



**Instituto de
Altos Estudios Espaciales
"Mario Gulich"**



Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética)

Por Tannia Margarita Mayorga Torres

**Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de**

**MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Julio, 2013

© IG - CONAE/UNC 2013

© FaMAF - UNC 2013

**Director: Agrim. Gabriel Platzeck
Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, Córdoba-Argentina**

**Co-director: Ing. Edwin León
Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, Quito-Ecuador**

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Resumen

Ecuador es un país rico en recursos naturales, multi-cultural, y a la vez sensible a amenazas naturales y antrópicas, porque la cultura es de respuesta y no prevención. Ecuador ha implementado una Infraestructura Nacional de Datos Geo-espaciales con la finalidad de que a nivel nacional todas las instituciones gubernamentales, públicas y privadas compartan información espacial. Por su ubicación geográfica tiene ventajas al tener varios climas en una pequeña extensión territorial, pero tiene la desventaja de tener una cobertura de nube casi permanente. Las imágenes satelitales de radar traspasan las nubes. Bajo ésta visión, en la presente investigación se procesan imágenes de radar para detectar movimientos en masa con el uso de la herramienta de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR).

Este estudio es un inicio de lo que se puede hacer al tener la disponibilidad de recursos satelitales y conocimiento de manejo de software de interferometría. Se logró realizar una secuencia temporal de interferogramas en base a la disponibilidad de imágenes ERS-1/2 y ALOS sensor PALSAR. Se aplicó la técnica Stacking DInSAR para obtener un promedio de desplazamiento que indica solevamiento y subsidencia en la extensión cubierta por la imagen de radar.

Palabras Claves:

Interferometría diferencial, stacking DInSAR, imágenes de radar, movimiento en masa, ERS, ALOS PALSAR.

Abstract

Ecuador is a country of natural resources, multicultural, and at the same time sensible to the occurrence of natural and anthropic events, because the culture is response and no prevention. Ecuador has implemented a National Spatial Infrastructure to share geo spatial information to national level through public and private institutions. By its geographic location it has the advantages to have different weather in a small territorial extension, but the disadvantage is having cloud all time. Radar data are invisible to the atmosphere. Under this statement, the present research study processes radar data to detect lanslides using the tool of differential interferometry of radar (DInSAR).

This study is the beginning to develop applications with enough availability of radar data and knowledge of proper software for doing interferograms. This study achieved to do a temporal sequence of interferograms based on availability of data ERS-1/2 and ALOS sensor PALSAR. The technique of Stacking DInSAR was applied to get an average of displacements that indicate uplift and subsidence in the radar scene.

Key words:

Differential interferometry, stacking DInSAR, radar data, landslide, ERS, ALOS PALSAR.

Agradecimientos

A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina CONAE, al Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich”, a la Universidad Nacional de Córdoba-Facultad de Matemática, Astronomía y Física FaMAF, por la beca otorgada para enriquecer mis conocimientos profesionales que los pondré al servicio de mi país.

Mi agradecimiento profundo al Agrimensor Gabriel Platzeck, Director del Instituto Gulich y Director de mi tesis, por su seguimiento constante, consejos y apoyo permanente para llevar a cabo mi investigación. De igual manera al Doctor Marcelo Scavuzzo, Director de la Maestría por su buena voluntad y apoyo constante para con mi persona en el transcurso de mi estudio y desarrollo de la tesis.

A la Doctora Selva Soledad Rivera, Directora del Instituto CEDIAC-Facultad de Ingeniería-Universidad de Cuyo, por su apoyo para mi entrenamiento. Al Doctor Pablo Euillades, Director de la División de Imágenes Satelitales del Instituto CEDIAC, por su generosidad al compartir sus conocimientos en el campo de interferometría. Al Doctor Leo Euillades, y los Estudiantes de Doctorado, los Agrimensores Natalia Riveros y Sebastián Balbarini por su apoyo y amistad durante mi entrenamiento y estadía en Mendoza.

A mi tribunal de tesis conformado por los Doctores Sergio Masuelli, Pablo Euillades, Daniel Barraco y Julián Pucheta, por sus acertadas sugerencias de cambio en el trabajo de corrección de la tesis.

Expreso mi gratitud a mis profesores del Instituto Gulich y de la FaMAF por su guía en mi formación durante la maestría.

Al CUSS CONAE User Segment Service por su eficiente trabajo en el proceso de adquisición de imágenes de radar para la elaboración de la tesis, y por medio del CUSS a la Agencia Espacial Europea ESA, al nodo de Alaska de “Japan Aerospace Exploration Agency”, y al Instituto Espacial Ecuatoriano IEE.

Al Instituto Delft para la Investigación del Espacio Orientada a la Tierra al proporcionar las órbitas precisas y órbitas de adquisición rápida ERS, como resultado de la investigación de Scharroo y Visser (Scharroo Remko 1998).

Agradezco al Instituto Nacional de Investigación, Geológico, Minero, Metalúrgico INIGEMM, a los Ingenieros Geólogos Aracely Lima y Edwin León al suministrar información de campo del área de estudio de Ecuador. Mi profunda gratitud a los Ingenieros Geólogos Galo Plaza y Washington Castillo por sus acertados comentarios para mejorar el presente trabajo de investigación, y de igual manera al Master Mohammad Alange investigador en la Universidad de Shiraz, por su apoyo incondicional en el procesamiento con ROI_PAC.

A Vanina y Gastón por su amistad. A mis queridos compañeros que me brindaron su amistad y apoyo dentro y fuera del salón de clase. A los amigos de la “combi” que hicieron ameno el traslado diario.

Agradezco infinitamente a mi familia que con su apoyo y cariño a la distancia me apoyaron incondicionalmente en éste nuevo sueño de mejoramiento profesional durante éstos dos años de estudio en Argentina.

Tabla de contenidos

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. | ANTECEDENTES..... | 1 |
| 1.2. | OBJETIVOS | 4 |
| 1.3. | ESTRUCTURA DE LA TESIS | 5 |
| 1.4. | UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO..... | 5 |
| 1.5. | CARACTERÍSTICAS GEODINÁMICAS DEL ÁREA INESTABLE..... | 7 |
| 1.5.1. | Marco geológico | 12 |
| 1.5.1.1. | Regional | 12 |
| 1.5.1.2. | Local..... | 14 |
| 1.5.2. | Características litológicas del área inestable | 16 |
| 1.5.3. | Medida de los desplazamientos en el terreno | 18 |
| 1.5.3.1. | Medida de los desplazamientos en el terreno con los extensómetros de fabricación artesanal | 19 |
| 1.5.3.2. | Medida de los desplazamientos en el terreno con las estaciones de GPS diferencial | 29 |
| 1.5.3.3. | Análisis y comparación de medidas en el terreno de los extensómetros Q1, Q2, Q3, y estaciones GPS diferencial QR-02, QR03, QR04..... | 31 |
| 1.5.3.4. | Análisis del sistema de monitoreo en tiempo real..... | 33 |
| 2. | FUNDAMENTO TEÓRICO | 37 |
| 2.1. | PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN RADAR | 37 |
| 2.1.1. | Interacción de la radiación electromagnética con la materia..... | 41 |
| 2.1.2. | Funcionamiento básico de un radar | 45 |
| 2.1.3. | Radar de apertura sintética SAR..... | 47 |
| 2.1.4. | Modos de adquisición..... | 53 |
| 2.1.5. | Distorsiones geométricas en las imágenes SAR..... | 55 |
| 2.2. | PLATAFORMAS SATELITALES | 58 |
| 2.2.1. | Advanced Land Observing Satellite - ALOS | 58 |
| 2.2.1.1. | Productos PALSAR..... | 63 |
| 2.2.2. | European Remote Sensing Satellite - ERS | 65 |
| 2.3. | INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA - INSAR..... | 68 |
| 2.3.1. | Imágenes multi-vista (multi-look)..... | 75 |
| 2.3.2. | Desenrollamiento de la fase | 76 |
| 2.3.3. | Generación de un interferograma diferencial DIFSAR..... | 77 |
| 2.3.4. | Geo codificación..... | 82 |
| 2.4. | SOFTWARE | 82 |
| 2.4.1. | Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, DORIS..... | 83 |
| 2.4.2. | Repeat Orbit Interferometry PACKage, ROI_PAC | 84 |
| 2.5. | METODOLOGÍA | 86 |
| 3. | ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO | 89 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.1. | MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN | 94 |
| 3.2. | DATOS ERS | 98 |
| 3.2.1. | Pre-procesamiento del dato RAW | 100 |
| 3.2.2. | Procesamiento del dato RAW | 101 |
| 3.2.2.1. | Órbita precisa | 101 |
| 3.2.2.2. | Conformar los pares interferométricos..... | 103 |
| 3.2.2.3. | Formación de la imagen enfocada..... | 104 |
| 3.2.2.4. | Proceso de corrección de desplazamiento de las imágenes que conforman el par interferométrico | 108 |
| 3.2.2.5. | Proceso de mejorar pixel de desenrollamiento de fase | 108 |
| 3.2.2.6. | Interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado | 120 |
| 3.2.3. | Pos-procesamiento..... | 121 |
| 3.2.4. | Conclusiones del procesamiento con ERS | 123 |
| 3.3. | DATOS ALOS PALSAR..... | 124 |
| 3.3.1. | Pre-procesamiento del dato RAW | 126 |
| 3.3.1.1. | Estimación del parámetro Línea de Base | 126 |
| 3.3.1.2. | Modificación de la frecuencia de muestreo del modo FBD al FBS..... | 127 |
| 3.3.2. | Procesamiento del dato RAW..... | 128 |
| 3.3.2.1. | Formación de la imagen enfocada..... | 128 |
| 3.3.2.2. | Proceso de corrección de desplazamiento de las imágenes que conforman el par interferométrico | 131 |
| 3.3.2.3. | Proceso de mejorar pixel de desenrollamiento de fase | 132 |
| 3.3.2.4. | Interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado | 136 |
| 3.3.3. | Conclusiones del procesamiento con ALOS | 140 |
| 4. | RESULTADOS CON ALOS PALSAR..... | 143 |
| 4.1. | POS-PROCESAMIENTO | 144 |
| 4.1.1. | Transformación de radianes a centímetros | 144 |
| 4.1.2. | Calibración de los interferogramas..... | 150 |
| 4.2. | STACKING DINSAR..... | 156 |
| 5. | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 163 |
| 5.1. | LÍNEAS A FUTURO..... | 165 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 167 |
| | Anexo 1: Datos obtenidos antes de la recalibración en los extensómetros Q1, Q2 y Q3 (periodo 25/octubre/2007-22/abril/2008) y experimentales E1, E2 (periodo 14/noviembre/2007-22/abril/2008)..... | 181 |
| | Anexo 2: Monitoreo con los extensómetros durante el periodo 10/12/2006 – 11/02/2010 ... | 183 |
| | Anexo 3: Monitoreo con GPS diferencial durante la primera (14-16 Junio del 2007) y segunda campaña (18-20 Julio del 2007) | 195 |
| | Anexo 4: Mapas de Pendiente y Aspecto del SRTM 90 m. DEM de Ecuador Continental... | 196 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 5: Disponibilidad de órbitas para ERS-1/2 | 199 |
| Anexo 6: Ingreso de comandos en IDL para corregir datos ERS..... | 201 |
| Anexo 7: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado | 202 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Derrumbe en Chimborazo. Lugareños recorren el lugar del derrumbe ocurrido el domingo 21/octubre/2012, en horas de la mañana. Foto: Glenda Giacometti/EL COMERCIO. Fuente: Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio (2012c)..... | 4 |
| Figura 2: Ubicación del área de estudio. Elaboración: Tannia Mayorga Torres..... | 6 |
| Figura 3: Mapa Geológico Regional. Elaboración: Tannia Mayorga Torres..... | 13 |
| Figura 4: Mapa Geológico Local. Elaboración: Tannia Mayorga Torres..... | 15 |
| Figura 5: (1) Área 1 deslizamiento activo 1 ocurrido en julio/2006, se observa el escarpe secundario y las grietas trasversales: INIGEMM (León y Pilatasig, 2006); (2) Diagrama de un deslizamiento rotacional: Bonnard (2008a), Lateltin (2008a)..... | 17 |
| Figura 6: Área 2 deslizamiento activo 4, vista de la parte activa e inactiva del escarpe principal del deslizamiento. Fuente: INIGEMM (León y Pilatasig, 2006)..... | 18 |
| Figura 7: Ubicación de puntos de monitoreo. Fuente: presentación de diapositivas del INIGEMM (León, 2010)..... | 19 |
| Figura 8: Esquema del extensómetro de fabricación artesanal, indicando sus componentes. Fuente: León et al.(2007_1)..... | 20 |
| Figura 9: Desplazamiento acumulado de los extensómetros Q1 y Q2, durante el periodo 10/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: León et al. (2007_1), León et al. (2007_2)..... | 22 |
| Figura 10: Esquema de la relación del instrumental experimental. Fuente: Calero (2007)..... | 23 |
| Figura 11: Desplazamiento acumulado de los extensómetros Q1, Q2, Q3, QE1 y QE2, durante el periodo 04/dic./2006-15/feb./2007. Fuente: Calero (2007)..... | 24 |
| Figura 12: Ubicación de los puntos de control GPS <i>QR-02</i> , <i>QR-03</i> , <i>QR-04</i> , los cuales están cercanos a los extensómetros <i>Q1</i> , <i>Q3</i> y <i>Q2</i> respectivamente. Elaborado: Tannia Mayorga Torres..... | 31 |
| Figura 13: Registro de lecturas medidas en el terreno por los extensómetros y estaciones GPS diferencial..... | 32 |
| Figura 14: Desplazamiento acumulado (cm) del instrumento TUMBA SF-1. Fuente: Registro del INIGEMM..... | 33 |
| Figura 15: Desplazamiento acumulado (cm) del instrumento TUMBA SF-2. Fuente: Registro del INIGEMM..... | 34 |
| Figura 16: Espectro electromagnético..... | 38 |
| Figura 17: Radar, adquisición. Fuente: Lopinto (2010)..... | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 18: Onda electromagnética y sus componentes. Fuente: FAO (1990)..... | 39 |
| Figura 19: Longitud de onda, amplitud y frecuencia. Fuente: MontevideoLibre (2007)..... | 40 |
| Figura 20: Polarización de las ondas electromagnéticas, campo eléctrico..... | 40 |
| Figura 21: Interacción entre un haz y una superficie. Fuente: Masuelli (2010a)..... | 42 |
| Figura 22: Diferenciación de la señal de retorno de acuerdo a la rugosidad del terreno. Fuente: Masuelli (2010a) | 42 |
| Figura 23: Mecanismos de dispersión: doble rebote. Fuente: SARMAP (2008)..... | 43 |
| Figura 24: : Penetración del pulso de radar en las bandas X, C y L. Fuente: SARMAP (2008) | 43 |
| Figura 25: Radar mono estático. Fuente: SARMAP (2008)..... | 45 |
| Figura 26: Toma de datos de un SLAR. Fuente: Olmsted (1993)..... | 46 |
| Figura 27: Apertura sintética en el SAR. Fuente: CCRS (2001)..... | 48 |
| Figura 28: Parte Real (1) e Imaginaria (2) del Chirp. Fuente: Masuelli (2003)..... | 49 |
| Figura 29: Datos SAR. Fuente: SARMAP (2008) | 50 |
| Figura 30: Datos de la señal RAW, Fuente: Sandwell (2008)..... | 51 |
| Figura 31: Imagen focalizada en rango. Fuente: Masuelli (2010a)..... | 52 |
| Figura 32: Imagen focalizada en acimut. Fuente: Masuelli (2010a)..... | 53 |
| Figura 33: Modos de adquisición de un SAR. Fuente: Masuelli (2003) cita a Schwabisch y Siegmund (2002)..... | 53 |
| Figura 34: Geometría en Rango. Fuente: SARMAP (2008) | 56 |
| Figura 35: Imagen ERS-1 enfocada a 16 vistas de fecha de adquisición 19981217, con dirección de órbita descendente. Centro del marco: 3645. Track: 254. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 57 |
| Figura 36: Satélite “Advanced Land Observing Satellite, ALOS”. Fuentes: (JAXA, 2011), Rosenqvist et al. (2004)..... | 60 |
| Figura 37: Sensor PALSAR. Fuente: JAXA (2011)..... | 61 |
| Figura 38: Antena de PALSAR durante una prueba de desarrollo. Fuente: Rosenqvist et al. (2004) | 61 |
| Figura 39: Concepto de observación de PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011) | 62 |
| Figura 40: Características de observación de PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011)..... | 62 |
| Figura 41: Satélite “European Remote Sensing Satellite, ERS”. Fuente: ESA (2011)..... | 65 |

| | |
|---|-----|
| Figura 42: Geometría de adquisición de ERS. Fuente: Colesanti y Wasowski (2006)..... | 66 |
| Figura 43: Pasada única y configuración interferométrica para una altura H_p . (A) la direncia entre el punto P' en la superficie de referencia ($H_p = 0$) y el punto P en el mismo rango pero a altura H_p . (B) configuración interferométrica. Fuente: Hanssen (2001) | 69 |
| Figura 44: Geometría simplificada de medidas interferométricas. Fuente: Colesanti & Wasowski (2006)..... | 72 |
| Figura 45: Decorrelación geométrica para ERS-1/2 como una función de la línea de base perpendicular y la pendiente local del terreno. Fuente: Hanssen (2001)..... | 73 |
| Figura 46: Distribuciones exponenciales L-vista, donde L es el número de vistas. Fuente: SARMAP (2008)..... | 76 |
| Figura 47: Flujo de procesamiento interferométrico de imágenes SAR. Fuente: DORIS (2011) | 84 |
| Figura 48: Procesamiento en ROI_PAC. Fuente: (ROI_PAC) | 86 |
| Figura 49: Metodología. Elaborado por: Tannia Mayorga T. | 87 |
| Figura 50: Monitoreo de sismos y volcanes en el territorio Ecuatoriano. Fuente: (IGEPN). Acceso: 12 Mayo 2012. Modificado por: Tannia Mayorga T. | 93 |
| Figura 51: (1) Productos SRTM 90m DEM que cubren la región Sierra de Ecuador, (2) aplicación de máscara. Fuente: Jarvis et al. (2008)..... | 95 |
| Figura 52: SRTM 90 m. Modelo Digital de Elevación de Ecuador. Fuente: CGIAR-CSI (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T. | 96 |
| Figura 53: Pendiente y Orientación del área de estudio. Fuente: procesamiento del SRTM 90 m Ecuador (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T..... | 97 |
| Figura 54: Productos SLC a 16 vistas de ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuentes: (IEE), (ESA)..... | 106 |
| Figura 55: Productos SLC a 16 vistas de ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuente: (ESA) | 107 |
| Figura 56: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 110 |
| Figura 57: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 111 |
| Figura 58: Ubicación del pixel de desenrollamiento..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| Figura 59: Máscaras de coherencia a 4 vistas: (1) procesamiento anterior, (2) procesamiento para mejorar el desenrollamiento de la fase. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 113 |
| Figura 60: Imagen de coherencia a 4 vistas, mostrando las imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 115 |
| Figura 61: Imagen de coherencia a 4 vistas, mostrando las imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 116 |
| Figura 62: Imágenes de coherencia a 4 vistas del par IM ₁₉₉₇₁₂₁₆ _IS ₁₉₉₈₁₂₀₁ , mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 117 |
| Figura 63: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par IM ₁₉₉₈₁₂₁₇ .IS ₁₉₉₈₁₂₁₈ , en unidad de radianes. Fuente: (IEE) | 120 |
| Figura 64: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par IM ₂₀₀₀₁₁₀₁ .IS ₂₀₀₂₀₈₂₈ , en unidad de radianes. Fuentes: (ESA); datos de órbita (Scharroo, 2008)..... | 121 |
| Figura 65: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par IM ₁₉₉₈₁₂₁₇ -IS ₁₉₉₈₁₂₁₈ , fase en centímetros. Paleta de colores de la fase: B-W LINEAR. Fuente: (IEE)..... | 122 |
| Figura 66: Interferograma relativo diferencial del par IM ₂₀₀₀₁₁₀₁ _IS ₂₀₀₂₀₈₂₈ , fase en centímetros. Paleta de colores de la fase: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 123 |
| Figura 67: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ | 126 |
| Figura 68: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ | 127 |
| Figura 69: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ | 127 |
| Figura 70: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ | 127 |
| Figura 71: Productos SLC a 16 vistas de ALOS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuente: (ASF) | 131 |
| Figura 72: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 134 |
| Figura 73: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 74_ Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 136 |
| Figura 75: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)..... | 137 |
| Figura 76: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)..... | 138 |
| Figura 77: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)..... | 139 |
| Figura 78: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)..... | 140 |
| Figura 79: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 146 |
| Figura 80: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 147 |
| Figura 81: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 148 |
| Figura 82: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 149 |
| Figura 83: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 152 |
| Figura 84: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 153 |
| Figura 85: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 154 |
| Figura 86: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)..... | 155 |
| Figura 87: Procesamiento con Stacking DInSAR | 158 |
| Figura 88: Resultado del stacking en el periodo 20061223-20090630, área de estudio | 159 |
| Figura 89: Resultado del stacking en el periodo 20061223-20090630, ampliación del área de estudio | 160 |
| Figura 90: Mapa de Pendiente de las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Elaborado por: Tannia Mayorga T..... | 197 |

| | |
|--|-----|
| Figura 91: Mapa de Aspecto de las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Elaborado por: Tannia Mayorga T..... | 198 |
| Figura 92: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 202 |
| Figura 93: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 203 |
| Figura 94: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 204 |
| Figura 95: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 205 |
| Figura 96: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 206 |
| Figura 97: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 207 |
| Figura 98: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado..... | 208 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Escala de velocidad de movimientos en masa. Fuentes: Cruden y Varnes (1996), The Geological Society (2012b)..... | 7 |
| Tabla 2: Clasificación de movimientos en masa. Fuentes: Varnes (1978), USGS (2009), The Geological Society (2012a), British Geological Survey (2012) | 11 |
| Tabla 3: Lectura y desplazamiento de los extensómetros Q1 y Q2, durante el periodo 10/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: León et al. (2007_1), León et al. (2007_2) | 21 |
| Tabla 4: Lectura y desplazamiento de los extensómetros Q1, Q2, Q3, QE1 y QE2, durante el periodo 04/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: Calero (2007)..... | 23 |
| Tabla 5: Nomenclatura estandar de bandas de frecuencia de radar. Fuentes: Chuvieco (2002), CCRS (2001), SARMAP (2008)..... | 41 |
| Tabla 6: Principales especificaciones de ALOS. Fuentes: JAXA (2008), JAXA (2011), Rosenqvist et al. (2004)..... | 60 |
| Tabla 7: Características principales del instrumento PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011) | 62 |
| Tabla 8: Definiciones de productos de datos estandar de PALSAR en el modo de observación fino. Fuente: JAXA (2008)..... | 63 |
| Tabla 9: Composición de registros de los archivos del volumen imagen en ALOS PALSAR. Fuente: JAXA (2008) | 64 |
| Tabla 10: Principales parámetros del modo de imagen SAR de ERS. Fuente: CRISP (2011) | 68 |
| Tabla 11: Principales parámetros para el análisis de fiabilidad y exactitud. Fuente: Hanssen (2005) | 73 |
| Tabla 12: Lista principal de satélites de misiones InSAR capaces de mapear deformación, se indica la duración de la misión, intervalo de revisita y longitud de onda (λ). Fuente: Hanssen (2005)..... | 73 |
| Tabla 13: Comparación de los satélites ERS y ALOS. Fuente: Wei & Sandwell (2010) | 90 |
| Tabla 14: Adquisiciones de ERS-1/2 del producto RAW. Fuentes: (ESA), (IEE) | 91 |
| Tabla 15: Adquisiciones de ALOS sensor PALSAR de los productos 1.1 (SLC) y 1.5 (GEC). Fuente: (ASF)..... | 92 |
| Tabla 16: Adquisiciones de ALOS sensor PALSAR del producto 1.0 (RAW). Fuente: (ASF) | 92 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 17: Información general de volcanes presentes en las imágenes de radar. Fuente: (IGEPN) | 93 |
| Tabla 18: Valores de pendiente y orientación en grados de la ubicación de los puntos de control de los deslizamientos rotacionales. Fuente: SRTM 90 m. Ecuador (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T..... | 97 |
| Tabla 19: Detalle del par de imágenes ERS-1/2 del producto RAW proporcionado por el IEE | 100 |
| Tabla 20: Pares interferométricos procesados con ERS-1/2. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo & Visser, 1998)..... | 103 |
| Tabla 21: Imágenes RAW ERS reconocidas por ROI_PAC | 104 |
| Tabla 22: Imágenes enfocadas ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 105 |
| Tabla 23: Imágenes enfocadas ERS a 16 vistas. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 105 |
| Tabla 24: Comandos del archivo int.proc de los pares definidos con ERS. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo y Visser, 1998) | 108 |
| Tabla 25: Imágenes de coherencia de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 109 |
| Tabla 26: Imágenes de coherencia a 4 vistas de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 109 |
| Tabla 27: Porcentajes de desplazamiento en rango y acimut de los pares definidos. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo y Visser, 1998) | 118 |
| Tabla 28: Pares interferométricos procesados con ALOS sensor PALSAR | 128 |
| Tabla 29: Imágenes RAW ALOS reconocidas por ROI_PAC: | 129 |
| Tabla 30: Imágenes enfocadas ALOS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 129 |
| Tabla 31: Imágenes enfocadas ALOS a 16 vistas. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 129 |
| Tabla 32: Comandos del archivo int.proc de los pares definidos con ALOS..... | 132 |
| Tabla 33: Imágenes de coherencia de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 133 |
| Tabla 34: Imágenes de coherencia a 4 vistas de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas) | 133 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 35: Intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa en centímetros, de cada interferograma | 145 |
| Tabla 36: Valores de corrección de los interferogramas con punto de control GPS “QR15”. Elaborado por: Tannia Mayorga T. | 151 |
| Tabla 37: Interferogramas propuestos para aplicar la técnica de Stacking DInSAR | 156 |
| Tabla 38: Comparación resultado Stacking DInSAR, monitoreo GPS y extensómetro artesanal | 161 |
| Tabla 39: Valor de pendiente y aspecto del pixel del DEM, el cual contiene los puntos de control de la ubicación de los movimientos en masa, monitoreo de desplazamiento mediante GPS diferencial y extensómetro artesanal. Elaborado por: Tannia Mayorga T. | 196 |
| Tabla 40: Disponibilidad de órbitas para ERS-1/2. Elaborado por: Tannia Mayorga T. | 200 |

