5.2, el análisis por series temporales considerará los datos con valor absoluto y sin valor absoluto para mantener la correlación entre los resultados obtenidos por la distribución espacial y el análisis temporal a presentar.

Importante:

Analizando a Ferretti (2001) y Berardino (2002), se argumenta que, el análisis temporal en DInSAR depende directamente de como el set de imágenes “slave” interactúe con respecto a una toma “master” o de referencia, lo cual origina que el factor de decorrelación se vaya acumulando y que la región de aplicabilidad se reduzca; este fenómeno se ve corregido cuando el monitoreo temporal se realiza sobre reflectores puntuales en el terreno.

Por lo tanto:

En la búsqueda de nuevos métodos de análisis, las series temporales a presentar, han sido construidas a partir de la diferencia en las condiciones superficiales del terreno, captadas por pares interferométricos en intervalos de a cada 12 días entre la toma master y slave en trayectorias ascendentes y descendentes, originando una base de datos que estima un delta o desplazamientos relativos entre los pares interferométricos procesados.

Es decir que, se ha ejercido un monitoreo sobre puntos de control tomando como referencia diferentes imágenes maestras, obteniendo así, por cada interferograma un delta de desplazamiento con alto valor de coherencia debido a que el intervalo temporal entre tomas es relativamente corto.

9.6.1. Tipos de Series Temporales en Función del Punto de Monitoreo a Evaluar

Teniendo en claro que la deformación del terreno es diferencial, es decir que, no es la misma en todos los puntos del terreno y que depende de factores como la geología, tectónica, densidad de la vegetación, saturación del suelo, uso de la tierra, estrés hídrico, procesos de meteorización, geomorfológicos y demás, se hace una propuesta de clasificación en función del tipo de punto de monitoreo, cálculo de los acumulados y dinámica de la deformación superficial captada por el sensor de radar.

9.6.1.1. Clasificación de las Series Temporales

I. Serie Temporal sobre Puntos de Referencia: Serie temporal generada sobre un punto de monitoreo con alta coherencia referido a una coordenada tomada estrictamente en campo. Son considerados como puntos de referencia, coordenadas alusivas a la ubicación de estaciones de monitoreo en campo o instituciones que realicen mediciones con GPS de doble frecuencia, independientemente de su fin como una referencia correlacionable.

II. Serie Temporal sobre Punto de Deformación Crítico: Serie temporal generada sobre un punto de monitoreo que presente valores altos de deformación, en donde el factor de coherencia puede oscilar entre los mínimos y máximos establecidos por la metodología, en donde un valor con alta decorrelación debe de analizarse considerando factores geológicos y geográficos que incidan en el aumento de la vulnerabilidad del terreno a deformarse.

Puntos de monitoreo con baja coherencia y deformación significativa, no deben de ser descartados, deben de asociarse a desplazamiento súbitos del terreno.

III. Serie Temporal sobre Punto de Deformación Estable: Serie temporal generada sobre un punto de monitoreo que presente valores de deformación mínimos, en donde el factor de coherencia puede oscilar entre los mínimos y máximos establecidos por la metodología, pero en caso de tener alta decorrelación se sometería a una evaluación.

9.6.2. Resultados

Se presentarán como resultados, ejemplos de series temporales calculadas usando la base de datos de deformación DInSAR detallada en la sección 9.4, para cada tipo de punto de control antes detallado, con y sin valor absoluto y sobre ambas trayectorias satelitales.

9.6.2.1. Trayectoria Ascendente

I. Estación de Monitoreo VSSS – MARN – San Salvador – Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Referencia.

Coordenadas: X = 258650.48590; Y = 1514300.21100.

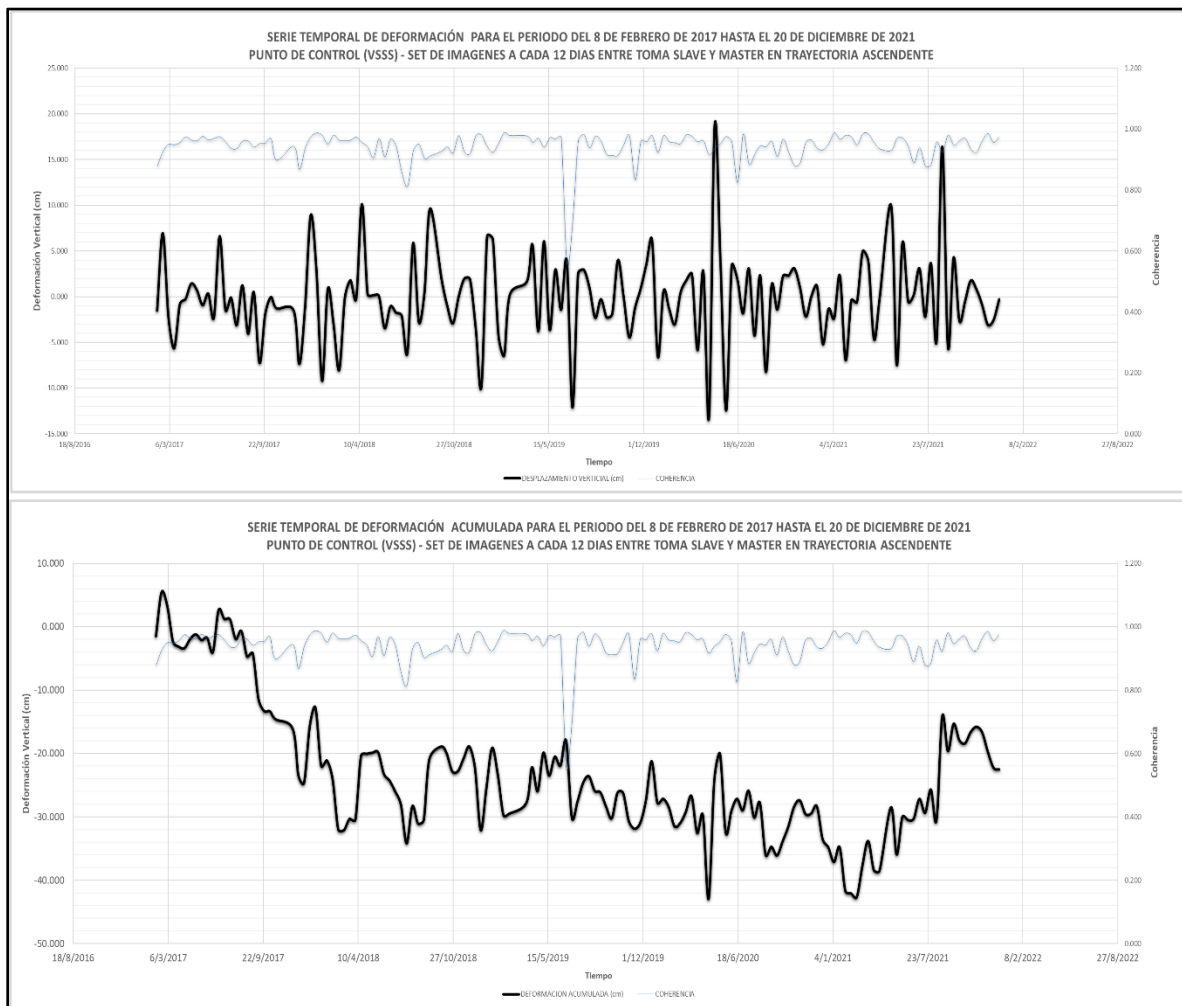


Figura 68. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

II. Punto de Control 1125 – Plan de la Laguna – Antiguo Cuscatlán - Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Estable

Coordenadas: X = 256805.33160; Y = 1512591.39300

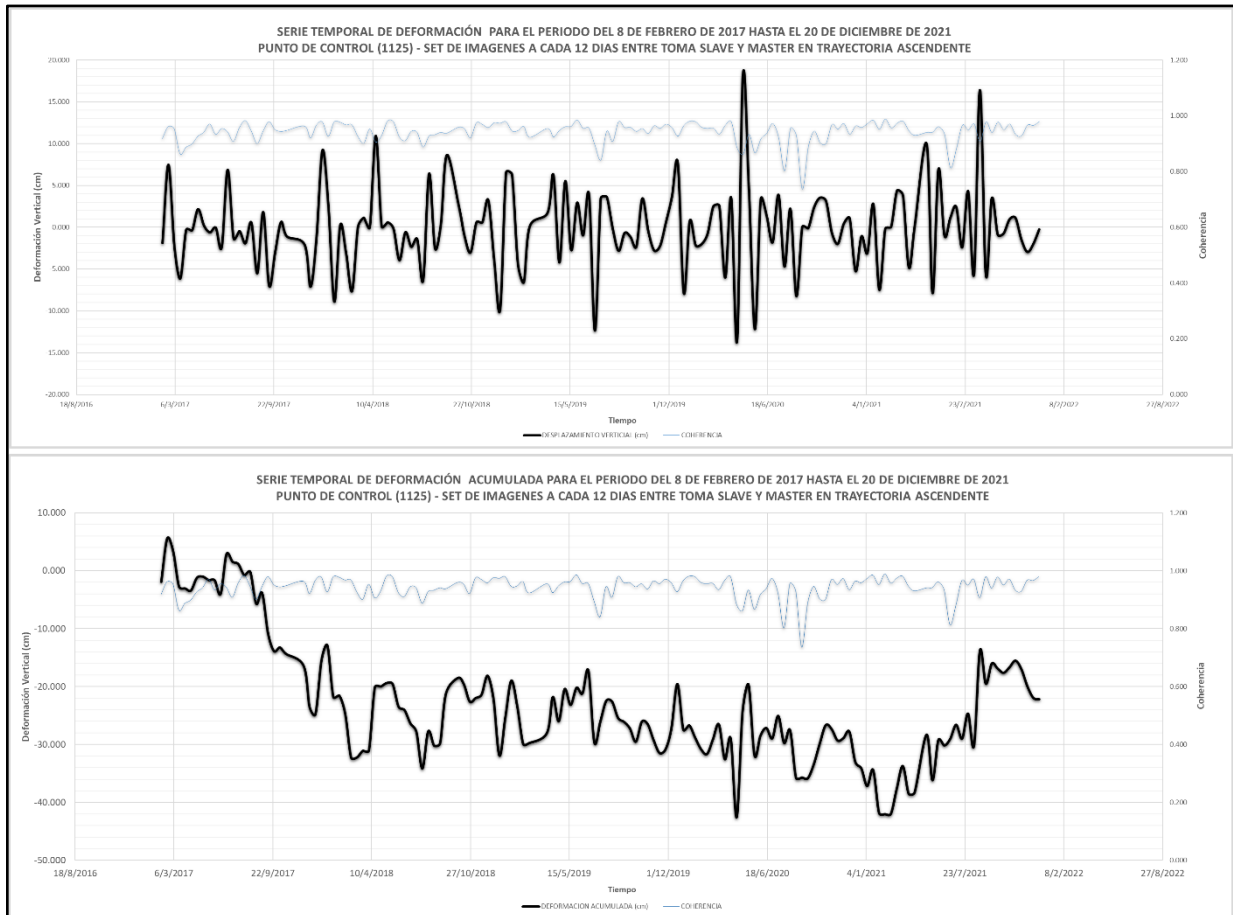


Figura 69. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa una clara correlación entre los patrones de oscilación generados por los registros de deformación DInSAR sobre la estación de monitoreo VSSS de la DGOA-MARN y el punto de control PC1125 ubicado en el Plan de la Laguna.

Esto es debido a que la intensidad de los esfuerzos en puntos relativamente cercanos tiende a ser similar, presentando promedios anuales de entre -6 a 4 mm por año (sin valor absoluto), viéndose afectados por recurrente sismicidad, alta actividad antropogénica y tendencia a la subsidencia o deformación negativa, la cual se traduce a hundimientos del terreno.

III. Punto de Control 1503 – Al NO del Centro Eruptivo La Hoya - Cota 1400

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 253662.93092; Y = 1517591.63294

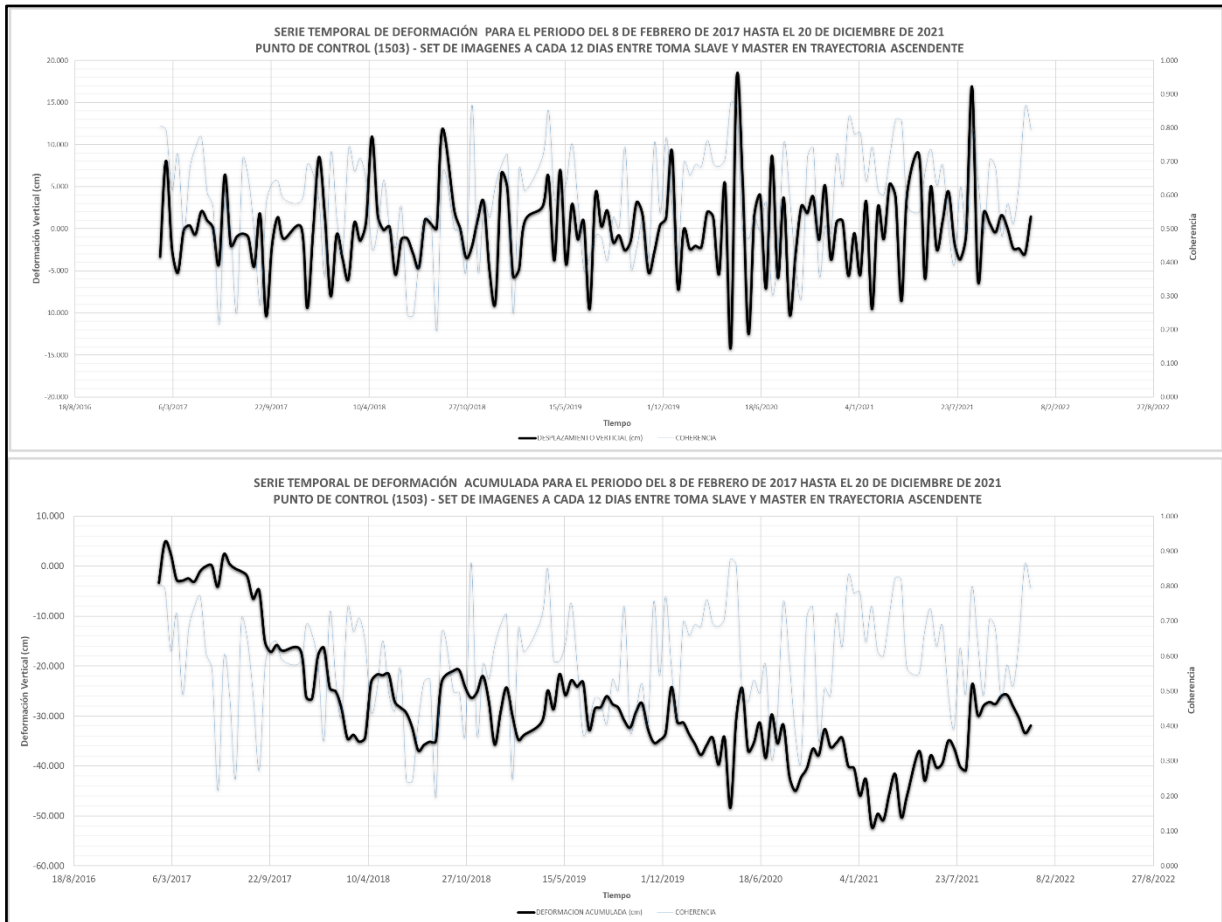


Figura 70. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Es importante observar que, los registros de deformación a cada 12 días conservan un patrón de oscilación que varía únicamente en magnitud, pero conforme el análisis se hace en un sector geológicamente más inestable, el parámetro que define si la zona es más susceptible a la deformación es el cálculo del acumulado, en donde para una zona estable y sin valor absoluto no aumenta de los -40 cm, mientras que las puntos críticos tienden a sobrepasar los -50 cm de deformación anual promedio para el periodo de análisis.

Se observa, además, que las fluctuaciones entre valores positivos y negativos propios del registro DInSAR, dificultan la representación y análisis gráfico de la deformación.

IV. Punto de Control 1555 – Cráter Boquerón

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252700.24823; Y = 1519913.19279

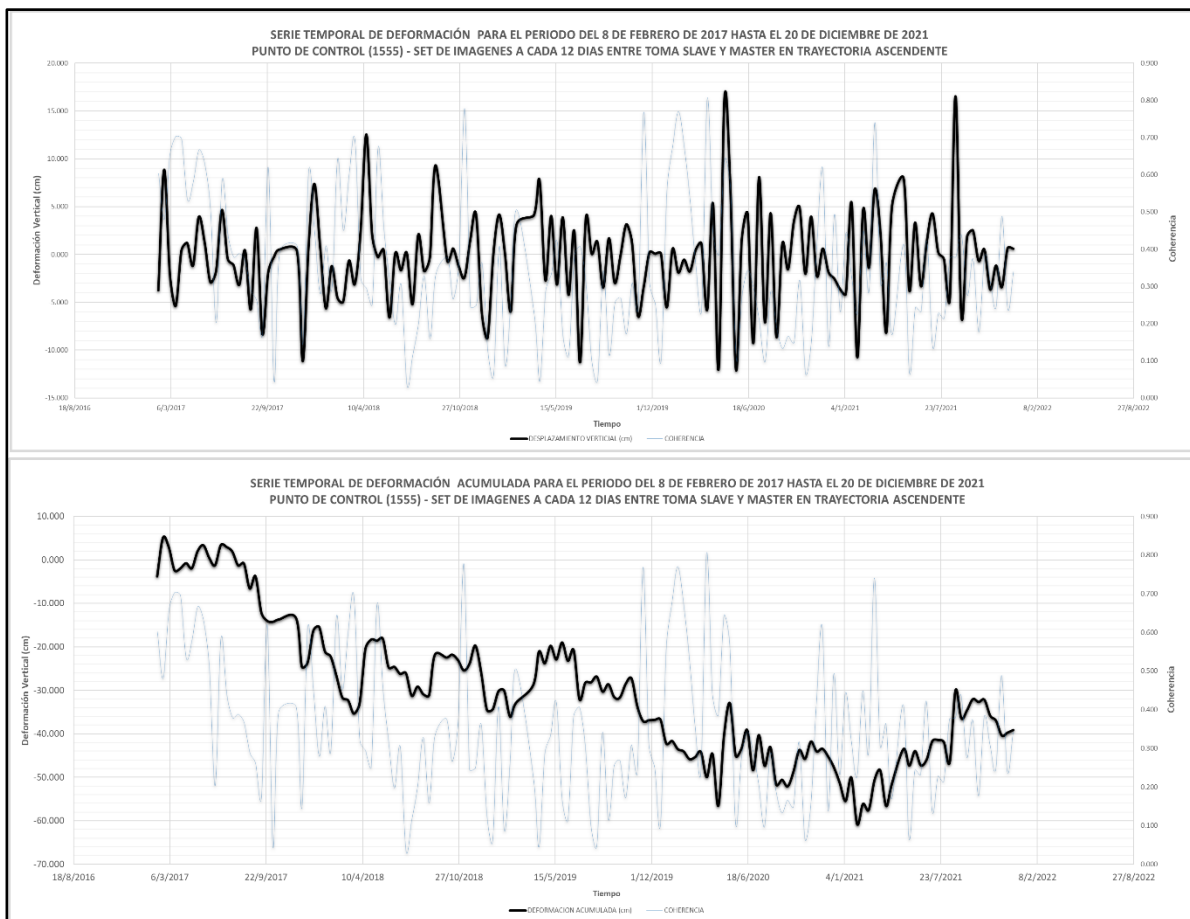


Figura 71. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

Se presenta la serie temporal del punto crítico correspondiente al cráter Boquerón, la cual muestra uno de los mayores acumulados de deformación, pero a su vez un factor de coherencia muy variable en el tiempo, siendo su promedio anual de decorrelación igual a 0.35 y su deformación máxima -61 cm, demostrando que la deformación es mayor conforme se avanza en dirección NE sobre la zona de fracturas del CVSS.

V. Punto de Control 1942 – Boca Eruptiva Flanco NO – Entre Cota 1500 y 1600

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252466.48352; Y = 1521582.23931

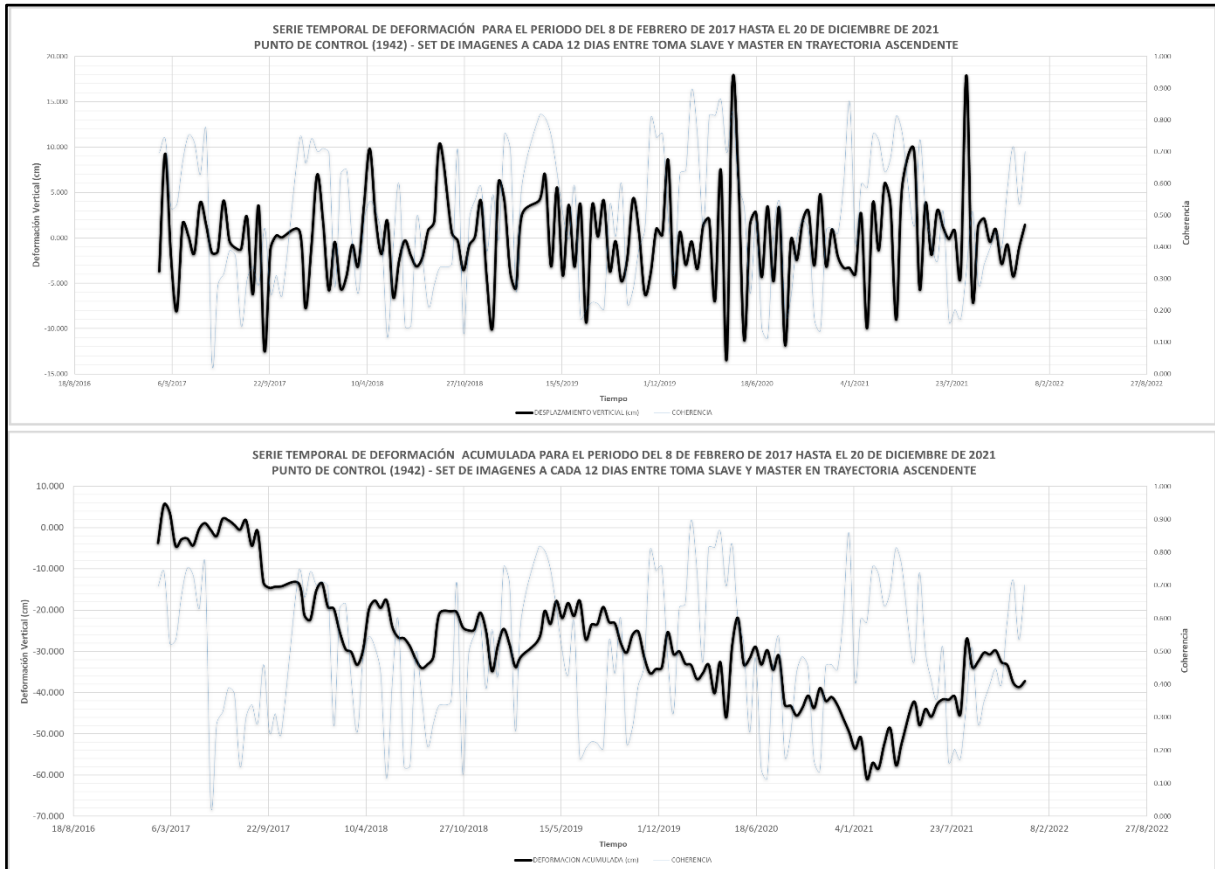


Figura 72. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Al igual que en la serie temporal II, al ser los puntos 1555 y 1942 relativamente cercanos, las variaciones de la coherencia y magnitud de deformación son muy similares.

Es importante notar que, a pesar de las similitudes antes mencionadas, es el punto 1942 el que se ve más afectado por la deformación, presentando valores de deformación que oscilan entre los -14 a 18 cm, acumulados de hasta -62 cm y coherencia promedio de 0.4866, mayor que el punto correspondiente al cráter Boquerón.

Esto revalida que, la deformación es mayor en la zona de fallas NO del CVSS, principalmente en el sector de flancos que se ve influenciado por el sistema de fracturas del volcán.

VI. Punto de Control 134 – Boca Eruptiva Flanco NO – Sobre Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 250804.11980; Y = 1525073.78700

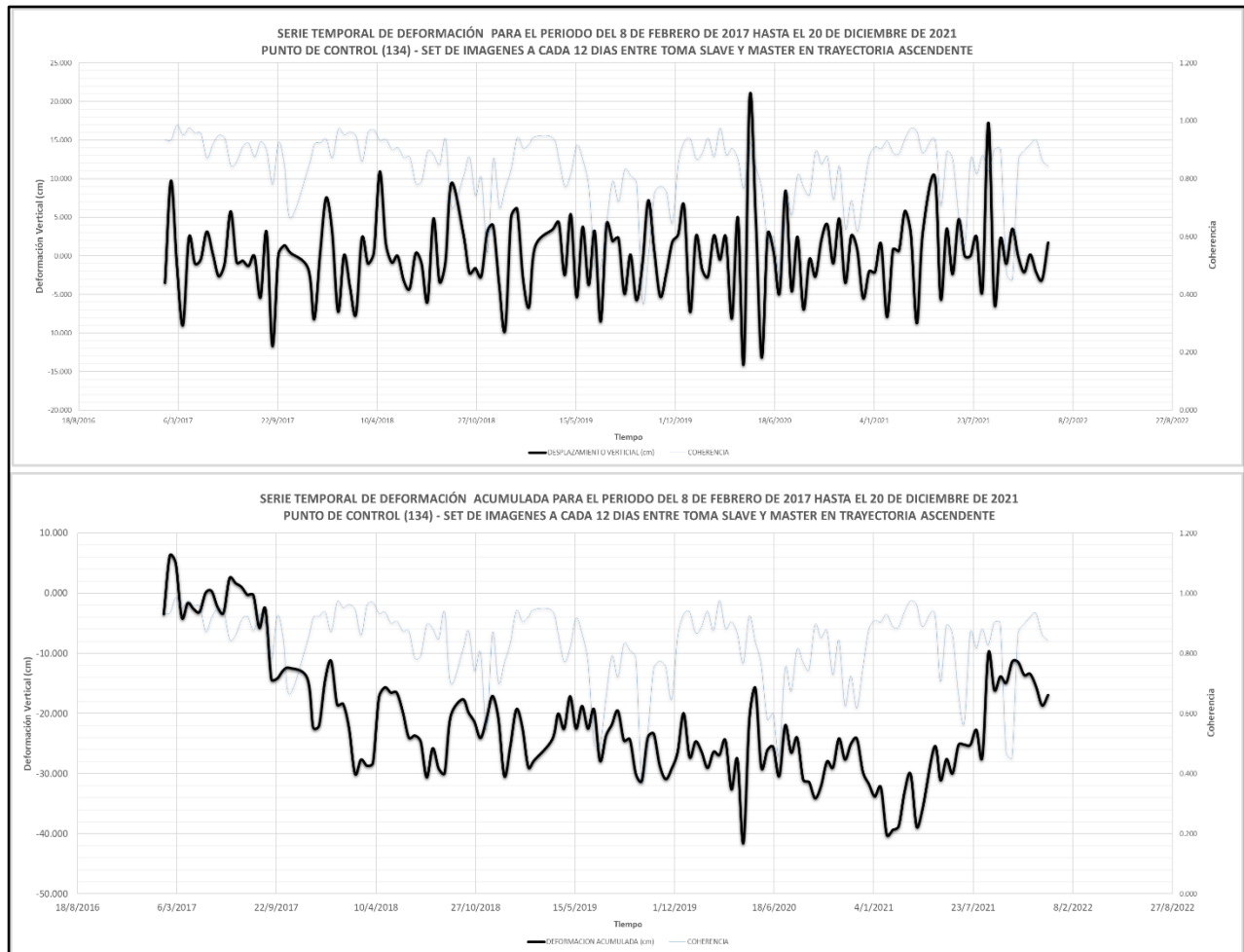


Figura 73. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 73, se puede ver que, aunque la oscilación se exponga como “similar” a sus predecesoras, en la presente, su dominio de deformación ha venido mostrando una transición de deflación a inflación según los acumulados, con registros de mayor amplitud y frecuencia que los correspondientes al cráter Boquerón y la boca eruptiva de 1917, así como también una mayor coherencia anual promedio, alcanzando un valor de 0.8321 y deformaciones de -55 a 50 cm anuales. Estos valores corresponden a un sector geológicamente inestable debido a la dispersión de material volcánico y presencia de bocas eruptivas y fracturas en la zona.

Citando nuevamente el análisis planteado en la sección 9.5.2, se formulan las series temporales para los puntos antes seleccionados, de manera que, se logre temporalizar y visualizar en términos de la deformación acumulada con valor absoluto, como los esfuerzos han suscitado de forma neta sin considerar los desplazamientos relativos del terreno respecto al sensor.

Importante:

Las series temporales del acumulado de deformación con valor absoluto son de vital importancia en la metodología propuesta, debido a que estos gráficos son los que permiten evaluar y determinar de una forma más práctica cuáles son los puntos que mayor deformación han presentado en el tiempo, mientras que los gráficos de deformación a cada 12 días permiten evaluar tendencias, puntos mínimos y máximos de la serie de datos.

Los gráficos a mostrar, son el equivalente a la evaluación analítico-estadístico de los puntos de monitoreo que componen a los mapas presentados en la sección 9.5.

I. Estación de Monitoreo VSSS – MARN – San Salvador – Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Referencia.

Coordenadas: X = 258650.48590; Y = 1514300.21100

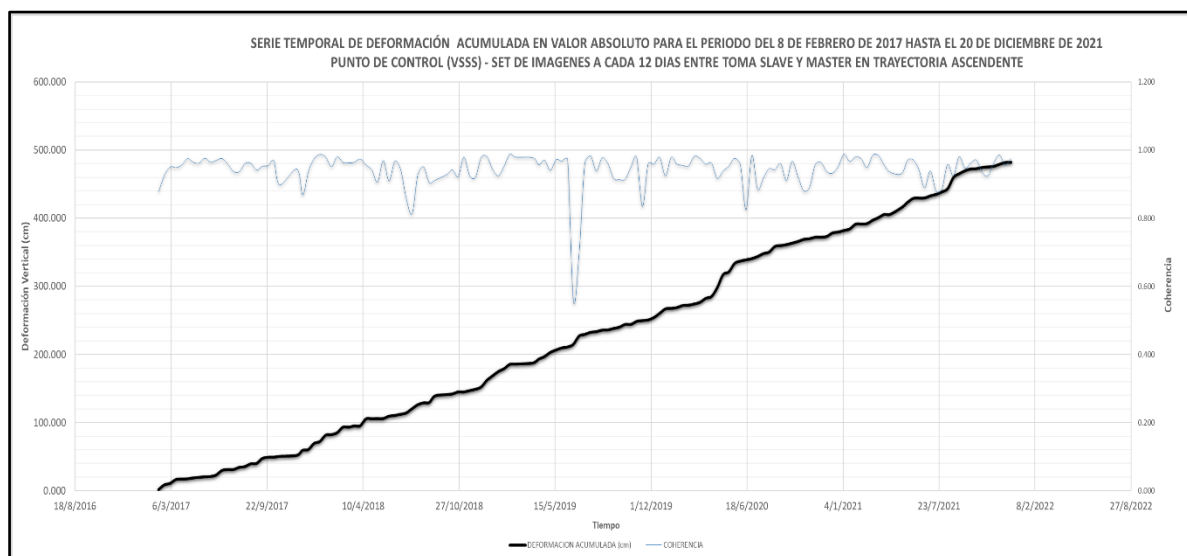


Figura 74. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente:

Elaboración Propia.