Lista de acrónimos

| | |
|-----------|--|
| AMI | Active Microwave Instrument |
| ASI | Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana) |
| BGS | Centro de Investigación Geológica Británica “British Geological Survey” |
| CEDIAC | Instituto CEDIAC - Facultad de Ingeniería - Universidad de Cuyo. Mendoza-Argentina |
| CEOS | Comité de Satélites de Observación de la Tierra “Committee on Earth Observation Satellites” |
| CGIAR-CSI | Consortio para la Información Espacial “Consortium for Spatial Information” |
| CLIRSEN | Centro de Levantamientos Integrados por Sensores Remotos, ahora denominado IEE |
| CODIGEM | Corporación Metalúrgica |
| CONAE | Comisión Nacional de Actividades Espaciales |
| CUSS | CONAE User Segment Service |
| DEOS | Delft Institute for Earth-Oriented Space Research |
| DIFSAR | Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética “Differential Synthetic Aperture Radar Intererometry” |
| DLR | Centro Aeroespacial Alemán “German Aerospace Center” (Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt) |
| DORIS | Delft Object-oriented Radar Interferometric Software |
| ERS | European Remote Sensing Satellite |
| ESA | Agencia Espacial Europea “European Space Agency |
| GOME | Global Ozone Monitoring |
| IEE | Instituto Espacial Ecuatoriano |
| IGEPN | Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional |
| INAMHI | Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología |
| INEC | Instituto Nacional de Estadística y Censo |
| INIGEMM | Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico |
| InSAR | Interferometría de Radar de Apertura Sintética “Interferometry Synthetic Aperture Radar” |
| LOS | Distancia sensor-objetivo / slant range / dirección de línea de vista “Radar Line Of Sight direction” |
| MIDUVI | Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda |
| ODR | Orbital Data Record |
| PRF | Pulse Repetition Frequency |
| PRT | Pulse Repetition Time |
| PS | Permanent Scatterers |
| RADAR | Radio Detection And Ranging |
| RAR | Radar de Apertura Real “Real Aperture Radar” |

| | |
|-------------|---|
| ROI_PAC | Repeat Orbit Interferometry PAC age, es un software libre de datos SAR para producir interferogramas diferenciales |
| SAR | Radar de Apertura Sintética “ Synthetic Aperture Radar ” |
| SIG TIERRAS | Programa Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica |
| SLAR | Radar lateral aero-transportado “ Side Looking Airborne Radar ” |
| SNGR | Secretaría Nacional de Gestión del Riesgo |
| SLC | Single Look Complex |
| SRTM | Misión Espacial Topográfica de Radar “ Shuttle Radar Topography Mission ” |
| USGS | Servicio Geológico de los Estados Unidos “ U.S. Geological Survey ” |

Lista de símbolos

| | |
|---------------------------------|--|
| A | Amplitud |
| B_R | Ancho de banda del pulso transmitido “ <i>bandwidth</i> ” |
| θ | Ángulo de incidencia del sensor radar |
| 2π | Ciclo de fase completa |
| σ | Coefficiente de retro-dispersión |
| γ | Coherencia inteferométrica |
| I | Componente en-fase |
| Q | Componente en cuadratura |
| Δs | Deformación del suelo |
| ϕ | Diámetro de la apertura |
| $\Delta\phi$ | Diferencia de fase |
| ΔI | Diferencia de interferogramas |
| R | Distancia sensor-objeto |
| τ | Duración o longitud del pulso emitido |
| IM | Imagen master |
| IS | Imagen esclava |
| I | Intensidad |
| B_n | Línea de Base Normal “ <i>baseline</i> ” |
| $B_{\perp, \text{crit}}$ | Línea de Base Crítica |
| L | Longitud de la antena |
| λ | Longitud de onda “ <i>wavelength</i> ” |
| α | Pendiente local del terreno |
| HH | Polarización Horizontal - Horizontal |
| HV | Polarización Horizontal - Vertical |
| VH | Polarización Vertical - Horizontal |
| VV | Polarización Vertical - Vertical |
| Δs_{LOS} | Proyección de la deformación que ocurre a lo largo del sensor-objetivo LOS |
| ρ | Reflectividad del terreno |
| $R_s (\delta x_r)$ | Resolución espacial |
| $\Delta_{az} (\delta \alpha_z)$ | Resolución en dirección en acimut |
| $\Delta_{sr} (\delta r_a)$ | Resolución en dirección en rango |
| Δ_{gr} | Resolución del rango oblicuo “ <i>ground range</i> ” |
| c | Velocidad de la luz |

1. INTRODUCCIÓN

Para tener una visión del área de estudio, a continuación el ítem 1.1 describe los antecedentes y la motivación para desarrollar el presente trabajo de investigación, ítem 1.2 indica los objetivos, ítem 1.3 señala la estructura de los capítulos, ítem 1.4 muestra la ubicación y características generales del área de estudio, mientras que el ítem 1.5 describe las características geodinámicas del área inestable.

1.1. ANTECEDENTES

Ecuador está ubicado en Sur-América, limita al norte con Colombia, al sur y este con Perú, y con el Océano Pacífico al oeste; tiene una extensión territorial de 258.238 Km², con 14' 483.499 millones de habitantes según el Censo del 2010 (INEC). Se distinguen tres regiones geográficas en Ecuador continental: Costa, Sierra, y Oriente, y la cuarta región es el Archipiélago de Las Islas Galápagos ubicado a una distancia de 1.000 Km del continente. Ecuador es un país mega diverso por la gran variedad de flora y fauna presentes en el territorio, además está ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que es susceptible a la ocurrencia de amenazas naturales como los sismos, tsunamis, inundaciones y movimientos en masa principalmente (Mayorga, 2007). Los movimientos en masa constituyen una amenaza latente, independientemente de su magnitud y dinámica (lentos o rápidos), que afectan a todo el territorio Ecuatoriano especialmente en época invernal, comprendida entre diciembre y marzo. En el 2012 el invierno se extendió hasta mayo, causando pérdidas económicas y humanas, lo que dio lugar a la activación de la Carta Internacional del Espacio y Principales Desastres a nivel mundial (*International Charter*) para apoyar con la disponibilidad de mapas rápidos de afectación a la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgo SNGR en la ejecución de planes de respuesta por las pérdidas causadas por las inundaciones.

Sobre lo expuesto, como primer paso en la presente investigación, se trata de dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Por qué se realiza la investigación en el INIGEMM?

En Ecuador el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico INIGEMM es la entidad estatal encargada de generar, sistematizar y administrar la información científica y tecnológica: geológico-minera-metalúrgica a nivel nacional; y, entre sus objetivos estratégicos tiene la misión de propiciar y difundir el uso de productos y servicios geocientíficos como apoyo a las autoridades responsables del ordenamiento territorial para la toma acertada de decisiones relacionadas con la gestión preventiva ante la ocurrencia de amenazas geológicas, como son los movimientos en masa, entre otros. Para el desarrollo del presente trabajo de investigación sobre movimientos en masa, esta institución estatal suministró datos de desplazamientos medidos en el terreno (deslizamientos), plasmados en informes técnicos y presentaciones sobre los procesos geodinámicos que ocurren en el caso de estudio localizado en la ladera occidental del Cerro Iguazú en la Comunidad Tumba de la parroquia Quimiag, del cantón Riobamba en la provincia de Chimborazo. Dichos informes se realizaron para determinar los factores naturales y/o antrópicos que inciden en la generación de movimientos en masa.

Luego se plantea la siguiente pregunta a dar respuesta:

¿Por qué en el área de Tumba?

El INIGEMM (2012) entre sus proyectos está implementado por fases, la zonificación de susceptibilidad y amenazas por procesos de movimientos en masa en el territorio nacional a escala 1:50.000. La Fase 1 se concentra en las zonas más vulnerables como son las áreas donde existen asentamientos humanos y obras de infraestructura pública estratégica (provincias de Imbabura, Chimborazo y El Oro). La comunidad de Tumba está ubicada en la provincia de Chimborazo y el INIGEMM posee registros de monitoreo de desplazamiento del terreno a través de extensómetros de construcción artesanal y GPS diferencial.

La siguiente pregunta que se trata de dar respuesta es:

¿Por qué la aplicación de *InSAR* (interferometría de radar de apertura sintética)?

El presente trabajo de investigación consiste en el uso de interferometría de radar de apertura sintética (*InSAR*; por sus siglas en inglés) para determinar la deformación del terreno por los movimientos en masa, en un caso de estudio propuesto por el INIGEMM. Debido al componente de conocimiento de radar en la Maestría AEARTE del Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” adscrito a CONAE (Comisión Nacional de Actividades

Espaciales) y a la Universidad Nacional de Córdoba, se plantea desarrollar la herramienta de interferometría en el ámbito de los movimientos en masa, sobre la base de bibliografía sobre la factibilidad de este estudio.

Finalmente, como conclusiones del desarrollo de la investigación el objetivo es responder a la pregunta:

¿Cuál es la importancia del estudio?

La presencia de las Cordilleras Real y Occidental en la zona andina del Ecuador, debido a sus características fisiográficas y geomorfológicas (relieves montañosos, fuertes pendientes, etc.), dificultan de sobremano la colocación de sistemas de monitoreo en sitios ya identificados con movimientos en masa, que en muchos casos requieren de un gran esfuerzo humano y económico. Sin embargo, ¿Qué sucede en aquellas zonas que se desconoce de la existencia de éste fenómeno? ¿La herramienta de interferometría de radar puede ser una herramienta de apoyo en la identificación de zonas susceptibles a esta amenaza? Son preguntas que se darán respuesta al final de la investigación planteada.

En las faldas del Cerro Iguazú 60 familias están en peligro por los continuos deslizamientos en el cerro. En el 2006 los geólogos del ex – Ministerio de Minas y Petróleos advirtieron a las autoridades sobre el peligro de los movimientos en masa en la montaña, y que podrían afectar una parte de la comunidad Tumba San Francisco, ubicada al oriente de la parroquia Quimiag en Chimborazo. El estudio determinó que un millón de metros cúbicos de materiales (tierra y rocas) ocasionarían problemas muy graves y se recomendó la re-ubicación de la comunidad. Los técnicos revelaron que por la reciente temporada invernal se aceleró el deslizamiento de tierra de uno a cuatro milímetros por día (Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio, 2008).

Según la Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio (2010a), el 6 de Noviembre del 2010 a las 22h00 en la comunidad de Tumba se registró un deslave, inquietando a sus habitantes, sin ocasionar víctimas ni daños materiales. El deslizamiento se detuvo a unos 60 metros de cuatro viviendas y de la escuela de la comunidad, por lo que se reubicó inmediatamente a los escolares y familias en peligro. La comuna cuenta con dos hectáreas de terreno a 3 kilómetros de Tumba en una planicie en Valle Hermoso, a espera de que el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda MIDUVI construya sus nuevas viviendas en Enero del 2011 (Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio, 2010b). La Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio (2012a) señala que desde Junio del 2011

las 33 de las 60 familias de Tumba San Francisco, que habitaban en el pueblo, fueron reubicadas al reasentamiento de Valle Hermoso que edificó el MIDUVI , para evitar desgracias. No obstante, los comuneros continúan sus labores agrícolas en las chacras situadas en las faldas del cerro Iguazú, pero pernoctan en zona segura.

Las intensas lluvias en la madrugada del lunes 22 de Octubre del 2012 causaron un deslizamiento de tierra en la comunidad de Tumba San Francisco, que sepultó bajo el lodo a dos casas, mientras que 40 familias perdieron sus cultivos, no se registraron pérdidas humanas (Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio, 2012b). El deslizamiento (Figura 1) cubrió más de 20 hectáreas de cultivos de papas, maíz y pastos; y, según la SNGR de la provincia de Chimborazo, 150.000 m³ de materiales afectaron a una parte de la comunidad (Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio, 2012c).



Figura 1: Derrumbe en Chimborazo. Lugareños recorren el lugar del derrumbe ocurrido el domingo 21/octubre/2012, en horas de la mañana. Foto: Glenda Giacometti/EL COMERCIO. Fuente: Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio (2012c)

1.2. OBJETIVOS

General:

- Determinar la deformación del terreno usando interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) en ladera inestable con desplazamientos pequeños (160 cm/50 meses) en zona andina, y con ésta aplicación intentar dar los primeros pasos en la inserción de ésta tecnología en los organismos en Ecuador (INIGEMM).

Específicos:

- Determinar un registro histórico de interferogramas de movimientos en masa de la zona de estudio.

- Comparar los resultados de DInSAR obtenidos con los desplazamientos medidos en el terreno por el INIGEMM.
- Comparar la máscara de coherencia, resultado del procesamiento de interferogramas de los satélites ERS-1/2 y ALOS sensor PALSAR.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación tiene la siguiente estructura:

Capítulo 1: Explica los antecedentes del trabajo de investigación, motivación, objetivos, ubicación y características generales del área de estudio; además de las características geodinámicas del área inestable explicada sobre la base de los registros de monitoreo e informes técnicos proporcionados por el INIGEMM.

Capítulo 2: Contiene el fundamento teórico sobre radar e interferometría, las plataformas satelitales procesadas, el software utilizado y la metodología que contempla cuatro fases de desarrollo: pre-procesamiento, procesamiento, pos-procesamiento y análisis de datos.

Capítulo 3: Detalla el material disponible para interferometría como son el modelo digital de elevación y los datos de radar, además de su respectivo procesamiento. Los datos de radar fueron procesados en el software de distribución libre ROI_PAC, para producir interferogramas diferenciales. El software fue desarrollado por el “*Jet Propulsion Laboratory JPL, California Institute of Technology, Pasadena, California*”.

Capítulo 4: Muestra los resultados obtenidos con el pos-procesamiento de los productos resultantes de las imágenes de radar ALOS sensor PALSAR.

Capítulo 5: Contiene las conclusiones, discusión y líneas a futuro del presente trabajo de investigación.

1.4. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio tiene aproximadamente un área de 2 Km², localizada entre las coordenadas geográficas superior izquierda: longitud -78°33'21" Oeste y latitud -1°37'33"

Sur; e inferior derecha: longitud $-78^{\circ}32'21''$ Oeste y latitud $-1^{\circ}38'20''$ Sur; en la Ladera occidental del cerro Iguazú, comunidad Tumba de la parroquia Quimiag del cantón Riobamba en la provincia de Chimborazo (Figura 2). Esta área forma parte del flanco este del valle del Río Chambo, el mismo que fluye de sur a norte hasta la confluencia con el Río Paute, afluente del Río Pastaza que desemboca hacia la vertiente amazónica.

El área está dominada por montañas muy elevadas como los cerros Iguazú y Payacorrall que sobrepasan los 3.000 m.s.n.m., cuyas pendientes hacia el Oeste varían de fuertes a moderadas, generalmente mayor a 25° de inclinación.

En el área de estudio el clima es seco, de tipo templado frío y los valores de precipitación escasamente cubren las demandas hídricas de los cultivos durante gran parte del año. Además, la temperatura anual media es de $19,5^{\circ}$ C; y, según el censo de población del 2010 la parroquia Quimiag tiene 5.472 habitantes, y en el sector Tumba San Francisco habitan 60 familias (Redacción Sierra Centro del periódico El Comercio, 2012c). El uso del suelo es exclusivamente para la agricultura con zonas muy limitadas para la ganadería, se destacan sembradíos de ciclo corto, el riego es por aspersión (León y Pilatasig, 2006).

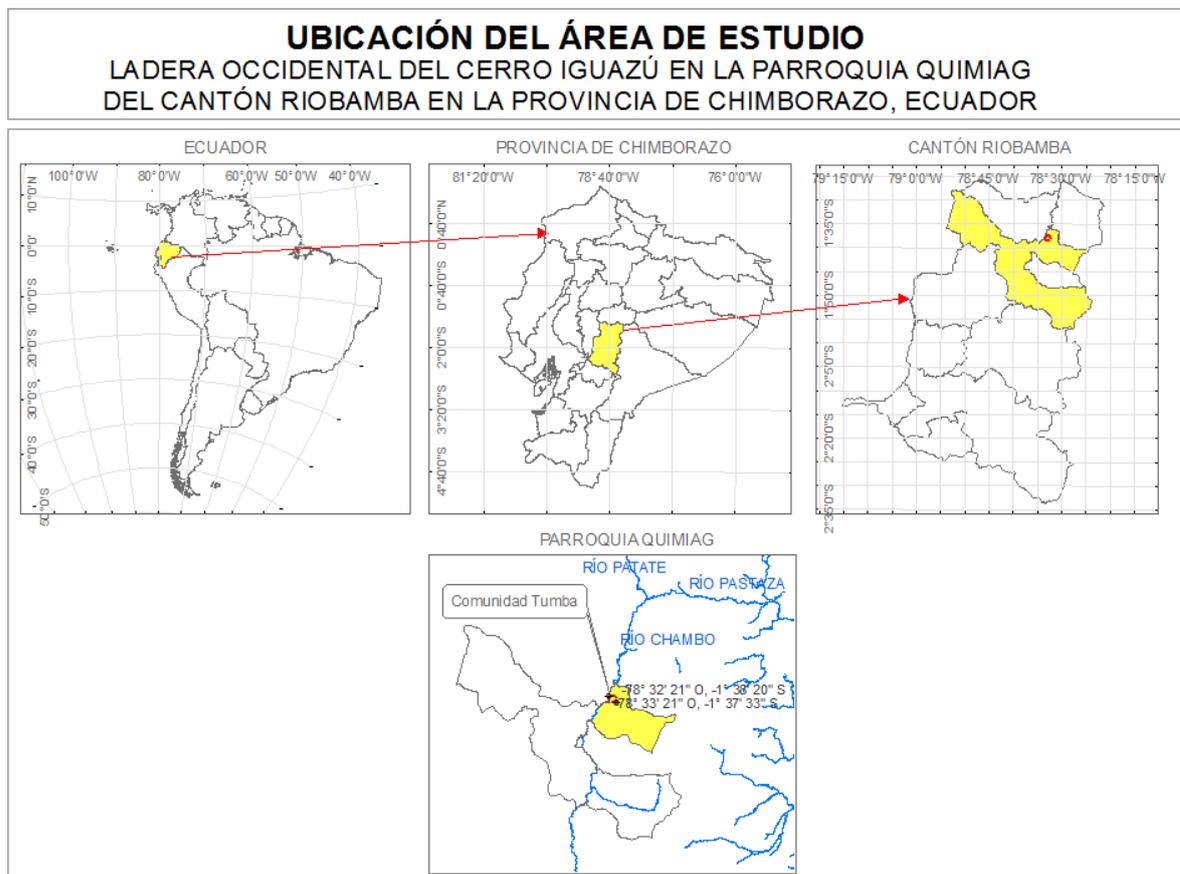


Figura 2: Ubicación del área de estudio. Elaboración: Tannia Mayorga Torres

1.5. CARACTERÍSTICAS GEODINÁMICAS DEL ÁREA INESTABLE

Bonnard (2008a) señala que un movimiento en masa es un fenómeno impulsado por la gravedad, que origina un desplazamiento de masa de suelo o roca a lo largo de una pendiente, sin embargo no necesariamente ocurre en una pendiente, como el caso de los flujos de escombros y movimientos de roca. El tamaño de un movimiento en masa es muy variable, desde unos pocos m³ a algunos millones de m³. El área puede variar de algunos m² a algunas docenas de Km². El promedio de pendiente de un deslizamiento es bastante variable, desde algunos grados a aproximadamente 30° que es un valor alto para pendiente. Algunos deslizamientos muestran una actividad permanente y otros son un fenómeno espontáneo, pero pueden provocar crisis y constituirse en una amenaza principal en el manejo de pendientes (Bonnard, 2008b). La velocidad del movimiento en masa puede fluctuar de algunos mm/año a docenas de m/seg y se la asocia al probable daño que puede causar, la Tabla 1 muestra una clasificación de velocidad de estos eventos, de acuerdo a Cruden y Varnes (1996).

| Velocidad clase | Descripción | Velocidad (mm/sec) | Velocidad típica | Probable significado destructivo |
|-----------------|-----------------------|--------------------|------------------|---|
| 7 | Extremadamente rápido | 5x10 ³ | 5 m/seg | Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por impacto de material desplazado; muchas muertes; improbable escapar. |
| 6 | Muy rápido | 5x10 ¹ | 3 m/min | Algunas pérdidas humanas, muy rápido para permitir que todas las personas escapen. |
| 5 | Rápido | 5x10 ⁻¹ | 1,8 m/hora | Posible escape de evacuación; estructuras y equipos destruidos. |
| 4 | Moderado | 5x10 ⁻³ | 13 m/mes | Algunas estructuras pueden ser temporalmente mantenidas. |
| 3 | Lento | 5x10 ⁻⁵ | 1,6 m/año | Posible remediación de construcciones se puede ejecutar durante el movimiento. |
| 2 | Muy lento | 5x10 ⁻⁷ | 15 mm/año | Algunas estructuras sin daño por el movimiento. |
| 1 | Extremadamente LENTO | | | Imperceptible sin instrumentos de monitoreo, posibles construcciones con precaución. |

Tabla 1: Escala de velocidad de movimientos en masa. Fuentes: Cruden y Varnes (1996), The Geological Society (2012b)

Varnes (1978) propuso una clasificación de movimientos en masa basado en un sistema de dos términos: el primer término describe el tipo de material envuelto, y el segundo término describe el tipo de movimiento (Tabla 2). El tipo de material mencionado en varios esquemas lo constituyen la roca, suelo, tierra, barro y escombros, diferenciándose por el tamaño de las partículas. Así, la **roca** es una masa dura y firme; el **suelo** es un agregado de partículas sólidas (minerales y rocas) que fueron transportadas o formadas por la erosión de la

roca; en la **tierra** el 80% o más de las partículas son más pequeñas que 2 mm; en el **barro** el 80% o más de las partículas son más pequeñas que 0,06 mm; y los **escombros** contienen una proporción significativa de material grueso, en el cual del 20% al 80% de las partículas son más grandes que 2 mm, y el resto son menores a 2 mm. El tipo de movimiento describe el dinamismo del movimiento en masa y como se distribuye la masa desplazada. Los cinco tipos de movimientos dinámicos se describen en la secuencia de caída, derrumbe, deslizamiento, esparcimiento y flujo (*The Geological Society*, 2012b). A continuación brevemente se describen los tipos más comunes de movimientos en masa (*The Geological Society*, 2012a) (USGS, 2009).

Deslizamientos (*slides*): se identifica una zona de debilidad que separa el material del deslizamiento del material subyacente más estable. Los tipos principales de deslizamientos son los rotacionales y traslacionales.

Deslizamiento rotacional: la superficie de ruptura es curvadamente cóncava y el movimiento del deslizamiento es rotacional a un eje que es paralelo a la superficie del suelo.

Deslizamiento traslacional: El bloque del deslizamiento se mueve a lo largo de una superficie plana, y consiste en una única unidad o pocas unidades muy cercanas que se mueven pendiente abajo.

Caída (*fall*): son masas de movimientos abruptos de material, como las rocas que se desprenden de laderas empinadas. La separación ocurre a lo largo de fracturas y el movimiento se produce por caída libre, rebote y rodadura.

Derrumbe (*topples*): las fallas en los derrumbes se distinguen por la rotación hacia adelante de una unidad o unidades, debido a la acción de la gravedad y por fuerzas ejercidas por las unidades adyacentes.

Flujos de escombros: es un movimiento de masa rápido que fluye ladera abajo, causado comúnmente por intensas precipitaciones.

Avalancha de escombros: son flujos de escombros muy rápidos a extremadamente rápidos.

Flujos de tierra: tienen una característica de forma de reloj de arena. El flujo es alargado y por lo general se produce en suelos finos.

Esparcimiento lateral: ocurre en pendientes muy suaves o terrenos planos. La falla se desencadena por movimiento rápido del suelo, como sucede luego de un sismo. Es causado por pérdida en la cohesión de los sedimentos. La falla empieza de repente en un área pequeña y se esparce rápidamente.

Complejo: es la combinación de 2 o más tipos principales de movimiento.

Además, a continuación se indica terminología presente en la Tabla 2, basada en Cruden y Varnes (1996), que ha sido adaptada cuando se clasifican y se describen movimientos en masa (*The Geological Society*, 2012b):

Corona: material no desplazado que sigue en pie y está al lado de las partes más altas del escarpe principal.

Escarpe principal: es una superficie empinada sobre el suelo no perturbado, está en el borde superior del movimiento en masa, causado por el movimiento del material desplazado, es la parte visible de la superficie de ruptura.

Cabeza: la parte superior del movimiento en masa, ubicado a lo largo del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.

Escarpe menor: es una superficie empinada sobre el material desplazado del movimiento en masa, producido por diferentes movimientos dentro del material desplazado.

Superficie de ruptura: es la superficie que forma el límite inferior del material desplazado por debajo de la superficie original del terreno.

Bonnard (2008b) enfatiza la importancia de: organizar un apropiado programa de monitoreo para entender los mecanismo de un movimiento en masa, calibrar correctamente los modelos desarrollados y planear sistemas confiables de alerta temprana. Las principales técnicas de monitoreo, dependiendo de la disponibilidad de puntos fijos cercanos o frente al deslizamiento, son: (1) medición con GPS de lugares establecidos en la superficie del deslizamiento (en general luego de una crisis) por lecturas discretas o continuas; (2) medición continua por hilo o extensómetro laser desde un punto fijo; (3) otras técnicas como extensómetro de radar o interferometría diferencial. En el monitoreo de movimientos en masa se pueden medir algunas características como los desplazamientos en el terreno, presión del agua subterránea, esfuerzos en el suelo/roca, fuerzas de los elementos estructurales y condiciones del clima (Bonnard, 2008a).

El INIGEMM en el área de estudio de Tumba San Francisco monitoreó la dinámica de los movimientos en masa a través de extensómetros de construcción artesanal en la parte superior, durante el periodo diciembre/2006-febrero/2010; además de la distribución de puntos de control con estaciones GPS diferencial durante dos campañas de monitoreo, las cuales se realizaron en los periodos 14-16/junio y 18-20/julio del 2007 (León y Castillo, 2007; León et al., 2007_1).

En el 2012, durante el periodo enero-agosto, el INIGEMM (2011) con el objetivo de monitorear las 24 horas el proceso de movimientos en masa que ocurre en el área de estudio de la Comunidad de Tumba instaló un sistema piloto de monitoreo en tiempo real, con fines de prevención de pérdida de vidas y daños materiales.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

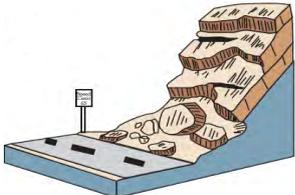
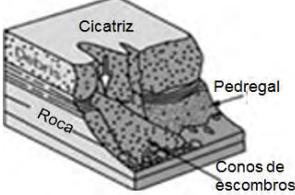
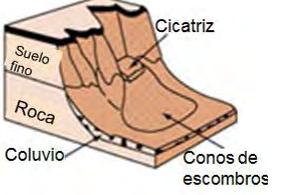
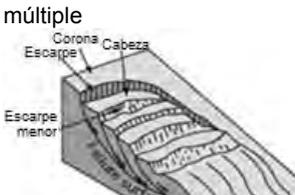
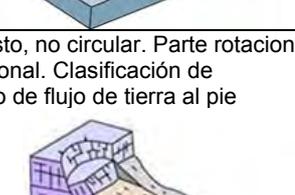
| Tipo de movimiento | Tipo de material | | |
|-----------------------|---|--|--|
| | Capa de roca base (bedrock) | Suelos de ingeniería | |
| | | Predominantemente grueso | Predominantemente fino |
| Caída | Caída de roca  | Caída de escombros  | Caída de tierra  |
| Derrumbe | Derrumbe de roca  | Derrumbe de escombros  | Derrumbe de tierra  |
| Deslizamiento | Deslizamiento Rotacional  | Deslizamiento rotacional múltiple  | Deslizamiento rotacional sucesivos  |
| | Deslizamiento Traslacional  | Deslizamiento de escombros  | Deslizamiento de tierra  |
| Esparcimiento lateral | Esparcimiento de roca  | Esparcimiento de escombros  | Esparcimiento de tierra  |
| Flujo | Flujo de solifluxión  | Flujo de escombros  | Flujo de tierra (deslizamiento de tierra)  |
| Complejo | Ej.: asentamiento flujo de tierra con caída de rocas  | Ej.: compuesto, no circular. Parte rotacional/ parte traslacional. Clasificación de deslizamiento de flujo de tierra al pie  | |

Tabla 2: Clasificación de movimientos en masa. Fuentes: Varnes (1978), USGS (2009), The Geological Society (2012a), British Geological Survey (2012)

1.5.1. Marco geológico

1.5.1.1. Regional

El área de estudio está localizada en las estribaciones occidentales de la cordillera Central o Real de los Andes Ecuatorianos, marcada por relieves montañosos con fuertes pendientes (35° - 45°), en la provincia de Chimborazo. En el Ecuador la cordillera Real está constituida por un basamento Precámbrico sobreyacido por cinturones sublineares alargados de rocas metamórficas del Paleozoico-Cretácico Inferior, afectadas por una sucesión de eventos tectónicos y magmáticos desde el Mesozoico hasta el Cuaternario (Zamora, 2007) (Aspen y Litherland, 1992). Aspen y Litherland (1992) han subdividido los terrenos metamórficos en cinco unidades litotectónicas de oeste a este denominadas: Guamote, Alao, Loja, Salado y Zamora, separados por importantes fallas regionales de dirección preferencial norte sur. Los límites tectónicos entre las unidades mencionadas son: la Falla Peltetec, el Frente Baños, la Falla Llanganates y la Falla Cosanga-Méndez (Figura 3).

Según León y Pilatasig (2006) el área de estudio está localizada en la zona de transición entre la Unidad Maguazo y la Unidad Peltetec. Estas unidades forman parte de la Unidad Guamote/Alao.

La Unidad Maguazo comprende una secuencia basáltica turbidítica-andesítica ligeramente metamorfizada (Guadalupe, 2011), conformada por metaturbiditas, meta-andesitas, cherts y mármoles, que son rocas de bajo grado de metamorfismo que corresponden a depósitos de cuenca oceánica (Arias, 2007).

La Unidad Peltetec consiste de metagabros, metabasaltos y peridotitas asociados a serpentinitas, doleritas piroxenitas, homblenditas, filitas y rocas sedimentarias volcanoclásticas basálticas (Guadalupe, 2011). Arias (2007), Guadalupe (2011), Caizaluisa y López (2012) indican que todas las litologías están definidas dentro de un Melange Ofiolítico.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

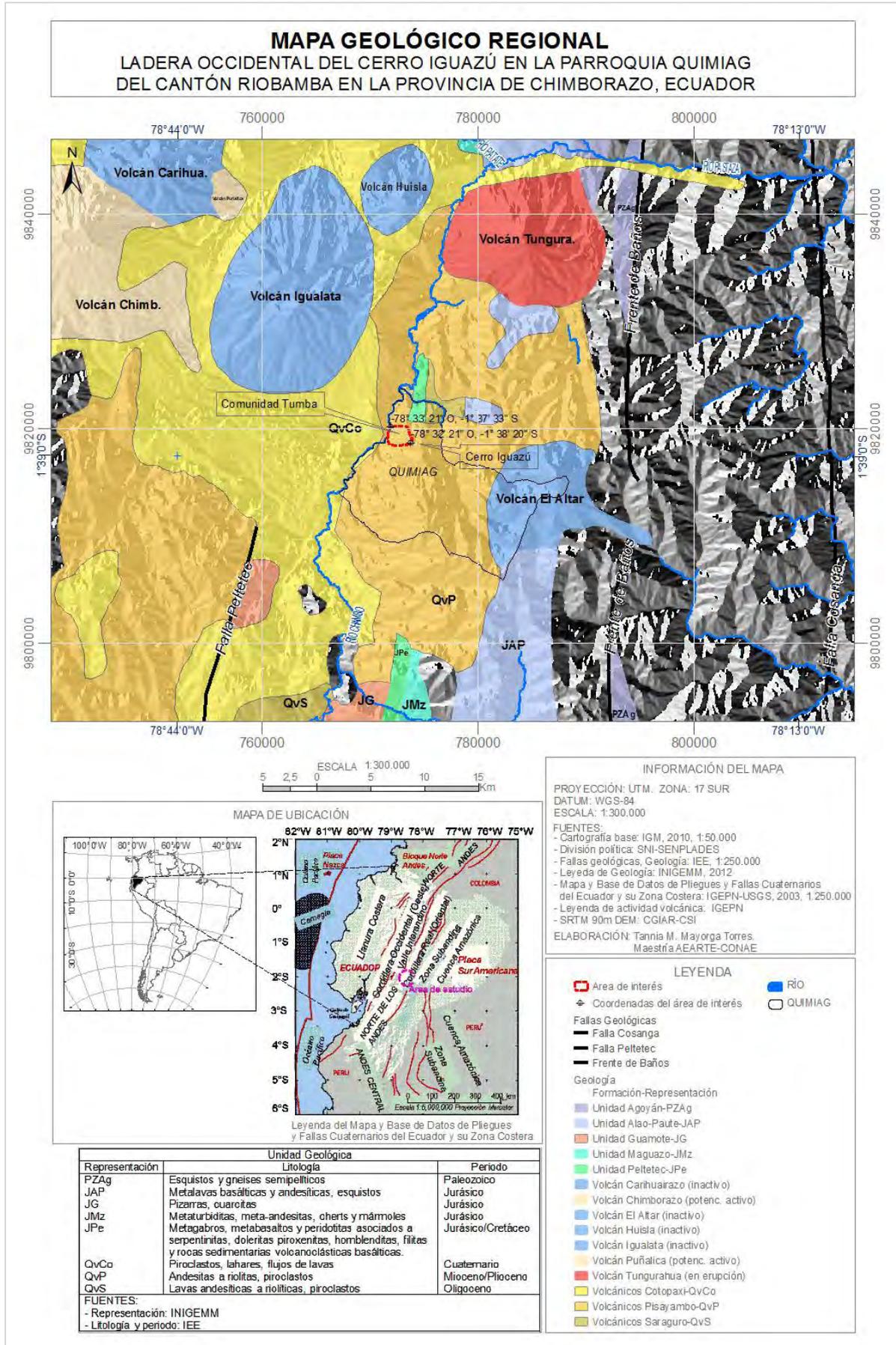


Figura 3: Mapa Geológico Regional. Elaboración: Tannia Mayorga Torres

1.5.1.2. Local

De acuerdo a León y Pilatasig (2006) el área de estudio está compuesta por depósitos de pie de monte, los cuales están integrados de materiales rocosos no consolidados que sobrepasan los 30 m de potencia. Al SE y E de la comunidad de Tumba, el depósito está constituido por clastos angulares de rocas verdes (metavolcánicos y filitas) menores o iguales a 20 cm de diámetro, soportadas en una matriz areno-arcillosa verde débilmente consolidada. Al O del sector de Tumba, el cambio brusco de relieve y de litologías (metavolcánicos básicos de la Unidad Peltetec y cuarcitas de la Unidad Cebadas), sumado a una fuerte deformación frágil de las rocas (brechación), presencia de cuñas tectónicas con desarrollo de débil clivaje y fallas locales evidenciadas por estrías con indicios de movimientos dextrales, sugieren que las rocas metavolcánicas y las cuarcitas son afectadas por el trazo más occidental del sistema de Fallas Peltetec (Figura 3). Se señala que los procesos geodinámicos externos, como son los deslizamientos tipo rotacional y flujos de detritos, afectan la zona en un área aproximada de 0,96 Km².

Según Lateltin (2008a), el tipo de deslizamiento rotacional ocurre en materiales homogéneos, y este deslizamiento termina en una deformación que fluye en un flujo de escombros. Además, los deslizamientos rotacionales se mueven a lo largo de la superficie de ruptura que es curva o cóncava (Lateltin, 2008b).

El suelo en el área de estudio es de color negro de composición areno-arcillosa. La potencia en los sectores donde los taludes son menores a 30° de pendiente sobrepasa los 3 m. Mientras que en los sectores donde el talud es mayor a 30°, la potencia oscila entre 0 y 1 m.

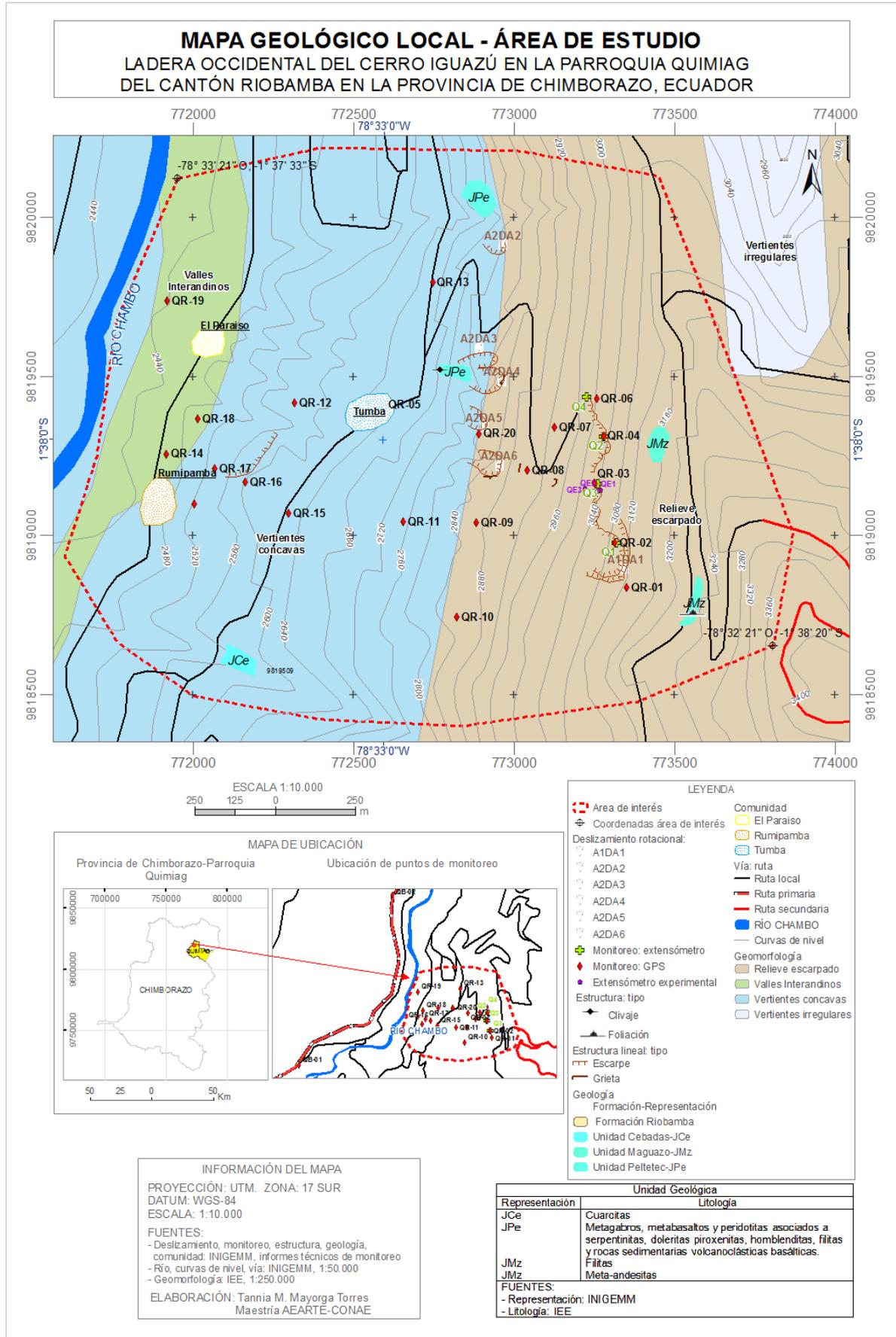


Figura 4: Mapa Geológico Local. Elaboración: Tannia Mayorga Torres

1.5.2. Características litológicas del área inestable

Los flujos de detritos de composición similar a los materiales que constituyen el depósito de pie de monte están ubicados a continuación de los deslizamientos, extendiéndose entre 180-200 m, y un ancho entre los flancos 10-25 m en la cabecera, y de 5-8 m en el pie, la pendiente de la línea de flujo es 15-20°. León y Pilatasig (2006) diferenciaron dos áreas de estudios.

En el área 1, los moradores del sector indican que en julio/2006 ocurrió el deslizamiento rotacional que es el más importante y de acuerdo a los datos obtenidos en campo se determinó que los factores incidentes fueron la geomorfología-estratigrafía-litología y sísmica. A continuación en el texto, se codifica a este deslizamiento como A1DA1 (Figura 5).

En el área 2, existen 5 deslizamientos rotacionales activos que produjeron flujos de detritos y se indican los siguientes factores incidentes: geomorfológicos, estratigráficos/litológicos, hidrogeológicos y uso de suelo. Se codifican a los 5 deslizamientos activos como: A2DA2, A2DA3, A2DA4, A2DA5 y A2DA6 (Figura 4). Del análisis de toda el área se desprende que los factores desencadenantes podrían ser sismicidad para el área 1 y agua en el área 2, en combinación con la fuerte pendiente y el material presente.

En el área 1, el DESLIZAMIENTO ACTIVO 1 - A1DA1 (Figura 5), el escarpe tiene forma irregular. El largo desde la corona al pie tiene una longitud de 280 m, el ancho entre los flancos es de 120 m, con un volumen desplazado de 100.800 m³. El plano del escarpe principal tiene una dirección N23°E y buza 76° al NO, en las paredes está expuesto el depósito de pie de monte. El cuerpo del deslizamiento está caracterizado por una serie de grietas y escarpes secundarios distribuidos de una manera transversal a la dirección del movimiento. En el extremo O del cuerpo, existe un levantamiento del terreno, creando una masa de material suelto e inestable que cae hacia la zona poblada y de sembríos. El pie del deslizamiento muestra una constante caída de material suelto con clastos < 50 cm producto del movimiento en masa de la parte alta.

El DESLIZAMIENTO ACTIVO 2 - A2DA2 ubicado en la zona norte del área de estudio, presenta un escarpe principal de 425 m de longitud, donde la parte alta se considera activa. La parte activa tiene una superficie de ruptura circular de 10-12 m de longitud que

forma el escarpe con una altura de 8-10 m y un buzamiento de 80°, con dirección de movimiento N55°O. En la corona existe una grieta de 20 cm de ancho.

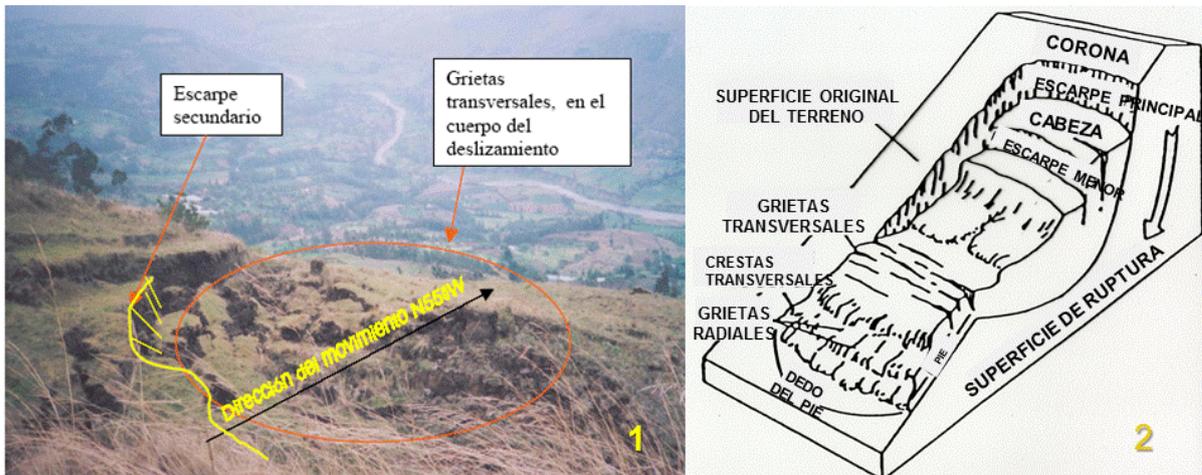


Figura 5: (1) Área 1 deslizamiento activo 1 ocurrido en julio/2006, se observa el escarpe secundario y las grietas trasversales: INIGEMM (León y Pilatasig, 2006); (2) Diagrama de un deslizamiento rotacional: Bonnard (2008a), Lateltin (2008a)

El DESLIZAMIENTO ACTIVO 3 - A2DA3 ubicado a 300 m al Sur del deslizamiento A2DA2, presenta un escarpe principal de 275 m de longitud, donde la parte alta se considera activa. La parte activa tiene una superficie de ruptura circular de 15 m de longitud que forma un escarpe con una altura de 15-18 m y un buzamiento de 80°, con dirección de movimiento N85°O.

El DESLIZAMIENTO ACTIVO 4 - A2DA4 (Figura 6) ubicado junto al deslizamiento A2DA3 presenta un escarpe principal de 290 m de longitud, donde la parte alta se considera activa. La parte activa tiene una superficie de ruptura circular de 25 m de longitud que forma parte del escarpe con una altura de 25-30 m y un buzamiento de 70°, con dirección de movimiento N80°O.

El DESLIZAMIENTO ACTIVO 5 - A2DA5 ubicado a 100 m al Sur del deslizamiento A2DA4 presenta un escarpe principal de 408 m de longitud, donde la parte alta se considera activa. La parte activa tiene una superficie de ruptura circular formando 2 escarpes de 8 y 15 m de longitud, con un buzamiento de 65° y en los flancos N y S de 50° y 70° respectivamente, con dirección de movimiento N50°O.



Figura 6: Área 2 deslizamiento activo 4, vista de la parte activa e inactiva del escarpe principal del deslizamiento. Fuente: INIGEMM (León y Pilatasig, 2006)

El DESLIZAMIENTO ACTIVO 6 - A2DA6 ubicado a 120 m al Sur del deslizamiento A2DA5 presenta un escarpe principal de 617 m de longitud, donde la parte alta se considera activa. La parte activa tiene una superficie de ruptura circular formado por un escarpe de 40 m de longitud y 20 m de altura, con un buzamiento de 80° y en los flancos N y S de 40° y 50° respectivamente, con dirección de movimiento $N55^\circ O$.

1.5.3. Medida de los desplazamientos en el terreno

La metodología empleada por el INIGEMM, para conocer el comportamiento dinámico de los movimientos en masa de manera cuantitativa que afectan la comunidad Tumba San Francisco, consistió en ubicar en la zona del deslizamiento y su área de influencia puntos de monitoreo de extensómetros de fabricación artesanal y estaciones GPS diferencial; con el fin de establecer la magnitud superficial, dirección del movimiento y las velocidades diferenciales de los deslizamientos. La Figura 7 muestra la ubicación de los puntos de monitoreo, y la Figura 4 muestra un mapa del sitio de ubicación de los puntos de monitoreo y de los deslizamientos activos identificados anteriormente.

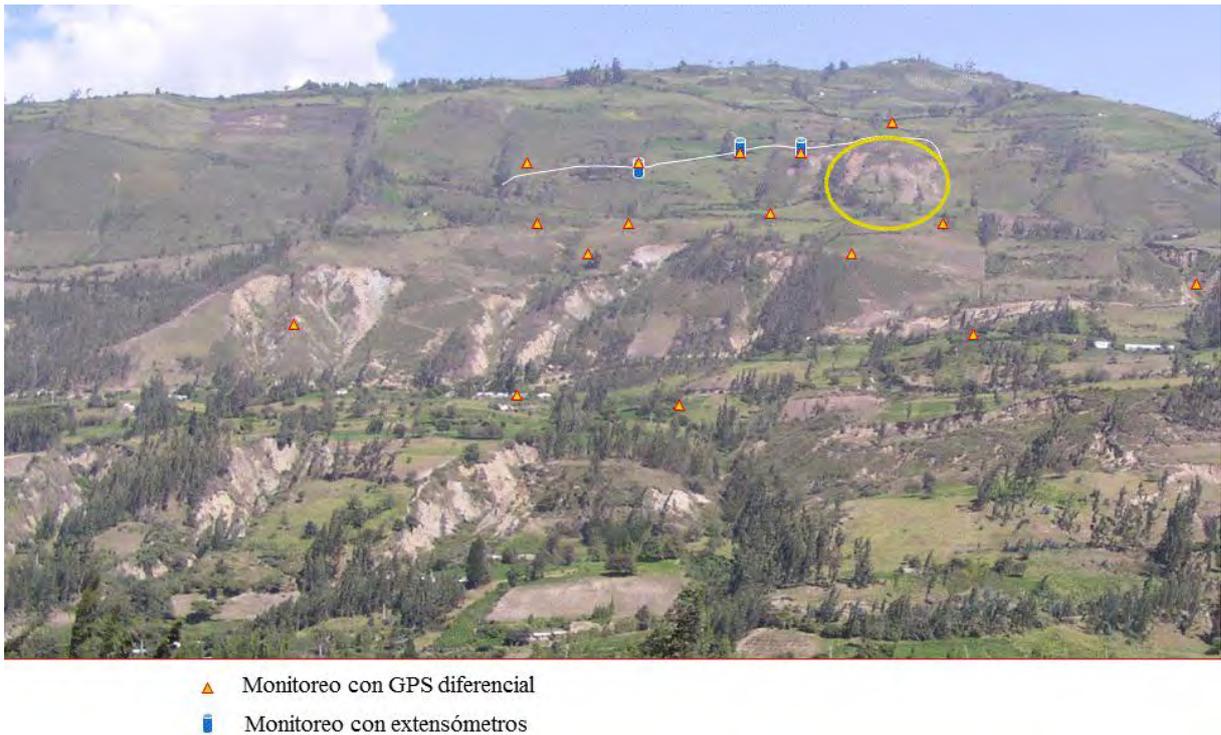


Figura 7: Ubicación de puntos de monitoreo. Fuente: presentación de diapositivas del INIGEMM (León, 2010)

De acuerdo a Bonnard (2008b), la única manera de conocer a corto plazo los desplazamientos con un cierto grado de fiabilidad implica utilizar extensómetros con un sistema continuo de almacenamiento. El INIGEMM a finales del 2006 y durante el 2007 instaló en el cerro Iguazú, de la comunidad Tumba San Francisco, extensómetros de fabricación artesanal para realizar un monitoreo periódico del movimiento en masa que podría afectar a la comunidad mencionada.