II. Punto de Control 1125 – Plan de la Laguna – Antiguo Cuscatlán - Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Estable

Coordenadas: X = 256805.33160; Y = 1512591.39300

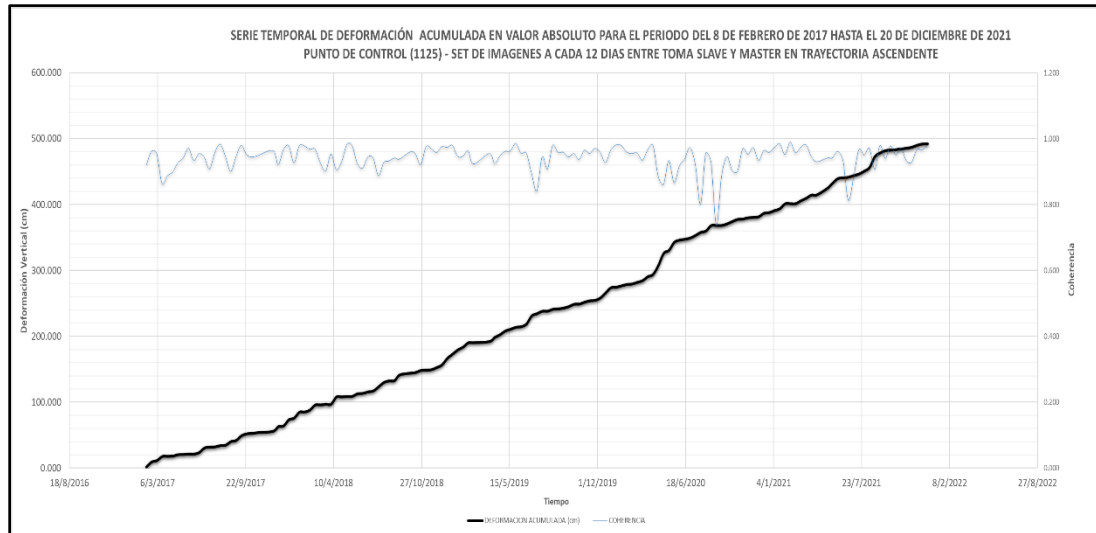


Figura 75. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

III. Punto de Control 1503 – Al NO del Centro Eruptivo La Hoya - Cota 1400

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 253662.93092; Y = 1517591.63294

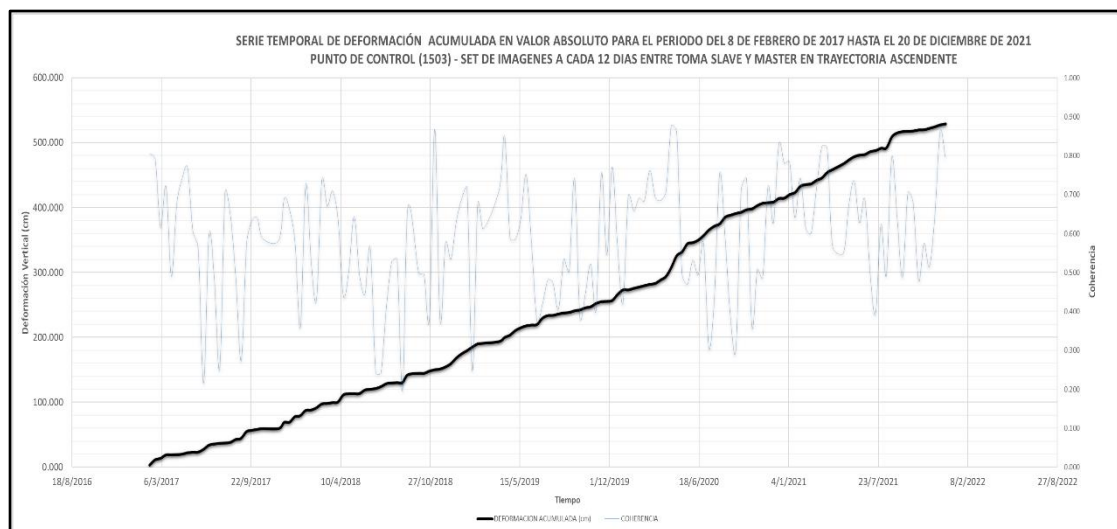


Figura 76. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

IV. Punto de Control 1555 – Cráter Boquerón

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252700.24823; Y = 1519913.19279

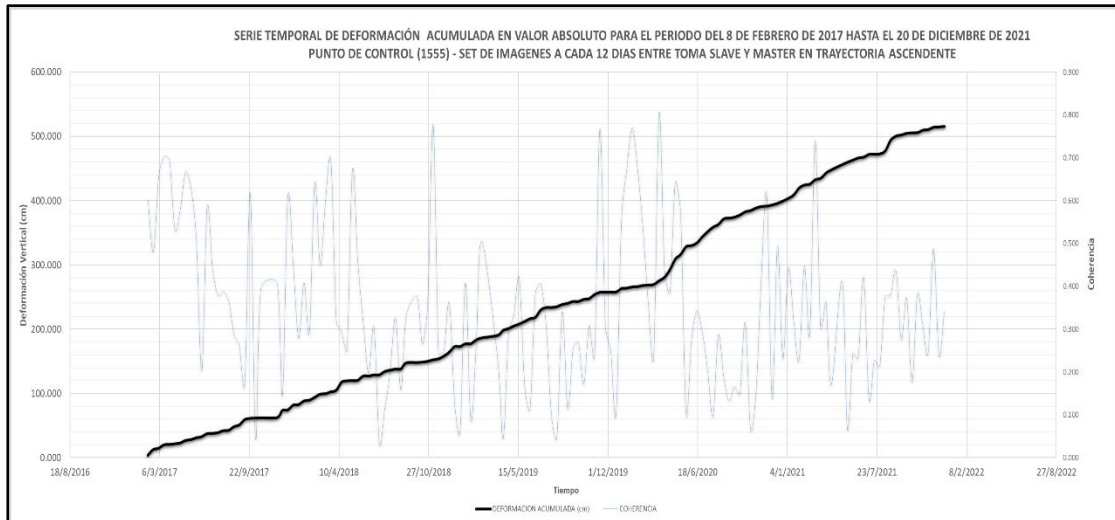


Figura 77. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

V. Punto de Control 1942 – Boca Eruptiva Flanco NO – Entre Cota 1500 y 1600

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252466.48352; Y = 1521582.23931

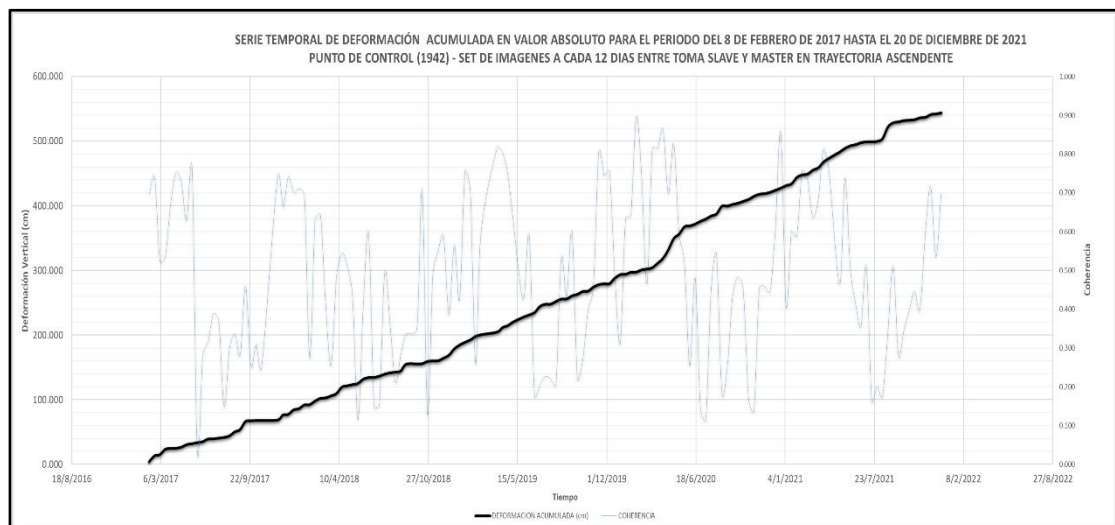


Figura 78. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

VI. Punto de Control 134 – Boca Eruptiva Flanco NO – Sobre Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 250804.11980; Y = 1525073.78700

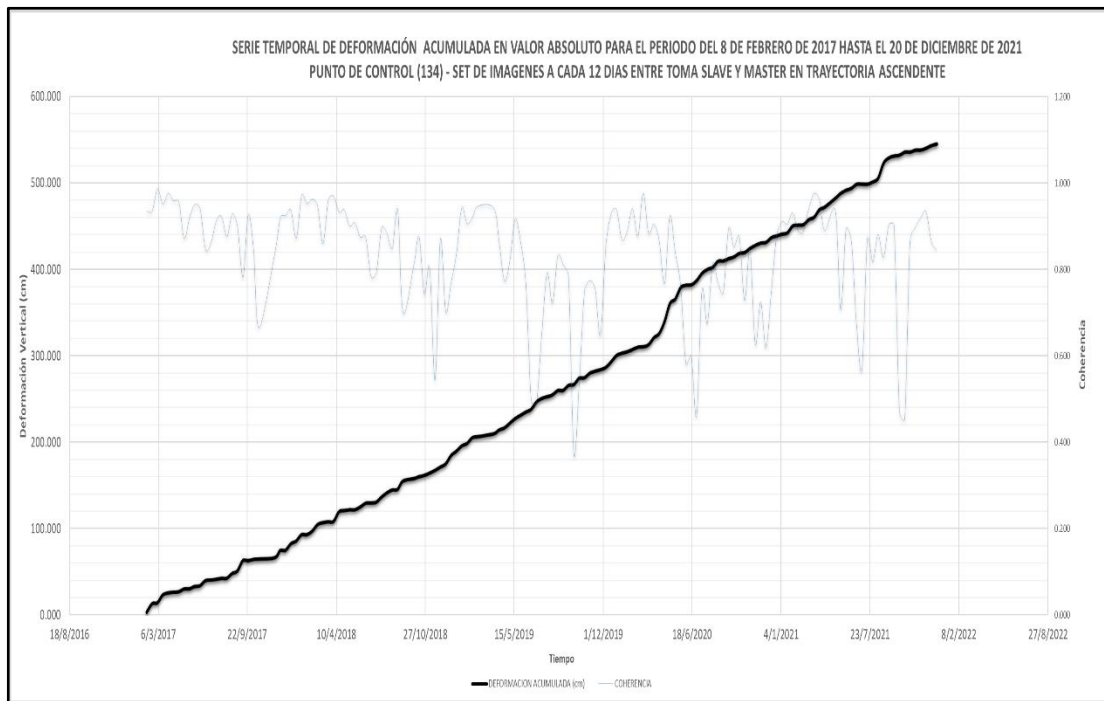


Figura 79. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Ascendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Con el ajuste de los datos por valor absoluto, es posible visualizar cuando la deformación se ha mantenido constante o estable (sucesión lineal sin cambio en la pendiente de la gráfica), cuando ha habido un aumento gradual (sucesión lineal con incremento relativo de la pendiente sin saltos súbitos en los datos) y cuando suceden aumentos súbitos en la deformación del terreno (representado por saltos abruptos bien marcados en la gráfica).

- ❖ De manera general, como un resumen de estos resultados, es que la deformación es un proceso que actúa permanentemente en la zona de fracturas del CVSS, presentando sus picos máximos de deformación sobre la zona del flanco N del volcán. Se observa además que el CVSS se encuentra en un dominio de deformación negativo, por lo que, según lo obtenido mediante la técnica DInSAR en trayectoria ascendente, la zona de fracturas del CVSS ha pasado por un periodo de liberación de esfuerzos evidenciado por su reciente sismicidad.

9.6.2.2. Trayectoria Descendente

Una vez construido el análisis por series temporales en trayectoria ascendente, se procede al análisis de la deformación con respecto a la trayectoria satelital descendente. Esto se hace con la finalidad de evaluar la deformación sobre todo el espectro visible del Sentinel-1, para detectar las similitudes o diferencias que permitan correlacionar el comportamiento de los esfuerzos entre ambas geometrías de adquisición.

I. Estación de Monitoreo VSSS – MARN – San Salvador – Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Referencia.

Coordenadas: X = 258650.48590; Y = 1514300.21100.

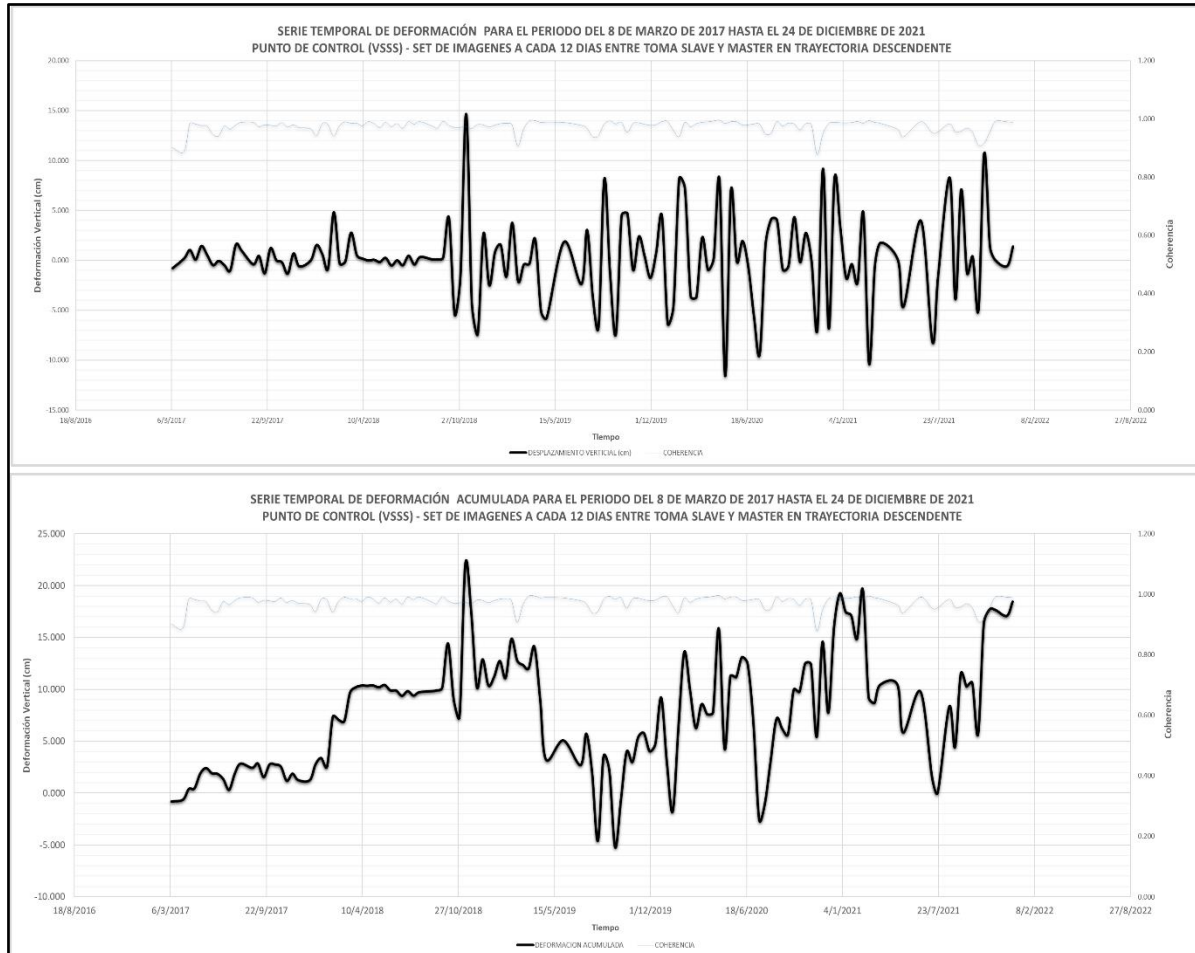


Figura 80. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

II. Punto de Control 1125 – Plan de la Laguna – Antiguo Cuscatlán - Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Estable

Coordenadas: X = 256805.33160; Y = 1512591.39300

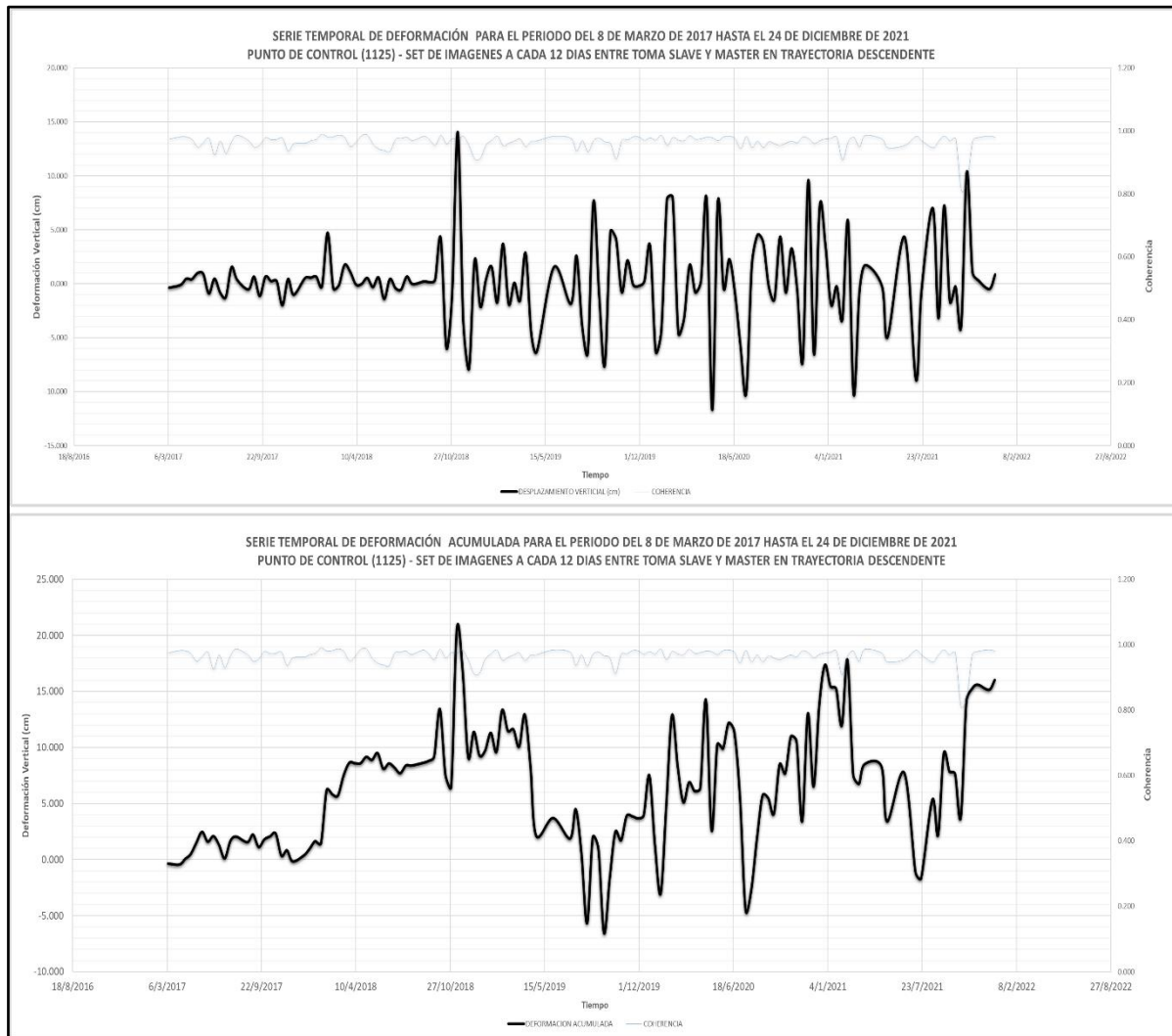


Figura 81. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antiguo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Es apreciable que la tendencia del registro temporal en trayectoria descendente es distinta al de la trayectoria ascendente; sin embargo, la dinámica de deformación para zonas estables es equivalente, puesto que es consistente el cómo los esfuerzos afectan con equidad puntos relativamente cercanos, oscilando entre desplazamientos negativos a positivos, pero con tendencia a la aleatoriedad debida a saltos abruptos sobre los acumulados a partir de 2018.

III. Punto de Control 1503 – Al NO del Centro Eruptivo La Hoya - Cota 1400

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 253662.93092; Y = 1517591.63294

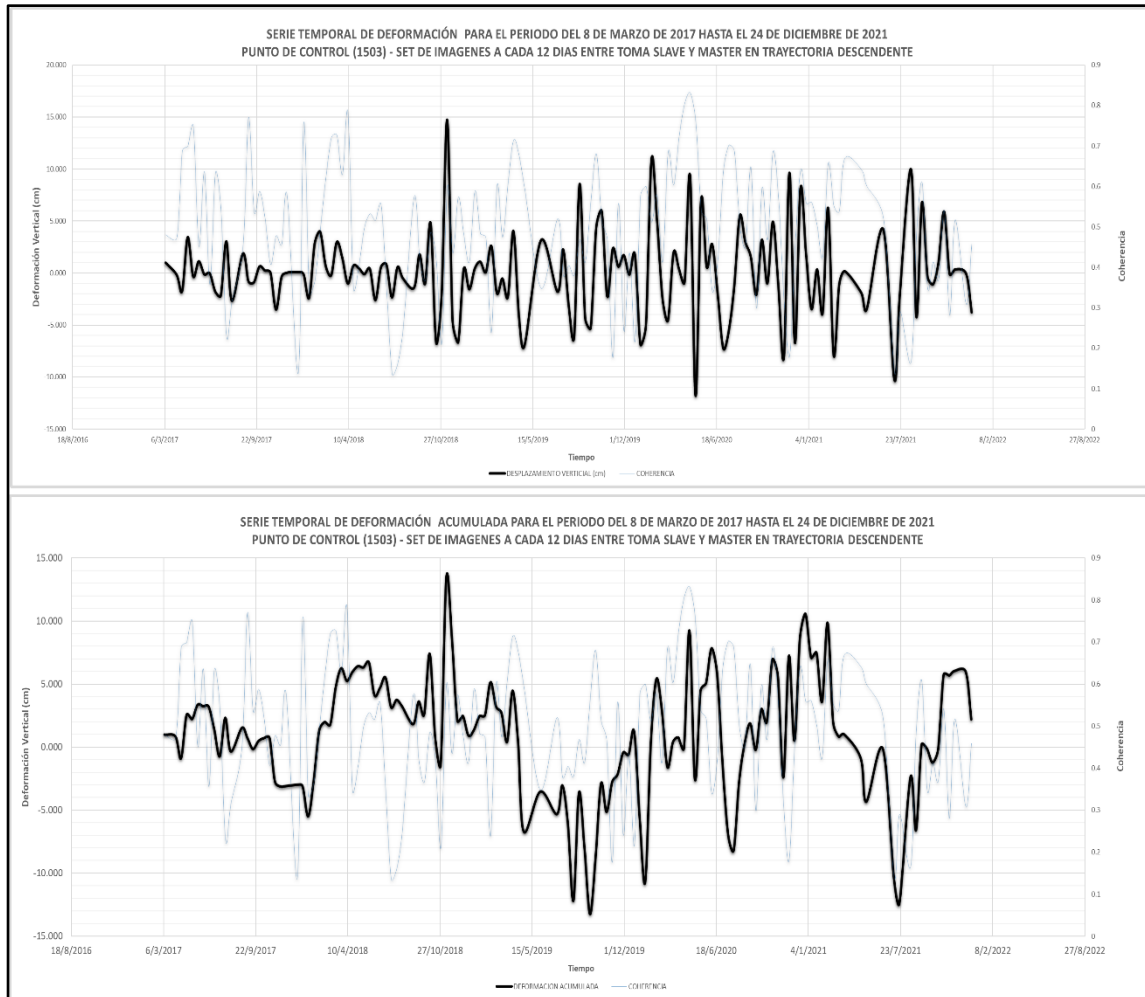


Figura 82. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

De igual manera la tendencia del registro temporal se mantiene, pero se dan los cambios en orden de magnitud esperados con respecto a la serie temporal ascendente sobre la zona de fallas, específicamente sobre la región de La Hoya; registrando oscilaciones más amplias de -13 cm a 15 cm de desplazamiento y acumulados con tendencia a la deformación negativa.

Es probable que picos altos de deformación puedan deberse a cambios geomorfológicos relacionados a deslizamientos, cambios en el uso de suelos, meteorización entre otros.

IV. Punto de Control 1555 – Cráter Boquerón

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252700.24823; Y = 1519913.19279



Figura 83. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Una variación importante con respecto a la trayectoria satelital ascendente, es que la tendencia de los acumulados cambia de un dominio negativo a un dominio positivo para la zona de cráter Boquerón, reflejando oscilaciones de entre -13 a 15 cm de desplazamiento, con acumulados de entre 2 a 30 cm de deformación positiva, mientras que, para la región de La Hoya, se mantiene entre -13 a 14 de acumulado. Es importante mencionar la tendencia de acumulados positivos se repite también sobre las zonas inferiores a la cota 900, comportamiento que no se muestra en la trayectoria ascendente y que debe ser verificado por mediciones en campo con GPS de doble frecuencia.

V. Punto de Control 1942 – Boca Eruptiva Flanco NO – Entre Cota 1500 y 1600

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252466.48352; Y = 1521582.23931

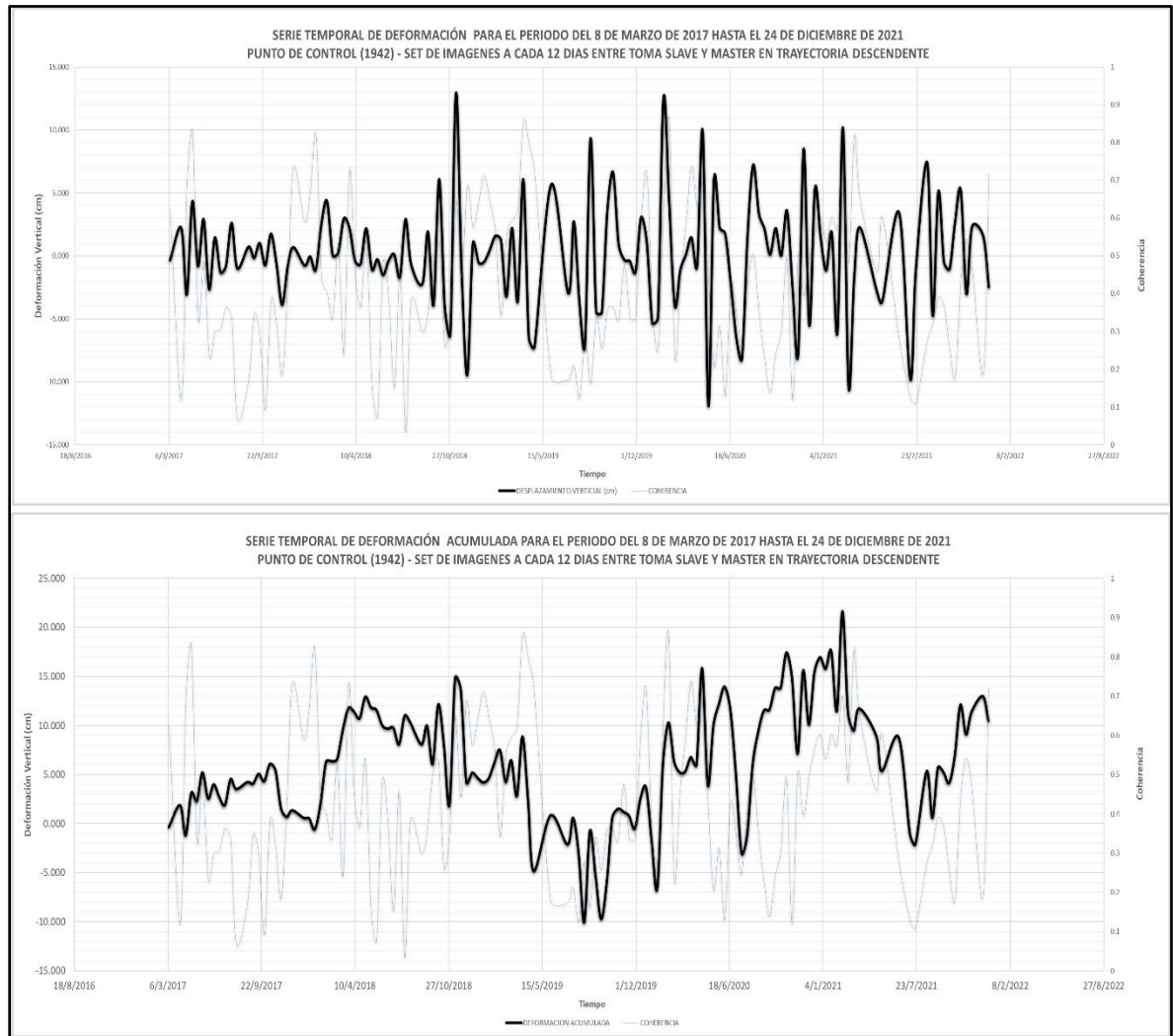


Figura 84. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

Para la zona del flanco norte, se mantiene la tendencia de los acumulados hacia un dominio positivo, mostrando además en el registro periódico de deformaciones, variaciones significativas entre valores negativos y positivos, oscilando de los -10 a los 13 cm de desplazamiento, con acumulados de -10 a 20 cm, el cual refleja el comportamiento de la dinámica de deformación sobre laderas debido a procesos de meteorización y erosión.

VI. Punto de Control 134 – Boca Eruptiva Flanco NO – Sobre Cota 800

Datos Sin Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 250804.11980; Y = 1525073.78700

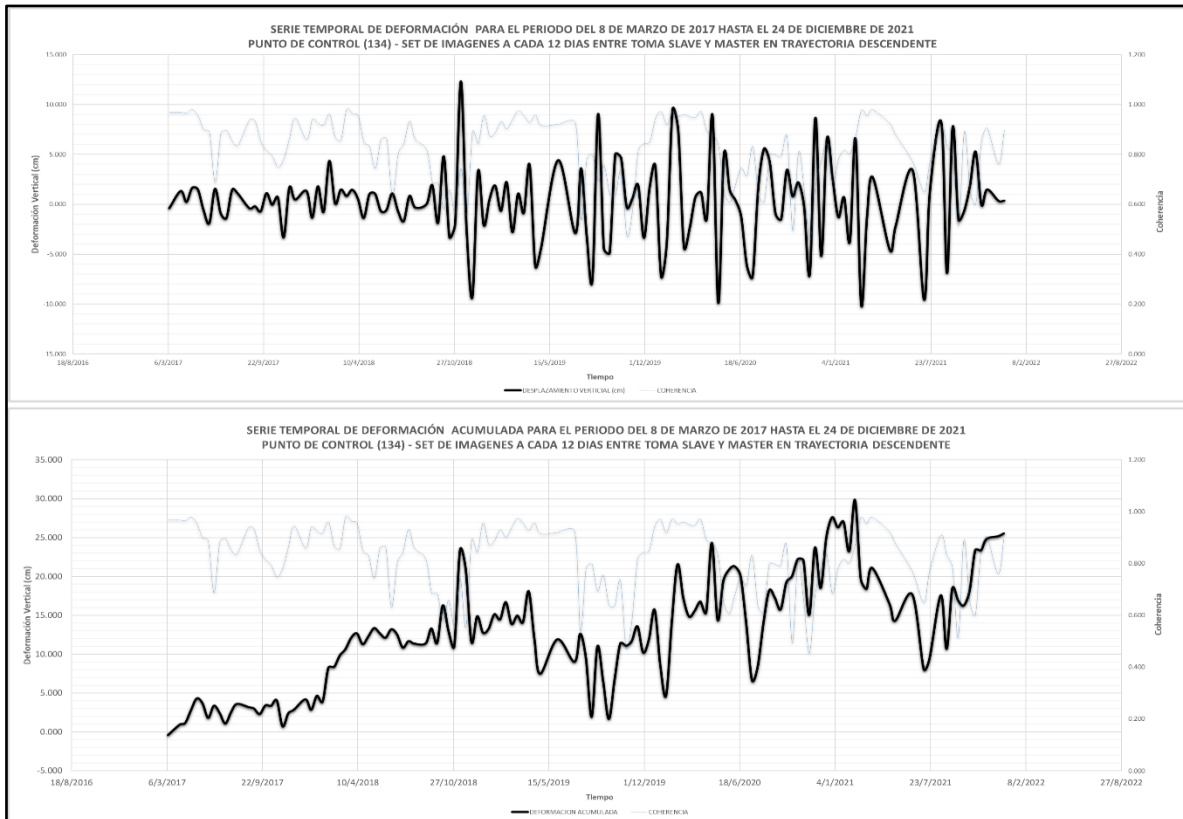


Figura 85. Series Temporales de Deformación en Trayectoria Descendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS sin Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

El comportamiento del PC134 es muy similar al del PC1942 debido a su relativa cercanía, demostrando que la trayectoria satelital descendente mantiene debajo de la cota 900 una tendencia positiva sobre los acumulados de deformación, fluctuando entre los 2 a 30 cm y presentando oscilaciones menores con respecto al punto anterior de entre -9 a 9 cm de desplazamiento sobre el registro periódico de deformaciones.

En resumen, aunque los registros dependan de marcos referenciales distintos, ambas trayectorias demuestran que, según el acumulado de deformación, es el flanco norte el que se ve mayormente afectado por los procesos de deformación, ya sean tectónicos o geomorfológicos, teniendo en claro que las zonas centro y sur se ven igualmente afectada.

Con el objetivo de determinar en qué momento la tendencia de deformación ha presentado sus cambios más significativos, se calculan nuevamente los gráficos de deformación acumulada con valor absoluto.

Citando lo analizado en el capítulo 9.1 y 9.2, es importante comprender que los datos en trayectoria descendente no mostrarán los mismos valores de deformación ni tendencias que en la trayectoria ascendente, puesto que hay diferencias relacionadas a la geometría de adquisición y tamaños del set de datos, lo cual también genera que el factor de coherencia varíe significativamente.

Con la finalidad de determinar una correlación confiable entre trayectorias, se evalúa el acumulado de deformación para comprender en qué momento suscitan los desplazamientos más significativos, si el orden de magnitud entre los datos es coincidente o en cuanto es su variación, y para verificar que la dinámica de deformación sea semejante entre trayectorias.

I. Estación de Monitoreo VSSS – MARN – San Salvador – Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Referencia.

Coordenadas: X = 258650.48590; Y = 1514300.21100.

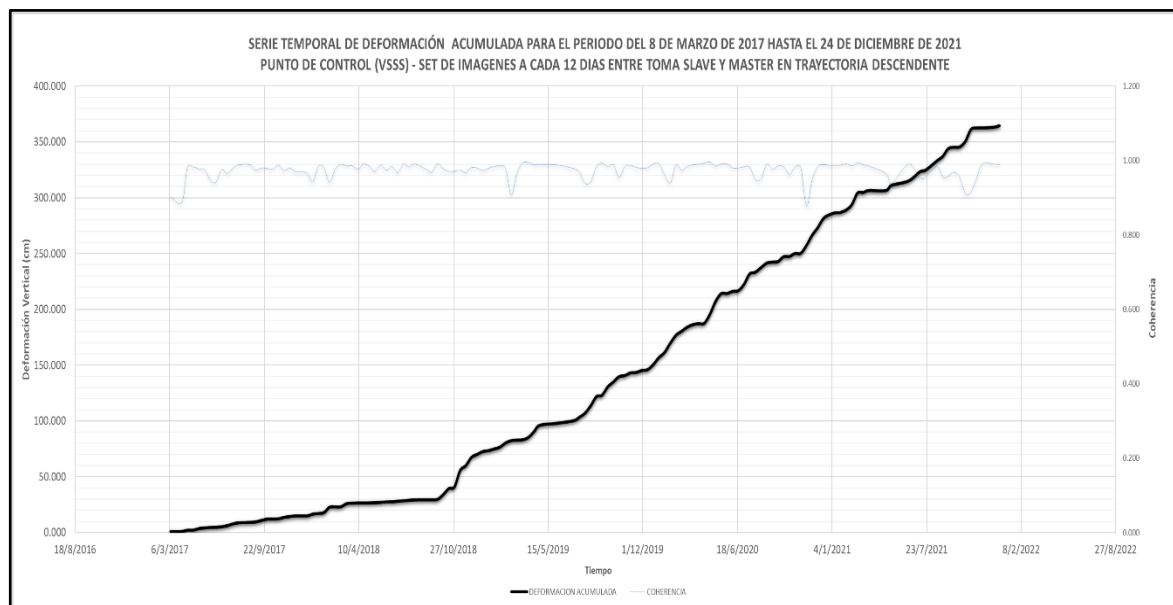


Figura 86. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente en la estación de monitoreo VSSS del DGOA-MARN, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto.

Fuente: Elaboración Propia.

II. Punto de Control 1125 – Plan de la Laguna – Antigo Cuscatlán - Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Estable

Coordenadas: X = 256805.33160; Y = 1512591.39300

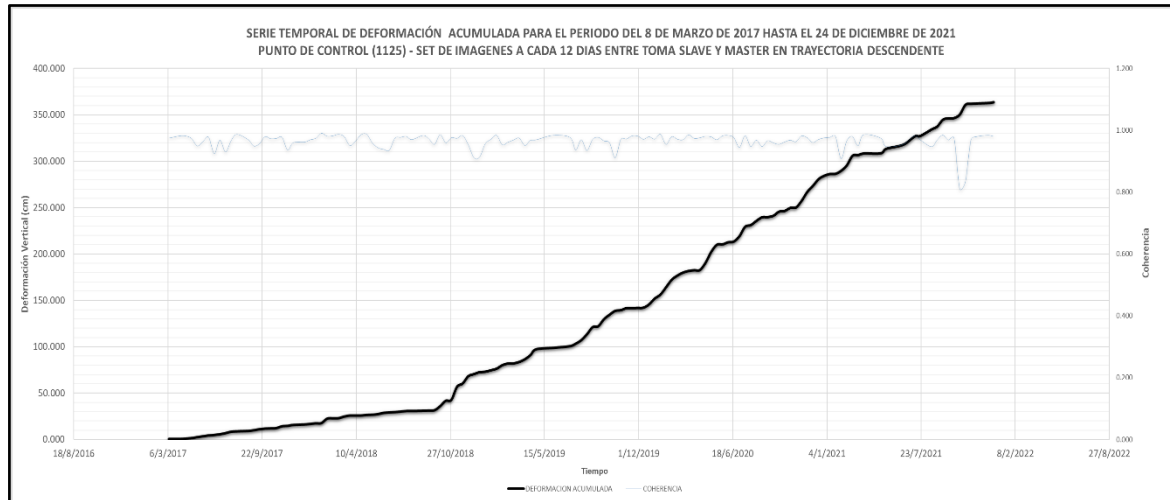


Figura 87. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1125, Ubicado en el Plan de la Laguna de Antigo Cuscatlán, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

III. Punto de Control 1503 – Al NO del Centro Eruptivo La Hoya - Cota 1400

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 253662.93092; Y = 1517591.63294

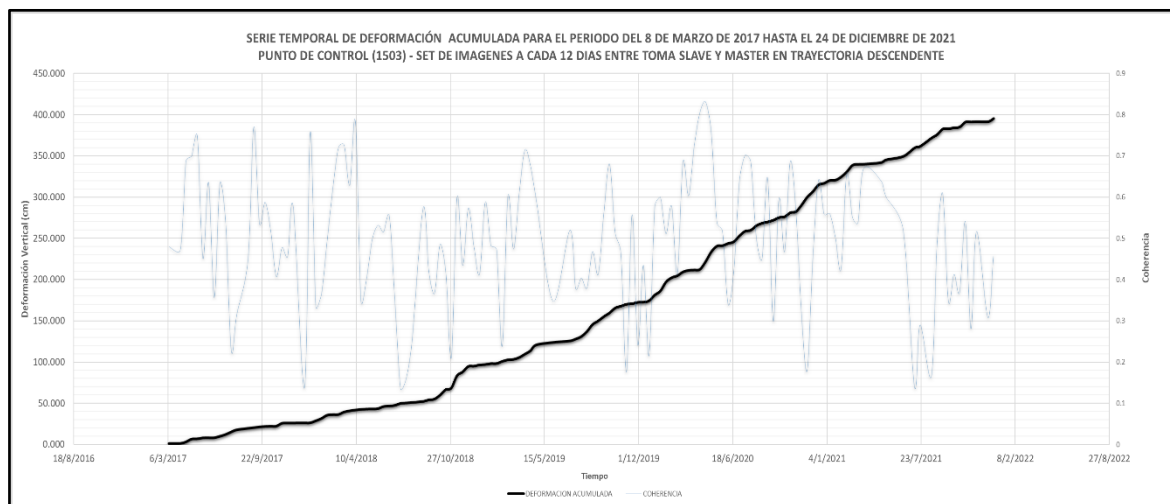


Figura 88. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1503, Ubicado al NE del Centro Eruptivo de La Hoya, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

IV. Punto de Control 1555 – Cráter Boquerón

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252700.24823; Y = 1519913.19279

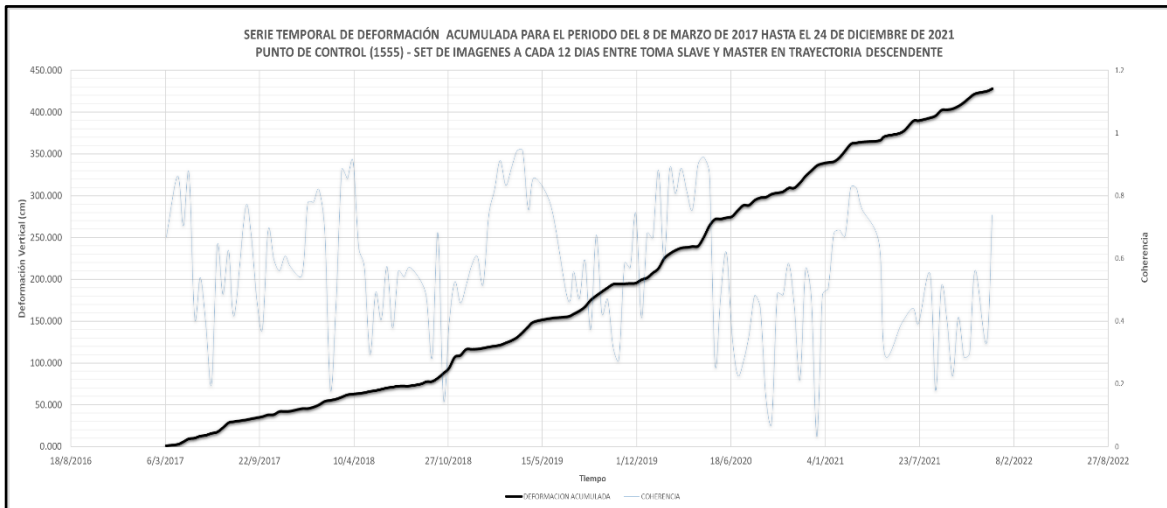


Figura 89. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1555, Dentro del Cráter Boquerón, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

V. Punto de Control 1942 – Boca Eruptiva Flanco NO – Entre Cota 1500 y 1600

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 252466.48352; Y = 1521582.23931

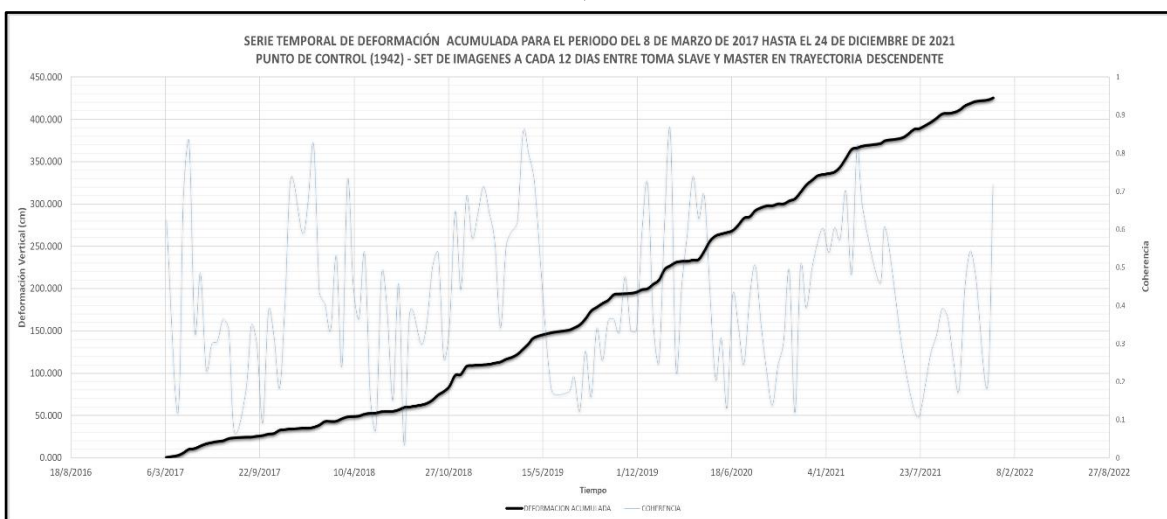


Figura 90. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 1942, Sobre la Boca Eruptiva de 1917 del Flanco NO entre las cotas 1500 y 1600, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

VI. Punto de Control 134 – Boca Eruptiva Flanco NO – Sobre Cota 800

Datos Con Valor Absoluto

Tipo: Punto de Deformación Crítico

Coordenadas: X = 250804.11980; Y = 1525073.78700

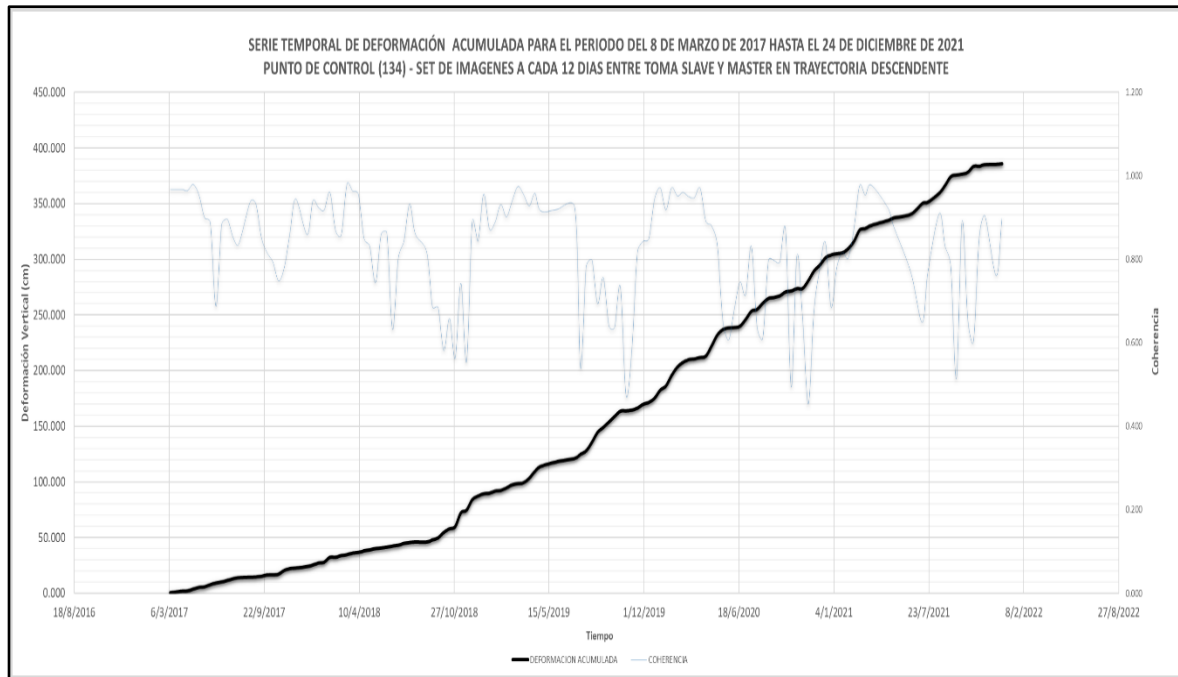


Figura 91. Serie Temporal de Deformación Acumulada en Trayectoria Descendente del Punto de Control 134, Sobre las Bocas Eruptivas del Flanco NO Sobre la Cota 800, para Periodo de 2017 - 2021 sobre la Zona de Fracturas del CVSS con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

De manera general, ambas trayectorias son consistentes debido a que reflejan un mayor acumulado de deformaciones sobre el flanco norte del volcán, presentando para la trayectoria ascendente valores arriba de los 500 cm para el periodo entre 2017 a 2021, mientras que la trayectoria descendente presenta valores de hasta 450 cm.

Además, aunque la trayectoria descendente recubre una mayor extensión del área de estudio, presenta valores generalmente más bajos de coherencia relacionados a la dispersión misma del set de datos, pero también al ángulo de visión del sensor radar, el cual en trayectoria descendente no se muestra tan eficaz en la zona de fracturas del CVSS como si lo es la trayectoria ascendente, puesto que registra deformación positiva en sectores donde la sismicidad y actividad humana sugieren procesos de subsidencia o deflaciones; esta aseveración se reforzada a partir de la correlación de datos con GPS en la sección 10.4

9.6.3. En Resumen

- I. Se comprueba mediante el registro temporal que, la medición de los desplazamientos del terreno por DInSAR es relativa entre trayectorias satelitales, es decir que la magnitud y dirección del vector deformación depende del punto de mira por el cual el sensor capta los cambios del terreno.
- II. Las series temporales del acumulado de deformación en ambas trayectorias muestran en conjunto con los mapas de la sección 9.5, que la deformación en la zona de fracturas del CVSS es mayor en el flanco norte; sin embargo, los efectos que ejercen la carga antrópica y la liberación de esfuerzos tectónicos en el flanco sur, es una clara señal de que dicho sector es igualmente o más vulnerable a experimentar cambios abruptos en sus valores de desplazamiento vertical.
- III. De manera general, la principal fuente de deformación en la zona de fracturas del CVSS es la sismicidad, mostrando en las series temporales ascendentes, picos en los registros de deformación debidos a la actividad sísmológica de 2020 en la zona del volcán Boquerón y flanco norte, y según la trayectoria descendente picos de deformación en 2018 para las zonas referentes a cotas menores de 900 m.s.n.m.
- IV. El dominio de los desplazamientos en el CVSS tiende a la deformación negativa, es decir que todos los procesos tectónicos, volcánicos y geomorfológicos asociados, generan sobre el terreno subsidencia o deflación, por lo que es de vital importancia evaluar el impacto de la sobreexplotación de pozos y formación de planos de deslizamiento productores de derrumbes en zonas geológicamente inestables.
- V. La trayectoria satelital que posee mayor correlación temporal con el registro sísmico y características geoestructurales de la zona de fracturas del CVSS es la trayectoria ascendente, sin embargo, en función del ángulo de visión del sensor, la trayectoria descendente puede usarse para analizar el comportamiento de la deformación en las zonas altitudinalmente bajas de CVSS.
- VI. Es importante mencionar que los registros entre 2017 y 2020 indican liberación de esfuerzos, pero la tendencia a partir de 2021 sugiere la transición a un período de acumulación de esfuerzos evidenciada por la escasa actividad sísmica de dicho año.
- VII. Se ha comprobado con los presentes resultados la eficiencia de la técnica DInSAR para ejercer un monitoreo de deformaciones confiable y eficiente sobre el CVSS.

10. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

10.1. Evaluación de las Deformaciones en la Zona de Fracturas del CVSS

Citando lo expuesto en los capítulos 9.5.3 y 9.6.3, se ha logrado determinar que la dinámica de deformación ha sido mayor en la zona del flanco norte del volcán, pero igualmente significativa en la región central del volcán Boquerón y zona sureste de la zona de fracturas del CVSS.

Se ha identificado por medio de las series temporales que los desplazamientos tienden a valores negativos de deformación, es decir que, para el periodo de análisis los movimientos mayoritarios del terreno se han debido a episodios de liberación energética como sismos y variaciones topográficas relacionadas a procesos geomorfológicos o morfogenéticos, en términos de deslizamientos, desprendimientos de tierra, meteorización, erosión, expansión de la mancha urbana y posible sobreexplotación de los acuíferos.

La correlación entre trayectorias satelitales y la delimitación espacial por coherencia facilitaron la obtención de los resultados presentes, permitiendo generar una cartografía y base de datos que posibilitan analizar de forma específica, la evolución anual de los desplazamientos verticales sobre el terreno de la zona de fracturas del CVSS.

En esta sección se expondrá por medio de una cartografía temática y análisis, la variabilidad anual de la coherencia y la deformación acumulada con valor absoluto en ambas trayectorias satelitales, para evaluar la tendencia de los desplazamientos sobre la zona de estudio.

10.1.1. Variación Anual de la Coherencia

La evaluación temporal del parámetro coherencia adquiere importante relevancia debido a que no solo delimita la zona de aplicabilidad de la técnica, sino que también permite analizar como los factores de decorrelación varían y se distribuyen geográficamente, garantizando y poniendo a evaluación la factibilidad del uso prolongado de la técnica DInSAR para ejercer eficientemente planes de monitoreo continuo de deformaciones.

Es importante aclarar que las zonas de baja coherencia no son sectores despreciables, al contrario, son zonas importantes, en las cuales deben de aplicarse métodos geofísicos o de mediciones topográficas de precisión para revelar sus condiciones de deformación.