1.5.3.1. Medida de los desplazamientos en el terreno con los extensómetros de fabricación artesanal

El 10/diciembre/2006, se instaló dos instrumentos prototipo de monitoreo (extensómetros de fabricación artesanal) en el área de estudio de Tumba San Francisco, con las codificaciones Q1 y Q2, localizados a 304 m de distancia. Cada extensómetro consistía de dos tubos de acero de 2 m de largo (Figura 8), donde el tubo A es fijo, se lo ubica en la corona y tiene una ceja para insertar un cable de medición. Mientras que el tubo B es móvil, se lo ubica en el cuerpo del deslizamiento por delante de la grieta asociada al escarpe y tiene una polea en la parte superior por cuya ranura pasa el cable de acero de medición, de aproximadamente 10 m de largo, y se acopla una regleta de acero de medición de 50 cm de largo (León et al., 2007_1).

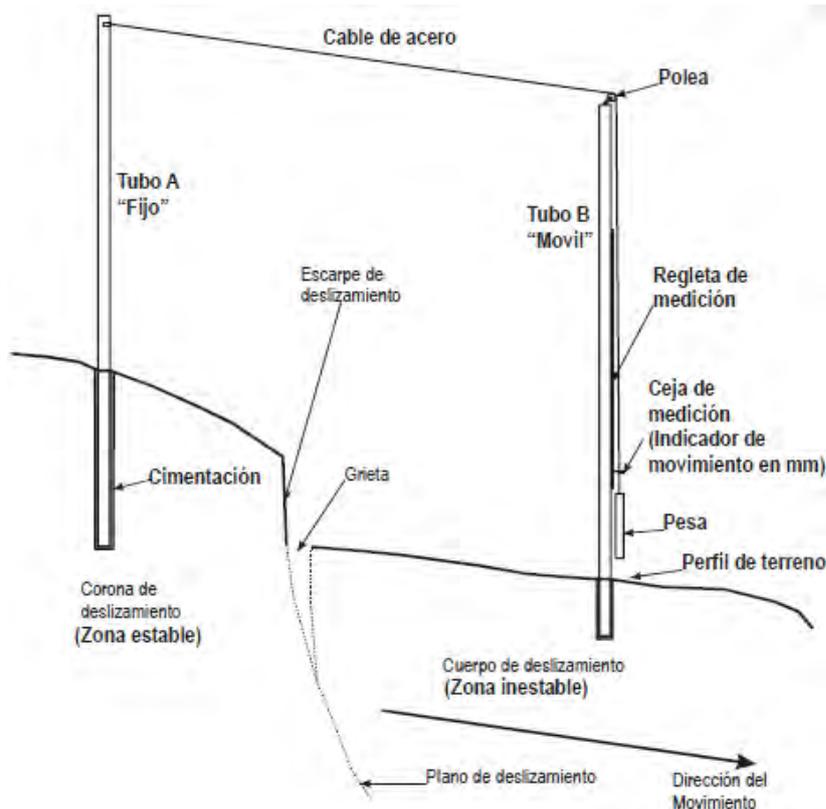


Figura 8: Esquema del extensómetro de fabricación artesanal, indicando sus componentes. Fuente: León et al.(2007_1)

A continuación se muestran las lecturas iniciales en los dos extensómetros. Las lecturas subsecuentes fueron registradas tanto por técnicos del INIGEMM como por habitantes de la comunidad, a quienes se les capacitó en la mecánica de las lecturas.

| | Q1 | Q2 |
|--|-------------------|--------------------|
| Fecha de lectura inicial | 10/dic./2006 | 10/dic./2006 |
| Lectura inicial (h1) | 36,95 cm | 37 cm |
| Fecha de lectura final | 15/feb./2007 | 15/feb./2007 |
| Altura referencial | 3.103 m.s.n.m | 3.037 m.s.n.m |
| Coordenadas: UTM, PSAD-56 (longitud-latitud) | 773.568-9'819.344 | 773.530- 9'819.678 |

En esta primera etapa de implementación, el registro de lectura de los extensómetros Q1 y Q2 es puntual. A continuación la Tabla 3 muestra los días en que fueron tomadas las lecturas.

A partir del 27/diciembre/2006 se tomaron lecturas el mismo día en los dos extensómetros, las lecturas no son continuas. Las lecturas más próximas registradas en ambos extensómetros corresponden al 23 y 26/enero/2007, donde el desplazamiento medio en Q1 es de 3,7 cm, mientras que Q2 se mantiene estable. El último día de la etapa de implementación

Q1 registra un desplazamiento acumulado de 4,95 cm, mientras que Q2 registra un desplazamiento acumulado de 5,20 cm.

| Fecha de lectura | Q1 | | Q2 | |
|------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|
| | Lectura (cm) (h2) | variación (cm) (h1-h2) | Lectura (cm) (h2) | variación (cm) (h1-h2) |
| 13/12/2006 | 36,80 | 0,15 | | |
| 14/12/2006 | 36,80 | 0,15 | | |
| 15/12/2006 | 36,80 | 0,15 | | |
| 16/12/2006 | 36,70 | 0,25 | | |
| 17/12/2006 | 36,50 | 0,45 | | |
| 18/12/2006 | 36,50 | 0,45 | | |
| 19/12/2006 | 36,40 | 0,55 | | |
| 20/12/2006 | 36,30 | 0,65 | | |
| 21/12/2006 | 36,20 | 0,75 | | |
| 22/12/2006 | 36,10 | 0,85 | | |
| 27/12/2006 | 35,60 | 1,35 | 35,60 | 1,40 |
| 09/01/2007 | 34,50 | 2,45 | 34,50 | 2,50 |
| 23/01/2007 | 33,40 | 3,55 | 33,40 | 3,60 |
| 26/01/2007 | 33,10 | 3,85 | 33,40 | 3,60 |
| 05/02/2007 | 32,50 | 4,45 | 32,70 | 4,30 |
| 15/02/2007 | 32 | 4,95 | 31,80 | 5,20 |

Tabla 3: Lectura y desplazamiento de los extensómetros Q1 y Q2, durante el periodo 10/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: León et al. (2007_1), León et al. (2007_2)

El desplazamiento acumulado indica la dinámica de la masa y se calcula de la diferencia de altura de días subsiguientes a la lectura (h2-h1) y se adiciona la diferencia entre el par de días anterior (h1-h2):

$$\text{Desplazamiento Acumulado} = \text{abs}(h2 - h1) + (h1 - h2) \quad (1-1)$$

La Figura 9 muestra la lectura del desplazamiento acumulado en centímetros de los extensómetros Q1 y Q2 durante el periodo 10/diciembre/2006–15/febrero/2007.

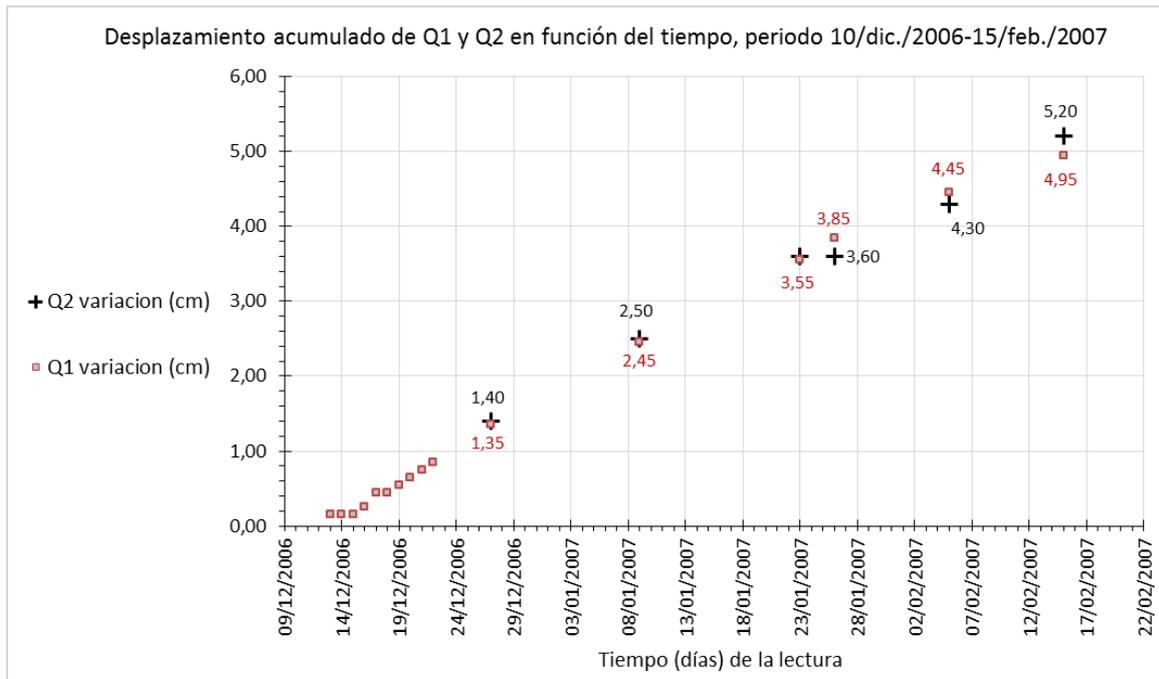


Figura 9: Desplazamiento acumulado de los extensómetros Q1 y Q2, durante el periodo 10/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: León et al. (2007_1), León et al. (2007_2)

A partir del 21/marzo/2007 existen registros del extensómetro con la codificación Q3, con el registro de lectura inicial de 2 cm.

Con el fin de determinar si existe diferenciación en el movimiento de masas dentro del deslizamiento, el INIGEMM instaló otro equipo de monitoreo denominándose equipo experimental (Figura 10), compuesto de un tubo colocado en la zona estable (denominado QE1) y dos tubos en la zona inestable (QE2 y QE3), registrándose lecturas puntuales en un periodo de quince días aproximadamente. A continuación se muestran las lecturas iniciales en los extensómetros experimentales:

| | QE1 | QE2 | QE3 |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| Fecha | 17/nov./2007 | 17/nov./2007 | 17/nov./2007 |
| Medida en la regleta | 0 cm | 0 cm | 0 cm (punto fijo) |
| Coordenadas: UTM, PSAD-56 (longitud-latitud) | 773.518-9'819.507 | 773.503-9'819.509 | 773.471-9'819.514 |

Este equipo se instaló para determinar la mecánica del movimiento en forma secuencial, definir si existen movimientos en masa diferenciados dentro del deslizamiento y conocer la incidencia que tiene la lluvia en la aceleración del deslizamiento (Calero, 2007). Para definir si el agua es o no uno de los factores que aceleran el proceso del movimiento, se acopló en el equipo QE1 un pluviómetro artesanal, para medir la cantidad de lluvia que se genera en el sector.

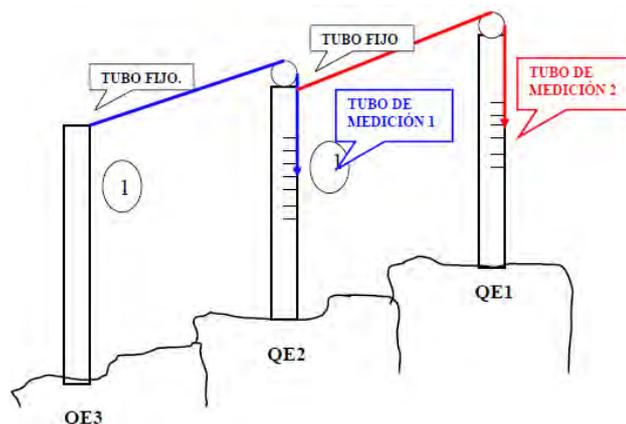


Figura 10: Esquema de la relación del instrumental experimental. Fuente: Calero (2007)

Los extensómetros experimentales fueron instalados el 17/noviembre/2007 y las lecturas fueron registradas tanto por técnicos del INIGEMM como por habitantes de la comunidad. A continuación la Tabla 4 muestra los días puntuales en que fueron tomadas las lecturas. En Q2 se observa un incremento en las lecturas del 27/12/2007 y 22/01/2008. De acuerdo a las conversaciones mantenidas con los expertos en el INIGEMM, cuando el desplazamiento es constante puede deberse a asentamiento del instrumento, mientras que cuando el desplazamiento empieza a ser superior al margen de error del equipo se puede asumir que se está hablando de desplazamiento de terreno. Debido a los pocos datos registrados en esta etapa de monitoreo no se puede concluir mayor cosa.

En QE1 existió un desplazamiento acumulado considerable el 22/01/2008, sin embargo el periodo de tiempo entre las lecturas del 27/12/2007 y 22/01/2008 corresponde a 26 días, no se tiene información de ese periodo y no se puede asegurar si el desplazamiento es verdadero o es falso. Es necesario disponer de un registro continuo para determinar la velocidad acumulada en ese periodo.

| Fecha de lectura | Q1 | | Q2 | | Q3 | | QE1 | | QE2 | | Agua (cm) |
|------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| | Lectura (cm) | Dif. (cm) | |
| 04/12/2007 | 32,50 | | 32,20 | | 17,20 | | 5,80 | | 0,45 | | 4 |
| 17/12/2007 | 29,30 | 3,20 | 30,30 | 1,90 | 21 | 3,80 | 9,80 | 4 | 1,30 | 0,85 | 49 |
| 27/12/2007 | 27,10 | 2,20 | 30,90 | 0,60 | 24 | 3 | 12,80 | 3 | 1,60 | 0,30 | 8 |
| 22/01/2008 | 21,70 | 5,40 | 25 | 5,90 | 31,70 | 7,70 | 19,70 | 6,90 | 1,90 | 0,30 | 8 |

Tabla 4: Lectura y desplazamiento de los extensómetros Q1, Q2, Q3, QE1 y QE2, durante el periodo 04/dic./2006-15/feb./2007. Fuentes: Calero (2007)

La Figura 11 muestra la lectura del desplazamiento acumulado en centímetros de los extensómetros artesanales instalados en la primera etapa (Q1, Q2 y Q3), y de los extensómetros experimentales (QE1 y QE2).

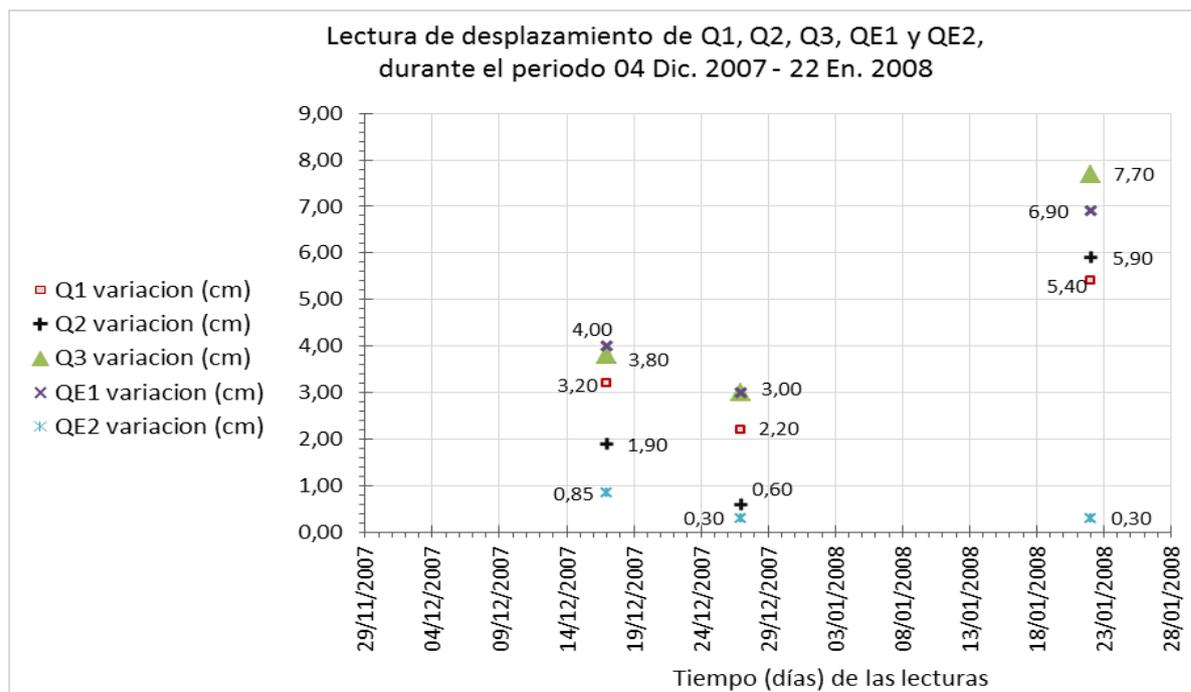


Figura 11: Desplazamiento acumulado de los extensómetros Q1, Q2, Q3, QE1 y QE2, durante el periodo 04/dic./2006-15/feb./2007. Fuente: Calero (2007)

Oleas y Calero (2007) indican que el INIGEMM instaló en el cerro Iguazú tres extensómetros (Q1, Q2 y Q3) y que por acción misma del deslizamiento se presentó una grieta en zona considerada estable, en la cual se fijó el extensómetro Q1. Debido a este incidente, se reubicó el extensómetro Q1 y se calibró los extensómetros Q2 y Q3 para que la lectura de datos de los 3 instrumentos empiecen con una medida inicial para tener un mejor control de la lectura de datos. La fecha de calibración de los extensómetros corresponde al 11/octubre/2007. En la reubicación se consideró que la zona estable no presente evidencia de grietas y que entre los tubos de la zona estable y la inestable no tenga más de 11 m para que el cable no estorbe en las actividades cotidianas de la población de la zona.

A continuación se muestran las lecturas iniciales en los extensómetros. Las lecturas subsecuentes fueron registradas tanto por técnicos del INIGEMM como por habitantes de la comunidad.

| | Q1 | Q2 | Q3 |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|
| Fecha de lectura inicial | 11-Oct.-2007 | 11-Oct.-2007 | 11-Oct.-2007 |
| Lectura inicial (h1) | 36.95 cm | 38 cm | 2 cm |
| Altura referencial | 3.105 m.s.n.m | 3.037 m.s.n.m | 3.043 m.s.n.m |
| Coordenadas: UTM, PSAD-56 (longitud-latitud) | 773.579-9'819.345 | 773.530- 9'819.678 | 773.505- 9'819.528 |

Oleas y Calero (2007) muestran a continuación los datos obtenidos en los extensómetros, antes del proceso de calibración y reubicación. Para tener un mejor control del deslizamiento, en marzo/2007 se registró como cuarto punto de control (Q4) dos árboles, teniendo en cuenta que se encuentran en zona estable.

| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 |
|----------------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| Fecha de lectura inicial | 10-Dic.-2006 | 10-Dic.-2006 | 21-Marzo-2007 | 21-Marzo-2007 |
| Lectura inicial | 36,95 cm | 37 cm | 2 cm | 2 cm |
| Fecha de lectura final | 11-Oct-2007 | 11-Oct-2007 | 11-Oct-2007 | 11-Oct-2007 |
| Lectura final | * | 10,7 cm | 42,1 cm | 42,1 cm |
| Desplazamiento del deslizamiento | 42,14 cm en 305 días | 26,3 cm en 305 días | 40,1 cm en 204 días | 40,1 cm en 204 días |
| Velocidad equivalente (cm/año) | 50,42 | 31,47 | 71,75 | 71,75 |
| Referencia de velocidad | Movimiento muy lento (Cruden y Varnes, 1996) | | | |

(*) No se pudo registrar la lectura final, debido a que la medida fue alterada.

Calero y Escárte (2008) indican que de acuerdo a los datos de desplazamiento hasta el 22/abril/2008 el sector donde se encuentra el equipo Q3 presenta mayor valor de desplazamiento con 280,35 cm. A continuación se resumen datos obtenidos en los extensómetros (Q1, Q2 y Q3) e instrumentos experimentales (QE1, QE2) antes y después de la recalibración. El Anexo 1 indica los datos obtenidos antes de la recalibración en los extensómetros Q1, Q2 y Q3 (periodo 25/octubre/2007-22/abril/2008) y experimentales E1, E2 (periodo 14/noviembre/2007-22/abril/2008).

| | Q1 | Q2 | Q3 | QE1 | QE2 |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fecha | 21-Abril-2008 | 21-Abril-2008 | 21-Abril-2008 | 21-Abril-2008 | 21-Abril-2008 |
| Medida en la regleta, antes | 6,1 cm | 14,4 cm | 56,1 cm | 44,2 cm | 2,8 cm |
| Medida en la regleta, después | 38 cm | 38 cm | 2 cm | | |

Los datos obtenidos después de la calibración (Calero y Escárte, 2008) son los siguientes:

| | Q1 | Q2 | Q3 | E1 | E2 |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Fecha | 22-Abril-2008 | 22-Abril-2008 | 22-Abril-2008 | 22-Abril-2008 | 22-Abril-2008 |
| Medida en la regleta, antes | 38 cm | 38 cm | 56,1 cm | 44,2 cm | 2,8 cm |
| Medida en la regleta, después | 37,8 cm | 38 cm | 2,3 cm | 44,4 cm | 3,2 cm |

A continuación se analiza el registro de monitoreo de los extensómetros Q1, Q2 y Q3 durante el periodo 10/diciembre/2006–11/febrero/2010. El Anexo 2 contiene la siguiente información, relacionada con el análisis que se indica a continuación:

- Gráficos de desplazamiento acumulado (cm) de los extensómetros Q1, Q2 y Q3, los cuales contienen agrupaciones de datos en función del tiempo.

- Tablas de lectura de los extensómetros Q1, Q2 y Q3, de acuerdo a las agrupaciones de datos definidas. Las tablas contienen lecturas del extensómetro, velocidad (cm/año) del movimiento en masa, desplazamiento acumulado (cm), movimiento efectivo (cm), diferencia en días en lecturas consecutivas, y cantidad de agua (cm) registrada en el periodo septiembre/2009-febrero/2010.
- Gráficos de velocidad (cm/año) del extensómetro respectivo, de acuerdo a las agrupaciones de datos definidas.
- Gráfico de lecturas puntuales del pluviómetro (cm), durante el periodo septiembre/2009-febrero/2010.

La velocidad del movimiento en masa se calcula en función del movimiento efectivo (cm) del desplazamiento dividido para la diferencia en días (dx) entre la lectura anterior y la presente, multiplicada por 365 días, para obtener el desplazamiento equivalente en un año:

$$Velocidad = (movimiento\ efectivo \div dx) 365 \quad (1-2)$$

El movimiento efectivo es la diferencia de desplazamiento entre la lectura anterior del extensómetro y la presente, por ejemplo: la lectura del extensómetro el 10/diciembre/2006 es 36,95 cm, la siguiente lectura el 13/diciembre/2006 es 36,8 cm. El movimiento efectivo de la primera lectura es 0 cm, mientras que en la segunda lectura es 0,15. A continuación el análisis de los extensómetros (ver gráficos y tablas en el Anexo 2). Las lecturas de los extensómetros Q1, Q2 y Q3 no son continuas.

ANÁLISIS DEL EXTENSÓMETRO Q1

Del gráfico de desplazamiento acumulado (cm) se distinguen 3 concentraciones de datos agrupados en función del tiempo. Los expertos del INIGEMM señalan que los datos no son continuos debido a toma errada de lectura de la medida del extensómetro por parte de miembros de la comunidad, y sugieren eliminar los datos diseminados (dato anómalo) y analizar los datos concentrados, porque el dato anómalo modificaría el análisis. Dato anómalo corresponde a un valor alejado de la concentración de datos. Los datos analizados están agrupados en los siguientes periodos:

- Enero-junio/2007 (135 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 28,56 cm/año.

- Octubre/2007-junio/2008 (260 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 82,85 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene el inicio de dos etapas de monitoreo. Cada etapa registra el valor de 0 como inicio de velocidad de desplazamiento, sin embargo el desplazamiento acumulado conserva la lectura anterior.
- Septiembre/2009-febrero/2010 (142 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 68,60 cm/año. Varios registros de velocidad en este agrupamiento tienen el valor de 0, donde su desplazamiento acumulativo respectivo conserva el valor del anterior desplazamiento registrado con velocidad $\neq 0$.

La cantidad de agua registrada en el pluviómetro cambia drásticamente de un valor de 3 cm (14/octubre/2009) a 6 cm (20/octubre/2009). De acuerdo al gráfico de desplazamiento acumulado, se observa un cambio brusco de alza alrededor del 20/octubre/2009 y a partir de esta fecha hasta febrero/2010 el desplazamiento acumulativo va en incremento correlacionado al incremento de la cantidad de agua.

La velocidad acumulada en el extensómetro Q1 según Cruden y Varnes (1996) es muy lenta.

ANÁLISIS DEL EXTENSÓMETRO Q2

Del gráfico de desplazamiento acumulado (cm) se distinguen 2 concentraciones de datos agrupados en los siguientes periodos:

- Diciembre/2006-junio/2008 (541 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 38,29 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene el inicio de dos etapas de monitoreo. En los datos donde la velocidad de desplazamiento tiene el valor de 0, el desplazamiento acumulado conserva la lectura anterior.
- Septiembre/2009-febrero/2010 (143 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 49,03 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene un recalibración donde el movimiento efectivo corresponde a 0, y se conserva el valor previo de desplazamiento acumulado, en este caso el de la fecha 20/febrero/2009. En los datos donde la velocidad de desplazamiento tiene el valor de 0, el desplazamiento acumulado conserva la lectura anterior.
- El 30/diciembre/2009 se observa un cambio brusco de desplazamiento acumulado, con el registro de 8 cm de cantidad de agua. El anterior registro del pluviómetro corresponde a 7

cm (6/noviembre/2009). A partir del 30/diciembre/2009 hasta febrero/2010 se registra incremento del desplazamiento acumulado, en correlación al incremento de cantidad de agua que el 11/febrero/2010 registra 11,5 cm.