10.1.1.1. Trayectoria Ascendente

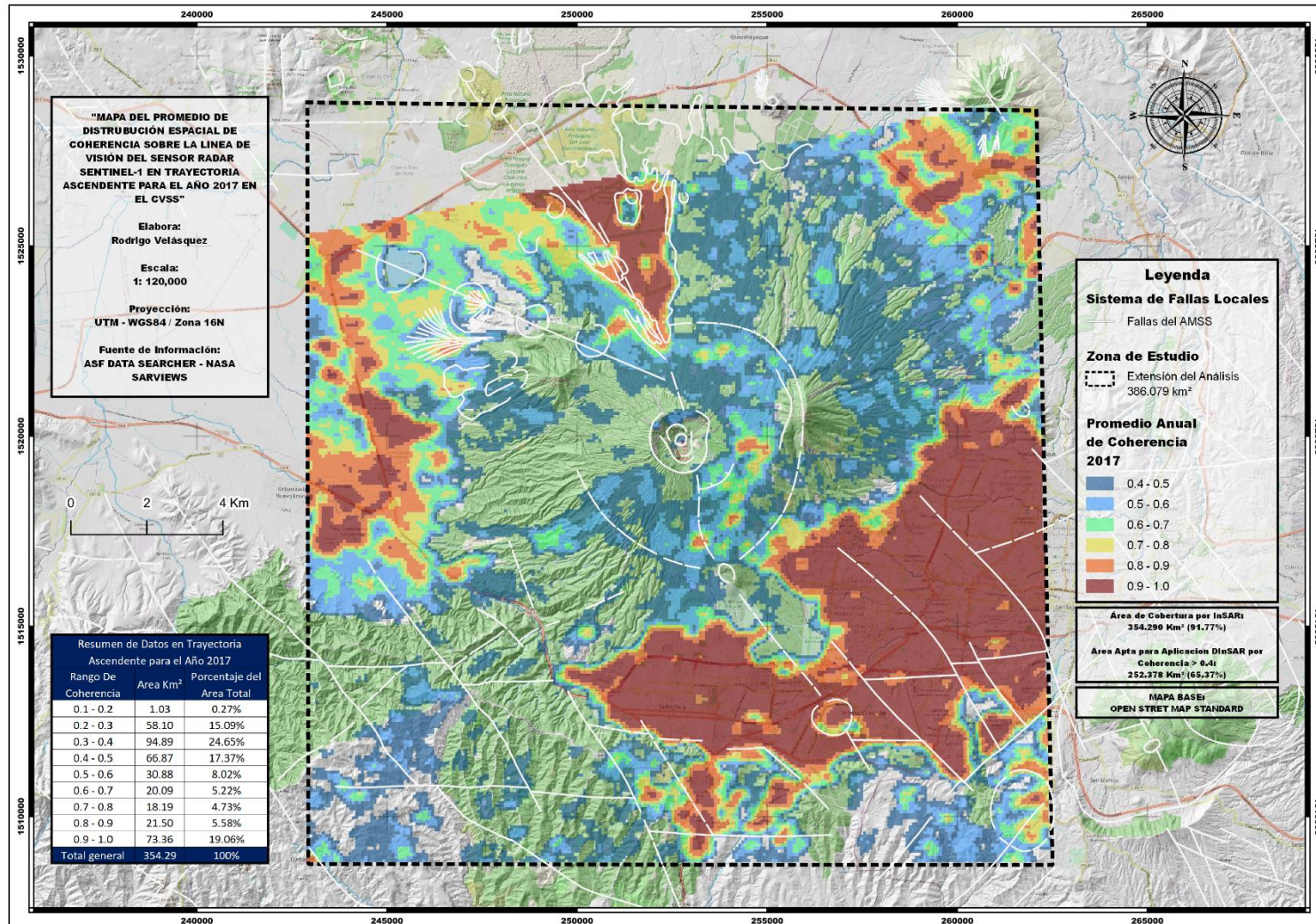


Figura 92. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

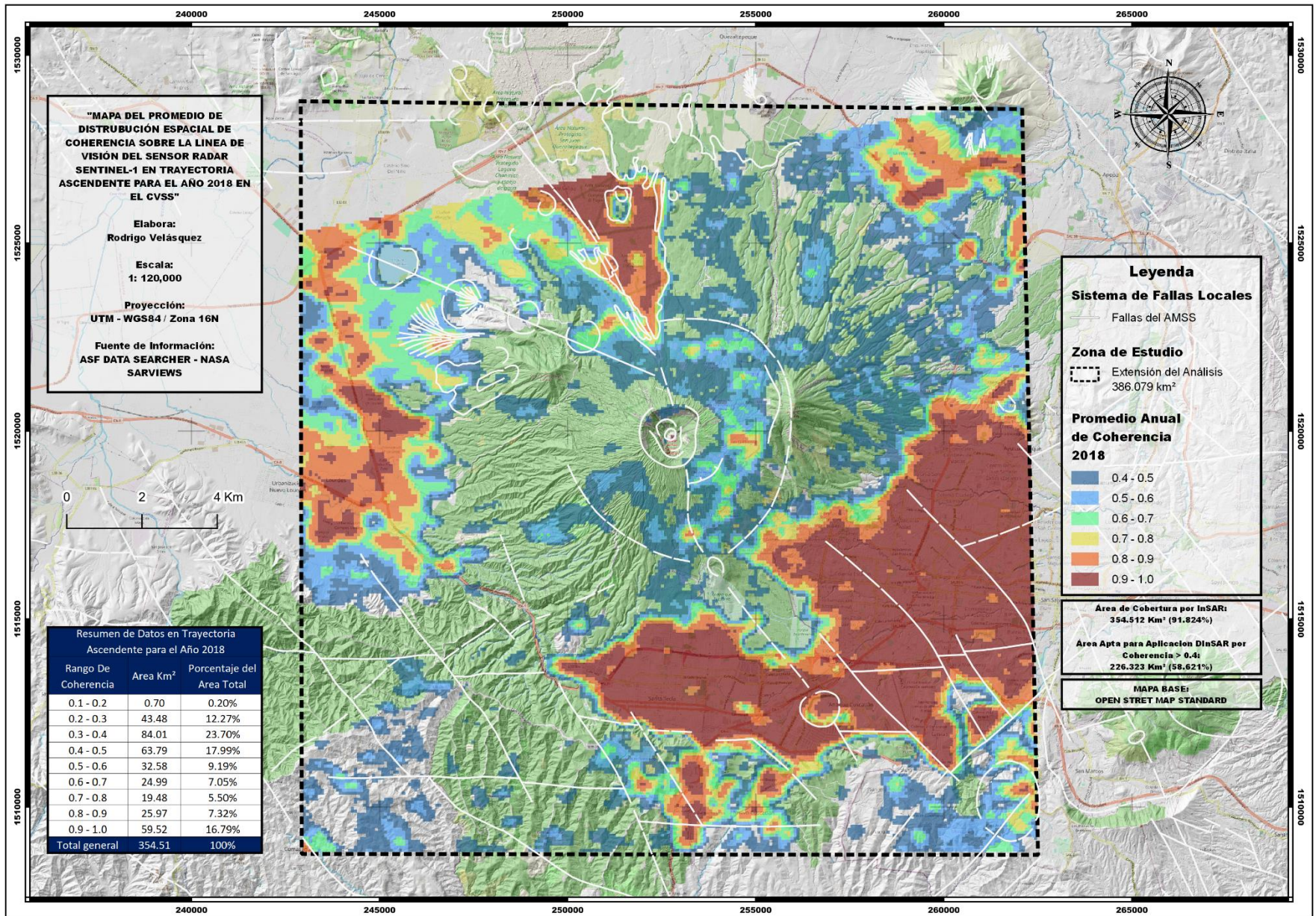


Figura 93. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

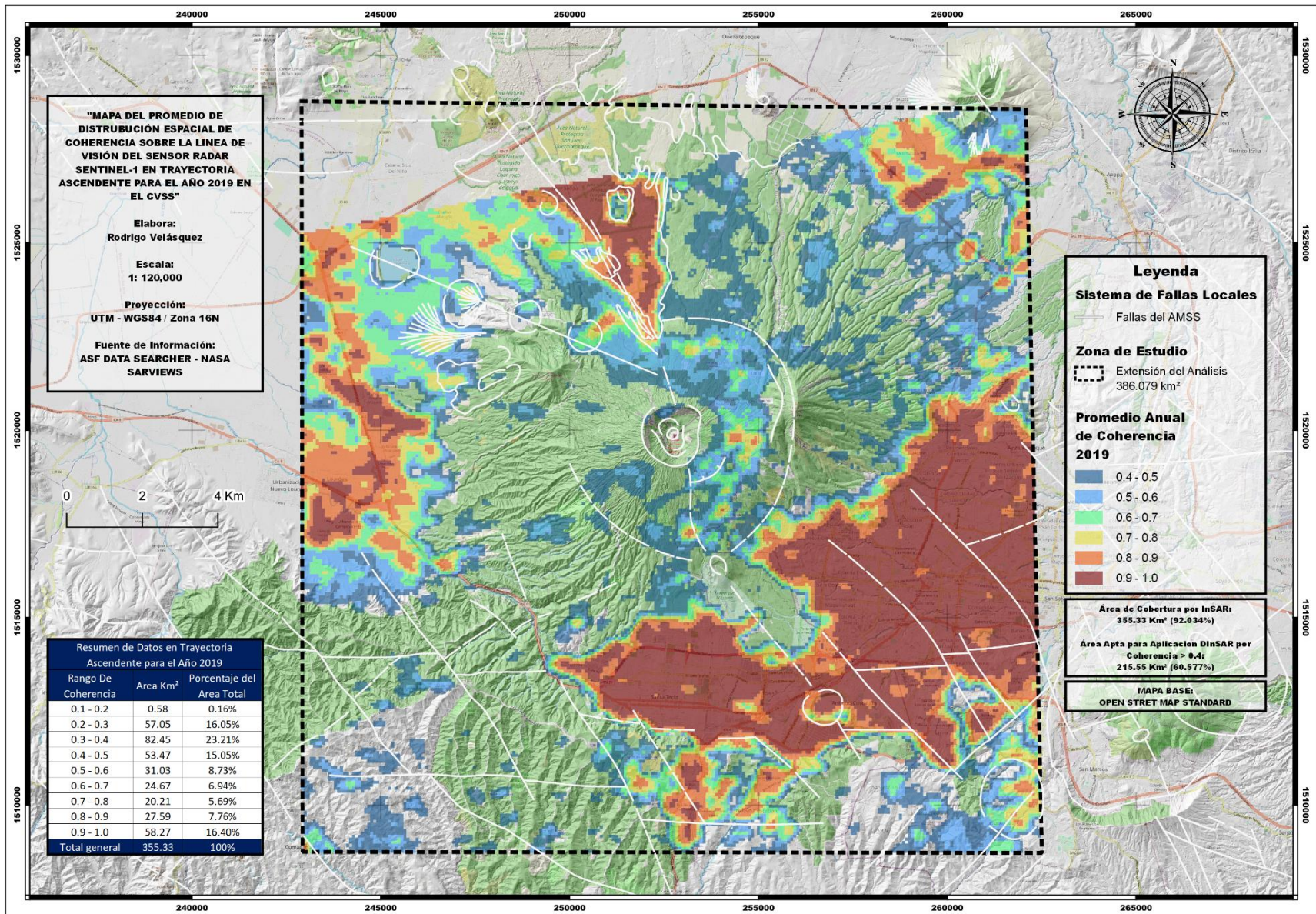


Figura 94. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

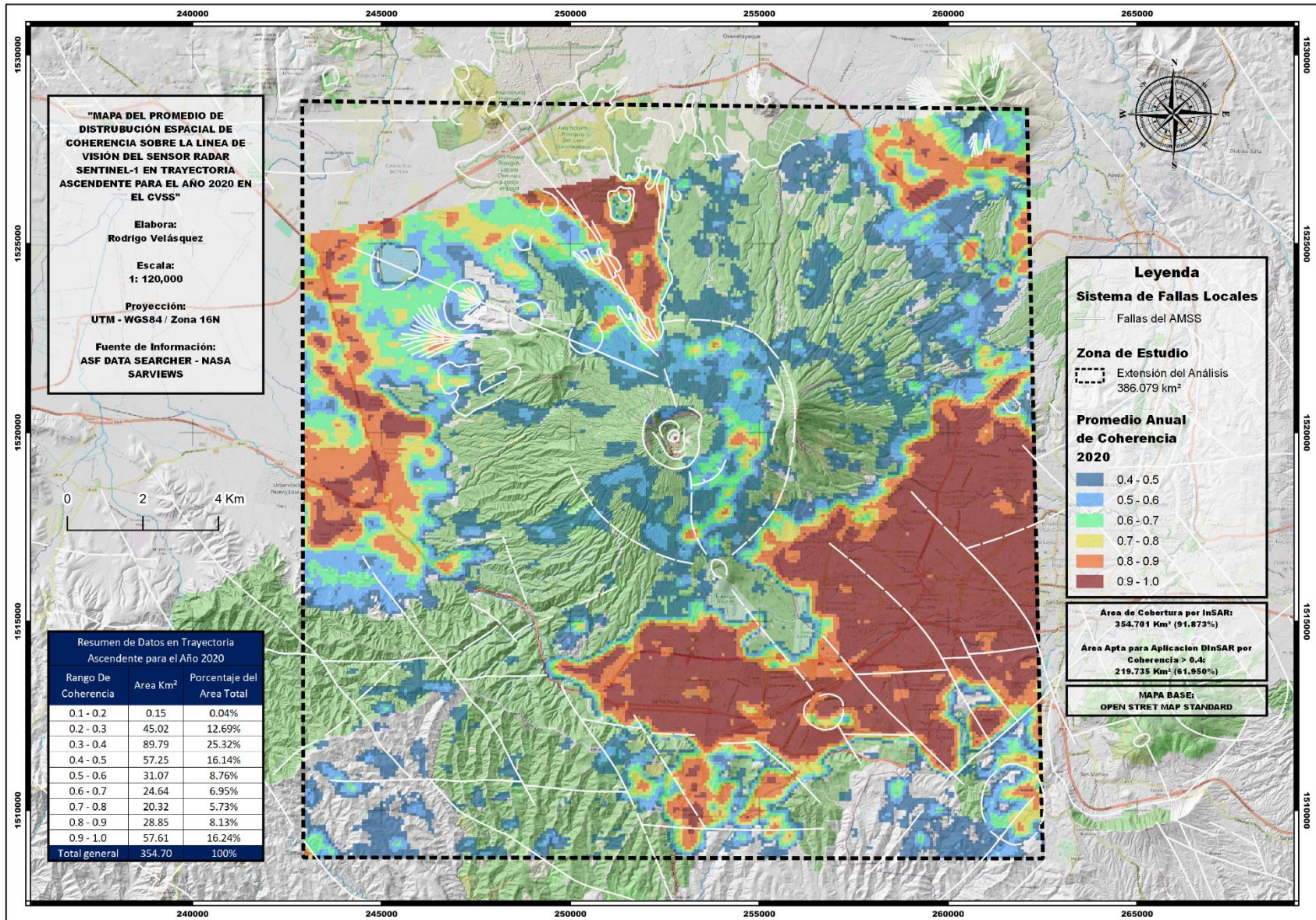


Figura 95. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

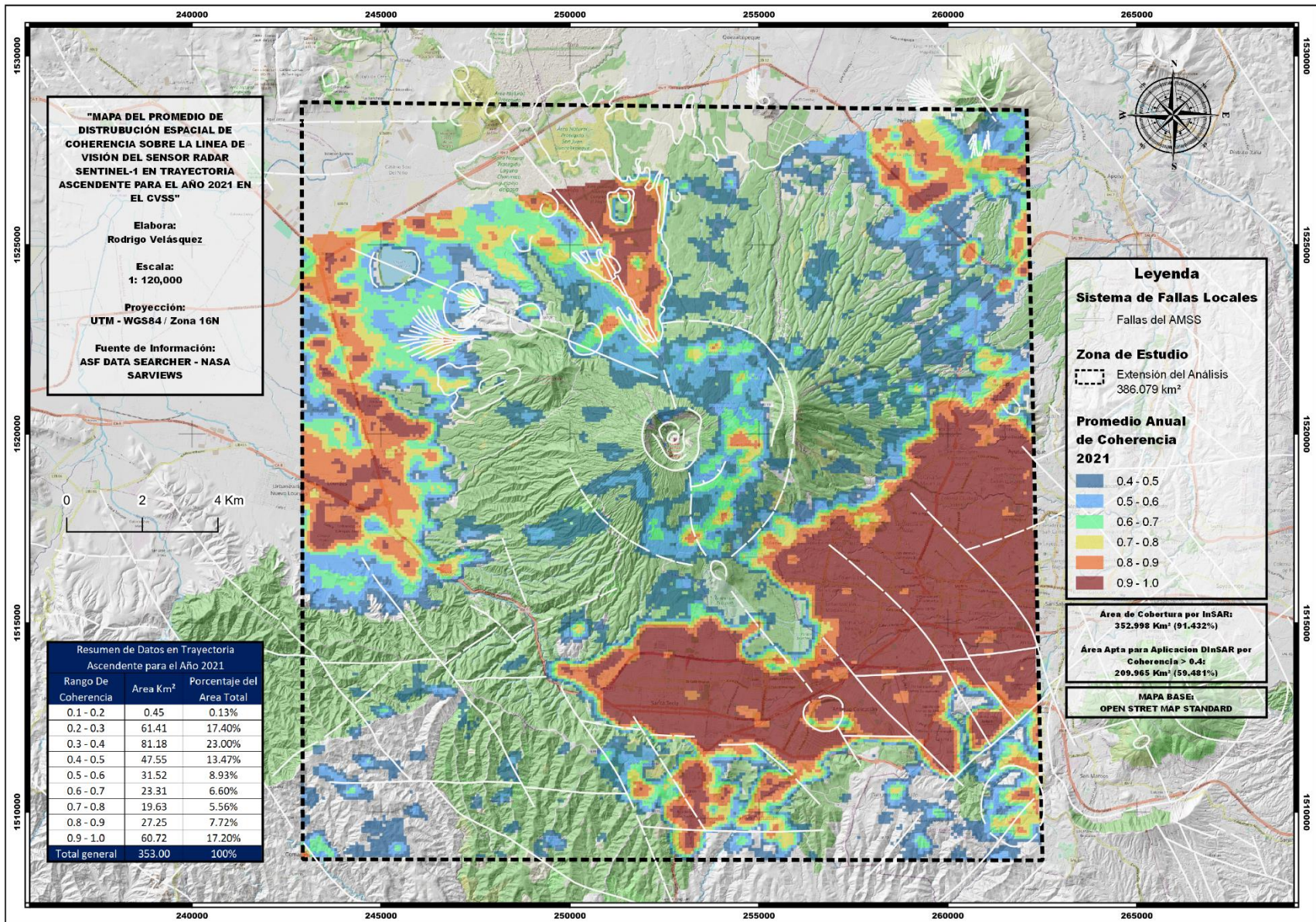


Figura 96. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

10.1.1.2. Trayectoria Descendente

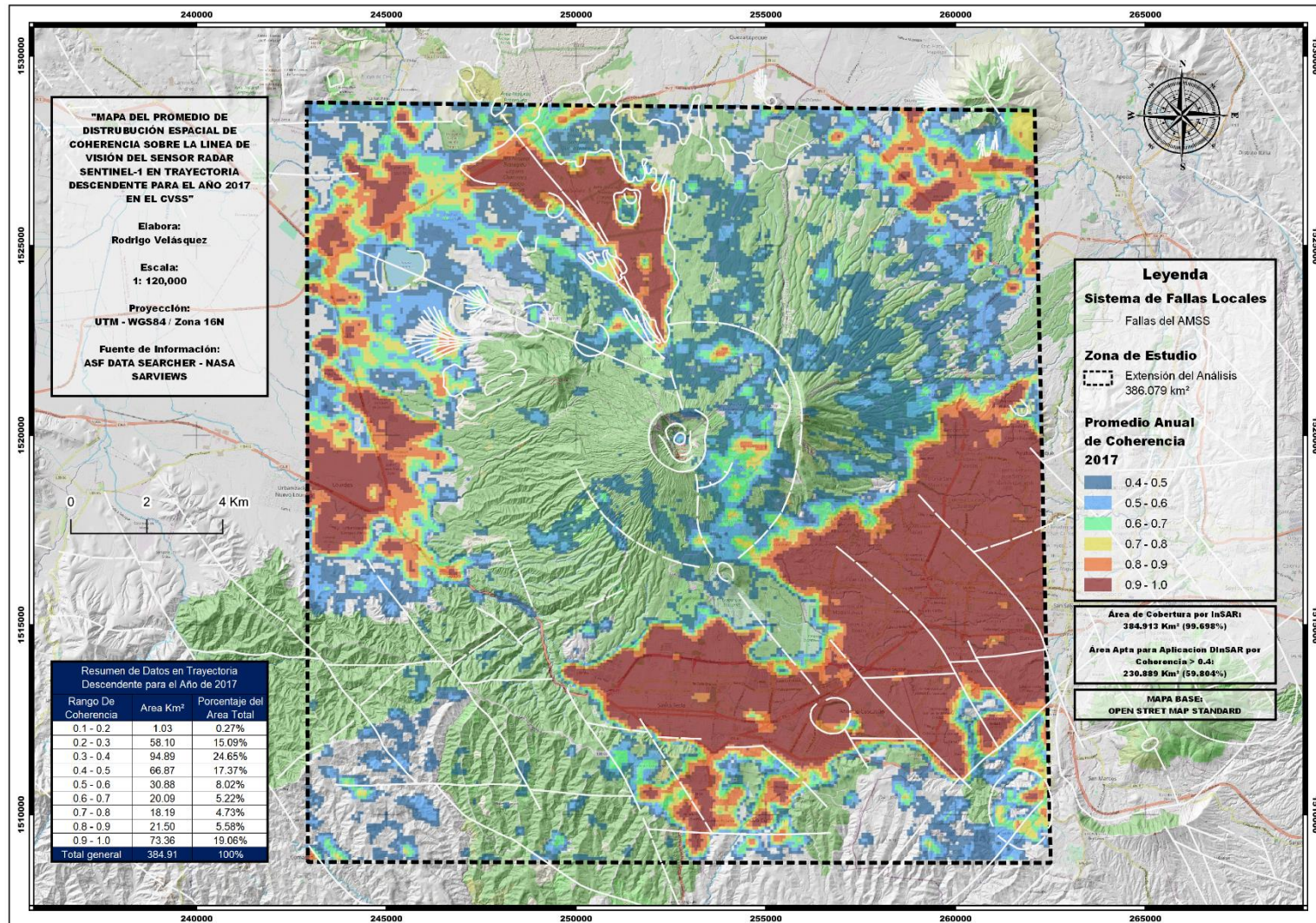


Figura 97. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

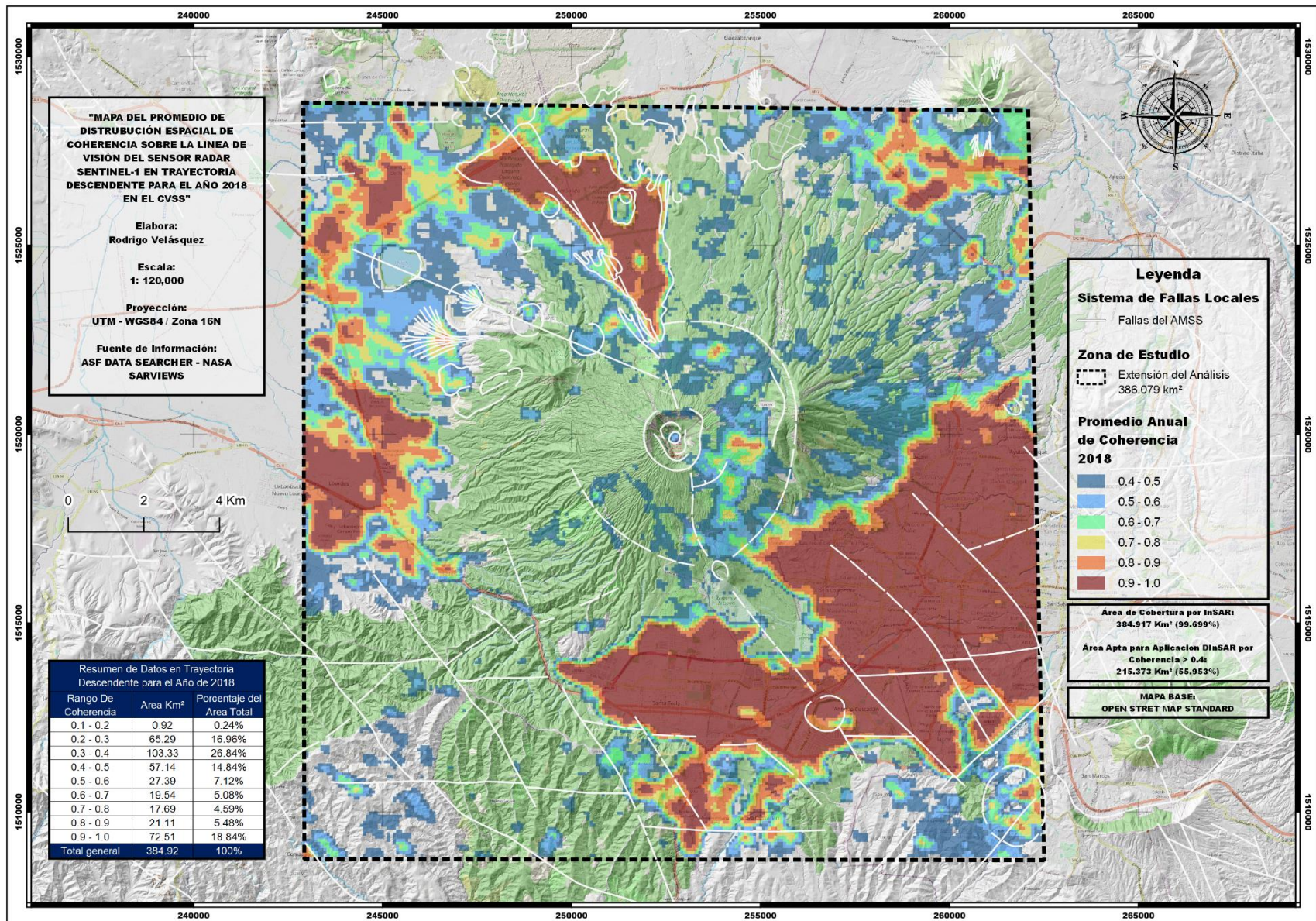


Figura 98. Mapa del Acumulado de Deformación por DinSAR durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

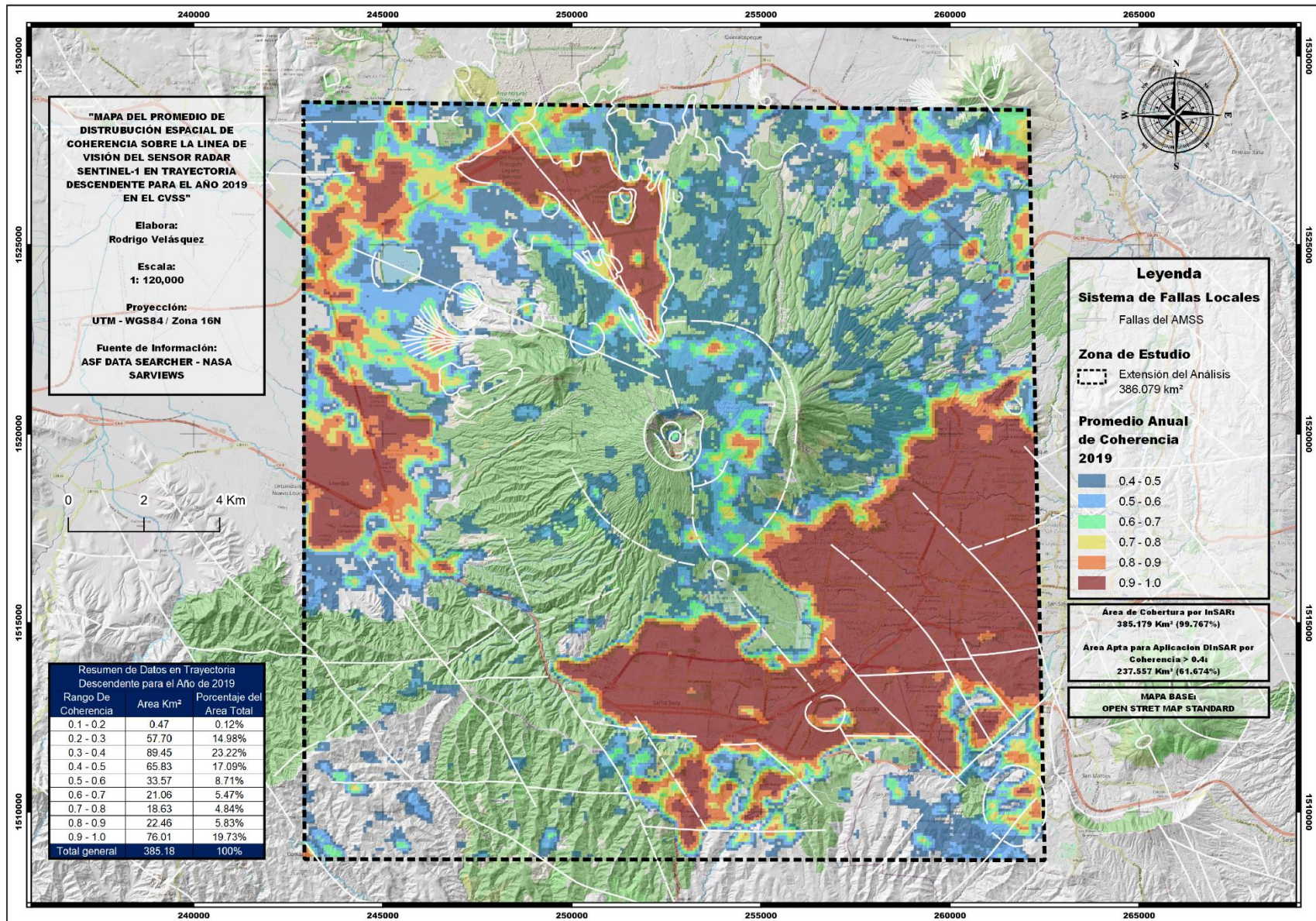


Figura 99. Mapa del Acumulado de Deformación por DinSAR durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

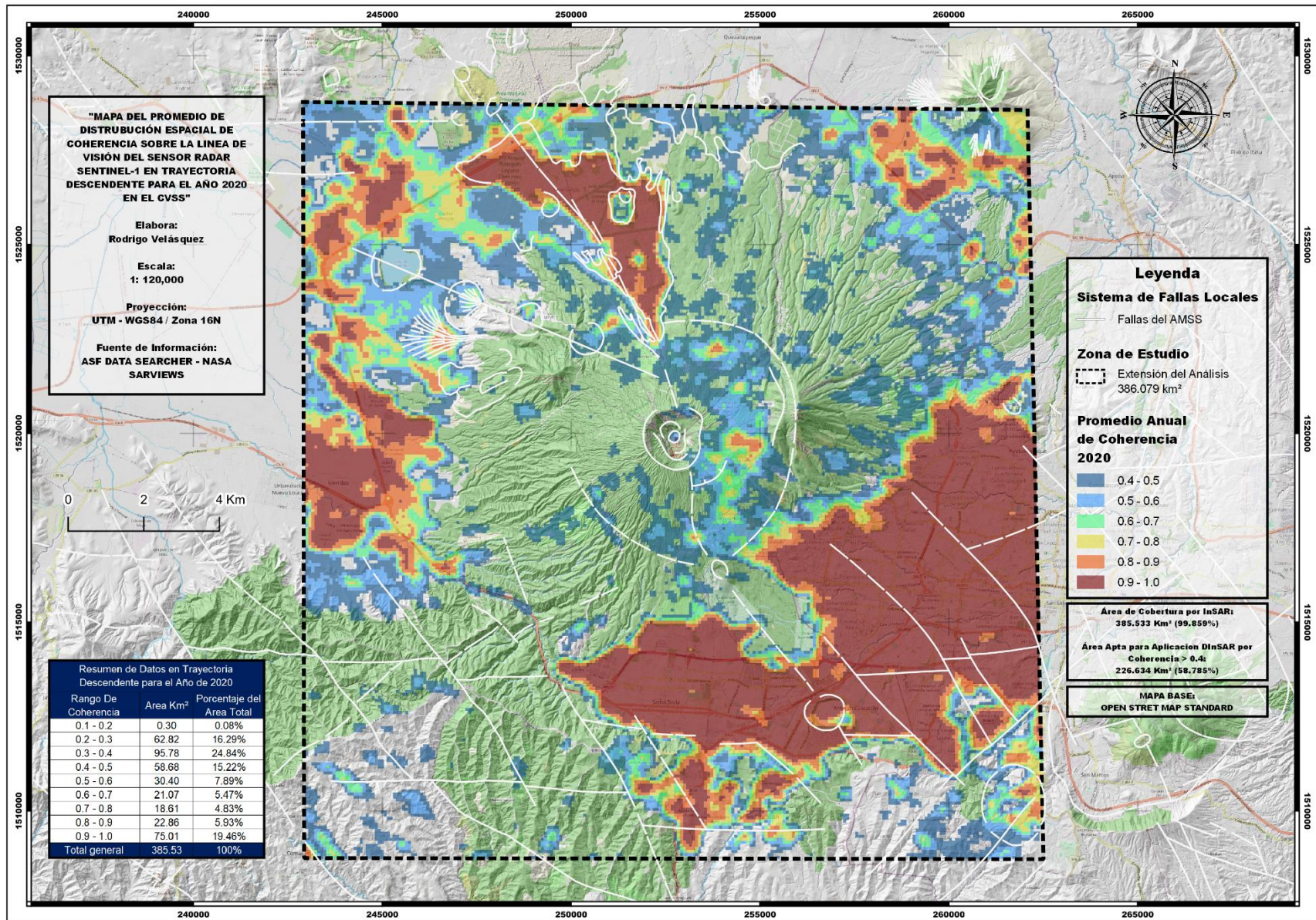


Figura 100. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

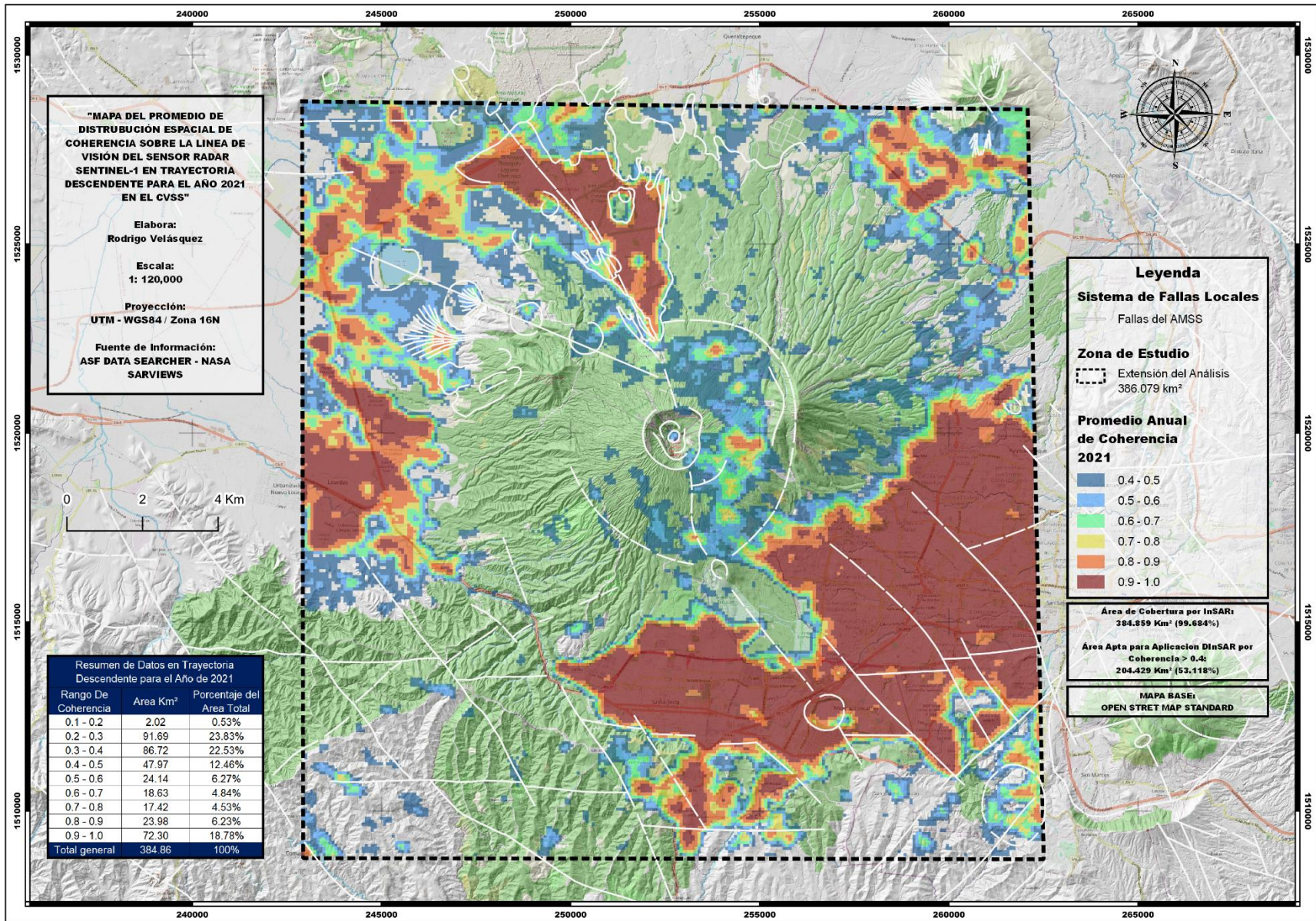


Figura 101. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

10.1.1.3. Análisis

Al analizar la distribución geográfica de la coherencia sobre la zona de estudio por medio de la cartografía temática presentada, es posible observar que:

- I. La región de visión promedio por DInSAR para la zona del CVSS durante 2017 a 2021, ha mantenido valores consistentes en concepto de “Área de Cobertura General Sobre el CVSS”, rondando entre los 352 Km² a 355 Km² en trayectoria ascendente y de 384 Km² a los 385 Km² en trayectoria descendente.
- II. En términos del “Área Apta para la Aplicación DInSAR”, el cual hace referencia a sectores con una coherencia mayor a 0.4, se detecta que, para la trayectoria ascendente, los registros de dicho parámetro tienden a experimentar una disminución severa, pasando de los 252 Km² de cobertura en 2017 a 209 Km² para 2021, siendo el único periodo de aumento de coherencia durante el año 2020.
- III. Para el caso de la trayectoria descendente, la coherencia presenta una misma tendencia decreciente, pasando de 230 Km² de cobertura para 2017 a 204 Km² de cobertura para 2021, presentando un aumento significativo en el año de 2019 alcanzando los 237 Km² con respecto a los 215 Km² del año 2018.

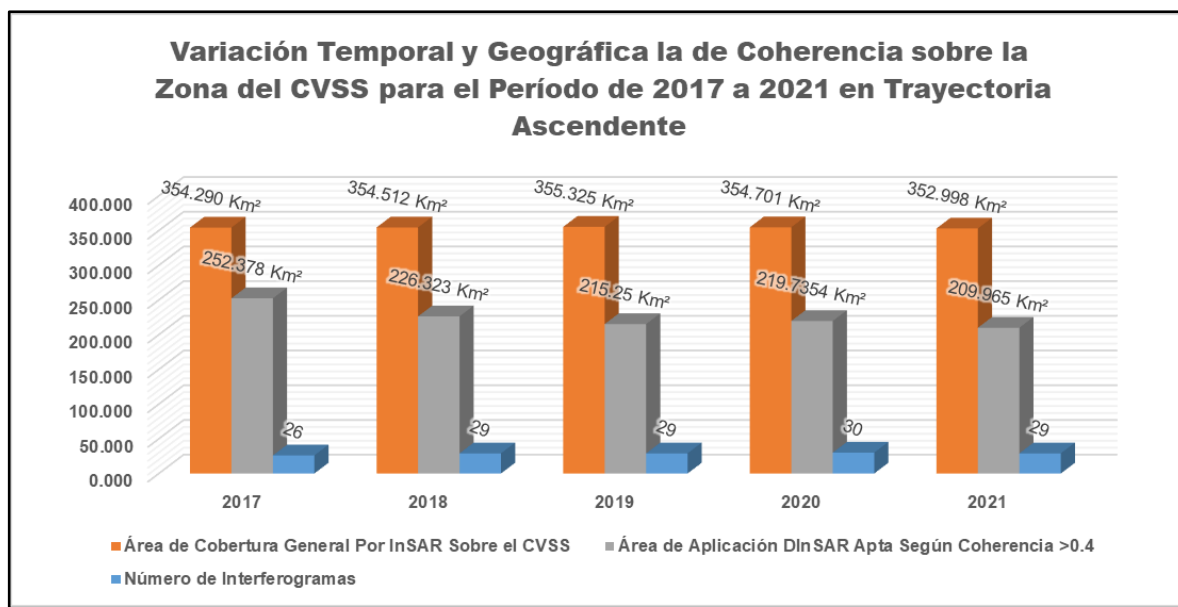


Figura 102. Gráfico de la variación temporal y geográfica de la coherencia, sobre la zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente para el periodo de 2017 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.

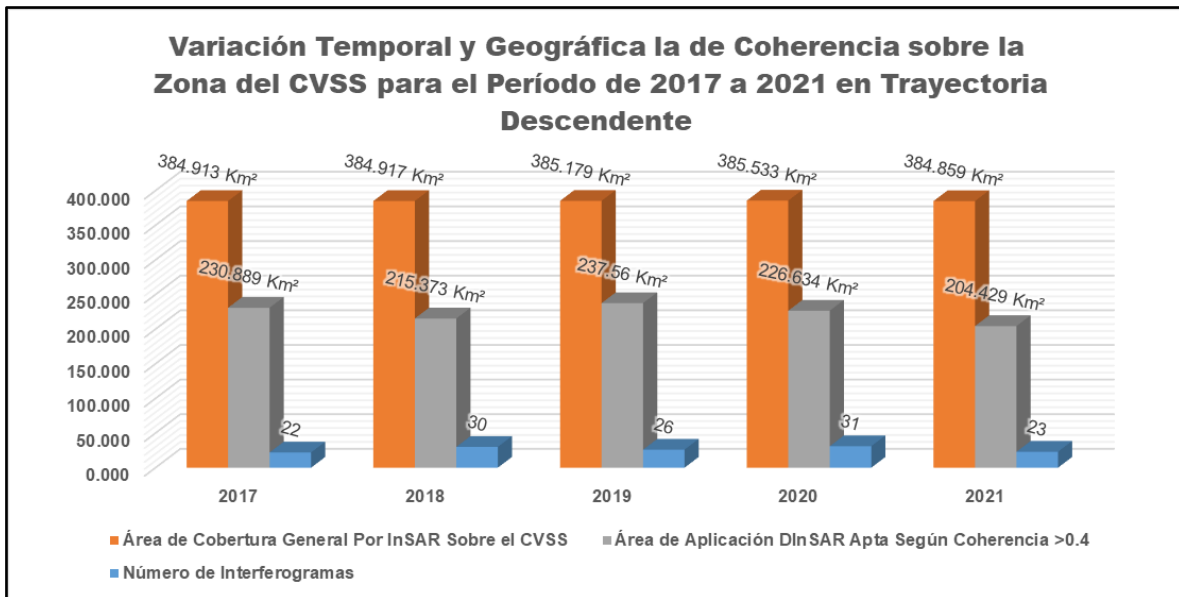


Figura 103. Gráfico de la variación temporal y geográfica de la coherencia, sobre la zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente para el periodo de 2017 a 2021. Fuente: Elaboración Propia.

- IV. Las zonas de alta coherencia (0.8 – 1.0) están principalmente relacionadas al AMSS, sector de lavas de Quezaltepeque y Lourdes debido a la poca vegetación presente, las zonas de coherencia media (0.6 – 0.8) se asocian a los márgenes externos del AMSS, Carretera Panamericana, Carretera hacia Quezaltepeque y sobre el sector comercial de Calle al Volcán, el cual, en conjunto con la zona de laderas del volcán, es un sector en donde además se manifiestan los valores menores permitidos de coherencia (0.4 – 0.6) debido a la importante presencia de vegetación.
- V. Los valores de baja coherencia en la zona de fracturas del CVSS pueden asociarse también a sectores susceptibles a deslizamientos, suelos sobresaturados o con cambios de uso muy significativos, capaces de generar cambios bruscos en el suelo.
- VI. Aunque el área de cobertura general por el sensor de radar Sentinel-1 sea mayor en trayectoria descendente debido al ángulo de visión del satélite, en promedio para el periodo de estudio ambas trayectorias registran valores similares de áreas aptas de aplicación por coherencia, rondando para la trayectoria descendente los 222 Km² de cobertura y para la trayectoria ascendente los 224 Km² de cobertura, con una misma tendencia temporal decreciente y distribución consistente del factor de decorrelación entre zonas de baja, media y alta coherencia.

10.1.2. Variación Anual de la Deformación

Se muestra a continuación la cartografía temática del acumulado anual de deformaciones para la zona de fracturas del CVSS.

10.1.2.1. Trayectoria Ascendente

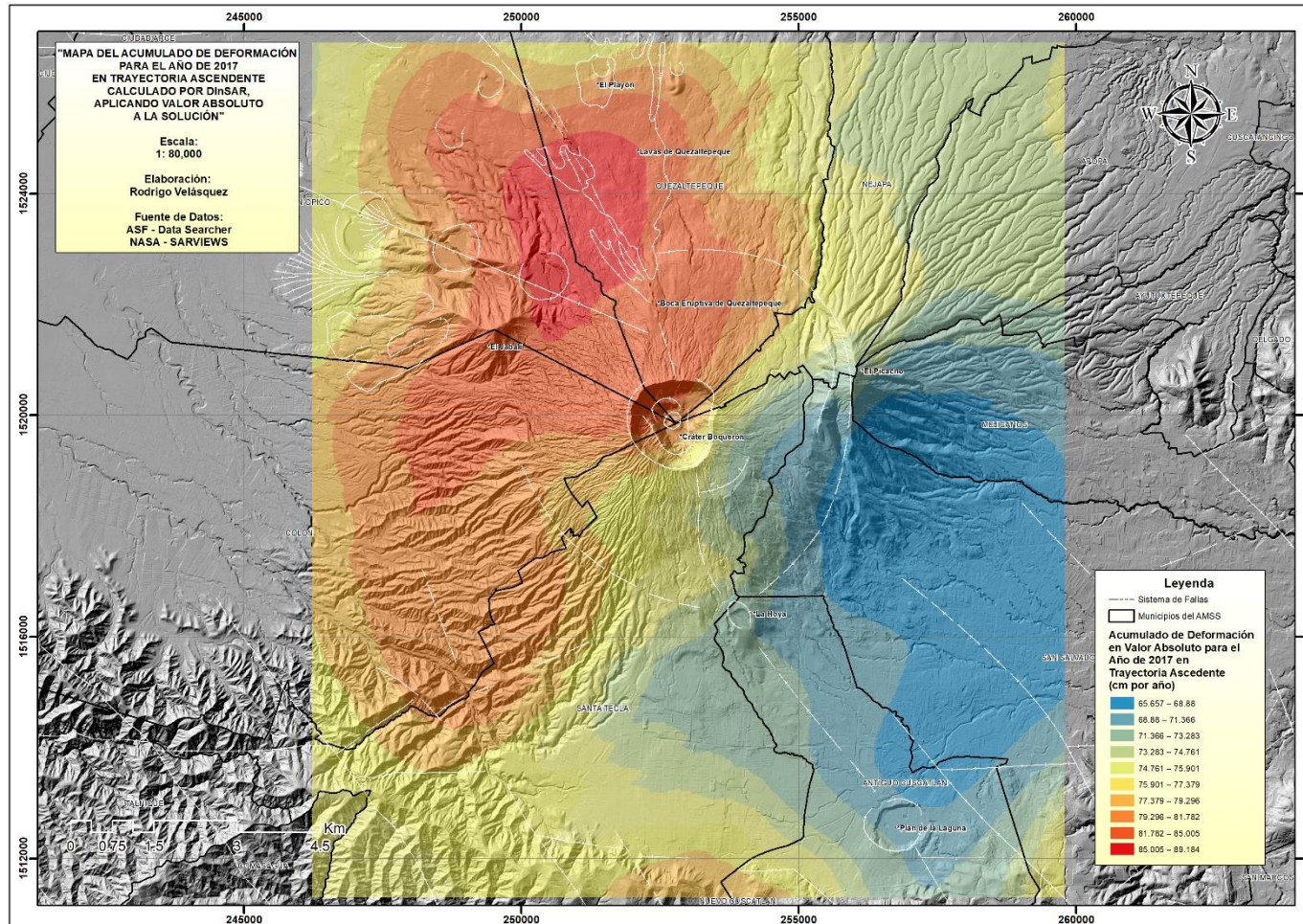


Figura 104. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en

Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

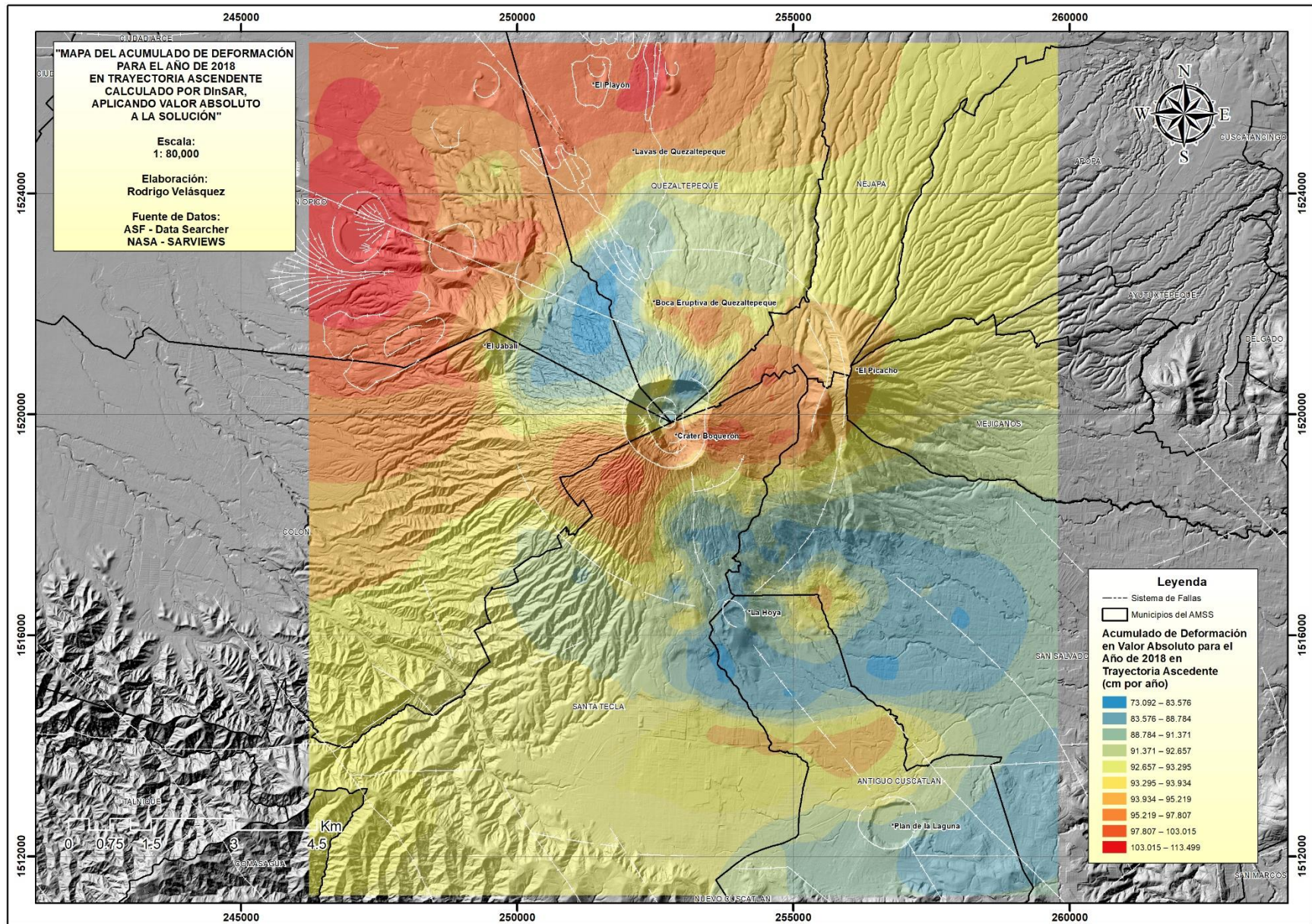


Figura 105. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

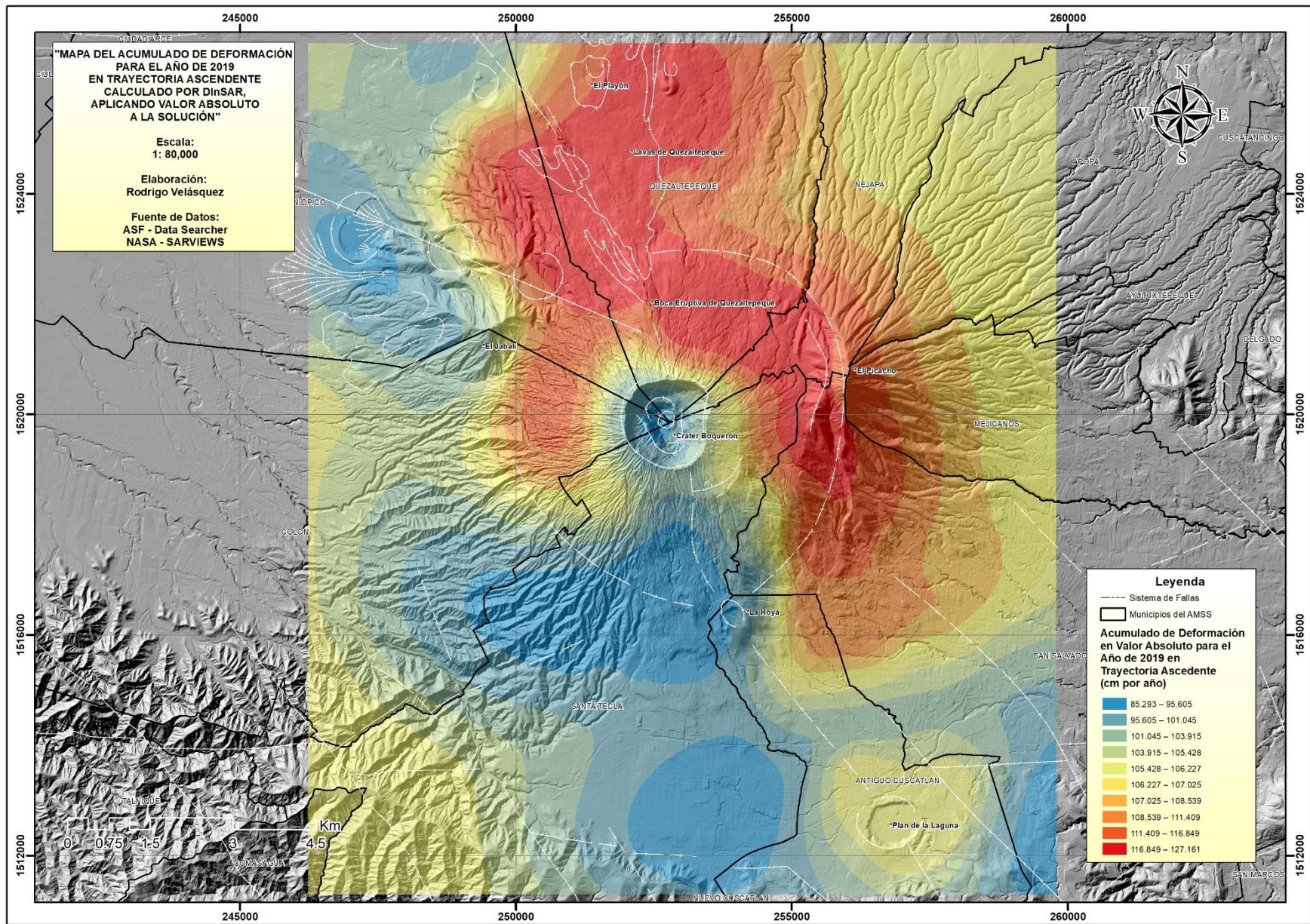


Figura 106. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2019, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

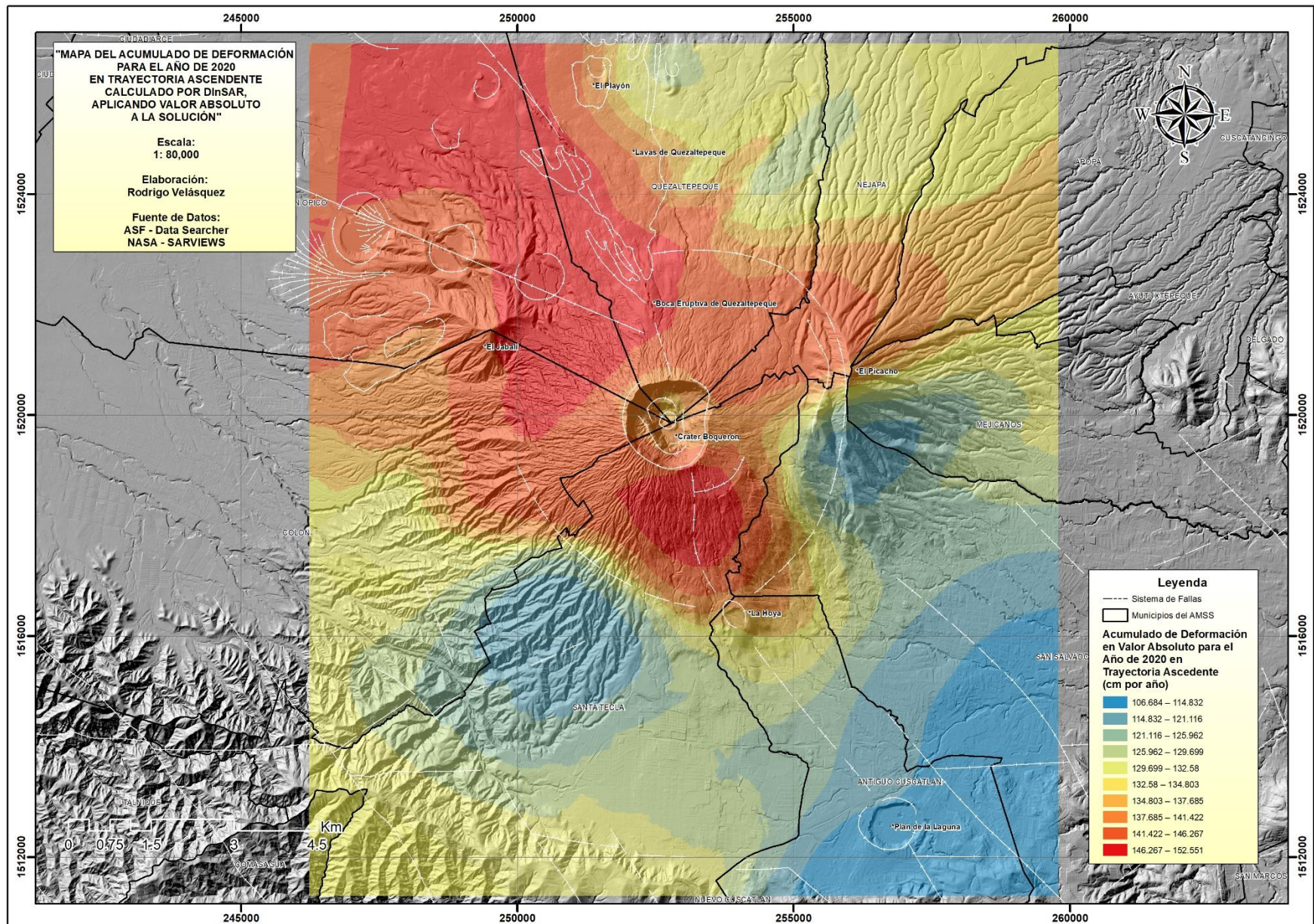


Figura 107. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

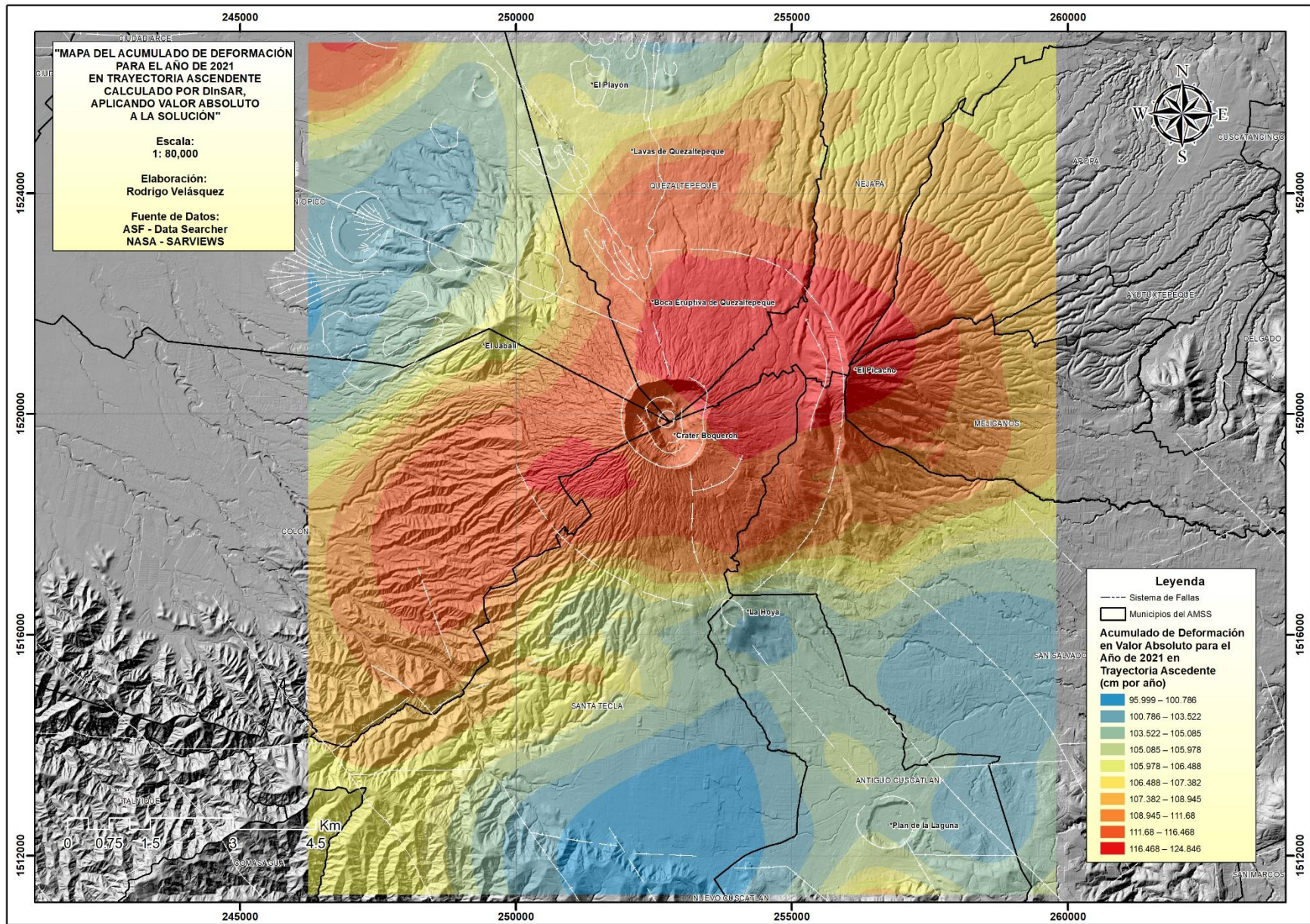


Figura 108. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Ascendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

10.1.2.2. Trayectoria Descendente

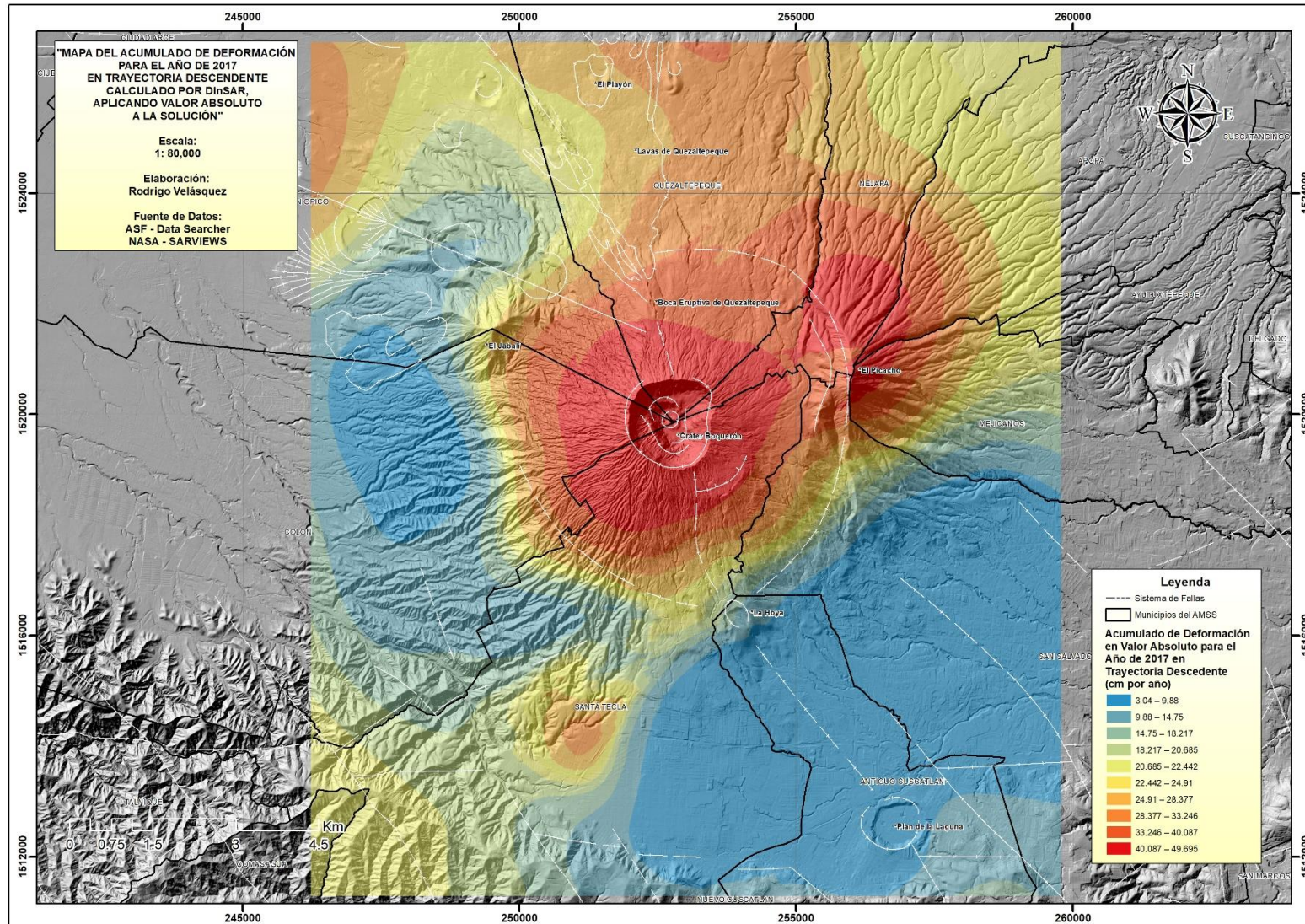


Figura 109. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2017, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

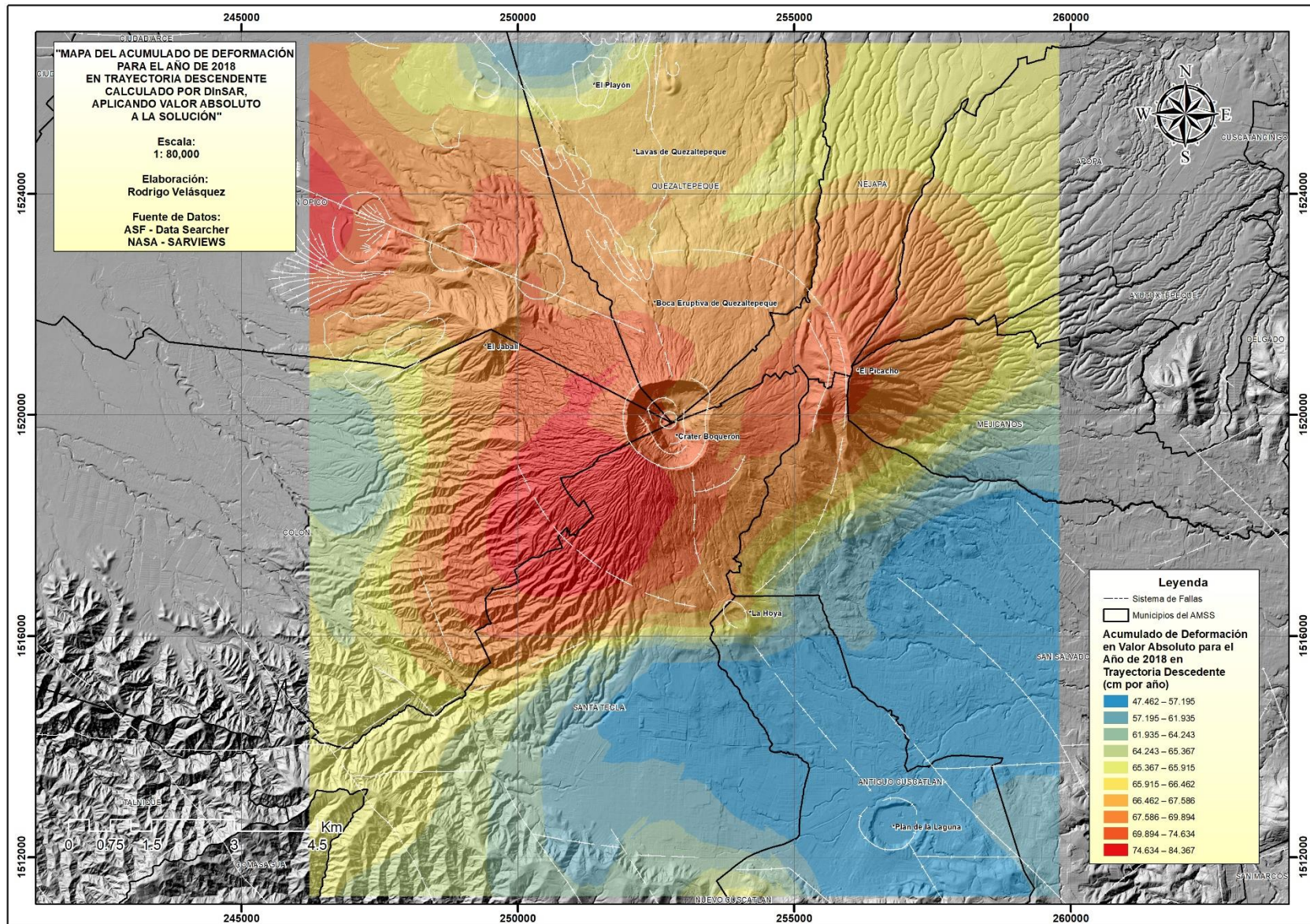


Figura 110. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2018, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

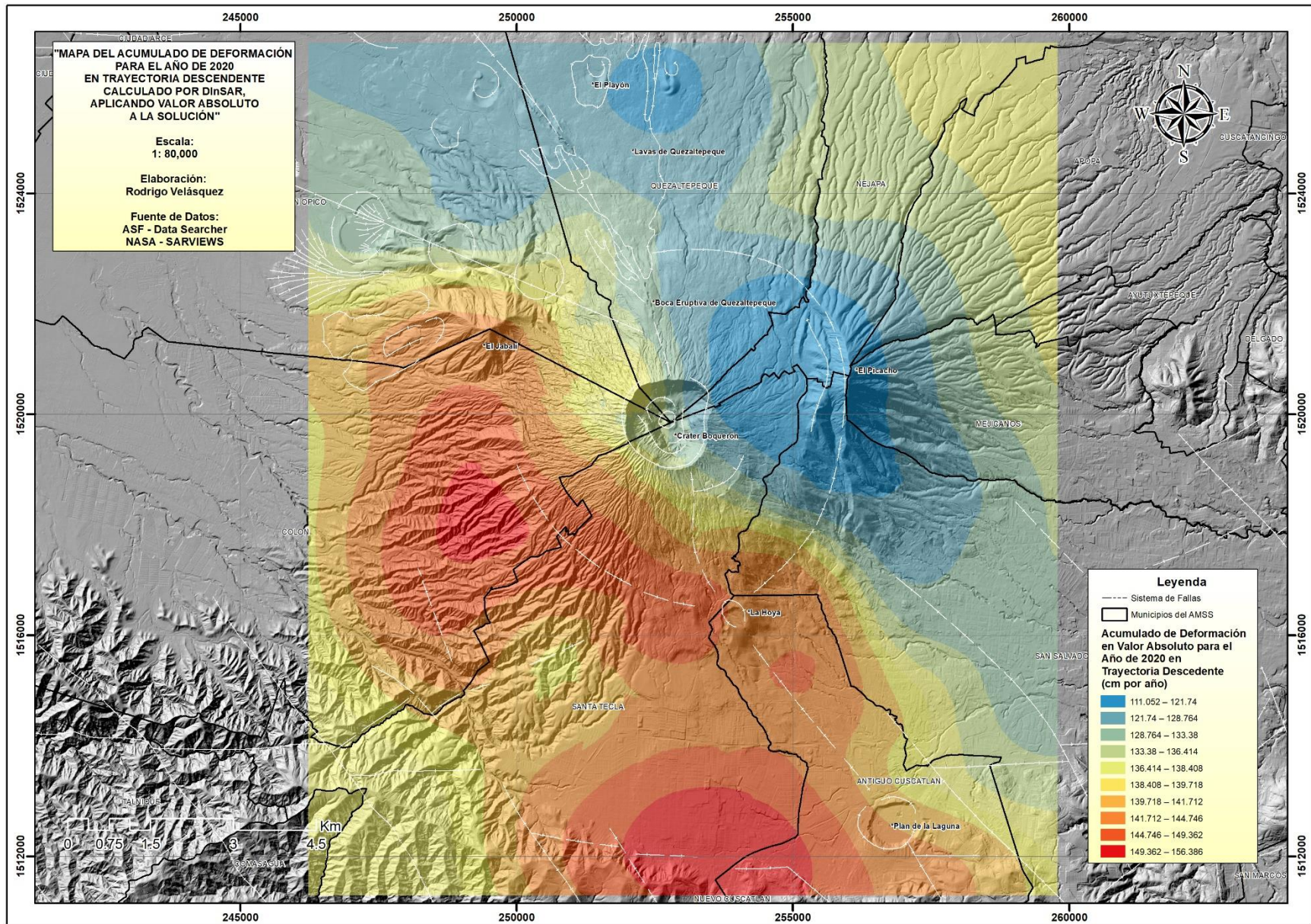


Figura 112. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2020, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

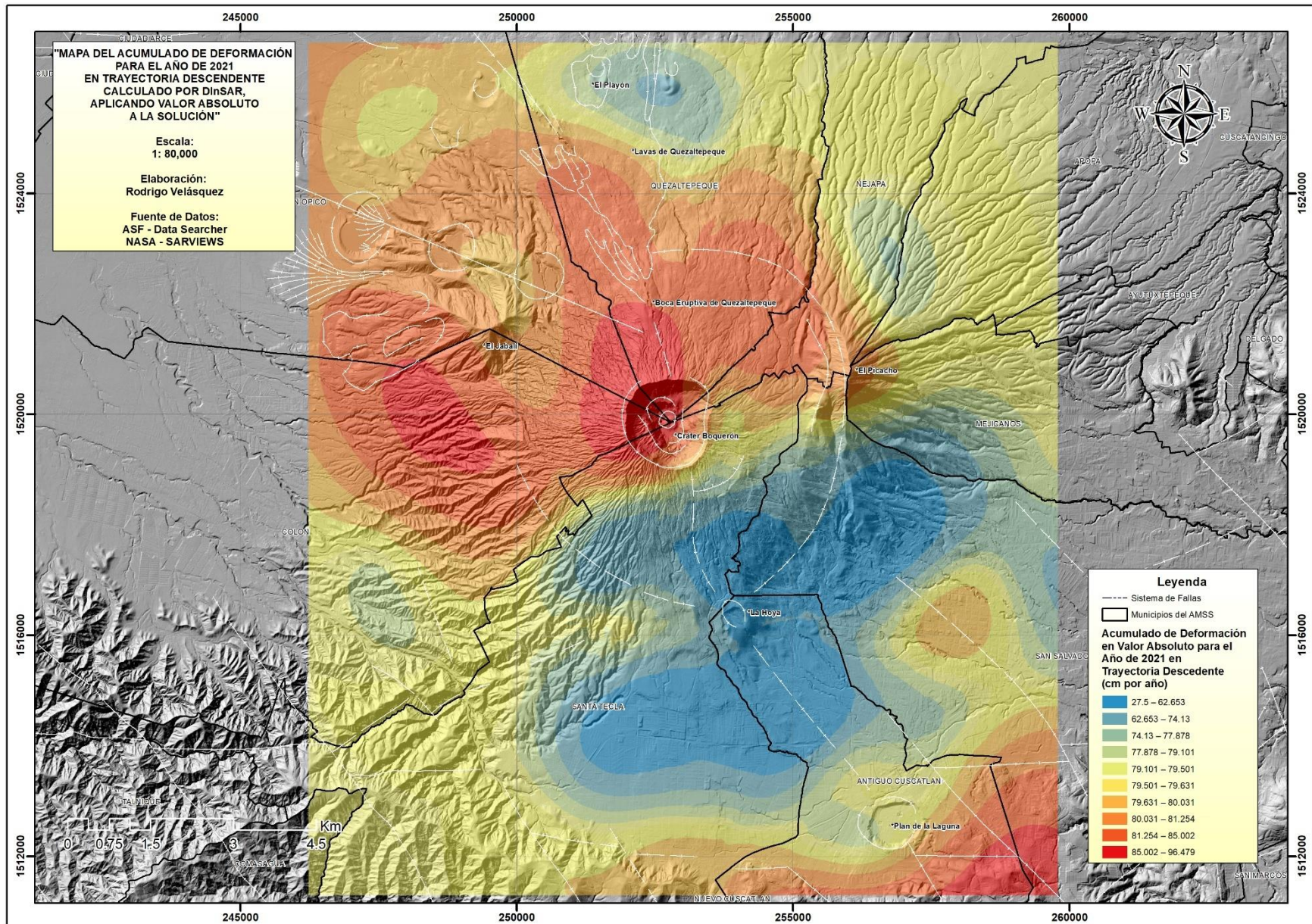


Figura 113. Mapa del Acumulado de Deformación por DInSAR Durante el Año de 2021, sobre la Zona de Fracturas del CVSS en Trayectoria Descendente con Valor Absoluto. Fuente: Elaboración Propia.

10.1.2.3. Análisis

Citando a lo expuesto en 9.5.2, en base a lo obtenido mediante la representación cartográfica generada por los modelos de interpolación en SIG, se tiene que:

- I. La deformación registrada sobre los puntos de monitoreo por la trayectoria ascendente en términos de desplazamientos netos (con valor absoluto), muestra aumentos importantes con respecto a los registros del año 2017, los cuales oscilaban entre 65 cm a 89 cm de acumulado, presentando un momento máximo de deformación en el año 2020 con valores entre 106 cm a 153 cm de acumulado.

Es importante observar que para el año 2021 se redujeron a intervalos de entre 96 cm a 124 cm de acumulado, momento en donde según las series temporales presentadas en la sección 9.6, se visualiza un cambio de tendencia, el cual puede verse como la transición de un periodo de liberación de esfuerzos (por sismicidad) a un periodo de acumulación.

- II. La trayectoria descendente presenta las mismas tendencias, pero con variaciones muy significativas entre los acumulados, presentando en 2017 oscilaciones entre 3 a 49 cm de acumulado y para 2020 entre 111 cm a 152 cm, el cual es un intervalo equivalente al de la trayectoria ascendente pero muy distante con respecto al acumulado de 2017 en trayectoria descendente.

De manera similar en 2021 hay una reducción significativa de la deformación, la cual oscila entre los 26 cm a los 96 cm de acumulado, notablemente menor que en la trayectoria ascendente.

Es importante observar que, a diferencia de la trayectoria ascendente, en donde los acumulados aumentan con relativa gradualidad, en la trayectoria descendente hay cambios abruptos entre 2017 y 2020, siendo más coincidentes los años 2018, 2019 y 2021, los cuales son en efectos, los periodos que menor acumulado de deformación presentan en la serie de datos para ambas trayectorias.

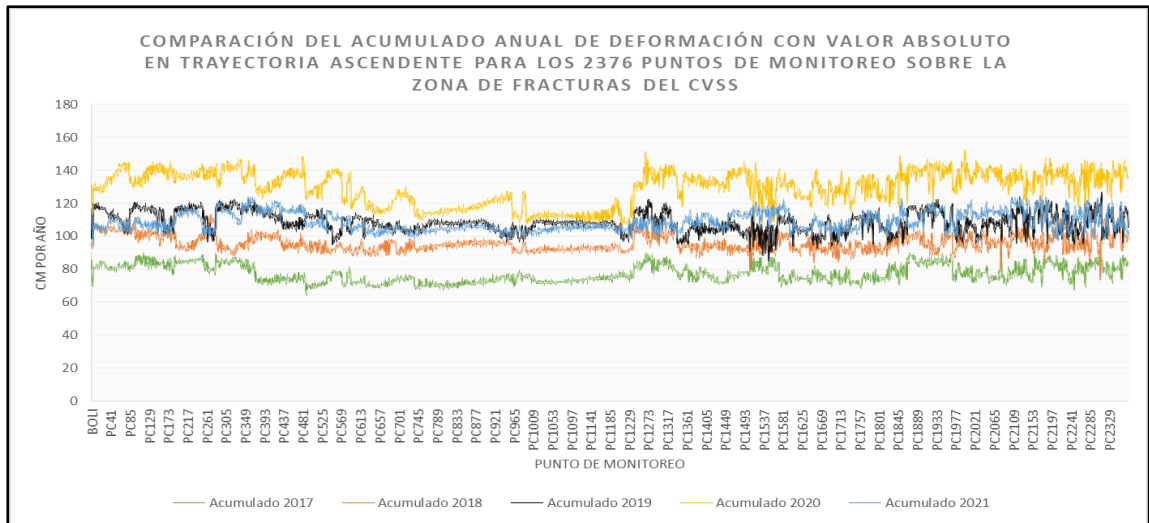


Figura 114. Gráfico Comparativo del Acumulado Anual de Deformación con Valor Absoluto, sobre los Puntos de Control fijados en la Zona de Fracturas del CVSS para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

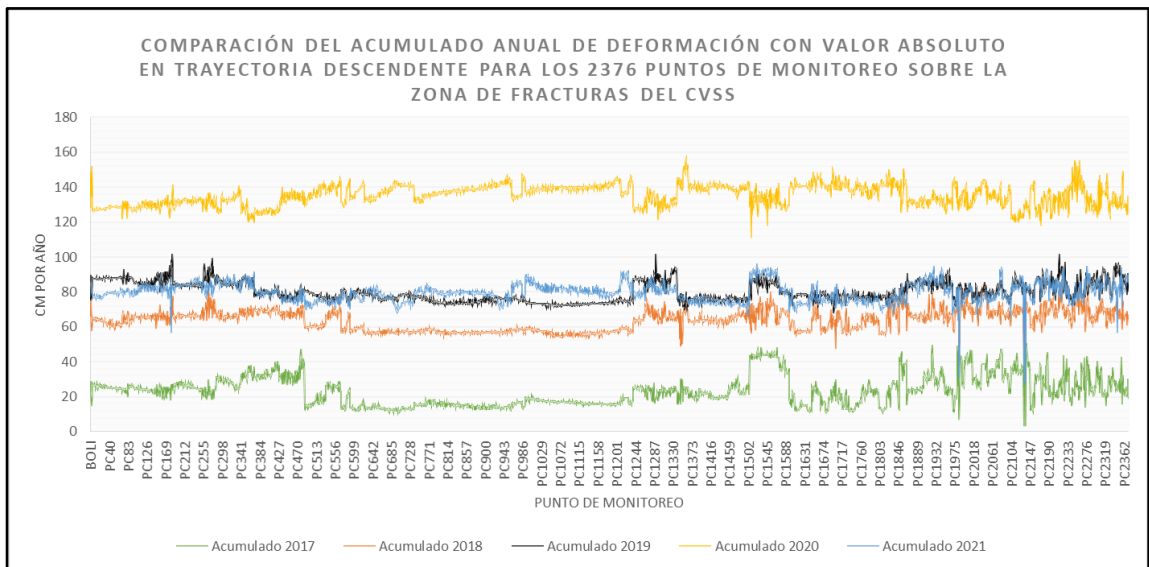


Figura 115. Gráfico Comparativo del Acumulado Anual de Deformación con Valor Absoluto, sobre los Puntos de Control fijados en la Zona de Fracturas del CVSS para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

III. Tomando a consideración el registro histórico de los sismos representado en la figura 10, se infiere en que la sismicidad reciente no ha sido un factor detonante para la deformación del terreno. Considerando que el sismo principal fue de 5.1 en escala Richter, el cual ocasionó ciertos daños materiales en la zona de influencia SE del CVSS, no se detectaron en el registro DInSAR desplazamientos verticales significativos para la región de fracturas del volcán y sistema de fallas locales del AMSS.

Es importante aclarar que, aunque el registro sísmico demuestre un decrecimiento importante en la actividad, el terreno ha sido más susceptible a la deformación posterior a los eventos de 2017, presentando en el registro del acumulado de deformaciones para trayectoria ascendente, oscilaciones similares en concepto de orden de magnitud, con un delta en el acumulado de 41.86 cm en 2019 y 45.87 cm en 2020, produciéndose 40 y 30 sismos en cada año respectivamente.

Es también clave observar que para el año 2021, el cual se propone como un periodo de transición entre un momento de liberación de esfuerzos hacia un periodo de acumulación, coincide en que el registro sísmico se encuentre prácticamente nulo, con 4 sismos registrados en ese año y disminución relativa en los acumulados de deformación.

- IV. Por medio de la cartografía temática de deformaciones, es posible observar que arriba de la cota 1000 (zona de flancos), las franjas de deformación calculadas, cambian significativamente su tendencia, registrando aumentos en los acumulados de deformación con respecto al cambio en la pendiente del terreno.

Esto demuestra que las condiciones topográficas y geológicas de la zona inciden notablemente en el comportamiento de la deformación, siendo estos actualmente sectores que, por su reciente actividad sísmica e importante actividad humana, se han visto desestabilizados estructuralmente, siendo así más propensos a generar cambios importantes en el terreno, capaces de originar escenarios de riesgos como deslizamientos o desprendimientos de tierra.