La velocidad acumulada en el extensómetro Q2 según Cruden y Varnes (1996) es muy lenta.

ANÁLISIS DEL EXTENSÓMETRO Q3

Del gráfico de desplazamiento acumulado (cm) se distinguen 3 concentraciones de datos agrupados en los siguientes periodos:

- Marzo/2007-junio/2008 (463 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 75,17 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene el inicio de dos etapas de monitoreo.
- Agosto-noviembre/2008 (95 días): se tiene una velocidad media de 102,35 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene un recalibración donde el movimiento efectivo corresponde a 0, y se conserva el valor previo de desplazamiento acumulado, en este caso el de la fecha 27/junio/2008.
- Septiembre/2009-febrero/2010 (143 días): eliminando los datos anómalos se tiene una velocidad media de 56,19 cm/año. Este agrupamiento de datos contiene un recalibración donde el movimiento efectivo corresponde a 0, y se conserva el valor previo de desplazamiento acumulado, en este caso el de la fecha 20/enero/2009.

El 27/enero/2010 se registra un cambio brusco de desplazamiento acumulado (215,7 cm), con el registro la cantidad de agua de 9,1 cm. El anterior valor de desplazamiento fue de 195,2 cm (24/enero/2010) con registro en el pluviómetro de 8,5 cm. Luego, el desplazamiento continúa en alza, el 11/febrero/2010 se tiene un desplazamiento acumulado de 217,9 cm, con valor de pluviómetro de 10,5 cm.

La velocidad acumulada en el extensómetro Q3 según Cruden y Varnes (1996) es muy lenta.

1.5.3.2. Medida de los desplazamientos en el terreno con las estaciones de GPS diferencial

La presencia de tres zonas inestables en Tumba-San Francisco, dispuestas de manera escalonada dificultan establecer con certeza las dimensiones superficiales de los procesos de movimientos en masa y sus implicaciones, por lo que se determinó realizar un monitoreo detallado con GPS diferencial en la zona del deslizamiento y su área de influencia, para establecer la magnitud superficial, dirección del movimiento y las velocidades diferenciales de los deslizamientos (León y Castillo, 2007).

En el monitoreo con GPS diferencial se realizaron dos campañas, la primera en el periodo 14-16/junio/2007 y la segunda 18-20/julio/2007. El Anexo 3 muestra el registro del monitoreo con GPS y la corrección de calibración en cada estación. Los objetivos principales de la primera campaña consistió en ubicar los puntos de monitoreo y determinar los valores iniciales X, Y y Z (León y Castillo, 2007). Para cumplir con lo señalado se cumplió lo siguiente:

- Ubicar e instalar estaciones base (no > 60 Km entre ellas).
- Ubicar en campo los puntos de monitoreo codificados mediante la utilización de estacas, mojones, varillas u otros.
- Tomar datos con la estación móvil en los puntos de monitoreo instalados para su procesamiento respectivo.

El equipo utilizado consistió en un GPS diferencial que consta de 3 receptores (2 estaciones base y 1 estación móvil), 3 antenas con sus respectivos dispositivos y accesorios. Los materiales utilizados consistieron en estacas metálicas de 28 mm de ancho y 50 cm de largo con una perforación de 5 mm de profundidad en la parte central de uno de los extremos, donde se coloca el puntero de trípode del equipo móvil del GPS diferencial. Cada estaca tiene señalado el número que corresponde al código del punto de monitoreo. El código de cada punto de monitoreo tiene las siglas *Q* correspondiente al deslizamiento de Quimiag, *R* de la estación móvil y un número que indica la secuencia de instalación. Se ubicaron 20 puntos de monitoreo a lo largo del deslizamiento, en zonas activas y también en zonas aparentemente fuera del deslizamiento. Adicionalmente se colocaron dos estaciones base, identificadas con la codificación *QB*, las cuales están ubicadas al Oeste del río Chambo (Figura 4: mapa de ubicación, ubicación de puntos de monitoreo) aproximadamente a 3 Km al NO como al SO de

la zona de estudio en zonas ubicadas fuera del área inestable. La calidad de recepción de los datos fue buena, con recepción de información de 7 a 9 satélites por tanto el error es bajo (León y Castillo, 2007).

Los puntos de monitoreo con los códigos QR-01, QR-02, QR-03, QR-04, QR-06 y QR-07 se colocaron al Este del escarpe principal, en la corona y en la parte superior del deslizamiento entre las cotas 2.960 y 3.120 m.s.n.m.

La Figura 12 muestra la ubicación de las estaciones GPS *QR-02*, *QR-03*, *QR-04*, las cuales están cercanas a los extensómetros Q1, Q3 y Q2 respectivamente.

En la zona central del área de estudio, sector Tumba, los puntos de monitoreo con los códigos QR-05, QR-08, QR-09, QR-10, QR-11 y QR-20 se localizan en las zonas que presentan deslizamientos y también en zonas aparentemente estables.

En la zona de estudio al Oeste de Tumba se ubicaron los puntos de monitoreo con los códigos *QR-12*, *QR-13*, *QR-14*, *QR-15*, *QR-16*, *QR-17*, *QR-18* y *QR-19* se ubican en zonas con pendientes bajas en lugares donde no se evidencian deslizamientos, a excepción de los puntos *QR-16* y *QR-17* localizados en la corona y en la parte superior del cuerpo del deslizamiento localizado entre Tumba y Rumipamba.

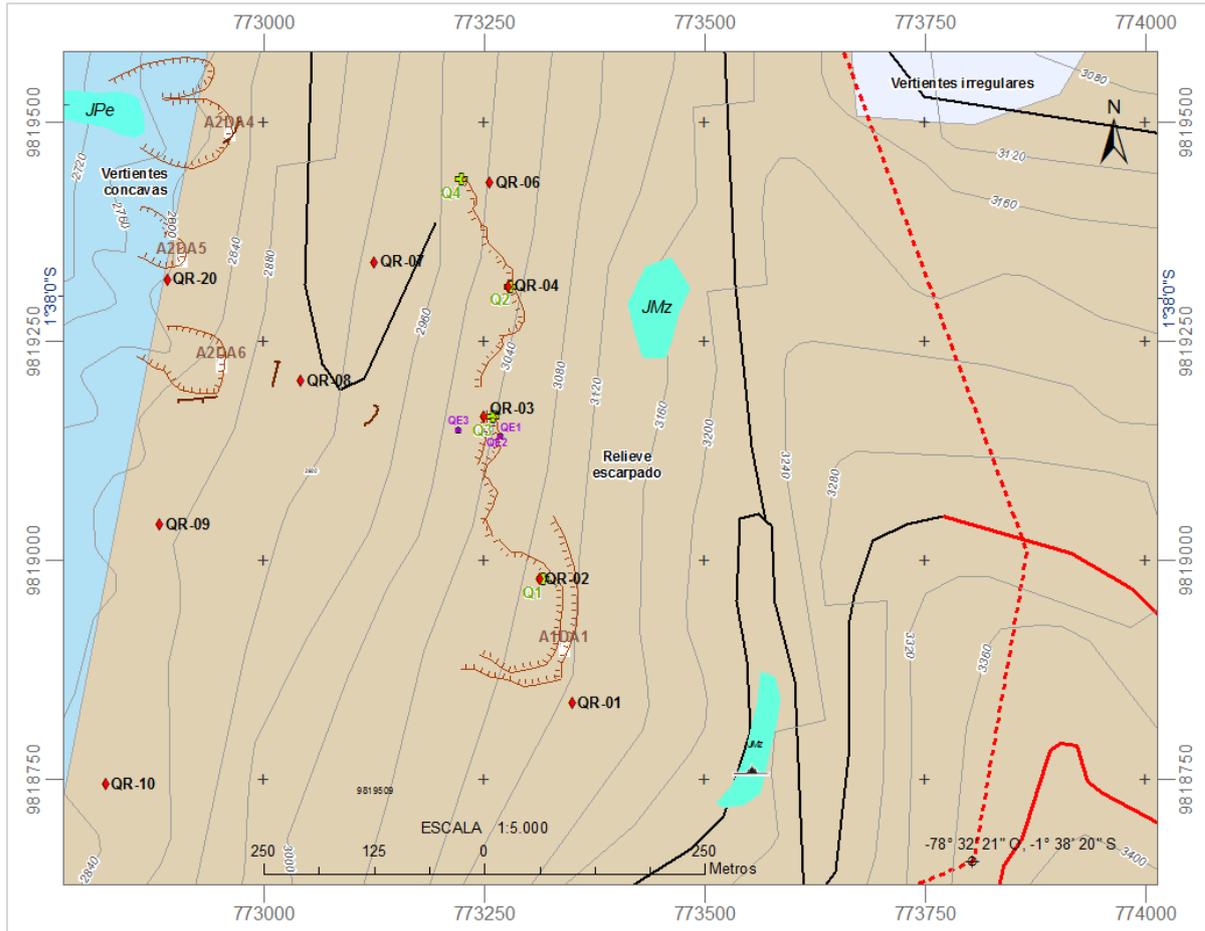


Figura 12: Ubicación de los puntos de control GPS *QR-02*, *QR-03*, *QR-04*, los cuales están cercanos a los extensómetros *Q1*, *Q3* y *Q2* respectivamente. Elaborado: Tannia Mayorga Torres

1.5.3.3. Análisis y comparación de medidas en el terreno de los extensómetros *Q1*, *Q2*, *Q3*, y estaciones GPS diferencial *QR-02*, *QR-03*, *QR-04*

La Figura 13 muestra el registro de monitoreo de las estaciones GPS *QR-02*, *QR-03*, *QR-04*, así como de los extensómetros *Q1*, *Q3* y *Q2*.

La estación GPS más cercana al extensómetro *Q1*, es *QR02*. El 15/junio/2007 el extensómetro *Q1* registró un movimiento efectivo (cm) de 3,95 cm. La diferencia de la coordenada X en la estación GPS *QR02*, entre la primera campaña (14-16/junio/2007) y segunda campaña (18-20/julio/2007) corresponde a 8,5 cm de desplazamiento. En la coordenada Y el desplazamiento es 0,9 cm, mientras que en Z es 8,5 cm. Por otra parte, el movimiento efectivo del extensómetro *Q1*, entre el 15/junio/2007 (fecha incluida en la primera campaña de GPS) y 18/julio/2007 (fecha incluida en la segunda campaña de GPS), es de 10,35 cm. Se concluye que la dirección de movimiento del vector es mayormente en

longitud y que las medidas del movimiento del terreno registradas por Q1 y QR02 están relacionadas.

La estación GPS más cercana al extensómetro Q3, es QR03. El 15/junio/2007 el extensómetro Q3 registró un movimiento efectivo (cm) de 3,55 cm. La diferencia de la coordenada X en la estación GPS QR03, entre la primera campaña y segunda campaña corresponde a 6,2 cm de desplazamiento. En la coordenada Y el desplazamiento es de 0,3 cm, mientras que en Z es 4,2 cm. Por otra parte, el movimiento efectivo del extensómetro Q3, entre el 15/junio/2007 y 18/julio/2007, es de 7,05 cm. Se concluye que la dirección de movimiento del vector es mayormente en longitud y que las medidas del movimiento del terreno registradas por Q3 y QR03 están relacionadas. De este análisis se excluye a los extensómetros experimentales, mismos que están cercanos a Q3, porque la fecha de su instalación es posterior al periodo analizado.

La estación GPS más cercana al extensómetro Q2, es QR04. El 15/junio/2007 el extensómetro Q2 registró un movimiento efectivo (cm) de 0,2 cm. La diferencia de la coordenada X en la estación GPS QR04, entre la primera campaña y segunda campaña corresponde a 3,4 cm de desplazamiento. En la coordenada Y el desplazamiento es de 1,1 cm, mientras que en Z es 0,2 cm. Por otra parte, el movimiento efectivo del extensómetro Q2, entre el 15/junio/2007 y 18/julio/2007, es de 3,8 cm. Se concluye que la dirección de movimiento del vector es mayormente en longitud y que las medidas del movimiento del terreno registradas por Q2 y QR04 están relacionadas.

| Extensom. | COORDENADA X | COORDENADA Y | Altura (m.s.n.m) | FECHA | LECTURAS (cm) | Movimiento efectivo (cm) | Desplazamiento acumulado (cm) | días | velocidad cm/año |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|
| Q1 | 773568 | 9819344 | 3103 | 24-may-07 | 24,9 | 0,7 | 12,05 | 19 | 13,44736842 |
| | | | | 15-jun-07 | 20,95 | 3,95 | 16 | 22 | 65,53409091 |
| | | | | 18-jul-07 | 10,6 | 10,35 | 26,35 | 33 | 114,4772727 |
| | | | | 19-jul-07 | 10,2 | 0,4 | 26,75 | 1 | 146 |
| Q3 | 773505 | 9819528 | 3043 | 16-ago-07 | 3,2 | 7 | 33,75 | 28 | 91,25 |
| | | | | 24-may-07 | 10,7 | 2,9 | 9,1 | 19 | 55,71 |
| | | | | 15-jun-07 | 14,25 | 3,55 | 12,65 | 22 | 58,90 |
| | | | | 18-jul-07 | 21,3 | 7,05 | 19,7 | 33 | 77,98 |
| Q2 | 773530 | 9819678 | 3037 | 19-jul-07 | 21,5 | 0,2 | 19,9 | 1 | 73,00 |
| | | | | 16-ago-07 | 28,3 | 6,8 | 26,7 | 28 | 88,64 |
| | | | | 24-may-07 | 23,3 | 2,3 | 13,7 | 19 | 44,18 |
| | | | | 15-jun-07 | 23,1 | 0,2 | 13,9 | 22 | 3,32 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| Estación GPS | COORDENADA X (1era campaña) | COORDENADA X (2da campaña) | Diferencia X (m) | COORDENADA Y (1era campaña) | COORDENADA Y (2da campaña) | Diferencia Y (m) | Altura (m.s.n.m) (1era campaña) | Altura (m.s.n.m) (2da campaña) | Diferencia Z (m) |
| QR02 | 773305,171 | 773305,086 | 0,085 | 9818969,066 | 9818969,057 | 0,009 | 3134,257 | 3134,172 | 0,085 |
| QR03 | 773240,262 | 773240,2 | 0,062 | 9819153,668 | 9819153,665 | 0,003 | 3067,76 | 3067,718 | 0,042 |
| QR04 | 773267,902 | 773267,868 | 0,034 | 9819302,733 | 9819302,722 | 0,011 | 3062,71 | 3062,708 | 0,002 |

Figura 13: Registro de lecturas medidas en el terreno por los extensómetros y estaciones GPS diferencial

1.5.3.4. Análisis del sistema de monitoreo en tiempo real

El INIGEMM en conjunto con la Unidad de Gestión Riesgos del Municipio de Riobamba en la provincia de Chimborazo, instaló un sistema de monitoreo en tiempo real que consiste en recibir diariamente vía internet, el registro de desplazamiento. El 14/septiembre/2011 se instalaron dos equipos, con las codificaciones TUMBA SF-1 y TUMBA SF-2. Los técnicos del INIGEMM encargados del monitoreo, reportan informes quincenales conteniendo los desplazamientos indicados. Los informes señalan que los equipos se encuentran expuestos, tanto a fenómenos naturales como lluvia, vientos, etc., así como a las actividades que realizan los pobladores; por lo que es necesario realizar visitas periódicas, para verificar el correcto funcionamiento de los equipos que monitorean el deslizamiento. Las Figuras 14 y 15 muestran el registro de monitoreo de los equipos TUMBA SF-1 y TUMBA SF-2 respectivamente, durante el periodo 1º/enero-15/agosto/2012:

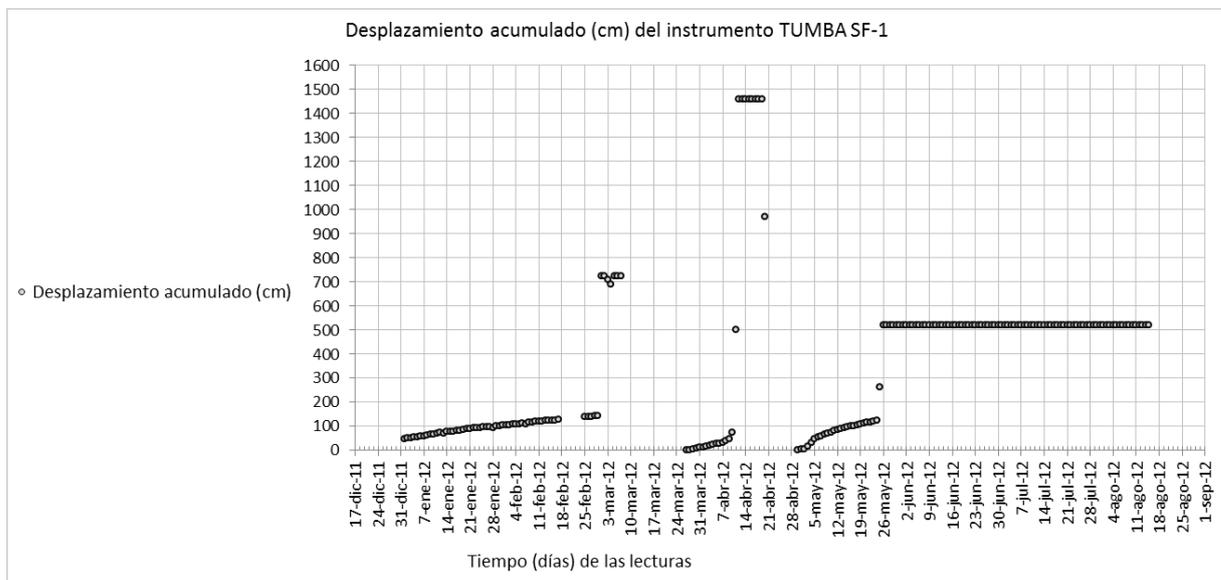


Figura 14: Desplazamiento acumulado (cm) del instrumento TUMBA SF-1. Fuente: Registro del INIGEMM

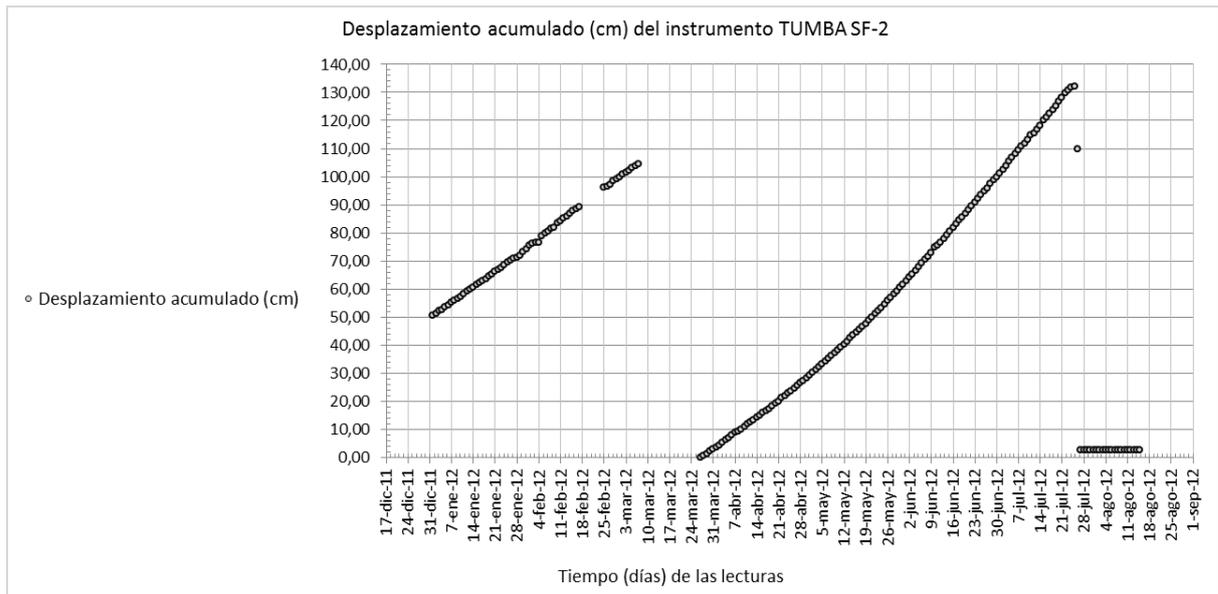


Figura 15: Desplazamiento acumulado (cm) del instrumento TUMBA SF-2. Fuente: Registro del INIGEMM

Del 1/enero/2012 al 17/febrero/2012 el registro de lectura es continuo, sin embargo durante el periodo 18-24/febrero el sitio web estuvo inhabilitado y no se registró datos en los dos equipos. El 25/febrero se continuo normalmente recibiendo los datos (Pulupa, 2012a). A continuación se indican los periodos de registro del equipo TUMBA SF-1:

- 1/marzo/2012: se produjo un cambio brusco de lectura, registrando el desplazamiento acumulado de 725,60 cm, el valor anterior del 29/febrero/2012 fue 141,80 cm. El informe quincenal (Pulupa, 2012b) señala que este comportamiento se pudo producir por fuertes vientos que pudieron mover el equipo, por la presencia de animales o falla de funcionamiento del equipo.
- 27/marzo/2012: el monitoreo se reinicia luego de realizar una calibración del equipo instalado, y los valores empiezan desde 0 (Pulupa, 2012c).
- 9/abril/2012: Pulupa (2012d) señala que el equipo registra un desplazamiento acumulado de 47,7 cm, el cual se ha incrementado en casi el doble desde el 4/abril/2012 (22,7 cm). El desplazamiento en este equipo se viene dando en una variación anormal, el 5/abril/2012 se tuvo un incremento de 27 mm/día y el 9/abril/2012 la lectura es de 89 mm/día.
- 12/abril/2012: se registró un desplazamiento acumulado de 1459,9 cm, el 11/abril/2012 el valor fue de 501,50 cm y el 10/abril/2012 fue de 73,50 cm, se sugiere realizar una inspección del equipo porque ya no se registra lecturas (Pulupa, 2012e).

- 30/abril/2012: el equipo se reinicia debido a inconvenientes, por lo que los valores empiezan desde 0. Se sugiere la reubicación de este equipo por los inconvenientes presentados (Pulupa, 2012f).
- 4/mayo/2012 y 5/mayo/2012: el equipo registra valores que desencajan dentro del normal registro, 135 mm/día y 174 mm/día respectivamente. Luego se va normalizando con un promedio de 55m/día (Pulupa, 2012g).
- 26/mayo/2012: el equipo registra un desplazamiento acumulado de 521,10 cm y esta lectura se mantiene, por lo que se presume falla del equipo (Pulupa, 2012h).

El equipo TUMBA SF-2 presenta los siguientes registros:

- 1-7/marzo/2012: el desplazamiento es continuo y registra un movimiento promedio de 8 mm/día (Pulupa, 2012b).
- 27-30/abril/2012: el desplazamiento en el equipo presenta un movimiento promedio de 10 mm/día, el equipo no registra daños (Pulupa, 2012f).
- 1-15/mayo/2012: el desplazamiento en el equipo registra un movimiento promedio de 10 mm/día (Pulupa, 2012g).
- 16/31/mayo/2012: el desplazamiento en el equipo registra un movimiento promedio de 11 mm/día (Pulupa, 2012h).
- 1-15/junio/2012 y 16-30/junio/2012: el desplazamiento en el equipo registra un movimiento promedio de 13 mm/día, no registra daños el equipo (Pulupa, 2012i) (Pulupa, 2012j).
- 1-15/julio/2012 el desplazamiento en el equipo registra un movimiento promedio de 14 mm/día (Pulupa, 2012k).
- 27/julio/2012: se produjo un descenso marcado de 109,80 cm (desplazamiento acumulado el 26/julio/2012) a 2,50 cm, lo que hace suponer que la cinta del equipo se soltó, este valor se mantiene hasta la última fecha de registro el 15/agosto/2012 (Pulupa, 2012l).

Se concluye que este registro continuo permitió determinar el desplazamiento acumulado en los equipos, lamentablemente el equipo TUMBA SF-1 mostró inconsistencias en las medidas por falla del equipo. No obstante, el equipo TUMBA SF-2 a pesar de proceso de calibración, muestra claramente el alza del desplazamiento acumulado en la zona, que indica

que es un desplazamiento verdadero. Los desplazamientos se registraron hasta el 15/agosto/2012 y el mayor evento de movimientos en masa ocurrió el 21/octubre/2012.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

A continuación el ítem 2.1 expone una revisión de literatura sobre introducción a los principios básicos de radar y radar de apertura sintética (*SAR*; por sus siglas en inglés), luego el ítem 2.2 despliega la descripción de las plataformas satelitales de las imágenes de radar procesadas, ítem 2.3 muestra interferometría de radar de apertura sintética (*InSAR*), el ítem 2.4 señala el software usado en el procesamiento, y finalmente el ítem 2.5 muestra la metodología empleada para alcanzar los objetivos planteados.

Como indica Bakker et al. (2004), existen diversos métodos para recolectar datos espaciales, es decir que tienen una referencia geográfica, y usarlos en distintas aplicaciones de acuerdo a sus necesidades. Así tenemos las encuestas, entrevistas, levantamiento de información catastral, muestras a analizarse en laboratorio, interpretación de imágenes de satélite, uso de fotografías aéreas, modelos numéricos, etc. En la presente investigación para recolectar datos espaciales del área de estudio y determinar la deformación del terreno usando *InSAR*, se realizó búsquedas de imágenes de radar correspondientes a los satélites ERS-1/2 y ALOS sensor PALSAR, utilizando el catálogo de observación de la Tierra (EOLi) de la ESA y el sitio de internet del Servicio de Facilidades de Alaska (ASF), respectivamente.