- V. No se han detectado procesos de inflación en el terreno que indiquen según Mogi (1958), Ruegg (1982), Lisowski (2006) y Vélez (2011), un aumento significativo de actividad en la cámara magmática del CVSS, capaz de generar un nuevo periodo eruptivo, sin embargo, la migración de los hipocentros sísmicos hacia la zona de Boquerón, es el factor clave para distinguir que el volcán está activo, el cual se caracteriza por ser sísmico endógeno, sin actividad visible en superficie.

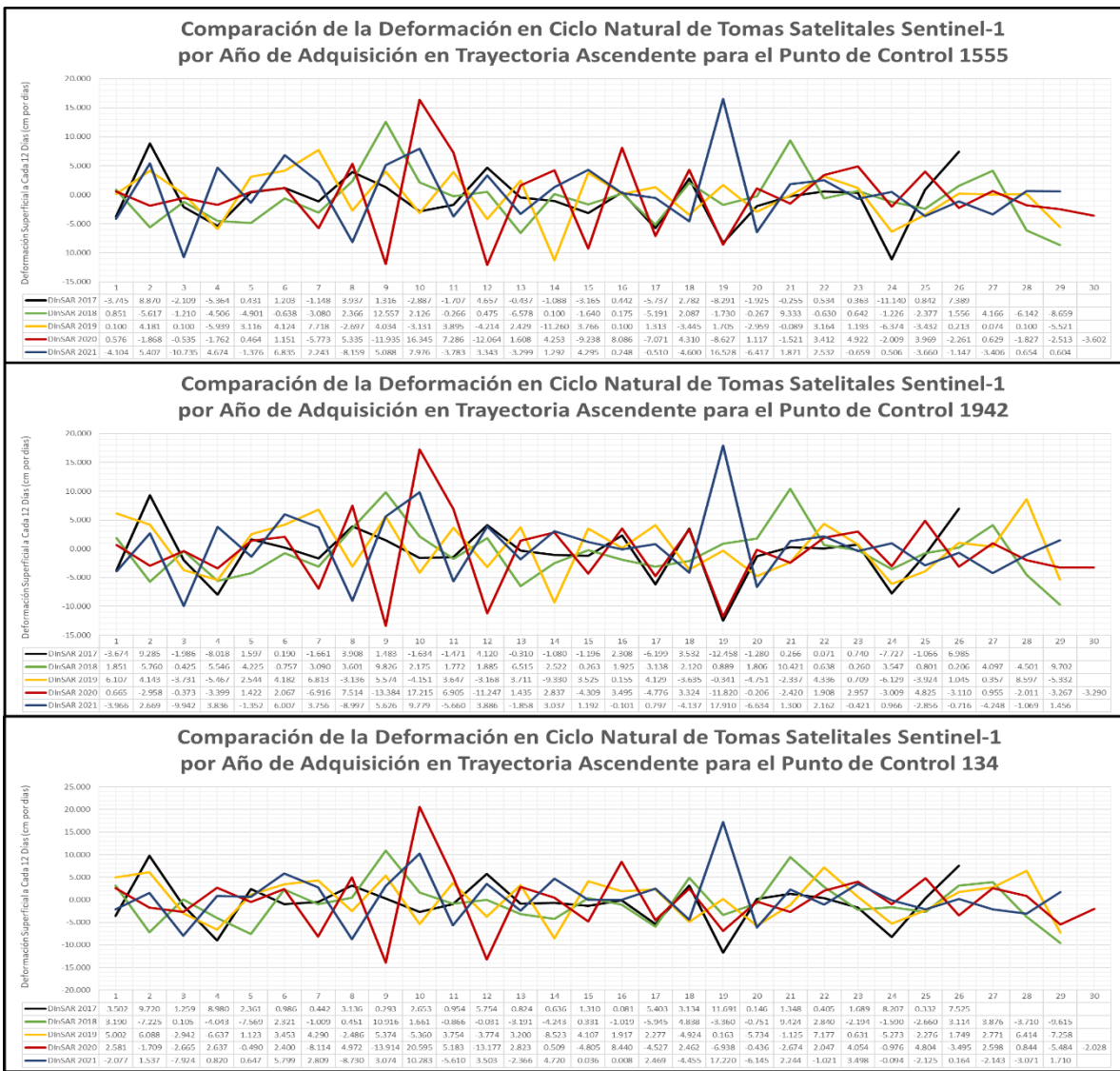


Figura 117. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Trayectoria Ascendente. Fuente: Elaboración Propia.

Se observa en la frecuencia de oscilación, que los patrones de deformación anual en trayectoria ascendente, son coincidentes entre puntos de control, indicando que el terreno se deforma bajo una intensidad propia definida por la acción de los esfuerzos tectónicos regionales (subducción entre las placas de cocos y del caribe), pero no con igual magnitud, esto debido a que, de manera local, las propiedades geológicas del terreno actúan como condicionantes para la ocurrencia de algún evento súbito, siendo naturalmente las regiones geológicamente más inestables (laderas) las que mayor deformación pueden sufrir.

Son las series DInSAR de 2020 y 2021 las que registra los picos mayores de deformación en los puntos de monitoreo, esto en función de la amplitud en sus oscilaciones.

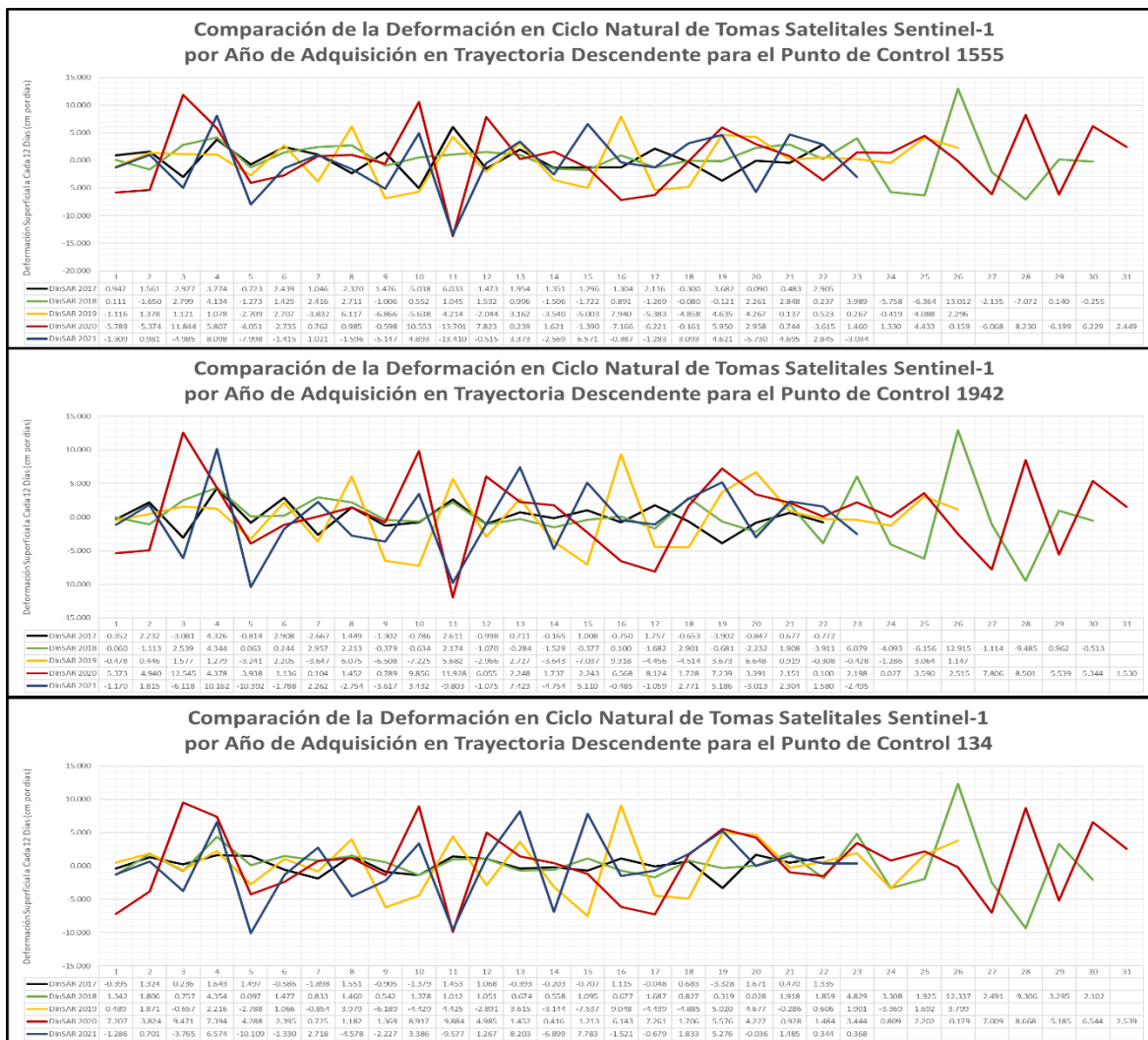


Figura 119. Gráfico Comparativo de la Deformación Anual, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Trayectoria Descendente. Fuente: Elaboración Propia.

De forma abrupta, los registros de deformación aumentan para los años de 2019, 2020 y 2021, en contraposición con lo visto mediante la trayectoria ascendente, la cual registra variaciones entre -10 cm a 10 cm desde 2017, mientras que la trayectoria descendente pasa por un intervalo de -1 cm a 1 cm para 2017 y 2018, hasta presentar un pico de deformación anómalo de entre 12 cm a 15 cm en los puntos de control, el cual marcó un cambio sustancial en la tendencia y amplitud de oscilación registrada por DInSAR para los años de 2019 a 2021, con intervalos de entre -8 a 10 cm en promedio.

Es importante aclarar que, a partir del pico de deformación registrado a finales de 2018 por la trayectoria descendente, el comportamiento de la serie temporal se vuelve casi coincidente con el registro en trayectoria ascendente, no mostrando saltos anómalos nuevamente.

10.2.1.3. Análisis

De lo planteado anteriormente mediante el análisis anual de las series temporales en ambas trayectorias satelitales, se establece que:

- I. El registro de deformaciones obtenido por la trayectoria ascendente, al poseer un mayor volumen de datos, presenta una menor incertidumbre al momento de analizar temporalmente los sucesos acontecidos entre 2017 a 2018, no presentando así, saltos abruptos en la magnitud y tendencia, mostrando así una dispersión de datos más lógica que en la trayectoria descendente.
- II. No se tiene registro alguno de eventos significativos capaces de alterar la dinámica de deformación sobre la zona de fracturas del CVSS como lo describe la trayectoria descendente a finales de 2018, por lo que dicha sucesión carece de precisión, siendo la trayectoria ascendente la que mejor describe la deformación temporal relacionada al ritmo sísmico y procesos de ladera actuantes como la meteorización y erosión, mostrando una frecuencia de oscilación y orden de magnitud más consistente en el tiempo.
- III. Se esperaba que el patrón de oscilación no fuera el mismo entre las trayectorias, esto debido a que, la deformación medida por el sensor de radar, depende de factores como la geometría de adquisición, ángulo de visión, periodo de retorno, línea de visión, etc., por lo que, aún con la notoria diferencia para el periodo de 2017 a 2018, posterior a ello y gracias a la mejoría en la cantidad de interferogramas procesados, se observa una mayor correlación tanto en la frecuencia de oscilación como en la magnitud de la deformación registrada, siendo ambas trayectorias útiles para el análisis, pero con una mejor precisión temporal sobre la trayectoria ascendente.
- IV. Se observa en ambas trayectorias para el periodo entre 2020 a 2021, picos máximos de deformación, siendo la trayectoria ascendente la que registra los

mayores desplazamientos y la trayectoria descendente un comportamiento más estable, pero con un registro de deformación mayor que en años previos.

- V. Los patrones de deformación registrados según su trayectoria satelital correspondiente, entre los puntos de monitoreo expuestos, son muy similares entre sí, siendo su diferencia fundamental, la cantidad de desplazamiento vertical medido, siendo mayor en los puntos ubicados arriba de la cota 800 del CVSS, más específicamente sobre el sector NO del volcán, fenómeno que se ve representado en ambas trayectorias y que es más visible a partir del año 2020.

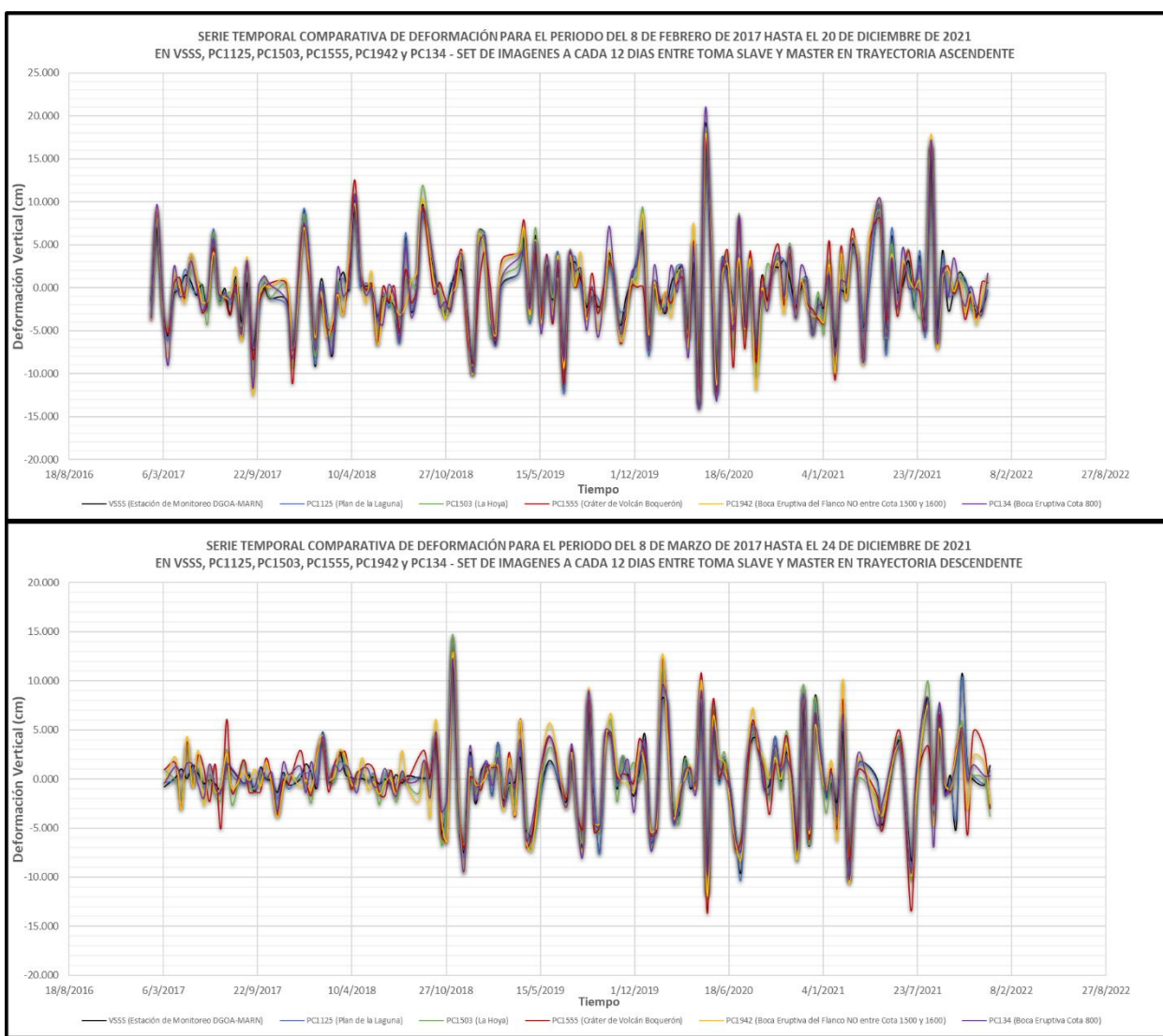


Figura 120. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control VSSS, PC1125, PC1503, PC1555, PC1942, y PC134 para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.

10.3. Comparación Entre Trayectorias Satelitales

Dando continuidad a lo planteado en la sección 10.2, y como un primer paso para la validación de la técnica DInSAR, se analiza el comportamiento entre las trayectorias satélites para evaluar su correlación y determinar que trayectoria es más conveniente para el establecimiento de un monitoreo periódico de deformaciones en el CVSS.

Se compararán tanto las series temporales de deformación como las series temporales de coherencia.

Series Temporales de Deformación:

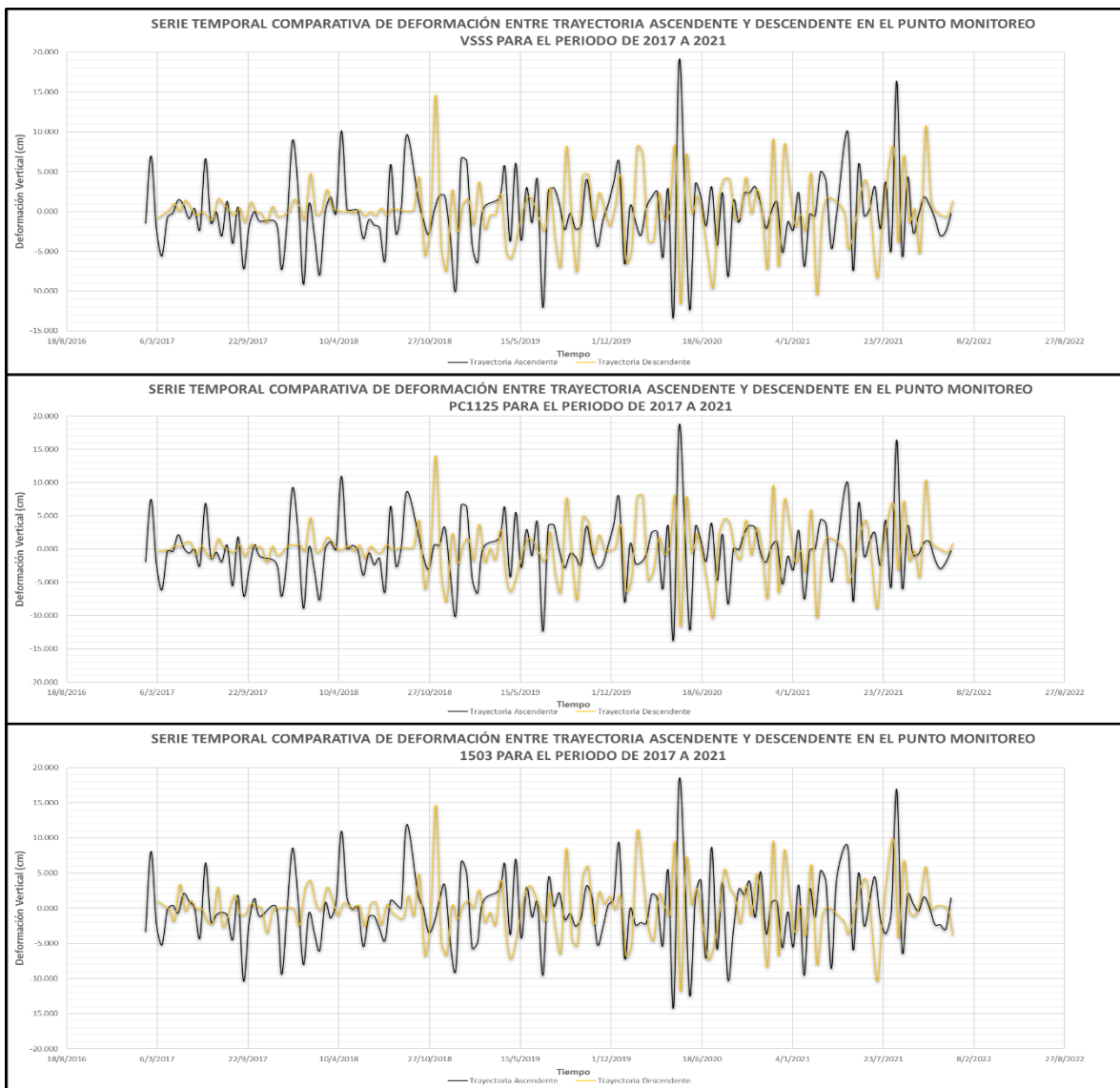


Figura 121. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC 1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.

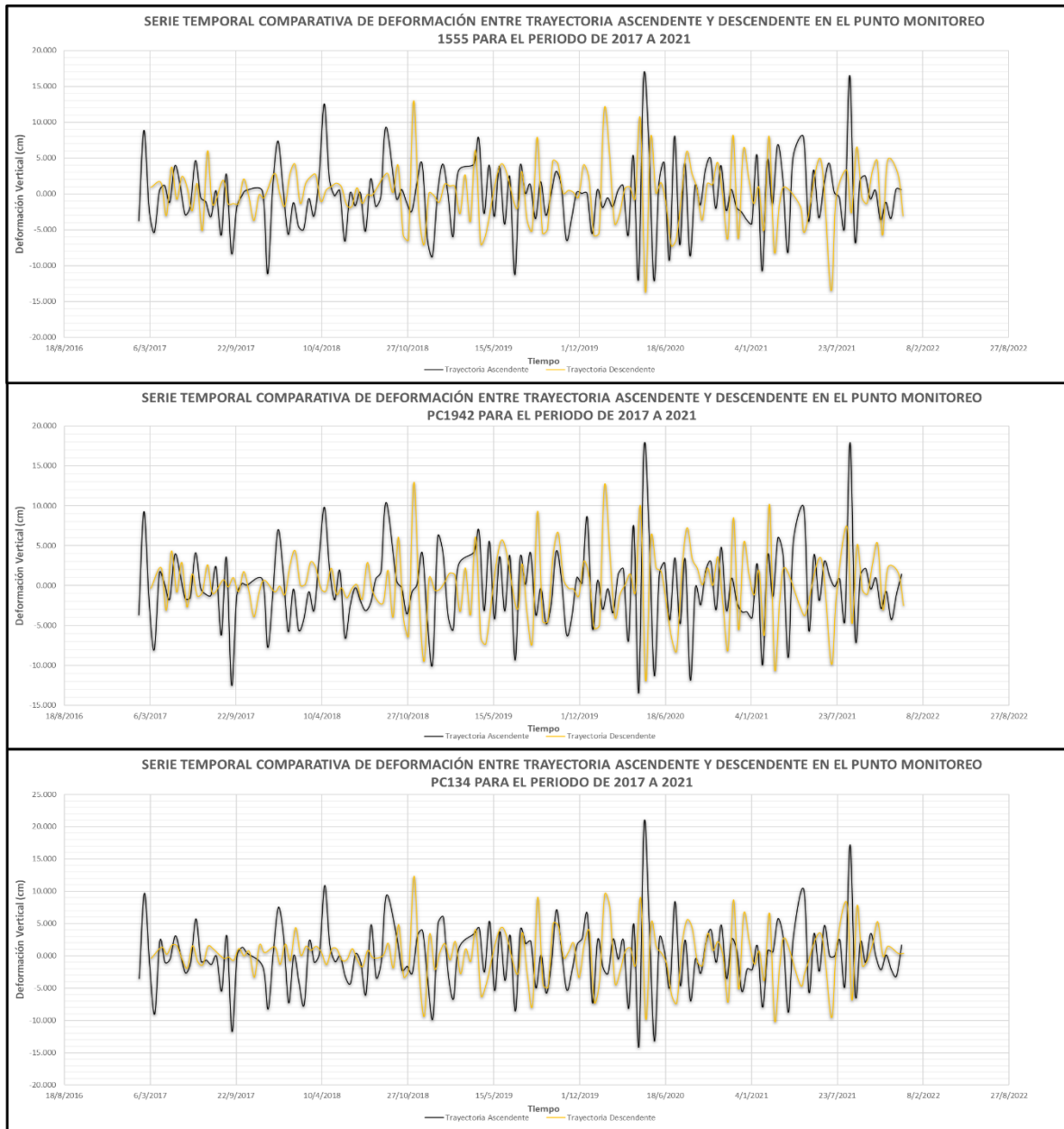


Figura 122. Gráfico Comparativo de la Deformación, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.

Citando a lo expuesto en la sección 10.2, es evidente por este ejercicio, que la trayectoria ascendente es más sensible a los desplazamientos del terreno, y que posteriormente al salto de deformación registrado en 2018 por la trayectoria descendente, es que la series temporales se pueden considerar “coincidentes”, salvo la detección de los picos mayores de deformación por la trayectoria ascendente entre 2020 y 2021, fenómeno que se reproduce consistentemente en el registro de deformaciones sobre los demás puntos de monitoreo

Series Temporales de Coherencia:

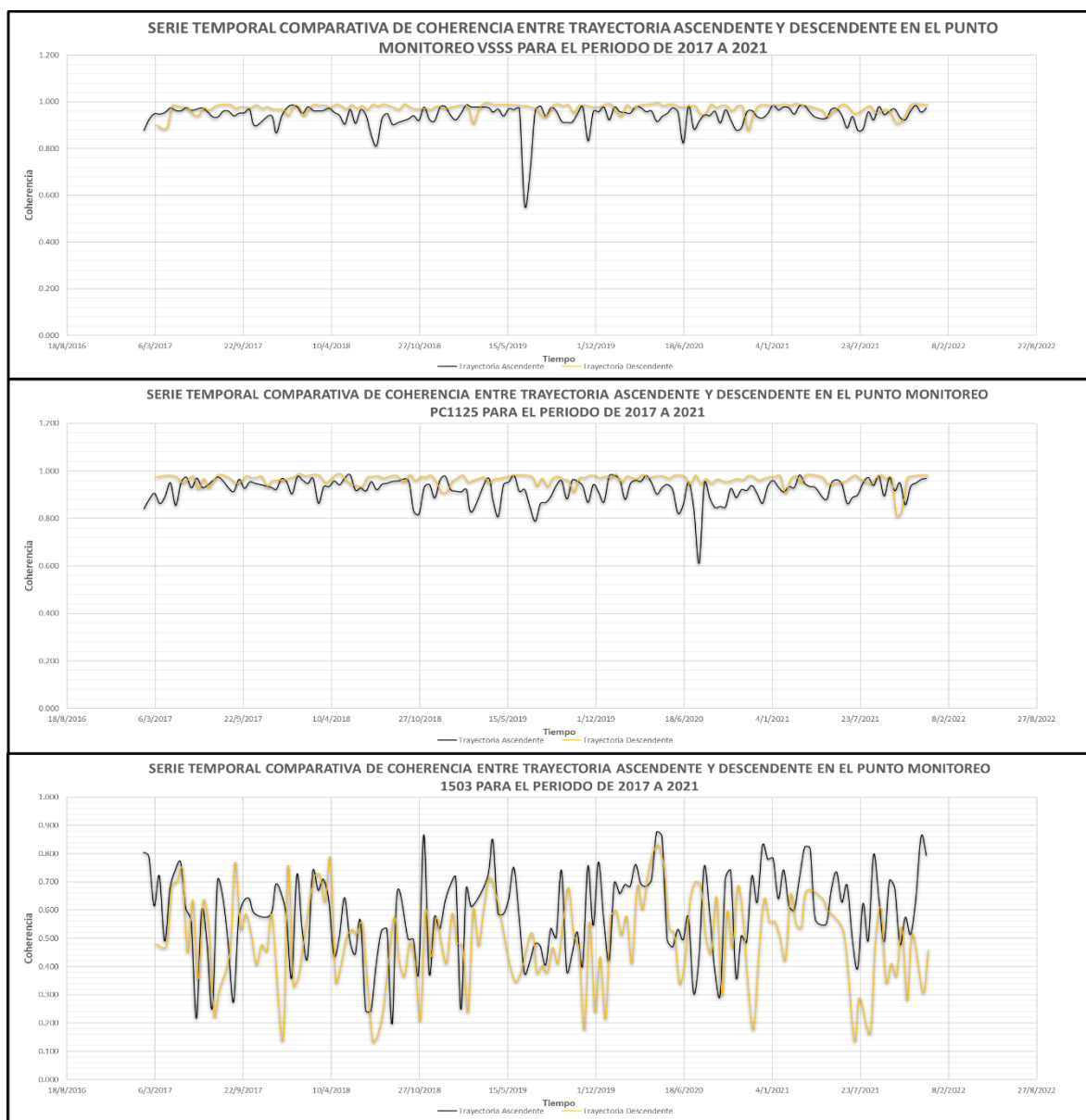


Figura 123. Gráfico Comparativo de la Coherencia, sobre los Puntos de Control VSSS (DGOA-MARN), PC 1125 (Plan de la Laguna) y PC1503 (La Hoya) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.

Es interesante observar que la coherencia en la trayectoria descendente es relativamente mejor en las zonas bajas del CVSS, siendo la trayectoria ascendente la que muestra mayor fluctuación en el registro de dicho parámetro; sin embargo, para zonas de mayor elevación, en donde la decorrelación es naturalmente más alta debido a la densidad en la vegetación, es la trayectoria ascendente la que se comporta de mejor manera.

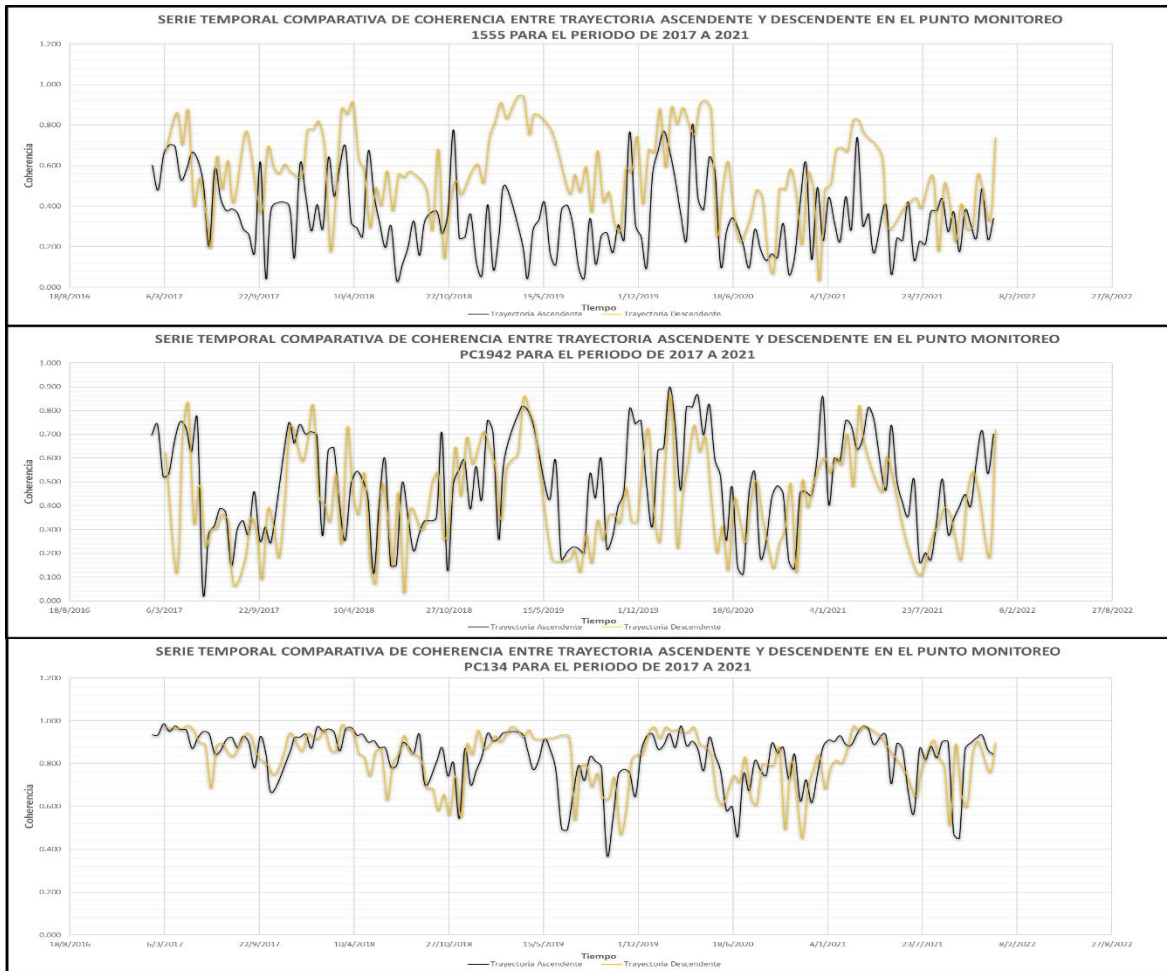


Figura 124. Gráfico Comparativo de la Coherencia, sobre los Puntos de Control PC1555 (Cráter Boquerón), PC1942 (Boca Eruptiva Arriba de Cota 1500) y PC134 (Boca Eruptiva Sobre Cota 800) para Ambas Trayectorias. Fuente: Elaboración Propia.

Consecuentemente para la zona del flanco NO, es la trayectoria ascendente la que sigue comportándose de mejor manera, excepto para el PC1555, el cual se ubica dentro del cráter Boquerón, siendo este un punto de alta decorrelación naturalmente, pero que permite observar como las variaciones altimétricas también afectan el factor de coherencia, encontrándose a menor elevación que los puntos siguientes y del cual se ha podido obtener datos preliminares, pero no concluyentes.

Por lo detallado anteriormente, ambas trayectorias conforman pilares fundamentales para un análisis integral de la deformación sobre el terreno, siendo la trayectoria ascendente la que de manera general puede considerarse como base principal para el análisis DInSAR, y la trayectoria descendente como un marco auxiliar de validación y análisis específico en los sectores de menor elevación y región SE de la zona de fracturas del CVSS.

10.4. Correlación de Resultados DInSAR con GPS Instrumental

Como un segundo paso para la validación de los resultados obtenidos mediante la técnica DInSAR, se evaluará la correlación de datos obtenidos entre GPS y DInSAR sobre las estaciones de monitoreo VSSS, CNR y PIAM, los cuales han sido brindados por el DGOA-MARN como apoyo fundamental para la presente investigación.

Debido a que no se cuenta con una red de monitoreo geodésica dedicada a la vigilancia del volcán, se usará la información de dichas estaciones como únicos puntos de referencia en campo, con la finalidad de definir en términos de orden de magnitud, si existe o no correlación entre ambas técnicas y cuál puede ser la estación de referencia para el presente estudio, puesto que las mediciones por GPS tienen sus propios factores de error, los cuales son ajenos a la técnica DInSAR, pero que es un requerimiento fundamental para asegurar la efectividad de la técnica y método propuesto.

La diferencia entre la técnica de GPS y DInSAR es que la medición remota depende de la línea de visión propia del satélite y periodo de retorno según su trayectoria satelital, mientras que el GPS depende directamente de la triangulación entre las constelaciones satelitales con el equipo fijado en el terreno, por lo que esto provee una medida que se va actualizando según un intervalo de tiempo definido por el operador.

Por lo tanto, para poder correlacionar los datos, se acude a los principios de Hanssen (2002), los cuales fueron retomados por Seppi (2016), adaptándolos para la presente investigación en los siguientes pasos:

- I. Analizando lo descrito por Seppi (2016), a partir de las observaciones de Hanssen (2002), se establece que la deformación obtenida mediante la técnica DInSAR hace referencia a los acumulados de deformación entre ambas fechas de adquisición.

Por lo que, como un primer paso para relacionar los datos GPS con DInSAR, se deben de llevar los datos GPS a un marco temporal simétrico con los datos DInSAR, es decir que, si el aporte de información por parte del GPS es diario (1

medición por día), se debe de calcular el acumulado de deformación sin valor absoluto referente al periodo de retorno o la resolución temporal del satélite a correlacionar, para el presente caso es una estimación del acumulado de deformación para cada 12 días, debido a que ese es el intervalo de tiempo que tienen los interferogramas que han sido usados de la misión Sentinel-1.

II. Una vez los datos GPS estén temporalmente calibrados con DInSAR, se procede a usar la ecuación planteada por Hanssen (2002), con la finalidad de re proyectar una medida dependiente de tres dimensiones (este, norte y altitud) a la línea de visión del sensor radar (LOS, una dimensión en la componente altitudinal), la cual permite dar solución a la correlación de los datos de la siguiente manera:

$$d_{LOS} = d_Z \cos \theta_{inc} - \text{Sen} \theta_{inc} d_N \cos \left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2} \right) - d_E \text{Sen} \theta_{inc} \text{Sen} \left(\alpha_h - \frac{3\pi}{2} \right)$$

(Ec. 18)

En donde, según Hanssen (2002) y retomado por Seppi (2016):

- d_Z , d_N y d_E son los desplazamientos en línea de vista del sensor, en dirección vertical, en dirección norte y en dirección este respectivamente.
- θ_{inc} es el ángulo de incidencia local medido entre la línea de vista y la vertical a un elipsoide de referencia.
- $\alpha_h - \frac{3\pi}{2}$ es el ángulo de dirección de mirada en azimut, perpendicular a la trayectoria de un satélite que mira hacia la derecha.

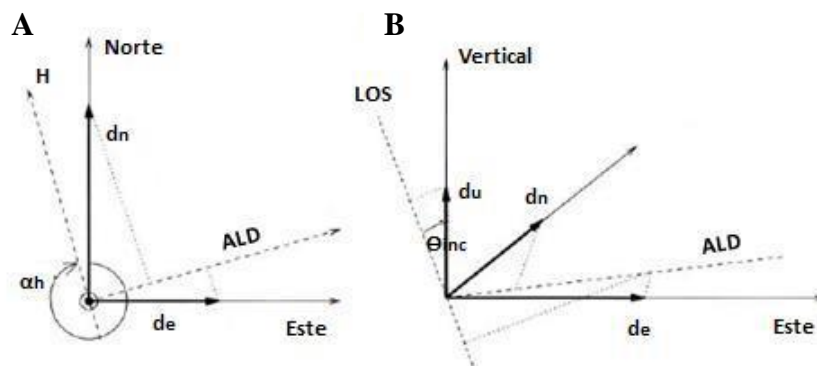


Figura 125. Proyección de los tres componentes de deformación sobre la línea de vista del sensor. (A) muestra la vista desde arriba de los componentes Este y Norte proyectados sobre la dirección de mirada en azimut (ALD), perpendicular a la trayectoria del satélite indicada con α_h . (B) muestra un esquema 3D incluyendo la proyección del componente vertical a la línea de vista del sensor empleando el ángulo de incidencia. Fuente: Hanssen, 2002, pág. 163.

Como resultado del proceso antes detallado, se obtuvo lo siguiente:

1. Estación VSSS

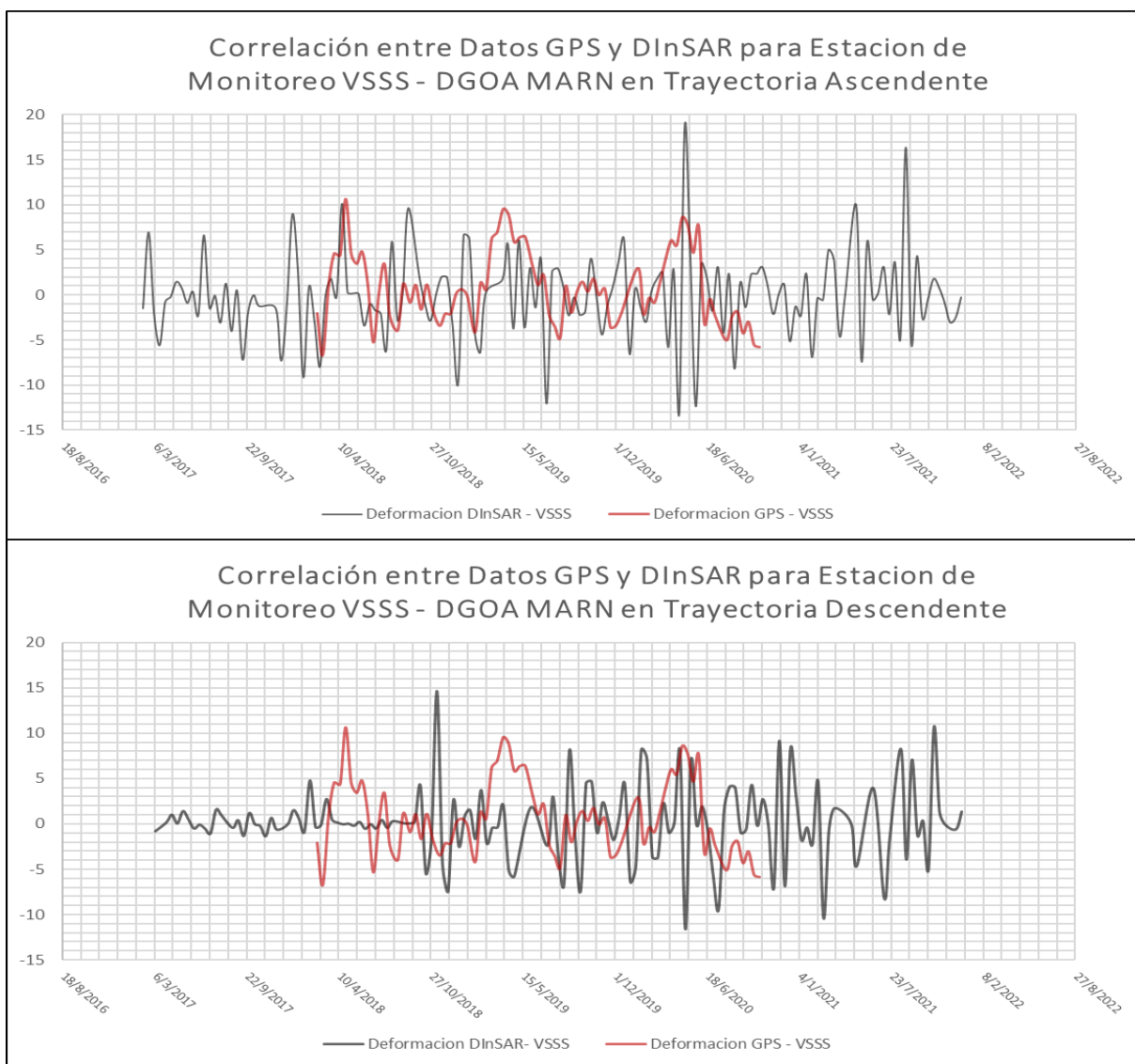


Figura 126. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación VSSS en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.

La correlación es alta para el caso de la estación VSSS, tanto en tendencia como en orden de magnitud, siendo preferentemente el set de datos en trayectoria ascendente, el que mejor se ajusta a los datos del GPS. Como se detalló anteriormente en la sección 10.2, los datos previos a finales de 2018 en trayectoria descendente, no son representativos de la dinámica del terreno, los picos altos de deformación por DInSAR que no son correlacionables con GPS, deben de ser estudiados más a detalle con reconocimiento de campo y geofísica.

2. Estación CNR-1

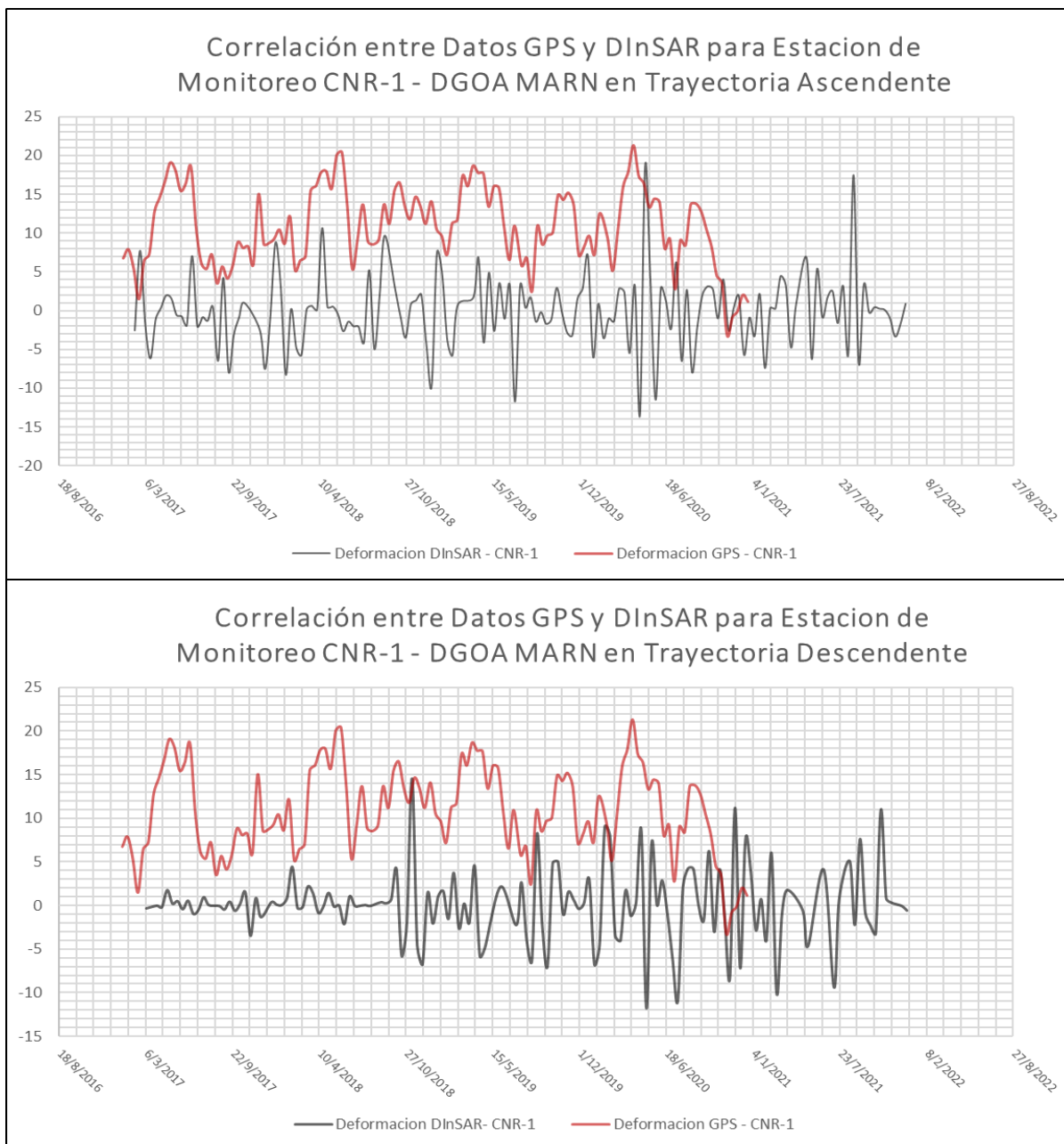


Figura 127. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación CNR-1 en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.

La correlación con la estación CNR-1 es muy baja. El GPS detecta desplazamientos notablemente más amplios que los registrados por DInSAR, los cuales poseen alta coherencia (coherencia > 0.9) dando confianza a la medición del radar. Este fenómeno puede deberse a factores de error asociados a la calibración de los equipos y recepción de señal del GPS, por lo que CNR-1 no es una estación que pueda ser usada como referencia actualmente.

3. Estación PIAM

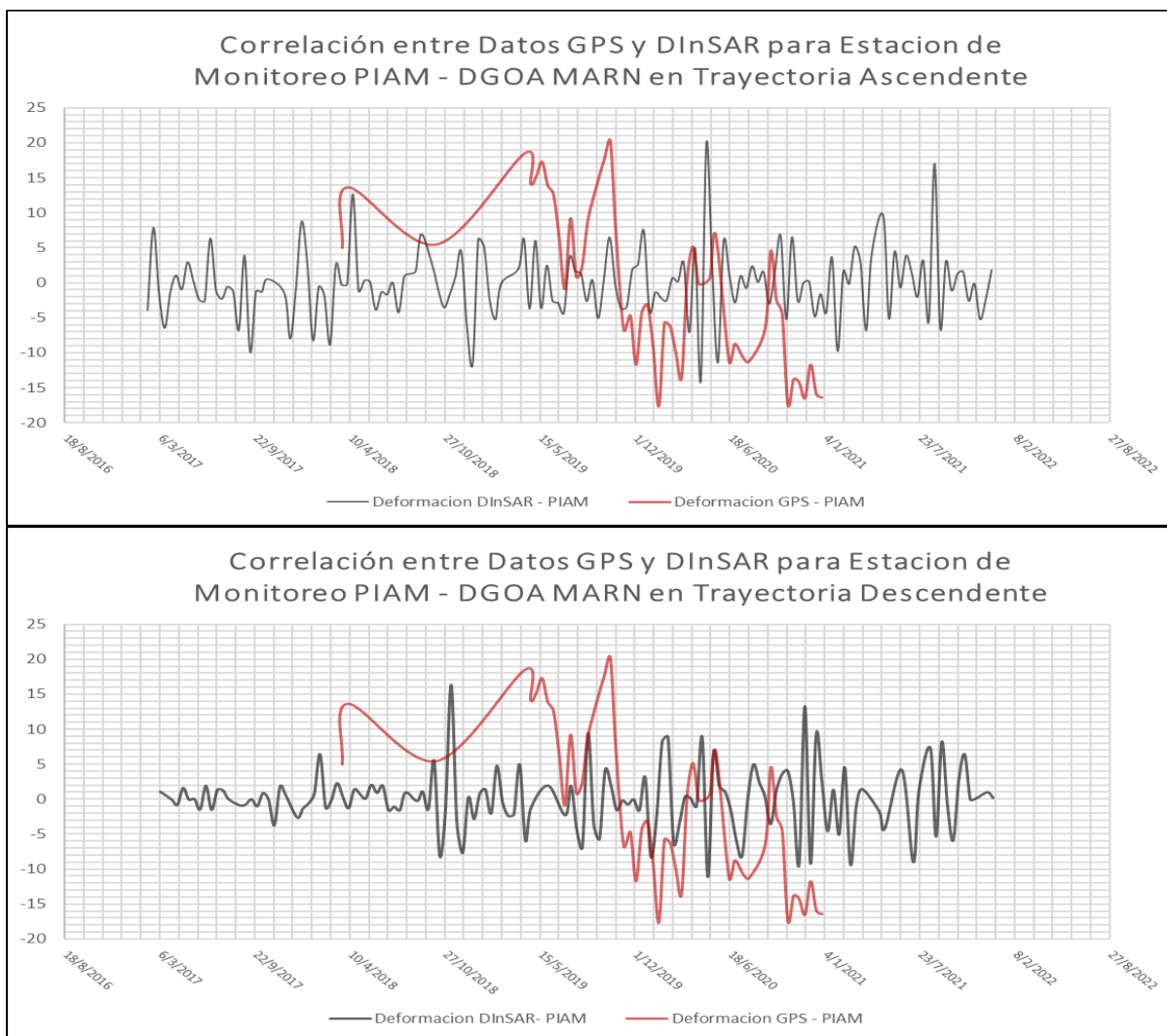


Figura 128. Correlación entre Datos GPS y DInSAR para la Estación PIAM en Ambas Trayectorias Satelitales. Fuente: Elaboración Propia, base de datos GPS del DGOA-MARN.

La estación PIAM puede considerarse como un punto de referencia debido a la buena correlación existente posterior a abril de 2019, puesto que la falta de datos previos hace imposible relacionar la información de una manera correcta. Es importante resaltar la coherencia en la tendencia de deformación detectada por ambas técnicas posterior a octubre de 2019, siendo el GPS relativamente más sensible a los procesos de subsidencia, pero sin desestimar las mediciones por DInSAR, las cuales, por su alta coherencia, se presentan con una línea base referente de información.

Debido a la baja densidad de datos, no ha sido posible correlacionar la estación BOLI con DInSAR.

10.5. Modelo Analítico de Variaciones Topográficas por DInSAR

Como parte fundamental del análisis del terreno, se esbozan perfiles analíticos generados mediante un SIG y procesados en una hoja de cálculo, que permitirán evaluar la propagación de la deformación en forma bidimensional para dar mayor sustento a lo establecido por la cartografía temática de deformaciones.

Los perfiles analíticos surgen de los mapas interpolados de deformación acumulada con y sin valor absoluto, extrayendo datos sobre la línea de perfil, tanto de los mapas de deformación como del modelo de elevación digital de referencia, graficando ambos perfiles y visualizando su comportamiento.

Se realizaron dos perfiles, un perfil 1 con rumbo NO-SE y un perfil 2 con rumbo EO sobre la zona de fracturas del CVSS, obteniendo lo siguiente:

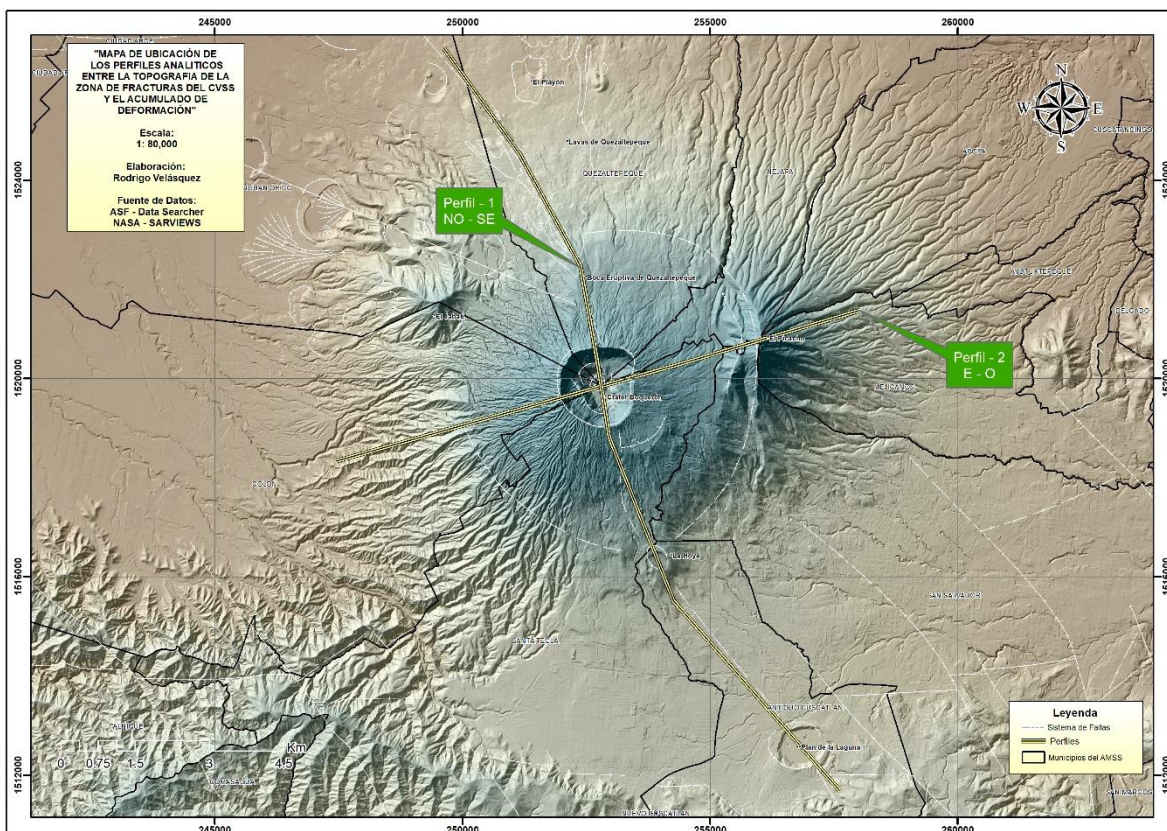


Figura 129. Mapa de Ubicación de los Perfiles Topográficos y de Deformación Acumulada para el periodo de 2017 - 2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

10.5.1. Trayectoria Ascendente

Perfil 1: NO-SE

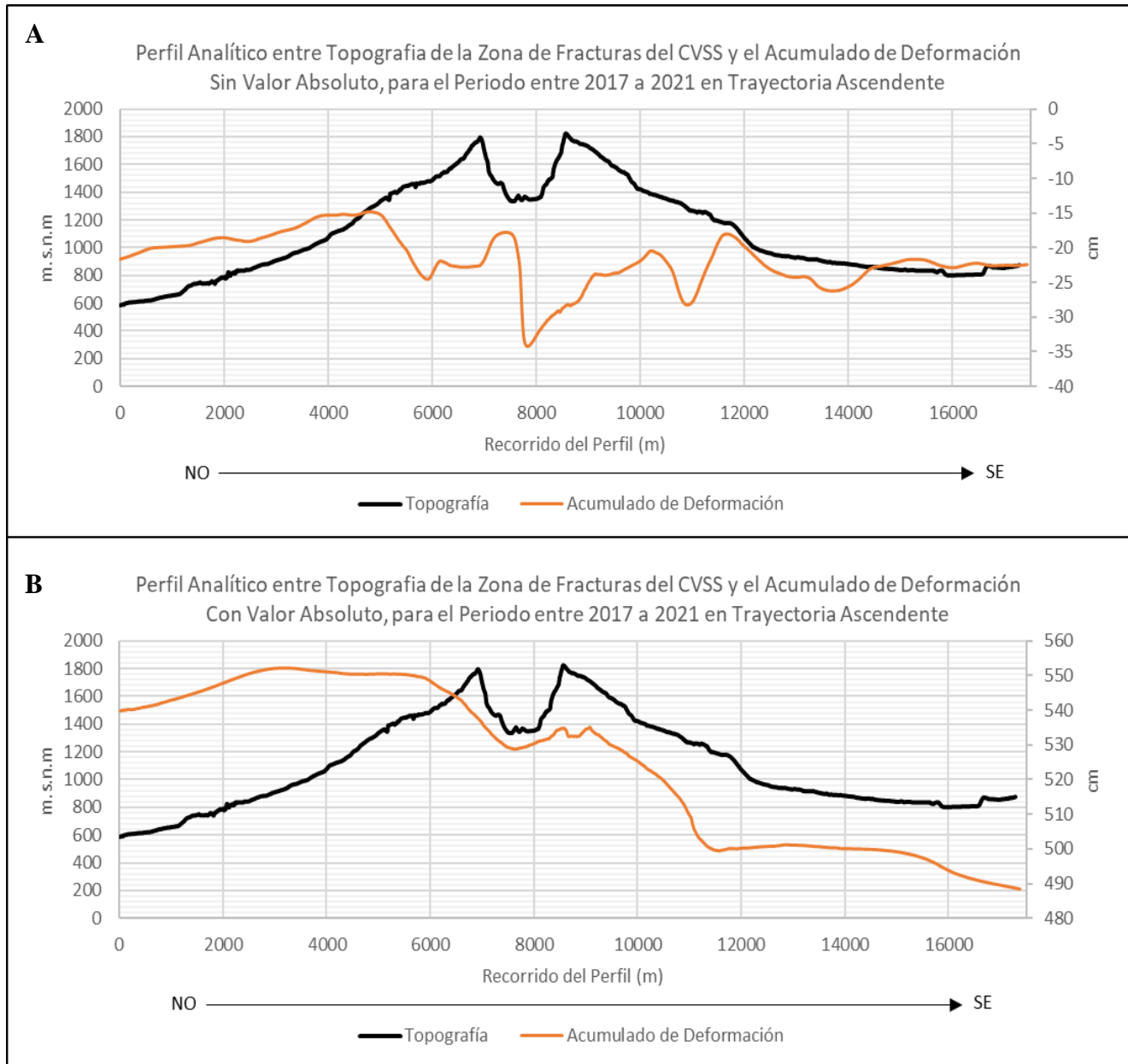


Figura 130. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Ascendente y con Rumbo NO-SE, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

El perfil A muestra que la zona del cráter Boquerón es el sector que más se ha visto afectado por la subsidencia, en el cual no se detectan procesos de inflación en el sector de fracturas del CVSS. Además, mediante el perfil B, se reafirma que el acumulado de los desplazamientos ha sido mayor en la zona del flanco NO, por lo que se establece como la zona más vulnerable a los procesos de deformación del terreno en el volcán.

Perfil 2: EO

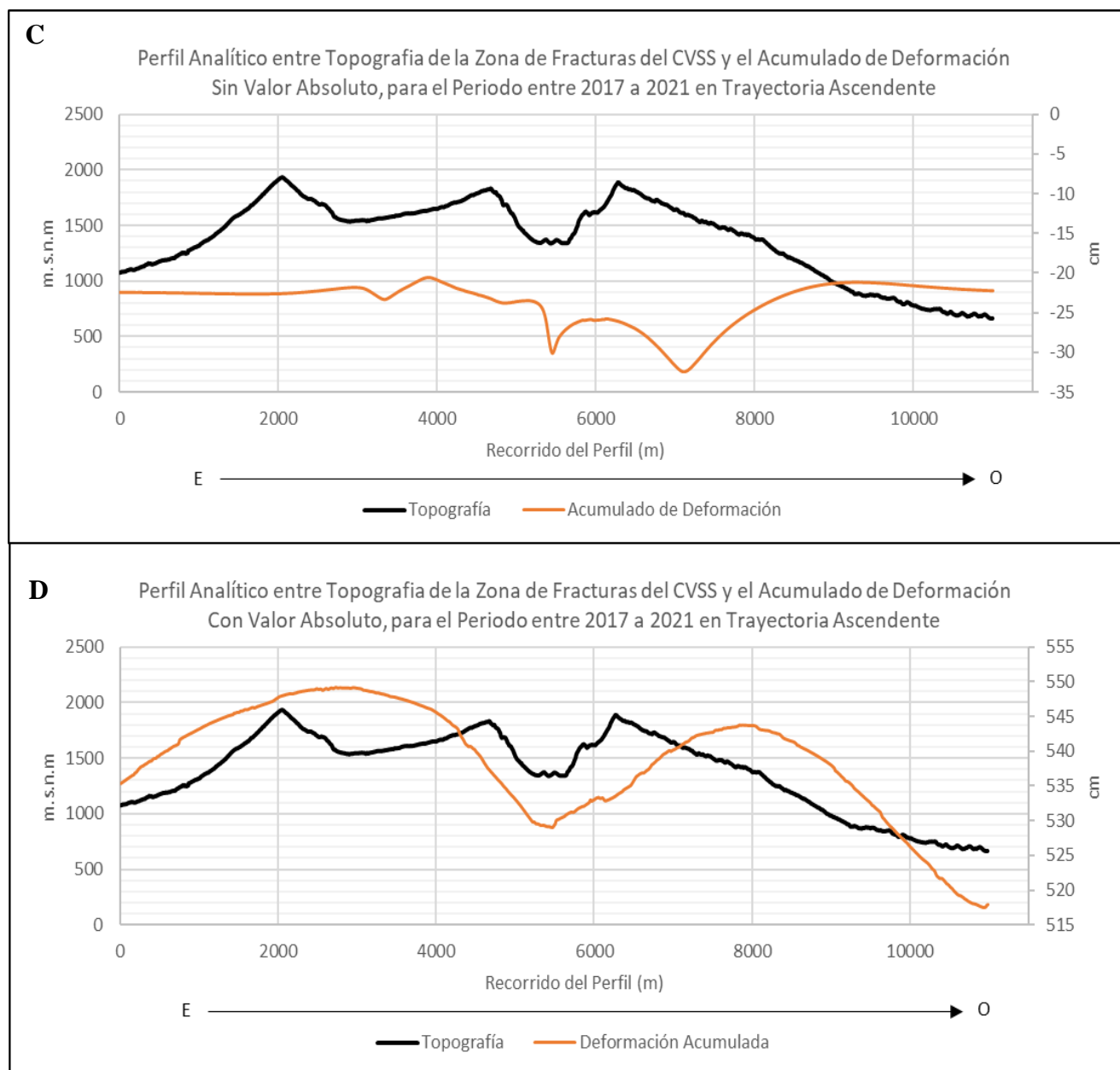


Figura 131. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Ascendente y con Rumbo EO, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

El perfil C revela que, la zona de El Picacho es también un sector muy vulnerable a los procesos de deformación, traducidos para el presente caso en procesos de ladera, reflejados por los valores de desplazamiento negativo de DInSAR comparables al sector del cráter Boquerón, en donde con el perfil D, se estaría reforzando tal observación debido a que presenta los valores más altos de deformación acumulada.

10.5.2. Trayectoria Descendente

Perfil 1: NO-SE

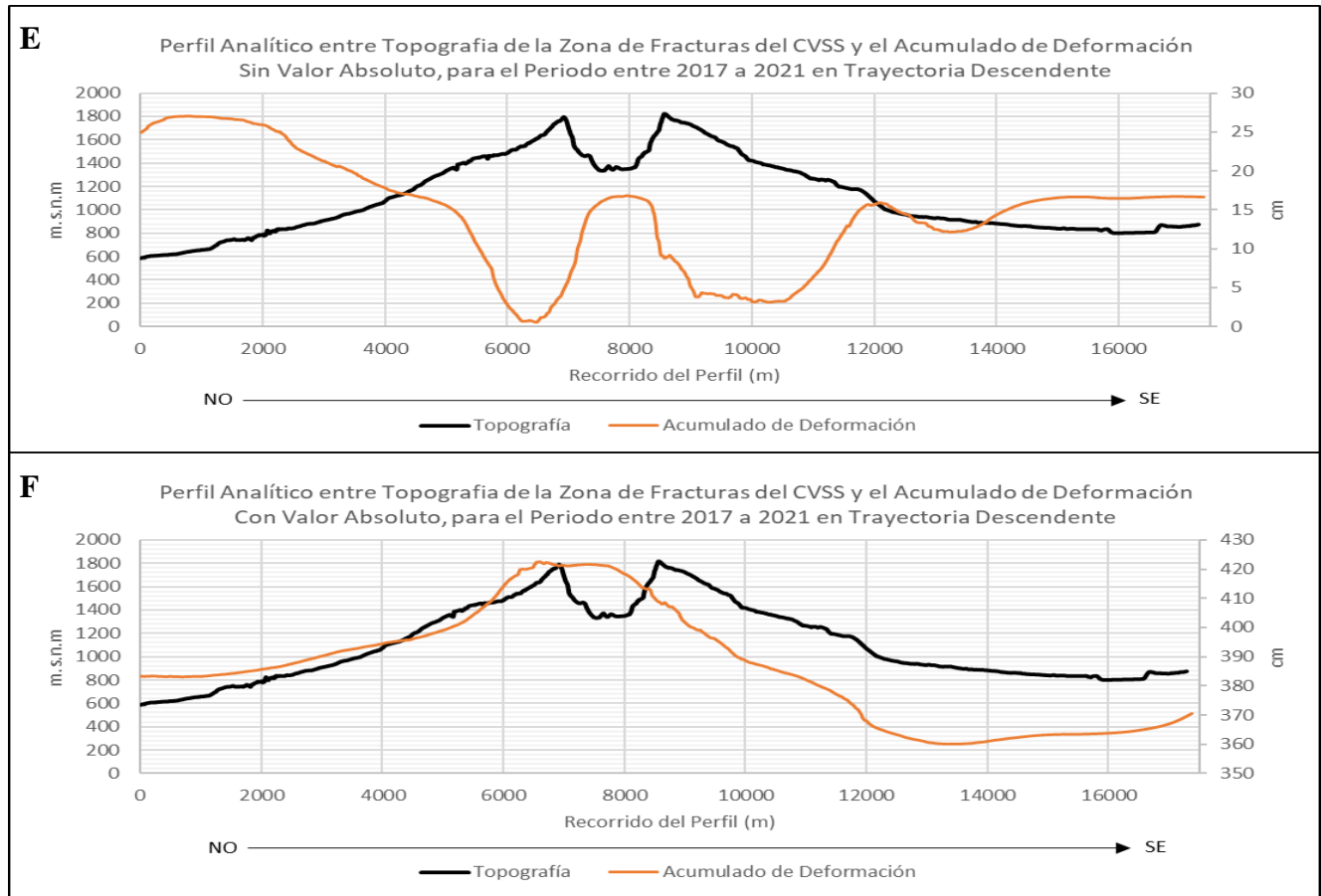


Figura 132. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Descendente y con Rumbo NO-SE, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

Es importante resaltar la respuesta del sensor de radar en trayectoria descendente, el cual, según los estudios realizados por Bürgmann, Rosen, & Fielding (2000), Wright, Parsons, & Lu (2004), Ferretti, Monti-Guarnieri, Prati, Massonet, & Rocca (2007), entre otros, tiene una mejor interacción con los terrenos de relativa baja elevación, mostrando en el perfil E los valores más altos de deformación sobre sectores de elevación menores a la cota 1100 del flanco NO y cota 900 del flanco SE, así como mínima deformación en el sector del cráter Boquerón y La Hoya.

Sin embargo, el resultado obtenido por los acumulados en valor absoluto es consistente con los perfiles A y B, ya que mantiene la tendencia en que el flanco norte es la región que mayor deformación ha experimentado en el tiempo y la región sur la que menor deformación ha registrado.