Adicionalmente, se solicitó al INIGEMM información de medidas del terreno (ver capítulo 1), para validar los resultados de interferometría. Los registros de medidas en el terreno en pocos puntos críticos identificados en el área de estudio son necesarios para complementar el análisis de SAR y determinar los desplazamientos absolutos (Fruneau et al., 1996).

2.1. PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DE UN RADAR

Un radar emite energía electromagnética y detecta el eco que regresa de los objetos reflejados. La naturaleza de la señal del eco de retorno contiene información sobre el objeto (Skolnik, 1990). El radar es un radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en la región del espectro electromagnético con longitudes de onda entre 1 mm y 100 cm (CCRS, 2001) (Figura 16), constituyendo las longitudes de onda más amplias utilizadas en teledetección. Las principales virtudes de esta región del espectro es que es independiente de la iluminación

solar y de las condiciones atmosféricas porque trabaja a longitudes de onda muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua (0,1 mm), y permite recoger información de zonas con cubierta de nubes muy frecuente, como son las zonas tropicales o polares (Chuvieco, 2002).

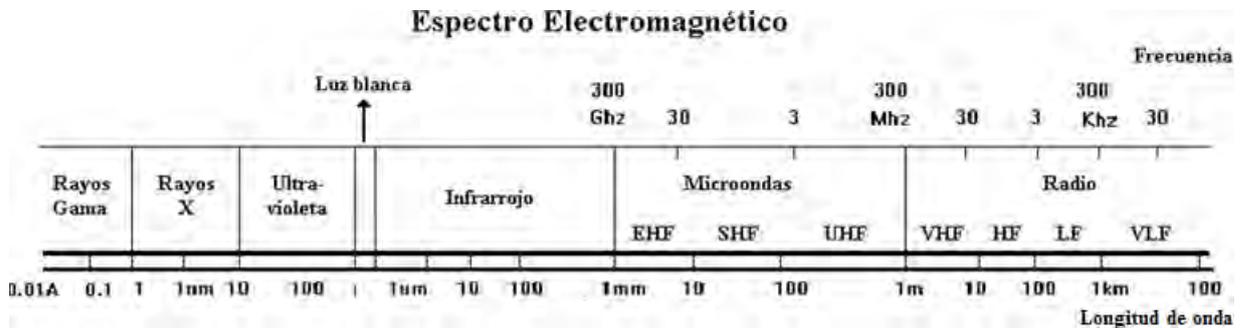


Figura 16: Espectro electromagnético

El desarrollo del radar (*Radio Detection And Ranging*) comenzó en los 40's en la Segunda Guerra Mundial, usado como dispositivo en el aire y en el mar para la detección de las fuerzas enemigas (Lopinto, 2010). El radar se diseñó inicialmente para medir distancias y detectar objetos en movimiento (Skolnik, 1990) (CCRS, 2001), y por su movimiento a lo largo de la dirección ortogonal a la dirección de la distancia que se está midiendo, el sensor es capaz de adquirir una imagen completa (Figura 17) (Lopinto, 2010).



Figura 17: Radar, adquisición. Fuente: Lopinto (2010)

Masuelli (2003) cita a Olmsted (1993) y señala que el proceso de detección de un radar se basa en cuatro principios tecnológicos que son:

1. La habilidad de una antena en transmitir un pulso corto en una dirección precisa.
2. La habilidad para detectar en una dirección precisa el eco dispersado, muy atenuado, de un blanco.
3. La habilidad de medir el tiempo de retardo entre la emisión y la detección y así la distancia al blanco.

4. La habilidad para muestrear con un haz direccionado y examinar blancos en áreas grandes.

La energía electromagnética se transmite a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas, formadas por un campo eléctrico y otro magnético oscilante y perpendicular entre sí y a su vez a la dirección de propagación (Figura 18). Una onda tiene cierta velocidad (c), frecuencia (f) y longitud de onda (λ), conectadas por la relación:

$$c = f * \lambda \quad (2-1)$$

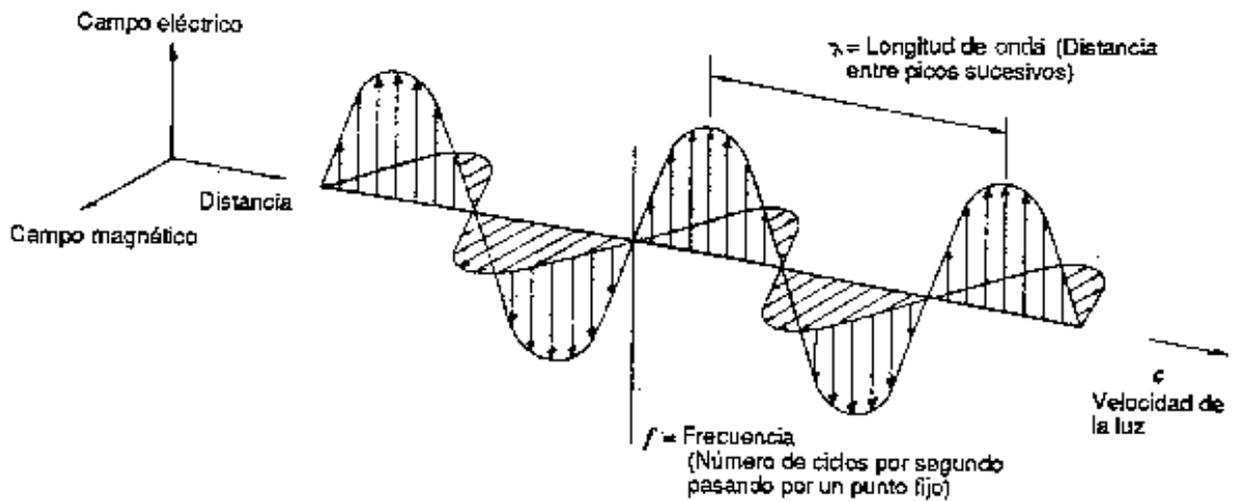


Figura 18: Onda electromagnética y sus componentes. Fuente: FAO (1990)

La longitud de onda es la distancia entre dos picos y se define por la velocidad con que se propaga la onda (c) dividido por la frecuencia (f):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2-2)$$

La frecuencia es el número de ondas enteras que pasan por un punto fijo en un segundo. La velocidad se mide en metros/segundo, la frecuencia en ciclos/segundo (o Hertz, abreviado Hz), y la longitud de onda, en metros. Las ondas tienen una propiedad denominada *amplitud*, que es la distancia desde el centro de la onda hasta el extremo de uno de sus picos. La Figura 19 muestra un ejemplo de onda, donde La frecuencia es dos ciclos por segundo o 2 Hz (MontevideoLibre, 2007).

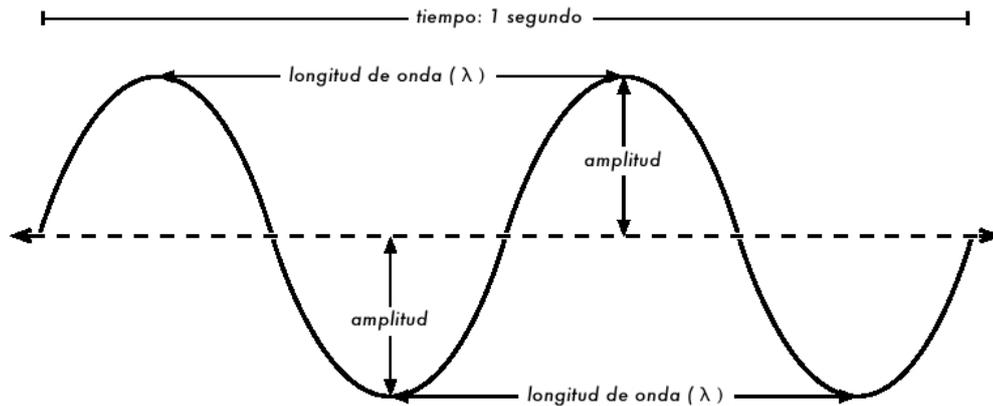


Figura 19: Longitud de onda, amplitud y frecuencia. Fuente: MontevideoLibre (2007)

En el radar se puede controlar condiciones de adquisición como son el ángulo, distancia, orientación, polarización, etc.

La orientación de la onda (esto es, el plano a lo largo del cual viaja) es referido como la **polarización**. Los sistemas de radar, algunas veces producen ondas con una polarización simple usualmente vertical u horizontal (Figura 20) con respecto a la superficie (FAO, 1990).

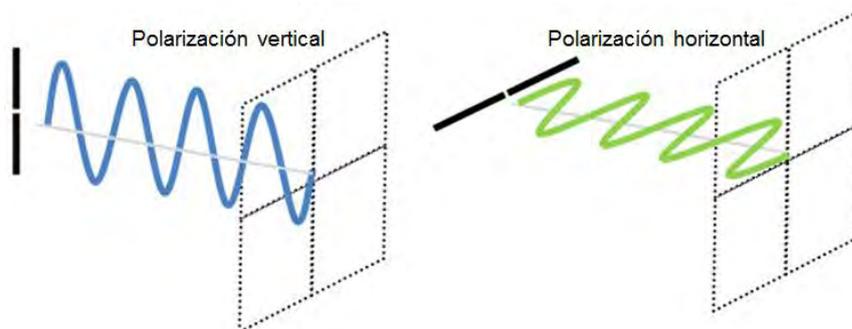


Figura 20: Polarización de las ondas electromagnéticas, campo eléctrico

La polarización permite una medida de la simetría de un objetivo; en principio un radar puede medir la rugosidad de la superficie de un objetivo y determinar algo sobre sus propiedades dieléctricas (Skolnik, 1990). En la polarización se toma en cuenta la orientación, fase relativa y periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas. Las antenas de los sistemas de radar están configuradas para transmitir y recibir radiación electromagnética ya sea horizontal o verticalmente (CCRS, 2001). En la polarización similar, la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida (HH, VV). La polarización es cruzada cuando varía la polarización entre la señal emitida y la recibida (HV o VH). La dirección con la que la señal está polarizada influye en el haz de retorno porque el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación (Chuvieco, 2002). El retorno de

polarización cruzada HV o VH es débil y se lo asocia con diferentes reflexiones debido a la rugosidad de la superficie (SARMAP, 2008).

En el radar se distingue una serie de bandas (ver Tabla 5) denominadas por una letra, y tienen frecuencias entre 0,3 y 300 GHz (CCRS, 2001). La terminología fue extraída en buena parte de las aplicaciones militares que dieron su origen, como la vigilancia y control de armas. Sin embargo, el radar se ha usado para la seguridad de vuelos aéreos, barcos, naves espaciales, para la teledetección aplicada en el medio ambiente (clima), y otras aplicaciones (Skolnik, 1990). En general, frecuencias inferiores a la banda S son adecuadas para la vigilancia aérea; mientras que frecuencias por encima de la banda S son mejores para la recopilación de información, rastreo de precisión y el reconocimientos de objetivos individuales (Skolnik, 1990).

| Banda | Longitud de onda λ (cm) | Frecuencia (GHz) | Sensor |
|-------|------------------------------------|---------------------|--|
| Ka | 0,75 - 1,10 | 26,5 - 40 | Uso militar |
| K | 1,10 - 1,67 | 18 - 26,5 | |
| Ku | 1,67 - 2,40 | 12,5 - 18 | |
| X | 2,40 - 3,75 | 8 - 12,5 | TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed |
| C | 3,75 - 7,50 | 4 - 8 | ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1 |
| S | 7,50 - 15 | 2 - 4 | Almaz-1 |
| L | 15 - 30 | 1 - 2 | JERS-1 SAR, SEASAT, ALOS PALSAR |
| P | 30 - 100 | 0,3 - 1 | AIRSAR de JPL/NASA |

Tabla 5: Nomenclatura estandar de bandas de frecuencia de radar. Fuentes: Chuvieco (2002), CCRS (2001), SARMAP (2008)

2.1.1. Interacción de la radiación electromagnética con la materia

Los sensores activos emiten una secuencia de pulsos muy cortos a la tierra con una frecuencia y duración muy precisa (Masuelli, 2003) y reciben posteriormente su retro-dispersión. Cada píxel en una imagen de radar representa el **coeficiente de retro-dispersión** (σ) de esa área sobre el terreno. El coeficiente de retro-dispersión (σ) implica una mayor complejidad porque depende de muchos factores como la **rugosidad del terreno**, la **geometría del terreno** (pendiente y orientación al ángulo de incidencia del haz), el **ángulo de incidencia del haz** y la **polarización** de la observación. Estos factores introducen una cierta variabilidad en torno al coeficiente promedio de cada tipo de objeto en la superficie, principalmente afectado por su **conductividad o constante dieléctrica** (Chuvieco, 2002).

La **rugosidad del terreno** incide directamente en la intensidad de la señal de retorno, siendo esta mayor cuando más elevada es la rugosidad. Sin embargo, el concepto de rugosidad no solo depende de la estructura de la superficie, sino también de la **longitud de**

onda (λ) de la observación y la variación altitudinal de la cubierta (h) (Chuvieco, 2002) (Figura 21).

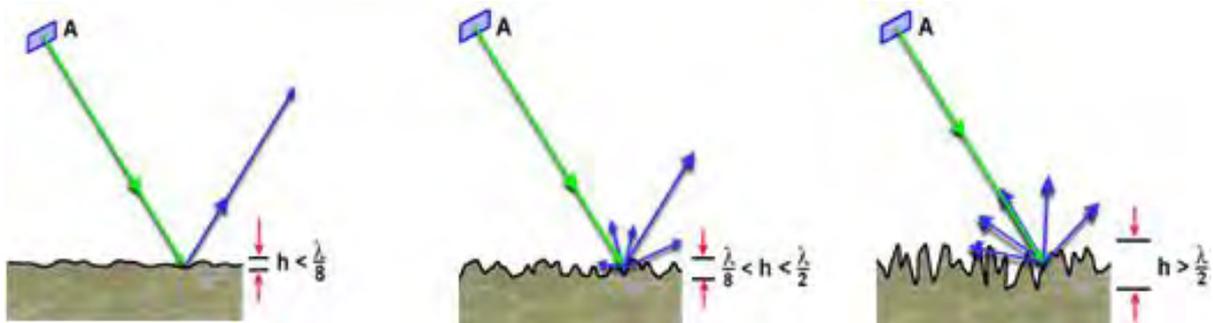


Figura 21: Interacción entre un haz y una superficie. Fuente: Masuelli (2010a)

Cuando se emite un haz de micro-ondas desde un radar a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con la superficie. Según la naturaleza de los objetos en la superficie, el haz principalmente se dispersa al exterior (caso del suelo), se dispersa dentro del propio objeto (caso de la vegetación) o se refleja especularmente (caso del agua) (Chuvieco, 2002). Objetivos ásperos dispersan la energía electromagnéticamente difusamente; la dispersión en los objetivos lisos es especular (Skolnik, 1990) (Figura 22).

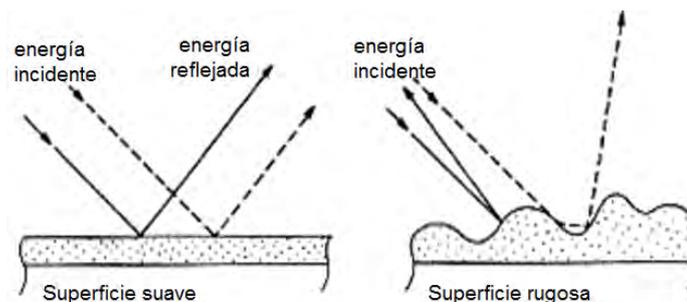


Figura 22: Diferenciación de la señal de retorno de acuerdo a la rugosidad del terreno. Fuente: Masuelli (2010a)

Las superficies con pendiente hacia el sensor tienen una dispersión más fuerte que las superficies con pendiente contraria al sensor, por lo que aparecen más brillantes en una imagen de radar. Las áreas en sombra y que no son iluminadas por el sensor aparecen oscuras. La estructura alineada de calles de ciudad y edificios permite que el pulso de radar incidente rebote en las calles y nuevamente rebote en los edificios (Figura 23), lo que se denomina *doble rebote* (*Double Bounce*), retornando al radar con una apariencia muy brillante (blanca) en la imagen de radar. Mientras que las carreteras y ferrovías, como son superficies planas aparecen oscuras (SARMAP, 2008).



Figura 23: Mecanismos de dispersión: doble rebote. Fuente: SARMAP (2008)

Dependiendo de la frecuencia y polarización de la observación, las ondas pueden penetrar la vegetación e incluso suelo seco, como nieve seca o arena, en ciertas condiciones. Generalmente, a más amplia longitud de onda, más fuerte es la penetración en los objetos (SARMAP, 2008) (Figura 24).

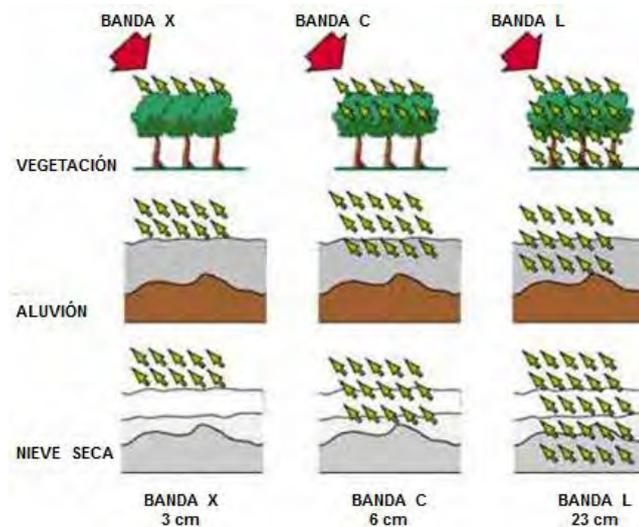


Figura 24: : Penetración del pulso de radar en las bandas X, C y L. Fuente: SARMAP (2008)

En la **geometría del terreno**, el **ángulo de incidencia local** toma en cuenta la inclinación local (pendiente) de la superficie iluminada, por lo que su valor influye de forma determinante en la brillantez de la imagen (CCRS, 2001).

El **ángulo de incidencia** (θ) es el ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la normal a la superficie de la Tierra. Dependiendo de la altura del radar sobre la superficie de la Tierra, el ángulo de incidencia (θ) cambia a lo largo de la dirección en rango (CCRS, 2001). A mayor ángulo, en general menor pulso de retorno, porque la rugosidad y en consecuencia la dispersión es menor. Si se combina un ángulo de incidencia bajo con una longitud de onda larga, el pulso de radar puede penetrar a una cierta profundidad (Chuvieco, 2002). La interacción de las micro-ondas con la superficie es complicada porque la

reflectividad de la señal de retorno es normalmente fuerte en pequeños ángulos de incidencia, y decrece con el incremento de los mismos (SARMAP 2008).

Las características eléctricas de los objetos en la superficie juegan un papel tan destacado como la geometría de observación en la señal retornada al sensor. Una de las medidas de este comportamiento es la **constante dieléctrica**, que intenta medir la conductividad y la reflectividad de un tipo de material. Los materiales secos ofrecen una constante dieléctrica relativamente baja entre 3 y 8, mientras que en los objetos metálicos y el agua corresponde a un valor alto de 80; los valores mencionados de la constante dieléctrica es para microondas. La presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar significativamente el pulso de retorno (Chuvieco, 2002). La humedad de la cobertura es una variable que interviene en las propiedades dieléctricas de la superficie en general (Massueli, 2010a); y, de acuerdo al contenido de humedad los objetos muy húmedos aparecen brillantes, mientras que los muy secos aparecen oscuros. Una excepción lo representan los cuerpos de agua sin olas que actúan como una superficie plana y aparecen en la imagen con color negro, porque la retro dispersión es muy baja, independientemente de la polarización utilizada. En base a las propiedades dieléctricas de los objetos, los sistemas de radar de apertura sintética SAR se usan para recuperar el contenido de humedad de suelo principalmente en suelo desnudo debido al gran contraste que existe entre suelo seco y suelo húmedo (SARMAP, 2008).

Con los radares se pueden identificar características de la superficie asociadas a la rugosidad del terreno, como las siguientes: hielo, ondas en la superficie del mar, humedad del suelo, cantidad de vegetación, objetos creados por el hombre (por ejemplo: edificios) y estructuras geológicas (CCRS, 2001).

Con estos antecedentes, la ecuación fundamental del radar es la siguiente:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2-3)$$

Donde: P_r indica la potencia retro-dispersada

P_t es la potencia emitida por el radar

G es un factor de ganancia de la antena

λ es la longitud de onda del radar

r indica la distancia entre el sensor y la superficie

σ es la sección eficaz de retro-dispersión

A continuación Skolnik (1990), expresa la sección eficaz de retro-dispersión (σ) en términos de resoluciones en acimut (δ_{az}) y en rango (δ_{ra}), así como en términos de la reflectividad del terreno (ρ). La sección eficaz de retro-dispersión es igual a la reflectividad del terreno multiplicada por el área proyectada. Esta proyección explica el término $\sin \psi$. Entonces la expresión para la sección eficaz de retro-dispersión en término de los parámetros mencionados resulta:

$$\sigma = \rho \delta_{ra} \delta_{az} \sin \psi \quad (2-4)$$

2.1.2. Funcionamiento básico de un radar

Hay muchos tipos de radar, que se han desarrollado durante el tiempo, desde los radares de apertura real (*RAR*; por sus siglas en inglés) a los radares de apertura sintética (*SAR*), usados para distintas finalidades. Sus posibles aplicaciones no se limitan a los resultados obtenidos con los sensores ópticos, como la identificación y reconocimiento de minerales; al contrario, constituyen un complemento efectivo como la polarimetría e interferometría, herramientas posibles únicamente con micro-ondas (Lopinto, 2010).

Un sistema normal de **radar mono estático** (Figura 25) consiste de un transmisor de señal y un receptor de la señal reflejada denominada eco, operando sobre una plataforma en vuelo como un avión o un satélite (Masuelli, 2003).

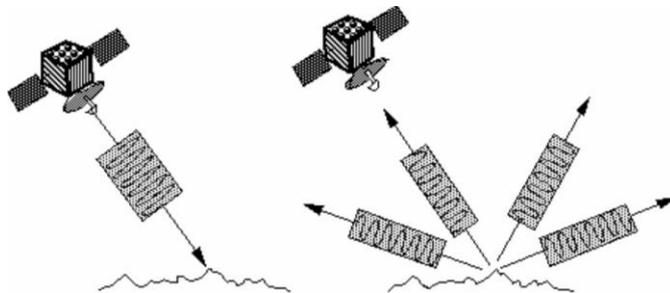


Figura 25: Radar mono estático. Fuente: SARMAP (2008)

En el radar retorna siempre una onda electromagnética con amplitud y fase, pero el *RAR* puede solo almacenar la amplitud de cada eco (Masuelli, 2010a) para ser medida y procesada.

Las primeras experiencias con radar se desarrollaron sobre plataformas aéreas, y el sistema más utilizado fue el **radar lateral aero-transportado** (*SLAR*, por sus siglas en inglés) (Figura 26), que mostró gran versatilidad respecto a la fotografía aérea. El principal

problema de estos sensores fue su baja resolución, como consecuencia del escaso diámetro de la antena. La resolución espacial (R_s) de un sistema de apertura circular se calcula:

$$R_s = \frac{\lambda h}{\phi} \quad (2-5)$$

La fórmula indica que el tamaño del mínimo objeto identificable en la imagen está en relación directa con la longitud de onda (λ) y la altura de la observación (h) e inversa con el diámetro de la apertura (ϕ). Según esta definición para lograr una resolución adecuada sería preciso contar con antenas de enormes proporciones. Este inconveniente puede obviarse con el empleo del *SAR* (Chuvienco, 2002).

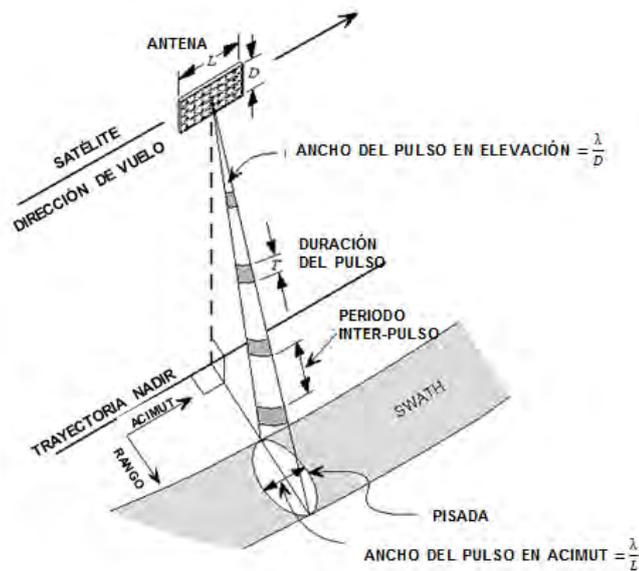


Figura 26: Toma de datos de un SLAR. Fuente: Olmsted (1993)

Tanto el radar aerotransportado como el espacial observan la superficie lateralmente (CCRS, 2001) y la dirección en que mira la antena se denomina **rango** (*slant range*). El **rango o distancia**, desde el sensor al objeto se calcula por el tiempo que toma la energía emitida para llegar al objeto y regresar al sensor (Skolnik, 1990). La Figura 26 muestra el modelo más simple de radar, donde la radiación retro dispersada vuelve al sensor luego de un tiempo t , el cual es proporcional a la distancia recorrida por ella, es decir $2r$ porque se considera la ida y la vuelta de la señal (Masuelli, 2003):

$$t = 2 \frac{r}{c} \quad ; \text{ Donde: } c = \text{velocidad de la luz} \quad (2-6)$$

La **resolución en radar** se obtiene por el rango o ángulo, o ambos. La **resolución en rango** requiere de un amplio ancho de banda, mientras que la **resolución en ángulo o acimut** requiere de grandes antenas (Skolnik, 1990). En un radar convencional como el RAR la resolución en acimut se determina por el ancho angular del haz en la dirección del acimut (CCRS, 2001). En un SLAR la resolución espacial en acimut y en rango están relacionados con las dimensiones de la antena (D y L) (Figura 26) (Masuelli, 2003), por lo que las resoluciones en acimut (δ_{az}) y en rango (δ_{ra}) resultan:

$$\delta_{az} = r \frac{\lambda}{L} \qquad \delta_{ra} = r \frac{\lambda}{D} \qquad (2-7)$$

2.1.3. Radar de apertura sintética SAR

El SAR tiene ventajas únicas sobre sensores ópticos ya que es independiente de la iluminación solar, penetra nubes, y en cierta medida pocos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve, dependiendo de la frecuencia a la que operan. No obstante, en imágenes de radar se debe considerar la complejidad en el procesamiento de los datos y las dificultades en su interpretación (SARMAP, 2008).