Perfil 2: EO

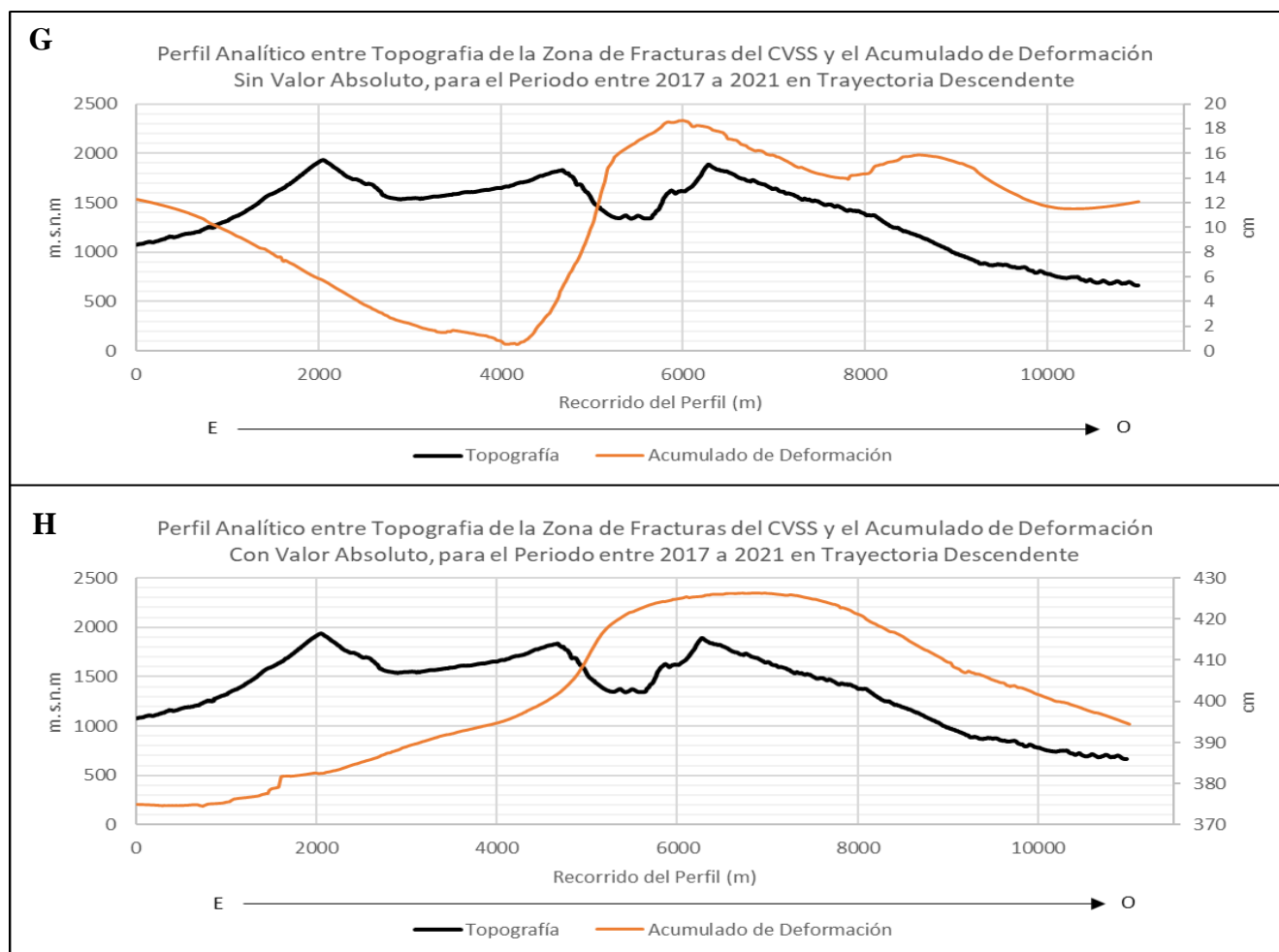


Figura 133. Perfil de Topografía vs Deformación Acumulada por DInSAR Con y Sin Valor Absoluto, en Trayectoria Descendente y con Rumbo EO, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

Los perfiles G y H son la herramienta que permiten comprobar como el análisis de deformaciones por trayectoria descendente no es ideal en los sectores de elevación, puesto que reflejan una dinámica de inflación en donde no existe en la actualidad evidencia alguna de campo (actividad volcánica o sísmica) que lo sugiera.

Demostrando de esta manera que, el análisis de deformación por DInSAR para la zona de fracturas del CVSS, debe de realizarse bajo el dominio de la trayectoria ascendente, y considerar como un auxiliar para el análisis de las cotas menores a los 1000 m.s.n.m, el uso de la trayectoria descendente. Además, se comprueba por ambos mecanismos que la dinámica de deformación es mayor en la zona centro y norte del volcán y menor en la región sur de la zona de fracturas del CVSS.

10.6. Propuesta de Sectorización de la Deformación sobre el CVSS

Aclarando que el presente estudio no es una evaluación de riesgos, es importante exponer que los presentes resultados pueden considerarse como una antesala a nuevas líneas de investigación referentes a la gestión de riesgos geológicos.

Se plantea como una propuesta de sectorización, zonas de deformación según altimetría y regiones geográficas para la zona de fracturas del CVSS, en donde se represente a partir de los acumulados de deformación en valor absoluto, el estado relativo de los desplazamientos del terreno y una clasificación semicualitativa que les describa.

Como un apoyo importante a esta investigación por parte del Ministerio de Obras Públicas (MOPT), ha sido posible adquirir en formato digital el mapa de "Red Vial Interurbana de El Salvador, Diciembre de 2017", el cual permitirá visualizar como la actual red vial, estructura vital y zonas urbanas pueden verse afectadas en términos de la deformación del terreno sobre la zona de fracturas del volcán.

Los mapas a presentar, se formulan bajo el siguiente planteamiento:

- I. La sectorización altimétrica se establece a partir de la reclasificación de la topografía de un modelo de elevación digital a una clasificación definida como zona alta, media y baja, mientras que la sectorización por regiones geográficas hace referencia a un acotamiento por rumbos geográficos definidos por el azimut, es decir, en términos de NO, NE, SE y SO del CVSS.
- II. Se extrae la información geográfica de los rásters generados con el paso anterior para darle referencia sectorial a los puntos de control.
- III. Se calcula el valor promedio de los desplazamientos en función del acumulado de deformación en valor absoluto con respecto a la sectorización correspondiente.
- IV. Se generan los mapas, superponiendo la información referente al mapa de red vial interurbano de El Salvador.

Este proceso se realiza con los resultados obtenidos mediante la trayectoria ascendente, esto debido a lo expuesto en la sección 10.5, obteniendo el siguiente resultado:

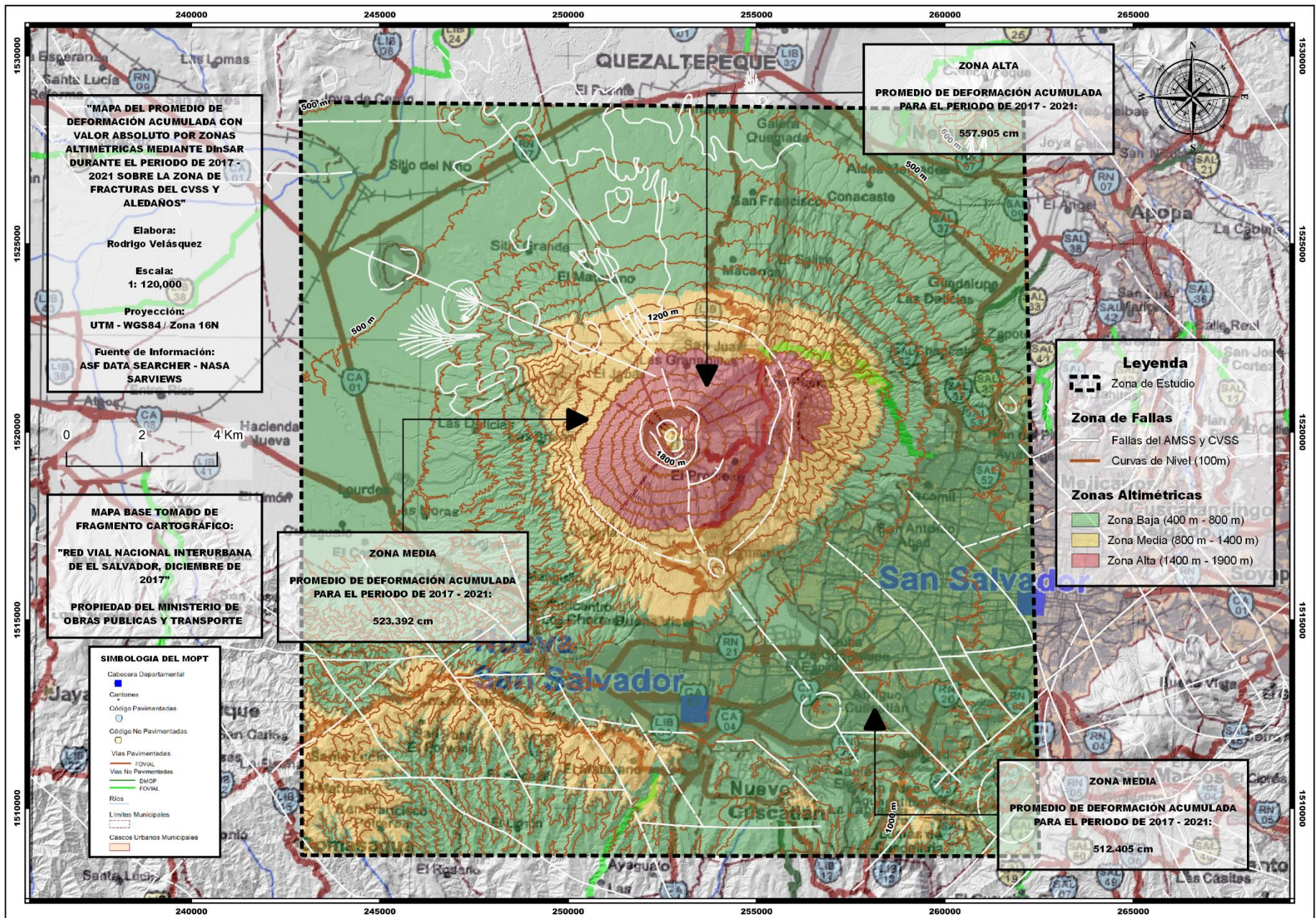


Figura 134. Propuesta 1: Mapa de Sectorización por Altimetría a Partir de los Promedios de Deformación Acumulada en Valor Absoluto, Sobre Trayectoria Ascendente, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

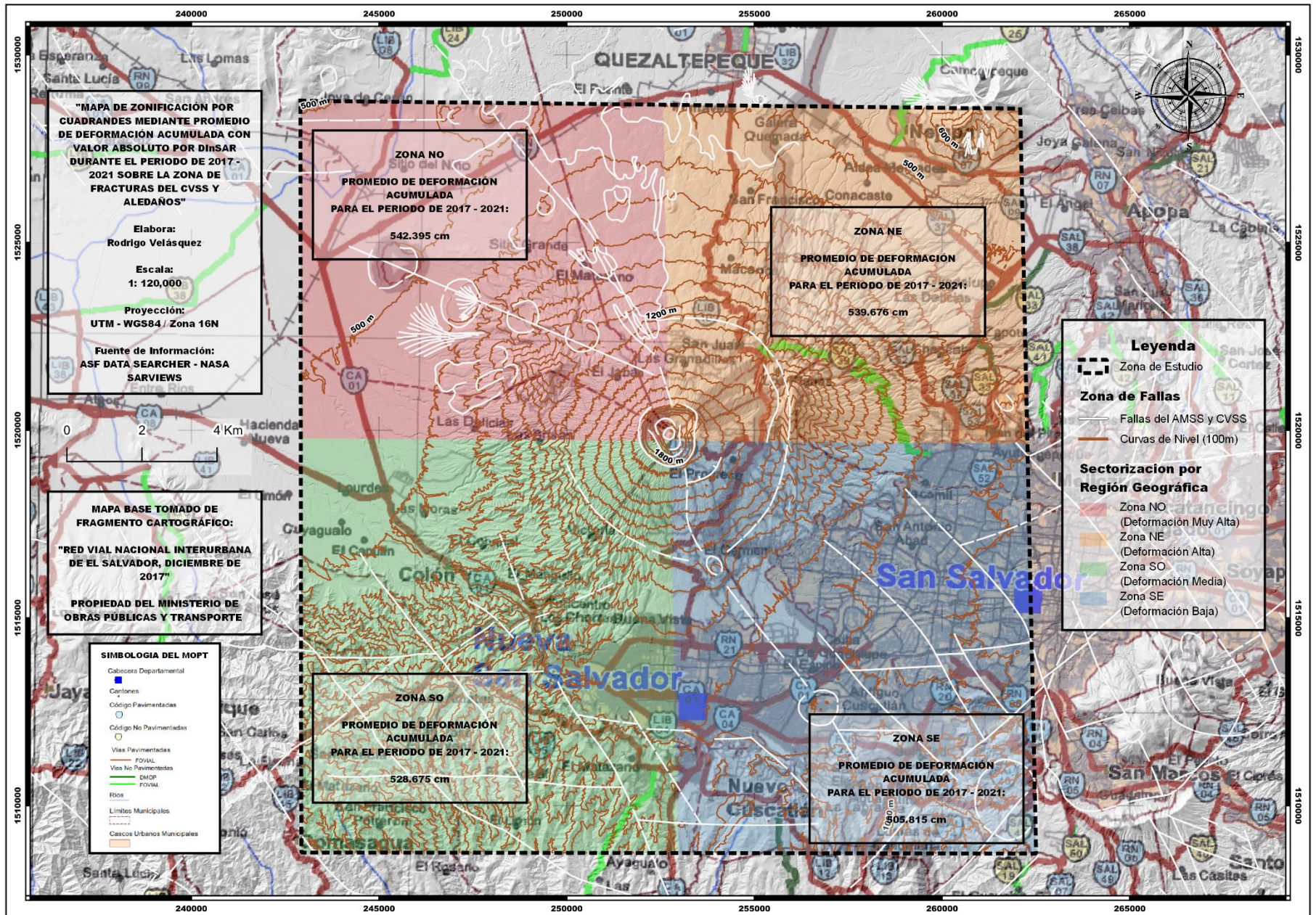


Figura 135. Propuesta 2: Mapa de Sectorización por Regiones Geográficas a Partir de los Promedios de Deformación Acumulada en Valor Absoluto, Sobre Trayectoria Ascendente, para el periodo de 2017 -2021 Sobre la Zona de Fracturas de CVSS. Fuente: Elaboración Propia.

Según lo mostrado en las figuras 134 y 135, se puede argumentar que:

- I. Mediante la propuesta 1 de sectorización (figura 134), se puede observar que es la zona alta (cota > 1400 m.s.n.m), la que mayor acumulado de deformación posee hasta el año de 2021, con un total de 557.905 cm de deformación en la componente vertical. Esta zona se compone por la estructura principal del cráter Boquerón, cerro El Picacho, región de colapso del antiguo volcán de san salvador y boca eruptiva de 1917, los cuales tiene la capacidad de afectar directamente a todo el sector comercial ubicado sobre Calle al Volcán y zona de laderas de Quezaltepeque ante un posible evento de reactivación volcánica.

La zona media del volcán (cota entre 800 a 1400 m.s.n.m), compuesta de manera general por la zona de laderas del volcán Boquerón, cerro El Picacho y el cerro El Jabalí, posee un acumulado de 523.392 cm hasta el mismo año, el cual por condicionantes geomorfológicos como las pendientes y procesos de ladera, podrían llegar a afectar a los sectores urbanos de manera directa en conjunto con la deformación de las zonas bajas (cota entre 400 a 800 m.s.n.m), los cuales no muestran señales de deformación por actividad volcánica pero si sísmica con una tendencia a la subsidencia según el registro por DInSAR hasta 2021.

- II. La propuesta 2 (figura 135) de sectorización permite observar que es el cuadrante NO el que mayor se ha visto afectado por los procesos de deformación del relieve con un total de 542.395 cm, el cuadrante NE le es consecuente con un total de 539.676 cm, los cuales comprometen severamente la interconectividad urbana, así como también accesos no pavimentados rurales de toda la zona norte del CVSS.

Es importante resaltar que es el cuadrante SE el que mayor red vial y estructura urbana compromete, por lo tanto, aunque presente los valores relativamente más bajos de deformación acumulada (505.815 cm), es necesario realizar más análisis geofísicos de detalle para determinar que estructuras geológicas o actividad humana promueve los procesos de subsidencia en la zona baja del CVSS.

11. CONCLUSIONES

En base a los resultados y análisis obtenidos en la presente investigación, se concluye que:

- ✓ La técnica DInSAR empleada bajo la metodología propuesta para ejercer un monitoreo de deformaciones volcánicas ha sido exitosa, debido a que ha permitido realizar una evaluación exhaustiva, entregando una cartografía de deformaciones, línea base de deformación y modelos de análisis para evaluar las condiciones de deformación entre el periodo de 2017 a 2021 en la zona de fracturas del CVSS.
- ✓ Se ha generado una base de datos DInSAR a partir de los mecanismos de procesamiento en SIG; la cual, por su estructura, permite la incorporación futura de información y adaptabilidad a los diferentes escenarios de análisis que la técnica permita.
- ✓ Se ha ejercido un monitoreo sobre puntos de control tomando como referencia diferentes imágenes maestras, obteniendo así, por cada interferograma un delta de desplazamiento con alto valor de coherencia debido a que el intervalo temporal entre tomas es relativamente corto.
- ✓ Se puede afirmar que los datos recopilados de la misión NASA-SARVIEWS, son productos confiables para definir la propagación de la deformación en la zona, pero habría que hacer una evaluación del filtro “Multi Looking” el cual se debe aplicar para la reducción del efecto topográfico en las tomas InSAR,
- ✓ El filtro de coherencia es un paso importante de ejecutar, porque delimita de manera precisa las zonas en donde los puntos de control se ha encontrado que son confiables y además permite disminuir el tiempo de definición de los mismos para un correcto levantamiento de información.
- ✓ El set de imágenes usadas cumple en su totalidad con el parámetro de baseline (separación horizontal relativa entre vista del paso 1 y 2 del satélite).

- ✓ Debido a las condiciones topográficas y altimétricas de la zona de estudio, es la trayectoria ascendente la ideal para el análisis de deformaciones en el CVSS, la cual con un barrido total del 60% del territorio salvadoreño, ha permitido la evaluación del 80% del área de estudio con una coherencia promedio mayor a 0.4.
- ✓ La trayectoria descendente, a pesar de barrer el territorio salvadoreño en un 88%, y la zona de estudio en un 76%, no se recomienda su uso como información base para el monitoreo de deformaciones, debido a las incongruencias espaciales y temporales que esta posee. Sin embargo, su uso es importante como un factor de correlación y validación de los datos bajo otras condiciones topográficas; el uso preferente de esta trayectoria satelital es para regiones de altimetría plana, razón principal por la cual no ha tenido buena respuesta en la zona de fracturas del CVSS.
- ✓ El principal factor de decorrelación en la zona de fracturas del CVSS es la densidad de la vegetación, que no favorece la retrodispersión de la señal emitida por el sensor de Sentinel-1, esto se debe a la longitud de onda propia de las imágenes en banda C.
- ✓ A partir del cálculo de los acumulados fue posible reconocer la dinámica de los desplazamientos relativos, además debido a la aplicación de valor absoluto a los datos, fue posible identificar los momentos en que dicha tendencia varía significativamente, es decir los momentos de inestabilidad debido a la deformación del terreno.
- ✓ Se logró identificar a partir de los cálculos con valor absoluto y sin valor absoluto, que es el cráter Boquerón y la zona de flancos norte del volcán la que más se ha visto afectada por los procesos de deformación del terreno relacionados a la sismicidad, agentes y procesos geomorfológicos como la erosión y meteorización.
- ✓ La región de laderas sur y zona urbana son los sectores que relativamente menos se deforman, sin embargo, se pueden ver directamente afectados por la dinámica de deformación en las zonas altas, siendo estas en función de la vulnerabilidad urbana,

una componente importante a tomar en cuenta por los futuros planes de gestión de riesgos volcánicos.

- ✓ El comportamiento actual de la sismicidad, no es un factor detonante de deformaciones en el terreno de la zona de fracturas del CVSS, pero si debe de considerarse como un factor condicionante, esto debido a que, según los resultados presentados en este estudio, es posible observar que posterior al evento sísmico de 2017, el cual presenta el registro de mayor amplitud sísmica para el periodo estudiado (5.2 en escala Richter), el terreno ha presentado mayor facilidad a deformarse, aunque la intensidad de la sismicidad haya venido disminuyendo en el tiempo.
- ✓ No se detectan procesos de inflación, es decir, que las condiciones altimétricas del terreno no muestran indicios de aumento positivo en la vertical, reflejados como levantamiento en el terreno, referida a la cámara magmática del volcán.
- ✓ De manera general, el dominio en la dinámica de deformación tiende a la subsidencia, es decir que la acción de los esfuerzos para el periodo de 2017 a 2021 ha tendido a la liberación energética reflejada por la sismicidad de los años recientes. Sin embargo, la tendencia presentada en las series temporales sugiere un cambio hacia la acumulación de esfuerzos para los años siguientes; se necesita de geofísica de detalle para determinar que estructuras geológicas o actividad humana promueve los procesos de subsidencia e inflación en la zona de fracturas del CVSS.
- ✓ Mediante las series temporales pudo comprobarse que, de manera general, la deformación en la zona de fracturas del volcán presentó sus picos máximos en el año de 2020, sus mínimos en 2017, el comportamiento para los años de 2018, 2019 y 2021 fue relativamente similar en términos de orden de magnitud.
- ✓ La correlación entre datos DInSAR con GPS (Hanssen, 2002) fue alta para la estación VSSS, media para la estación PIAM, muy baja para la estación CNR-1 y nula para la estación BOLI debido a la poca densidad de datos que esta última posee.

12. RECOMENDACIONES

12.1. Para la Universidad de El Salvador y Academia

- ❖ Fortalecer las capacidades de investigación a través del proyecto especial “Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra” y el laboratorio de Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, para dar seguimiento a la presente investigación, con la finalidad de articular un programa de monitoreo de deformaciones volcánica, subsidencia urbana y procesos de ladera, usando la técnica y metodología propuesta, así como también los resultados presentes como una línea base de información e investigación, capaz de incidir en la gestión de los riesgos geológicos referente a los procesos evolutivos del territorio.

- ❖ Formar y capacitar a grupos de investigación relacionado a las temáticas de levantamiento de información por medio de sensores remotos aplicado al monitoreo volcánico, de deformaciones de terreno, fallas geológicas, deslizamientos y movimientos en masa en general.

12.2. Para las Instituciones de Gobierno e Investigadores Autónomos

- ❖ Evaluar la inversión o medios de adquisición para instrumentalizar con equipo GPS de doble frecuencia el CVSS, con la finalidad de establecer una red de monitoreo geodésico de deformaciones sobre el volcán.

- ❖ Realizar cartas de entendimiento o acuerdos interinstitucionales para trabajar en conjunto con el Laboratorio de Geología de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, como un referente y apoyo para la investigación geofísica y geológica, de manera que los procesos de investigación sean más fluidos y se logren resultados de calidad en tiempos relativamente cortos.

12.3. Para la Sociedad Civil

- ❖ Confiar en los procesos de formación, investigación y resultados científicos producidos por la Universidad de El Salvador, institución que trabaja para generar nuevo conocimiento con la finalidad de lograr un impacto social positivo en la población y una mejor concepción del medio ambiente.

- ❖ Apoyar a la divulgación científica responsable, referido únicamente a fuentes oficiales.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, J., Hernández, R., Carrasco, D., & Rornero, R. (2004). *Interferometría Diferencial (Insar) En Tungurahua Y Galápagos*. Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Geofísica de Quito. CLIRSEN de Quito. INDRA de España. Instituto de Astronomía y Geodesia (CSIC - UCM).
2. Andrade, R. R. (2018). *Análisis de deformaciones de la corteza terrestre y extracción de lineamientos generados por esfuerzos sísmicos para el estudio de zonas sísmicas mediante imágenes de satélite y GPS*. Culiacán, Sinaloa: Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio.
3. Atkin, R. J., & Fox, N. (1980). *An Introduction to the Theory of Elasticity*. Dover, ISBN 0-486-44241-1.
4. Bellotti, F., Del Conte, S., & Ferretti, A. (2015). Advanced InSAR Techniques to support tectonics setting analyses. *Research Gate - Rediconti Online Societa Geologica Italiana*.
5. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). *A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11.
6. Burgmann, R., Hilley, G., Ferretti, A., & Novali, F. (2006). Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. *Geology (2006) 34 (3)*, 221–224.
7. Bürgmann, R., Rosen, P. A., & Fielding, E. J. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 28:169-209*.
8. Chandrasekharaiah, D. D., & Debnath, L. (1994). *Continuum Mechanics*. Academic Press.
9. Charco, M., & Galán del Sastre, P. (2011). *Deformaciones en áreas volcánicas: una aproximación numérica para su predicción en el volcán Teide (Tenerife, Islas Canarias)*. Departamento de Matemática Aplicada a la Edificación, al Medio Ambiente y al Urbanismo, Instituto de Geociencias (CSIC-UCM).
10. Chavez Hernandez, J. A., Lazecký, M., Šebesta, J., & Bakoň, M. (2020). *Relation between surface dynamics and remote sensor InSAR results over the Metropolitan Area of San Salvador*. Springer, Nat Hazards 103, 3661–3682 (2020).
11. Copernicus, NASA SARVIEWS. (2017-2021). *Datos de Sentinel-1 Procesados por ASF DAAC*. Misión Espacial Europea (ESA).
12. Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas Gonzalez, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2015). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ELSEVIER - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

13. De Ruyt, R. (2003). *Análisis Comparativo De Las Técnicas Insar Persistent Scatterers Interferometry (Psi) Y Small Baseline Subset (Sbas) Aplicadas En La Medición De La Deformaciones Del Complejo Volcánico Cordón Caulle (40.5°.s) - Andes Del Sur*. Universidad Nacional de Córdoba.
14. DGOA-MARN. (2019). *Sistema Nacional de Alerta Temprana: Evaluación Preliminar de Amenaza Volcánica en El Salvador y Analisis de Brecha (TAGA)*. Dirección General del Observatorio de Amenazas, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturalez, Área de Vulcanología, Gerencia de Geología.
15. Escobar, D., & García, V. (2021). *Árbol de Problables Eventos Eruptivos del CVSS*. Dirección General del Observatorio de Amenazas, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturalez (DGOA-MARN).
16. Fairbrothers, G. E. (1977). *Magmatic Trends at Boqueron Volcano*. Rutgers University.
17. Ferrés, D. (2014). *Estratigrafía, Geología y Evaluación de Peligros Volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador (El Salvador)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
18. Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Massonet, D., & Rocca, F. (2007). *InSAR principles: Guidelines for SAR Interferometry*. ESA publications.
19. Fitzgerald, R. W. (1996). *Mecánica de Materiales*. México: Alfaomega.
20. Garcés Muñoz, M. (2020). *Aplicación De Interferometría De Radar De Apertura Sintética (Insar) Y Análisis De Series De Tiempo Sbas, Para Tres Casos De Estudio En Chile Central*. Universidad de Chile.
21. Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21), 4035-4038.
22. Grunfeld Brook, N. A. (s.f.). *Introducción a Interferometría SAR -Generación de DEM*. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).
23. Hanssen, R. F. (2002). *Radar interferometry: Data interpretation and Error Analysis*. New York: Kluwer. New York: Kluwer Academic Publishers.
24. Hermosilla Díaz, D. E. (2016). *InSAR Aplicada al Estudio del Movimiento de Laderas Aledañas al Volcán Calbuco con Ayuda de Imagenes de Radar Sentinel-1A*. Universidad Técnica Federico Santa María.
25. Hernández, W., & Jicha, B. (2019). Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador. *Universidad Tecnológica de El Salvador*.
26. Herrera, G., Tomás, R., López Sánchez, J. M., Monserrat, O., Cooksley, G., & Mulas, J. (2009). *Sistemas Radar Aplicados A La Investigación De Subsistencia y Movimientos De Ladera*. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción,

Obras Públicas e Infraestructura Urbana, Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente.

27. Instituto Geográfico Nacional de España - IGN. (19 de Octubre de 2021). *Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Obtenido de <http://www.aepect.org/2021/10/19/recursos-didacticos-erupcion-volcanica-de-la-palma/>
28. Instituto Geográfico Nacional de España - IGN. (25 de Diciembre de 2021). *Erupción en la Isla de La Palma, Análisis de Actividad Volcánica Registrada desde el 11 de Septiembre de 2021*. Obtenido de <https://www.ign.es/web/vlc-serie-palma>
29. Jaeger, J. C., & W. Cook, N. G. (1979). *Fundamental of rocks mechanics 3rd Ed.* London: Chapman & Hall .
30. Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., & Pepe , A. (2007). An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis. *Pageoph Topical Volumes book series (PTV)*, 637-661.
31. Lisowski, M. (2006). Analytical Volcano Deformation Source Models. In: Dzurisin, D. (Ed.). *Springer*, 153–194.
32. Major, J. J., Schilling, S. P., Sofield, D. J., Escobar, D., & Pullinger, C. R. (2001). *Riesgos Volcánicos en la Región de San Salvador*. Departamento del Interior de los Estados Unidos, Investigación Geológica de los Estados Unidos.
33. Marroquín, G. (2017). *Características de la Sismicidad en el Complejo Volcánico de San Salvador y Alrededores*. Dirección General del Observatorio de Amenazas, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturalez (DGOA-MARN).
34. Martínez Mena, M. G. (2017). *Detección en Cambios de Reservorios Acuíferos Basados en Índices Espectral de Sequía*. Universidad Politécnica de Madrid.
35. Mason, R. D., Lind, D. A., Marchal, W. G., Hernández Lozano, M. C., & Paniagua Bocanegra, F. (2002). *Estadística para Administración y Economía*. Alfaomega.
36. Misión Geológica Italiana; Irvine, T N; Baragar, W R.A. (1988). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can Jour, Earth Science*, 523-548.
37. Mogi, K. (1958). Relations Between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformations of the Ground Surfaces Around Them. *Earthquake Research Institute, University of Tokyo N° 36*, 99-134.
38. Mouratidis, A., & Costantini, F. (2012). Ps and Sbas Interferometry Over the Broader Area of Thessaloniki, Greece, Using the 20-Year Archive of ERS and Envisat Data. *Conference Paper*.

39. Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2010). *Discrete Time Signal Processing*. Pearson Education.
40. Ortiz Berrocal, L. (2017). *Resistencia de Materiales*. España: McGraw Hill.
41. Parker, A. L. (2017). InSAR Observations of Ground Deformation. Application to the Cascades Volcanic Arc. *Springer*.
42. Peña, D. (2010). *Análisis de Series Temporales*. Alianza Editorial.
43. Peña, M. (2014). *Modelo Geológico Estructural Preliminar del Sector Compreendido entre El Anís y Los Arques, Municipio Sucre, Estado de Mérida*. Mérida: Tesis, Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología.
44. Perlock, P. A., González, P. J., Tiampo, K. F., Rodríguez Velasco, G., Samsonov, S., & Fernández, J. (2019). Time Evolution of Deformation Using Time Series of Differential Interferogram: Application to La Palma Island (Canary Island) . *Research Gate - Pure and Applied Geophysics*.
45. Pineda, K. (2019). *Mapeo geofísico integrado del área asociada al enjambre sísmico de abril de 2017 en el flanco sur del volcán de San Salvador*. Universidad de El Salvador.
46. Prieto Morín, J. F. (2015). *Metodos Diferenciales e Interferométricos para la Evaluación de Deformaciones de la Corteza Terrestre Medianre Tecnicas GNSS e InSAR*. Universidad Politécnica de Madrid.
47. Reuter, F. (2009). *Principios de Teledetección*. Universidad Nacional de Santiago del Estero.
48. Rodríguez Morilla, C. (2000). *Análisis de Series Temporales*. Editorial La Muralla, S.A., 2000.
49. Ruegg, J. C. (1994). Deformación de la corteza terrestre y terremoto: aplicación al estudio del ciclo sísmico en el norte de Chile. *Física de la tierra, Mecanismo focal de los terremotos, ISSN 0214-4557, N° 6, 1994, 201-243*.
50. Sanaz Vajedian, M. M. (2015). *StaMPS Improvement for Deformation Analysis in Mountainous Regions: Implications for the Damavand Volcano and Mosha Fault in Alborz*. Environmental Science, Remote Sensing.
51. Sears, & Zemansky. (2013). *Física Universitaria, Décimo Tercera Edición*. México: Pearson.
52. Seppi, S. (2016). *Uso De Interferometría Diferencial Para Monitorear Deformaciones De Terreno En La Comuna De Corvara, Provincia De Bolzano, Italia*. Universidad Nacional De Córdoba, Córdoba, Argentina.
53. Sofield, D. J. (1998). *History and Hazards of Volcán San Salvador, El Salvador*. Michigan Technological University.

54. Sousa, J. J., Guimarães, P., Sousa, A., Ruize, A. M., Patrício, G., Magalhães, L., & Pereira, F. (2004). *viStaMPS – a Collaborative Project for StaMPS-MTI Results Interpretation*. Procedia Technology, volume 16.
55. Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
56. Tofani, V., Raspini, F., Catani, F., & Casagli, N. (2013). Persistent Scatterer Interferometry (PSI) Technique for Landslide Characterization and Monitoring. *Open Access - Remote Sensing ISSN 2072-4292*.
57. Tom R. Lauknes, J. D. (2006). *A Comparison Of Sbas And Ps Ers Insar For Subsidence Monitoring In Oslo, Norway*. Norut IT, P.O. Box. 6434, NO-9294 Tromsø, Norway. Geological Survey of Norway (NGU), NO-7441 Trondheim, Norway. Norwegian Defence Research Establishment (FFI), P.O. Box 25, NO-2027 Kjeller, Norway.
58. TREA-Altamira. (6 de Octubre de 2021). *Erupción en Volcán Cumbre Vieja*. Obtenido de ArcGIS Story Maps: <https://storymaps.arcgis.com/stories/70846cfed5cd4381a13abba1feac359b>
59. Velasco Silva, W., & Gómez Gómez, J. E. (2020). *Análisis de Deformación de la Corteza en el Magdalena Medio con Técnicas de Interferometría Diferencial Avanzada y Dispensor Persistente*. Bogotá, Colombia: Tesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
60. Velásquez, R., & Villalobos, M. A. (2021). *Línea Base de Deformación del Volcán Chaparrastique, San Miguel, El Salvador*. Dirección General del Observatorio de Amenazas, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (DGOA-MARN), Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas (UES-CIMAT).
61. Velez, M. L. (2011). *Análisis de la deformación asociada al comportamiento de sistemas volcánicos activos : volcán Copahue*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
62. Wright, T. J., Parsons, B. J., & Lu, Z. (2004). Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, L01607*.
63. Zhou, X., Chang, N.-B., & Li, S. (2009). Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research. *Sensors 2009, 9(3), 1876-1912*.