El SAR es un radar de dimensiones relativamente pequeño, capaz de obtener imágenes como si hubieran sido adquiridas por una antena mucho mayor. Cada punto en tierra es iluminado varias veces por distintos pulsos (del orden de 1000, ver Figura 26) pero su retorno tendrá amplitudes, frecuencias y fases características que dependerán de la geometría del sensor respecto del punto en tierra y de las propiedades dieléctricas de la superficie (Masuelli, 2003).

En un sistema SAR, la resolución tiene dos dimensiones, una en la dirección del rango (distancia sensor-objetivo) y otra en la dirección del acimut (plataforma de dirección de vuelo) (CCRS, 2001) (SARMAP, 2008), y registra los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria (Chuvienco, 2002). Por el movimiento de la plataforma que avanza hacia adelante (Figura 27), se sintetiza una gran antena virtual al grabar la amplitud y la fase de la señal recibida, y mediante un procesamiento adecuado se adquiere una **resolución en acimut** más fina que depende del largo de la antena sintética y es inversamente proporcional al tamaño de la antena real

(Skolnik, 1990) (CCRS, 2001). En efecto, la mayoría de los satélites usan solo una antena, relativamente pequeña (Skolnik, 1990).

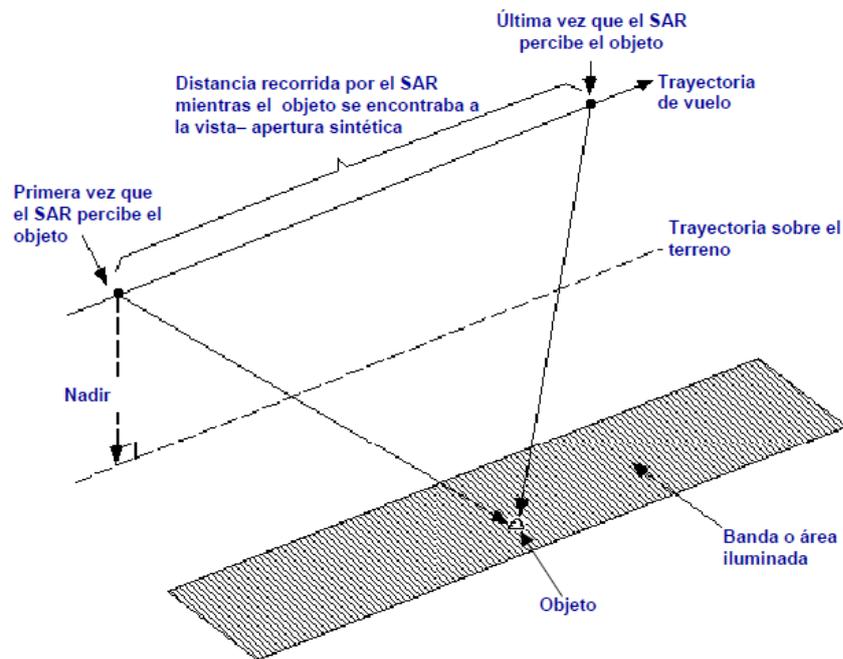


Figura 27: Apertura sintética en el SAR. Fuente: CCRS (2001)

La **resolución en rango** se determina por las características de la señal del radar a lo largo de la trayectoria entre el sensor y la superficie iluminada, y depende de la longitud del pulso transmitido (τ); un pulso corto proporciona mejor resolución (CCRS, 2001). La distancia entre el objeto y la antena cambia desde el extremo más cercano (rango cercano) al más lejano (rango lejano) (Chuvienco, 2002). En un SAR se puede enfocar cada rango separadamente por un ajuste adecuado de las fases de las señales recibidas antes de la suma total, lo que da como resultado una apertura sintética efectiva (Skolnik, 1990).

Mientras más corto sea el pulso, más baja es la energía transmitida y más pobre la **resolución radiométrica**. Para conservar la resolución radiométrica, los SAR generan un pulso amplio con una modulación de frecuencia lineal “**chirp**” (Figura 28) (SARMAP, 2008). El enviar una señal chirp y procesar el eco de retorno mediante un filtro adaptado (matched filter) son las principales ideas en la construcción de una imagen de radar (Lopinto, 2010). Además, debido a que el radar repite la transmisión del pulso chirp a un tiempo de repetición de pulso (*PRT*; por sus siglas en inglés), se producen ecos de repetición de pulsos de frecuencia (*PRF*; por sus siglas en inglés) cada segundo, los cuales van a ser recibidos y almacenados.

$$PRT = \frac{1}{PRF} \quad (2-8)$$

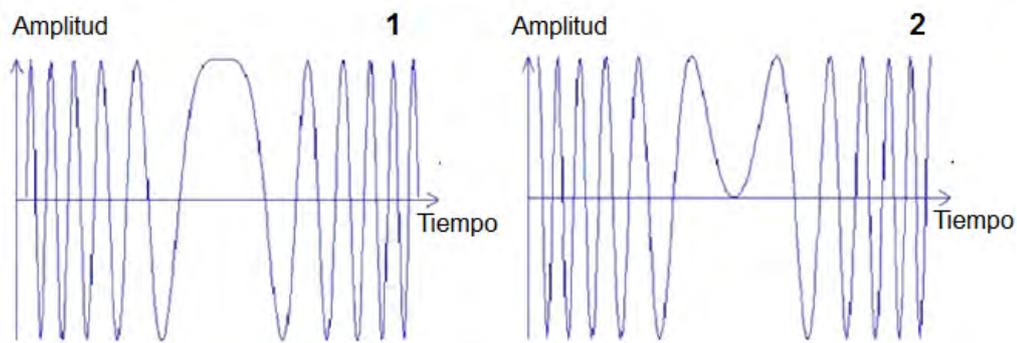


Figura 28: Parte Real (1) e Imaginaria (2) del Chirp. Fuente: Masuelli (2003)

Para aumentar la longitud del pulso es necesario disminuir la frecuencia, lo que implica que haya mayor probabilidad de ruido, esto se soluciona modulando la frecuencia de los pulsos emitidos y recibidos (Chuvienco, 2002). Sandwell (2008) señala que la formación de una imagen SAR comprende una secuencia de procesamiento estándar, en la cual los dos primeros pasos son hechos a bordo del satélite (demodulación y digitalización), mientras que los cuatro pasos restantes (compresión en rango, procesamiento patch, migración del rango y compresión en acimut) son hechos por el usuario utilizando un procesador digital SAR.

En el procesamiento a bordo del satélite, en el paso de la **demodulación** de la onda electromagnética, lo que es de interés es saber el retraso y distorsión de la señal chirp al reflejarse en la superficie de la Tierra. Usando el teorema de “*shift*” (Bracewell, 1978, pg. 108), que es una operación de filtro, se puede separar el valor de la parte del espectro del ancho de banda que contiene el chirp (~15 MHz), caso contrario el registro de la señal de retorno generaría 10 Gbytes de datos cada segundo. El eco de la señal original corresponde a la función $E(t)$ que fue una función estimada real, la cual luego de la operación *shift*/filtro la salida es compleja. En este proceso no existe pérdida de información, y ahora la salida se puede digitalizar a un valor de dos veces el ancho de banda del chirp (~30 MHz).

En el paso de la **digitalización** la señal compleja es digitalizada a 5 bits por pixel, sin embargo digitalizar los datos a 8 bits es más conveniente porque se envía los 3 bits extras a tierra para comprimir los datos antes de la transmisión. Una vez que los datos están en tierra, se los expande a 8 bits por asuntos de programación. Los expertos en el procesamiento se

refieren a las partes real e imaginaria de la señal como los componentes en-fase (I) y cuadratura (Q) (Figura 29):

$$I = \text{en fase} = A \cos \theta \quad (2-9)$$

$$Q = \text{cuadratura} = A \sin \theta \quad (2-10)$$

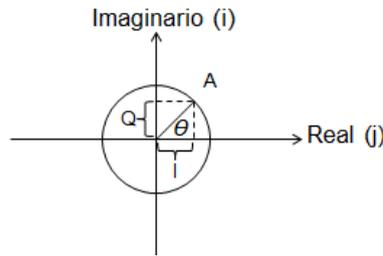


Figura 29: Datos SAR. Fuente: SARMAP (2008)

La amplitud (ecuación 2-11) y fase (ecuación 2-12) de la señal resultan (SARMAP, 2008):

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2-11)$$

$$\tan \theta = \frac{Q}{I} \quad (2-12)$$

Ferretti et al. (2007) señalan que una imagen digital SAR es una matriz de dos dimensiones formada por columnas y filas de píxeles, donde cada pixel está asociado a una pequeña parte de la superficie de la Tierra y tiene resolución de celda. Cada pixel contiene un número complejo que lleva información de amplitud y fase de la señal de retorno de todos los elementos, como pueden ser rocas, vegetación, edificios, etc., contenidos en cada resolución de celda proyectada en el suelo. La amplitud depende más de la rugosidad del suelo que de la composición química de los elementos dispersores en el terreno. Por lo que típicamente las rocas expuestas y área urbana muestran alto valor de amplitud, mientras que superficies planas y suaves muestran bajo valor de amplitud porque la radiación se refleja lejos del radar.

Los archivos de la señal *RAW* contienen filas de 11.644 bytes que representan un único eco de radar, de los cuales los primeros 412 bytes corresponden a cálculo de tiempo de encendido (timing), mientras los restantes 11.232 bytes contienen 5.616 números complejos de los datos de la señal *RAW* (Figura 30) (Sandwell, 2008). Los datos de la señal de retorno o eco, comúnmente conocidos como datos *RAW*, recibidos por el *SAR* están constituidos por el conjunto de ecos complejos recibidos por el radar en dirección en rango (Lopinto, 2010).

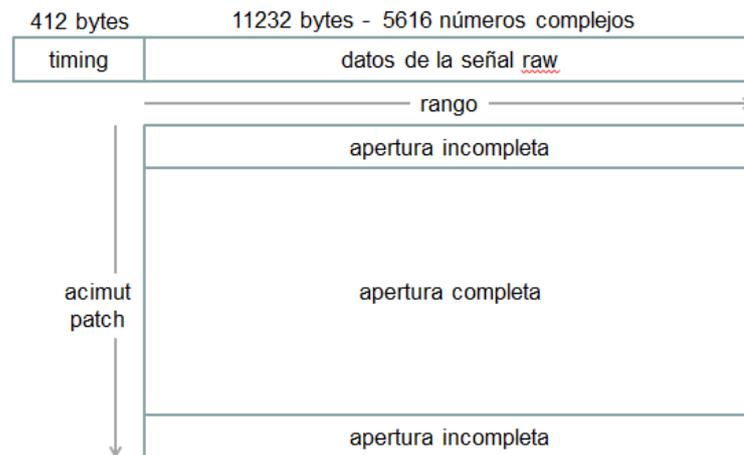


Figura 30: Datos de la señal RAW, Fuente: Sandwell (2008)

El procesador digital *SAR*, a través de un programa de computación, convierte los datos de la señal *RAW* a una imagen *SLC* (*Single Look Complex*). El producto *SLC* es el que tiene información de la fase y por lo tanto es el que se usa en interferometría de radar (Masuelli, 2010b). Para obtener la imagen *SLC* es necesario ejecutar en tierra los siguientes pasos:

Compresión en rango (filtro adaptado): En la compresión en rango, el radar emite una larga frecuencia modulada chirp, el chirp se propaga al suelo donde luego es reflejado al radar, el objetivo en este paso es recuperar la reflectividad compleja a través de la “*deconvolution*” del chirp (Sandwell, 2008). Para realizar la “*deconvolution*” del chirp del dato *RAW* se utilizan filtros adaptados, los cuales reconstruyen la información de cada punto de la tierra a partir de los datos que retornaron al sensor y que fueron medidos y almacenados. Se aplican los filtros para mejorar los dos parámetros de enfoque que son la resolución espacial y la relación señal ruido. A continuación se presenta la resolución espacial para un *SAR* (ecuación 2-13), que no depende de las dimensiones de la antena, sino del ancho de banda en frecuencia, el cual está limitado por la frecuencia portadora. En radar hay dos frecuencias involucradas: (1) la portadora que tiene toda la información de interacción con el medio; y (2) otra señal que está modulada y que tiene una frecuencia mucho más baja, y es esta la que se utiliza para el procesamiento (Masuelli, 2003).

$$\delta x_r = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2-13)$$

El diseño de un *SAR* tiene acceso a un número de grados de libertad que tienen su origen en el hecho de que las señales en almacenamiento pueden ser seleccionadas en rango, lo que permite que diferentes operaciones se puedan desarrollar en la señal a diferentes rangos; una operación importante de este tipo es la **focalización** (Skolnik, 1990). Masuelli (2010a) señala en la Figura 31 el efecto de la operación de **focalización en rango** sobre una escena completa *RAW* (Figura 31-1) y sobre una porción de la misma. Se observa que de una escena con valores sin mayor información se obtiene una imagen con puntos alargados verticalmente (Figura 31-2). Al observar la escena total *RAW* y compararla con la imagen resultante de la focalización en rango queda claro porque se denomina este proceso enfoque.

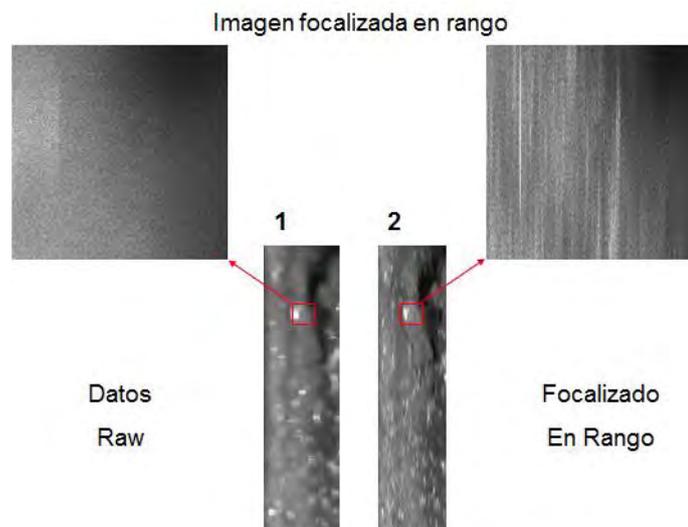


Figura 31: Imagen focalizada en rango. Fuente: Masuelli (2010a)

Compresión en acimut: dado el patrón de iluminación se calcula la forma de la apertura (reflectividad del objetivo). Esto se realiza al generar una segunda frecuencia modulada chirp donde los parámetros del chirp dependen de la velocidad de la nave espacial, del PRF, y del rango absoluto (Sandwell, 2008). La resolución espacial en acimut depende del tamaño de la antena real en acimut (Masuelli, 2010a):

$$\delta_{az} = \frac{L}{2} \quad (2-14)$$

Masuelli (2010a) señala en la Figura 32 el efecto sobre la imagen focalizada en rango (Figura 32-1) al **focalizarla en acimut** (Figura 32-2), claramente se observa que la imagen

está mejor enfocada. En el acercamiento de la zona de la imagen focalizada en acimut se distinguen claramente zonas urbanas, cultivos, etc.

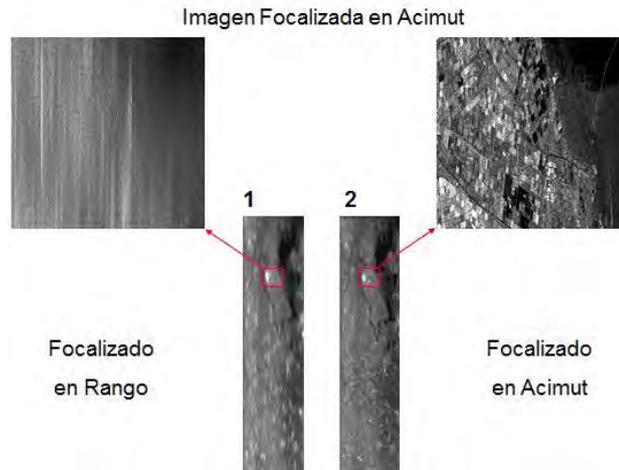


Figura 32: Imagen focalizada en acimut. Fuente: Masuelli (2010a)

2.1.4. Modos de adquisición

Los modos de funcionamiento del *SAR* desde el punto de vista de adquisición de imágenes son (Figura 33):

- *Stripmap*
- *ScanSAR*
- *Spotlight*

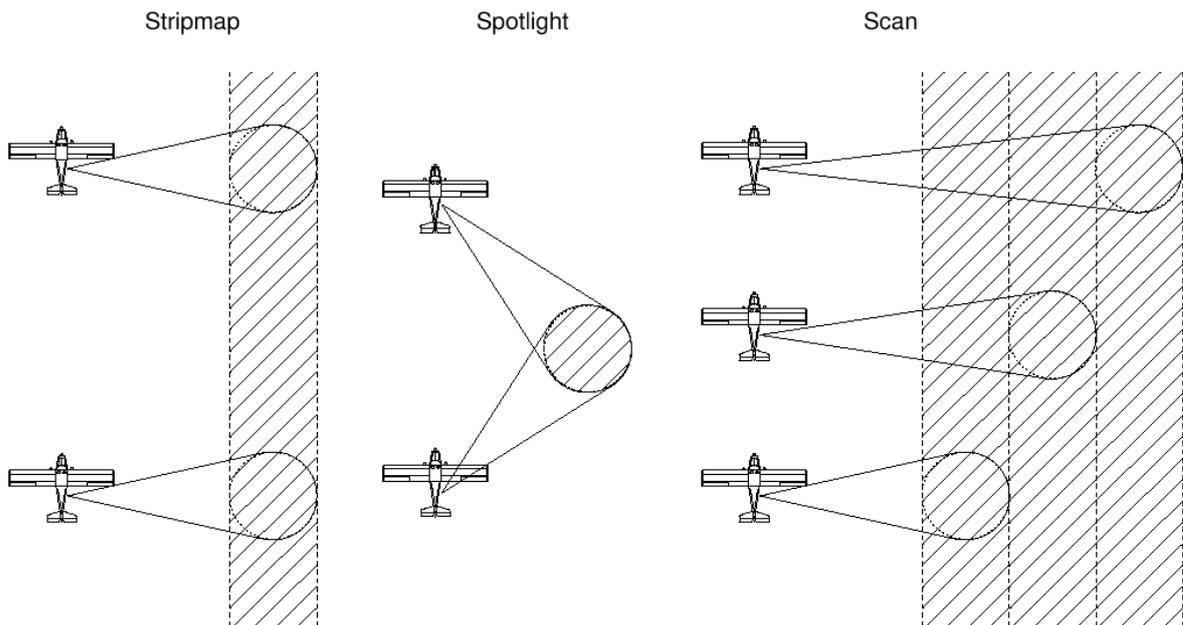


Figura 33: Modos de adquisición de un SAR. Fuente: Masuelli (2003) cita a Schwabisch y Siegmund (2002)

En el Modo *Stripmap* la antena por lo general permite al sistema la flexibilidad de seleccionar un ancho de franja (*swath*) al cambiar el ángulo de incidencia. Este modo es el que más se usa, pero tiene la limitación de tener un ancho de franja estrecho. En los casos de ERS-1/2 y JERS-1 el ancho de la franja es fijo. Mientras que otros sistemas *SAR* como RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed y RISAT-1 se pueden seleccionar diferentes ancho de franja (SARMAP, 2008). La flexibilidad de la antena no es porque se mueve, sino por cómo se desfazan los transmisores del array *SAR* (Massuelli, 2010a).

El Modo *ScanSAR* no tiene la limitación de la franja estrecha del Modo *Stripmap* y permite alcanzar franjas más amplias de longitud por el uso de un pulso de antena electrónicamente orientable en elevación. El área iluminada por cada pulso particular se denomina sub-franja. El principio de *ScanSAR* es compartir el tiempo de operación del radar entre dos o más sub-franjas separadas para obtener una imagen completa (SARMAP, 2008). Debido a que el procesamiento se realiza separadamente sobre cada sub-franja, los pulsos emitidos iluminan un número distinto de veces, así la sub-franja que esté en el centro tendrá muchos más pulsos que las que están en el extremo, produciendo una variación en brillo a lo largo del acimut. Para aplicación de interferometría se procesa cada sub-franja por separado, porque debe existir una alta sincronización en la conmutación de ángulos de elevación para tener un buen producto. En general, no se recomienda este modo para aplicaciones interferométricas (Masuelli (2003) cita a Schwabisch y Siegmund (2002)).

El Modo *Spotlight* permite incrementar la longitud de la antena, la antena de radar apunta e ilumina continuamente hacia la región que está siendo observada (Skolnik, 1990), originando que el ancho de banda del acimut sea más grande, lo que permite explotar para tener una mejor resolución en acimut. Otra característica importante de este modo es que tiene una gama más amplia de ángulos, por lo que se utiliza especialmente para interferometría porque al tener varias imágenes de una misma pasada se disminuyen los problemas de pérdida de coherencia (Masuelli, 2003).

Además, los modos *Spotlight* y *Stripmap* se distinguen por lo siguiente (SARMAP, 2008):

- *Spotlight* brinda una resolución más fina en acimut.
- *Spotlight* puede iluminar una misma escena con múltiples ángulos.

- *Spotlight* ilumina múltiples escenas pequeñas, mientras que *Stripmap* ilumina una franja larga de terreno.

2.1.5. Distorsiones geométricas en las imágenes SAR

Las variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del haz, implican notables deformaciones geométricas en las imágenes de radar. Además, la señal de retorno no solo depende del coeficiente de retro dispersión (σ) del objeto, sino también de su distancia a la antena, por lo que es complejo la interpretación de las imágenes de radar (Chuvieco, 2002).

Los efectos de distorsión geométrica deben considerarse al usar datos *SAR* en investigaciones geológicas, especialmente en inestabilidad de pendiente ya que la pendiente local del terreno (α) influye en la imagen de radar. Colesanti & Wasowski (2006) citan a Monti Guarnieri (2002) e indican los efectos de distorsión geométrica causados por el mecanismo del radar que induce una resolución que depende de la pendiente a lo largo del rango oblicuo (*ground range*).

En la geometría de adquisición de imágenes de radar tiene una gran influencia el **relieve**, que modifica el ángulo local de incidencia. La distorsión del terreno en las imágenes de radar es perpendicular a la trayectoria del vuelo, es decir que los objetos más altos se observan desplazados hacia el sensor (CCRS, 2001). Si la pendiente es menor que el ángulo de incidencia, la imagen ofrece las distancias reales como acortadas, de ahí que las vertientes orientadas hacia la antena aparezcan como inclinadas hacia la dirección de la antena (Chuvieco, 2002).

Otro problema relacionado con el relieve es el efecto de **solapamiento inverso** (*layover*) que se produce cuando el relieve modifica la posición con la que aparecen dos objetos en la imagen, a consecuencia de que sus ecos lleguen a la antena en forma inversa a su posición respecto a la trayectoria. Estos efectos pueden corregirse al usar un modelo digital del terreno. Más complicado es corregir el efecto del relieve cuando deja en sombra las vertientes opuestas a la dirección de observación. Este fenómeno que depende de la altitud del terreno y del ángulo de incidencia implica perder la información de esas laderas, aunque puede compensarse si el satélite está diseñado para pasar por el mismo lugar con dos ángulos distintos (pasadas ascendente y descendente), como ocurre con el europeo ERS (Chuvieco, 2002).

Sobre la **Geometría en Rango**, la posición de un objeto está en función del tiempo de tránsito del pulso entre el sensor y ese objeto, por lo que su posición es proporcional a la distancia sensor-objeto. La proyección de un objeto específico en LOS (*Line of Sight*) es proporcional a la distancia del sensor y causa compresión no lineal de la superficie iluminada. La Figura 34 indica la proyección (a' , b' , c') en rango de los objetos iluminados: a , b y c . Se visualiza que diferencias pequeñas en altitud pueden causar grandes distorsiones, lo que lleva a tener las distorsiones de escorzo (*foreshortening*), inversión por relieve (*layover*) y sombra (*shadowing*) (SARMAP, 2008).

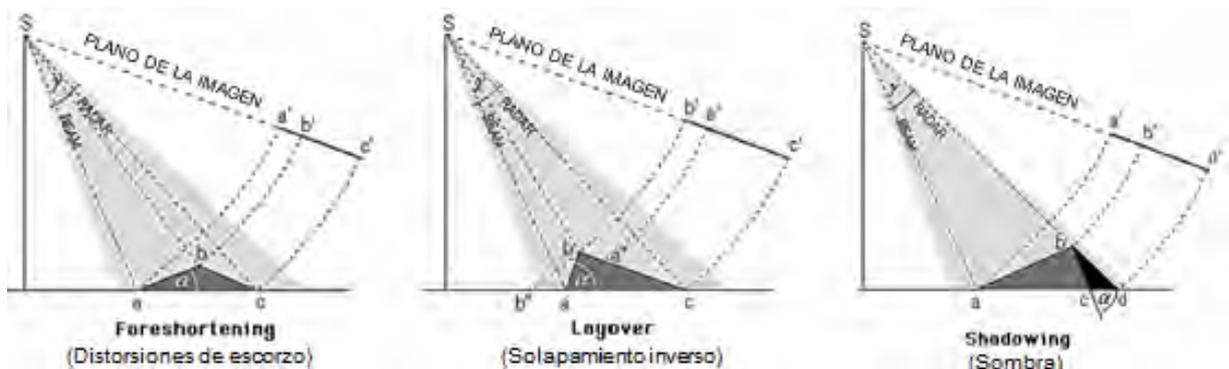


Figura 34: Geometría en Rango. Fuente: SARMAP (2008)

El efecto de **escorzo** ocurre cuando la pendiente local del terreno (α) está frente al sensor ($0 < \alpha < \theta$), entonces la imagen se comprime en pocos píxeles y presenta reflectividad brillante (SARMAP, 2008). El escorzo en las imágenes de radar consiste en la apariencia de compresión de las características de la escena que están inclinadas hacia el radar. El declive afectado por el efecto de escorzo en una imagen tiene una apariencia más brillante (CCRS 2001).

El efecto de **inversión por relieve** ocurre cuando la inclinación excede θ , causando que la parte superior e inferior de la pendiente estén invertidos en la imagen SAR (SARMAP, 2008). La inversión por relieve ocurre cuando la energía reflejada por la porción superior de un objeto se recibe antes que la que proviene de la porción inferior. En el procesamiento de la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada o “puesta encima” de su base (CCRS, 2001).

La región de la superficie del terreno que no se ilumina por el radar se representa como **sombra** en la imagen, y las sombras aparecen con tonos muy oscuros (CCRS, 2001). El efecto sombra causa que el área no esté iluminada completamente por el sensor debido a

que la pendiente está contraria al sensor $(-(90 - \theta) < \alpha < 0)$, es un caso extremo de escorzo donde α es más grande que θ . Por lo tanto, cuando se incrementa la distancia horizontal, la distancia sensor-objeto disminuye (SARMAP, 2008).

En áreas montañosas las imágenes SAR tienen una distorsión geométrica muy marcada y desde el punto de vista radiométrico, las pendientes con frente al sensor SAR aparecen muy brillantes (Figura 35). Como la antena de ERS mira a la derecha, una pendiente principalmente orientada al Oeste podría tener el efecto distorsiones de escorzo en órbita ascendente, por lo tanto imágenes con órbita descendente serían lo recomendado a usar. El conjunto de datos ERS del presente trabajo corresponde a escenas adquiridas con dirección de órbita descendente.

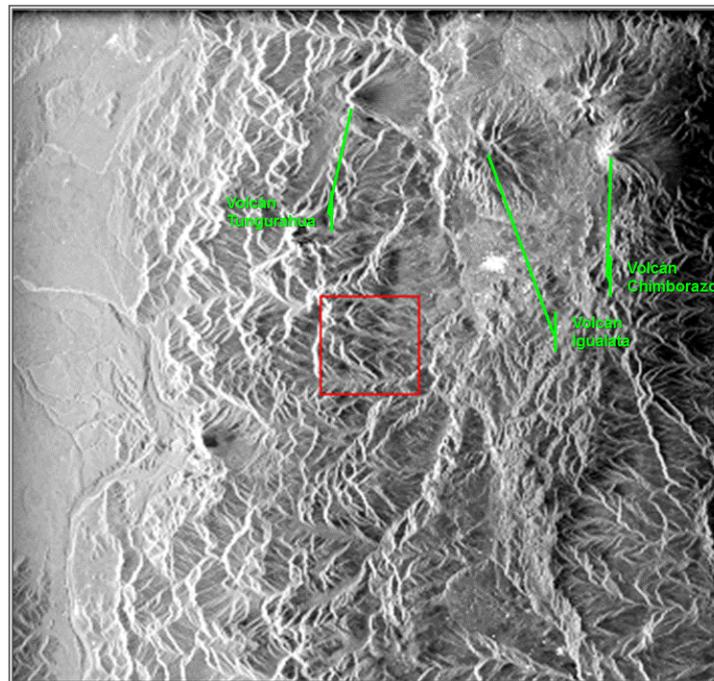


Figura 35: Imagen ERS-1 enfocada a 16 vistas de fecha de adquisición 19981217, con dirección de órbita descendente. Centro del marco: 3645. Track: 254. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

En topografía más pronunciada o en el caso de ángulos de incidencia muy pequeños como ERS-1/2 el efecto de escorzo es peor. El efecto de escorzo se puede corregir en las calibraciones geométrica y radiométrica con la disponibilidad de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución espacial. Mientras que los efectos de inversión por relieve y sombra no pueden ser corregidos porque esas áreas no tienen información temática (SARMAP, 2008).

Sobre la **Geometría en Acimut**, la frecuencia de la señal reflejada depende de la velocidad relativa entre el sensor y el objetivo. Parte de la señal de objetos que están frente al sensor se registran con una frecuencia mucho más alta que la emitida porque la antena se mueve a través del objetivo.

A continuación un ejemplo para determinar la resolución en rango proyectada en terreno (*ground range*). La resolución de ERS es alrededor de $\Delta_{az}=5$ m. en dirección en acimut, y $\Delta_{sr}=9,6$ m. dirección en rango (*LOS*). Dependiendo de la topografía local, la resolución del rango oblicuo (Δ_{gr}) es:

$$\Delta_{gr} = \frac{\Delta_{sr}}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (2-15)$$

Donde α es positivo para pendientes donde su frente mira al sensor radar, y negativo para pendientes opuestas al sensor. Para terrenos planos $\alpha=0^\circ$ a rango medio $\theta=23^\circ$, la resolución del rango oblicuo es alrededor de 25 m. La resolución no se debe confundir con el tamaño actual del píxel que es ligeramente fino. Por ejemplo, se tiene 4 m. en acimut, 8 m. en *LOS*, y por lo tanto 20 m. en rango oblicuo (terreno plano en rango medio) (Colesanti Carlo 2006). Las distorsiones en rango son amplias, causadas principalmente por variaciones en la topografía, mientras que las distorsiones en acimut son más pequeñas pero a su vez más complejas.

2.2. PLATAFORMAS SATELITALES

A continuación se describen las plataformas satelitales ALOS y ERS, cuyas imágenes SAR fueron procesadas para obtener productos interferométricos.

2.2.1. Advanced Land Observing Satellite - ALOS

La banda de frecuencia L de ALOS es recomendada para los radares de vigilancia aérea. En estas frecuencias es posible lograr un buen rendimiento de indicación de objetivos móviles y obtener potencia alta con antenas de ancho de haz estrecho. El ruido externo es bajo. La banda L también es adecuada para radares grandes que deben detectar objetivos extraterrestres a gran distancia (Skolnik Merrill I. 1990).

El programa satelital Japonés de observación de la Tierra consiste en dos series de satélites conformados de acuerdo al objetivo de observación. La primera serie de satélites está principalmente diseñada para observaciones atmosféricas y marinas, mientras que la segunda serie para observaciones del suelo. El satélite “*Advanced Land Observing Satellite ALOS*” es el sucesor del satélite “*Japanese Earth Resources Satellite-1 JERS-1*” (banda L, polarización HH, 35° ángulo off-nadir) en operación durante 1992-1998. ALOS fue exitosamente lanzado desde el Centro Espacial de Tanegashima-Japón en enero/24/2006 (Rosenqvist et al., 2004), (JAXA, 2008). En mayo del 2011, JAXA anunció la terminación de la vida útil del satélite ALOS y se anuncia para el 2013 el lanzamiento de ALOS-2 con el mejoramiento de sus modos de adquisición, mejor resolución, más ángulos de incidencia, etc.

ALOS utiliza técnicas avanzadas de observación del suelo con los siguientes objetivos:

1. Cartografiar y así proveer mapas para Japón y países contenidos en la región Asia-Pacífico.
2. Realizar observaciones regionales para fomentar el equilibrio entre el planeta y el desarrollo.
3. Monitorear desastres alrededor del mundo.
4. Investigar recursos naturales.
5. Desarrollar tecnología para futuros satélites de observación de la Tierra.

ALOS (Figura 36) está compuesto por tres sistemas independientes para la observación de la Tierra, que adquieren simultáneamente imágenes ópticas y de radar con diversas resoluciones y coberturas. A continuación se indican los sensores ópticos PRISM y AVNIR-2, y el sensor radar PALSAR:

- ***Panchromatic Remote-sensing Instrument Stereo Mapping (PRISM)***: por estereoscopia este instrumento mide la elevación precisa del suelo. El sensor tiene una cámara pancromática, la longitud de onda comprende 0,52~0,77 μm , la resolución espacial es 2,5 m.
- ***Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2)***: permite observar lo que cubre la superficie del suelo. El sensor es multispectral de cuatro bandas, cuyas longitudes de ondas corresponden a los rangos 0,42~0,5 μm (banda 1), 0,52~0,60 μm

(banda 2), 0,61~0,69 μm (banda 3) y 0,76~0,89 μm (banda 4). La resolución espacial corresponde a 10 m.

- *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)*: permite observar el suelo durante el día-noche y en todos los climas.

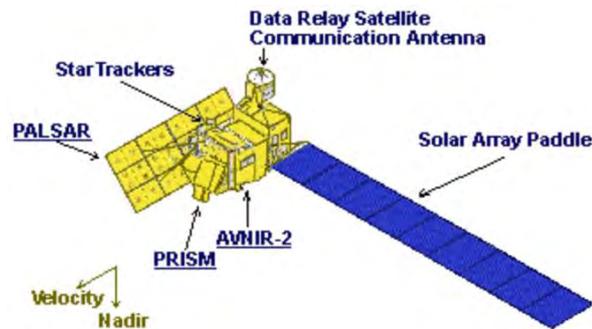


Figura 36: Satélite “Advanced Land Observing Satellite, ALOS”. Fuentes: (JAXA, 2011), Rosenqvist et al. (2004)

La Tabla 6 muestra las principales especificaciones del satélite ALOS:

| | |
|-----------------------------------|--|
| Fecha de lanzamiento | Enero 24, 2006 |
| Vehículo de lanzamiento | H-IIA |
| Sitio del lanzamiento | Centro Espacial Tanegashima |
| Masa de la nave | 4 toneladas aproximadamente |
| Poder generado | 7 kW (fin de sus funciones) |
| Diseño en funcionamiento | 3-5 años (hasta 2011) |
| Orbita | Sincronizada con el sol, sub recurrente |
| | Ciclo completo de repetición: 46 días |
| | Sub ciclo: 2 días |
| | Altitud: 691.65 km (en el Ecuador) |
| Inclinación: 98.16° | |
| Pasada de tiempo en Ecuador | ~10.30 (descendente); ~22.30 (ascendente) |
| Precisión de posicionamiento | 1 m (fuera de línea) |
| Velocidad de transmisión de datos | 240 Mbps (DRTS, via Data Relay Technology Satellite) 120 Mbps (estación de transferencia directa) |
| Registadores de vuelo | Grabadora de estado sólido (90 Gbytes) |

Tabla 6: Principales especificaciones de ALOS. Fuentes: JAXA (2008), JAXA (2011), Rosenqvist et al. (2004)

PALSAR (Figura 37) es un SAR que usa la frecuencia de la banda L para observar el suelo durante el día-noche sin la interrupción de las nubes, capaz de adquirir datos de hasta 10 m de resolución con ángulos de incidencia entre 20° y 55°. El desarrollo del sensor es un proyecto conjunto entre la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa “*Japan Aerospace Exploration Agency JAXA*” y la Organización de Observación de Recursos Japoneses “*Japan Resources Observation System Organization JAROS*”.

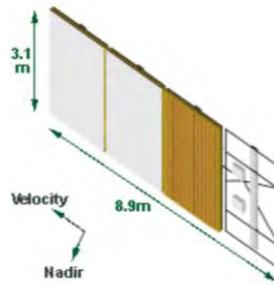


Figura 37: Sensor PALSAR. Fuente: JAXA (2011)

PALSAR es un instrumento full polarimétrico que opera en los siguientes modos (JAXA, 2008):

- modo fino con una sola polarización (FBS)
- modo fino en doble polarización (FBD)
- modo Scan SAR (SL Scan SAR)
- modo fino de Polarimetría (P Fine Polarimetría)

La antena de PALSAR consiste de 80 T/R módulos en 4 segmentos, con un tamaño de 3,1 x 8,9 m cuando se despliega (Figura 38). Como resultado del tamaño de antena relativamente pequeña, de la altitud en órbita y del amplio ancho de banda Doppler, la frecuencia de repetición de pulso (PRF) varía (1500-2500 Hz) durante la órbita. PALSAR puede cambiar el ángulo off-nadir en el rango de 9,7-50,8°. Básicamente observa con un ángulo off-nadir de 34,3°, donde la resolución espacial es 10 m. para modo de alta resolución.



Figura 38: Antena de PALSAR durante una prueba de desarrollo. Fuente: Rosenqvist et al. (2004)

La Figura 39 muestra un concepto de observación de PALSAR, mientras que la Figura 40 muestra sus características de observación. La Tabla 7 señala las características principales del instrumento.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

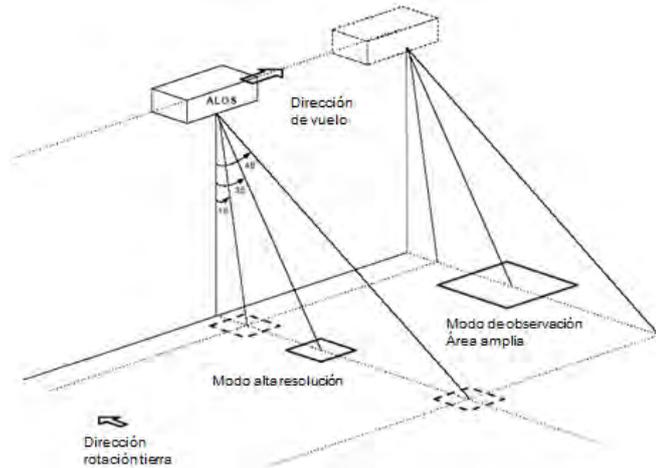


Figura 39: Concepto de observación de PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011)

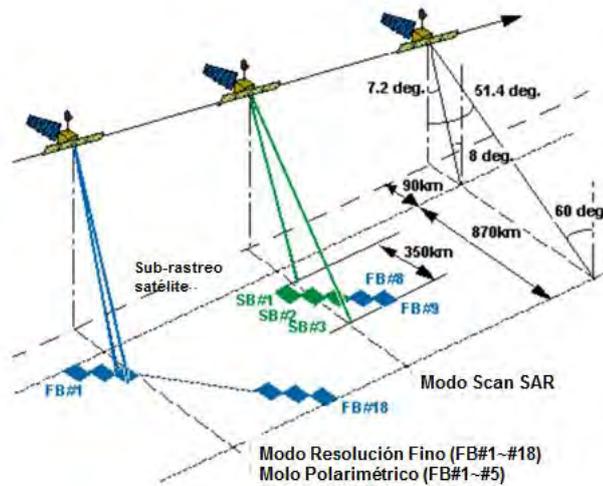


Figura 40: Características de observación de PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011)

| Características | Modo de observación | | | |
|-------------------------------------|--|---------------|--------------------|--------------------|
| | Modo fino | | Modo ScanSAR | Modo Polarimétrico |
| Frecuencia | 1270 MHz, banda L (23.6 cm) | | | |
| Ancho de banda Chirp | 28MHz | 14MHz | 14MHz, 28MHz | 14MHz |
| Polarización | HH o VV | HH+HV o VV+VH | HH o VV | HH+HV + VV+VH |
| Angulo incidencia | 8-60° | 8-60° | 18-43° | 8-30° |
| Resolución en Rango | 7-44 m | 14-88 m | 100 m (multilook) | 24-89 m |
| Ancho de observación (Swath) | 40-70 Km | 40-70 Km | 250-350 Km | 20-65 Km |
| Longitud de Bit | 5 bits | 5 bits | 5 bits | 3 o 5 bits |
| Velocidad de datos | 240 Mbps | 240 Mbps | 120 Mbps, 240 Mbps | 240 Mbps |
| NE (Noise Equivalent) sigma zero *2 | < -23 dB (Swath 70 km) < -25 dB (Swath 60 km) | | < -25 dB | < -29 dB |
| Precisión radiométrica | Precisión relativa dentro de imagen: 1 dB Precisión relativa dentro de órbita: 1.5 dB | | | |
| PRF | 1500 – 2500 Hz | | | |

Tabla 7: Características principales del instrumento PALSAR. Fuentes: Rosenqvist et al. (2004), JAXA (2011)

2.2.1.1. Productos PALSAR

A continuación se muestran características del instrumento PALSAR (Tabla 8) en el modo de observación fino, que corresponde a las imágenes de radar procesadas.

| Características | | Nivel | | | Observ. |
|---|---|---|---|--|----------|
| | | 1.0 | 1.1 | 1.5 | |
| Definición de los niveles de los productos estándar de PALSAR | Definición | Reconstruido, datos de la señal sin procesar con coeficientes de corrección radiométrica y geométrica | Comprimido en rango y acimut Datos complejos en LOS | Imagen proyectada procesada multi-look a coordenadas de mapa. Latitud y longitud del producto son calculados sin considerar la altitud. Opciones G y R | |
| | Nota | Archivos de imágenes separados por cada polarización (HH, VV, HV, VH) | Solo es seleccionable una de las opciones G y R. Archivos de imágenes separados por cada polarización (HH, VV, HV, VH) | | |
| Niveles de procesamiento en modo de observación fino | Una polarización | ✓ | ✓ | ✓ | 18 beams |
| | Doble polarización | ✓ | ✓ | ✓ | 18 beams |
| Nivel de procesamiento y sus tipos de datos | Formato | 8 bit(I) + 8 bit(Q) | 32 bit(I) + 32 bit(Q) (*1) | 16 bit entero sin signo (*2) | |
| | Coordenadas | - | Coordenada en LOS | Coordenada de mapa | |
| Espaciamiento del píxel (píxel spacing) en modo de observación fino | Una polarización | | | 6.25 m (2 vistas) 12.5 m (4 vistas) | |
| | Doble polarización | | | 12.5 m (4 vistas) | |
| Tamaño de la imagen en modo de observación fino | Dirección rango | Longitud de la señal de ingreso (corresponde al ancho de la señal de la puerta) | Longitud de la señal válida (corresponde al ancho de la señal de la puerta-ancho del pulso) | -Ángulo off-nadir 9.9°-43.4°: 70 km -Ángulo off-nadir 45.2°-50.0°: 50 km -Ángulo off-nadir 50.8°: 40 km | |
| | Dirección acimut | 16.4 sec (correspondiente a 110 km) | 51 a 79 km | Tamaño de imagen en dirección acimut varía de acuerdo a PRF y ángulo off-nadir. 51 a 79 km | |
| Resumen de parámetros de procesamiento | Proyección de mapa | - | - | UTM, PS, MER, LCC (*5) | |
| | "Framing" (*3) | - | - | G, R | |
| | Dirección de imagen (*4) | - | - | Mapa | |
| | "Resampling" | - | - | NN, BL, CC | |
| | Coordenada geodética (modelo de Tierra) | - | - | ITRF97 (GRS80) | |
| | "Scene Shift" | -5 a 4 | -5 a 4 | -5 a 4 | |
| | Función de ventana | - | Rectangular | Rectangular | |
| | Número de multi-vistas | - | 1 | Depende del modo de observación | |
| Espaciamiento del píxel | - | - | Depende del modo de observación y número de multi-vistas | | |
| (*1) I y Q are datos reales basado en IEEE. Byte order es Big Endian (*2) Byte order es Big Endian (*3) G: geo-codificado, R: geo-referenciado (*4) Válido en el caso de Geocoded (*5) UTM o PS en modo de observación fino | | | | | |

Tabla 8: Definiciones de productos de datos estándar de PALSAR en el modo de observación fino.

Fuente: JAXA (2008)

El formato del producto PALSAR se basa en las normativas del Comité de Satélites de Observación de la Tierra CEOS (2011), para el formato de datos SAR.

El volumen imagen existe como un volumen lógico y está compuesto por los siguientes cuatro clases de archivos, la Tabla 9 muestra la composición de registros de cada archivo:

- 1 archivo “*Volume Directory*” (VOL-SceneID-ProductID): almacena los formatos de los registros del descriptor del volumen, del archivo puntero y del texto.
- 1 archivo “*SAR Leader*” (LED-SceneID-ProductID): almacena los formatos de los registros de tipos de datos relacionados a la imagen.
- Algunos archivos imagen “*SAR Data*” (IMG-XX-SceneID-ProductID): almacena los formatos de los registros de la imagen. La cantidad de archivos imagen depende del número de polarizaciones.
- 1 archivo “*SAR Trailer*” (TRL-SceneID-ProductID): almacena información final relacionada a la imagen.

| Archivo/nombre del registro | Nivel de procesamiento | | |
|---------------------------------------|------------------------|-----|-----|
| | 1.0 | 1.1 | 1.5 |
| Archivo “Volume directory”: | | | |
| 1. descriptor del volumen | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2. puntero del archivo | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3. texto | ✓ | ✓ | ✓ |
| Archivo “SAR leader”: | | | |
| 1. descriptor del archivo | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2. resumen del conjunto de datos | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3. datos de proyección de mapa | - | - | ✓ |
| 4. datos de posición de plataforma | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5. datos de altitud | ✓ | ✓ | ✓ |
| 6. datos radiométricos | - | ✓ | ✓ |
| 7. resumen de la calidad de datos | - | ✓ | ✓ |
| 8. datos de calibración | ✓ | - | - |
| 9. datos relacionados a la facilidad | ✓ | ✓ | ✓ |
| Archivo “SAR Image”: | | | |
| 1. descriptor del archivo | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2. datos de la señal | ✓ | ✓ | - |
| 3 datos procesados | - | - | ✓ |
| Archivo “Trailer”: | | | |
| 1. descriptor del archivo | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2. datos de imagen de baja resolución | - | ✓ | ✓ |

Tabla 9: Composición de registros de los archivos del volumen imagen en ALOS PALSAR. Fuente: JAXA (2008)

2.2.2. European Remote Sensing Satellite - ERS

En esta frecuencia se puede encontrar radares de precisión de largo alcance usados para el rastreo preciso de misiles, así como radares meteorológicos de mediano alcance (Skolnik, 1990).

La serie de satélites “*European Remote Sensing Satellite ERS*” (Figura 41), a cargo de la Agencia Espacial Europea ESA (*European Space Agency*), se inició con el lanzamiento de ERS-1 el 17/julio/1991, y en septiembre del mismo año se cumplió la validación de sus capacidades interferométricos (Ferretti et al., 2007), y tuvo continuidad en ERS-2 con el lanzamiento del 21/abril/ 1995. ERS-2 continuó con sus operaciones aunque con una disminución en la exactitud de control de altitud debido a una falla de giro que ocurrió en enero del 2001 (Ferretti et al., 2007). Poco tiempo después del lanzamiento de ERS-2, ESA decidió enlazar los dos satélites en la primera “Misión Tandem”, la cual tuvo una duración de nueve meses. Durante éste tiempo la misión ofreció una oportunidad única de observar cambios en un periodo de tiempo muy corto, porque ambos satélites orbitaban la Tierra con una diferencia de 24 horas. Lamentablemente, en marzo del 2000 por falla computacional ERS-1 terminó sus operaciones (Ferretti et al., 2007).

A finales de 1999, los giroscopios en ERS-2 fallaron, por lo que fue difícil controlar el ángulo de lado (squint angle) de la nave espacial. Datos adquiridos luego de esta fecha pueden tener el centroide Doppler fuera del rango aceptable y ser menos útiles para interferometría (Sandwell, 2008). De acuerdo al sitio de la ESA (2011), debido a la terminación de la vida útil del satélite ERS-2, gradualmente se está disminuyendo la altitud de su órbita hasta llegar aproximadamente a 550 Km, para reducir al mínimo el riesgo de colisión con otros satélites y habilitar que el satélite ingrese a la atmósfera terrestre y empiece su fusión. La destrucción ocurre luego de 25 años de su funcionamiento.



Figura 41: Satélite “*European Remote Sensing Satellite, ERS*”. Fuente: ESA (2011)

De acuerdo al Instituto Delft para la Investigación Espacial Orientada a la Tierra (Scharroo, 2011a), ERS-1 y ERS-2 tienen fases de misiones, donde las fases de misiones de ERS-1 son las siguientes:

| | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Fase A: Puesta en Fase: | 25/julio/1991 – 10/diciembre/1991 |
| Fase B: Fase de Hielo: | 28/diciembre/1991 – 30/marzo/1992 |
| Fase R: Modo de Campaña Roll Tilt: | 4/abril/1992 – 13/abril/1992 |
| Fase C: Fase Multidisciplinaria: | 14/abril/1992 – 21/diciembre/1993 |
| Fase D: Segunda Fase de Hielo: | 23/diciembre/1993 – 10/abril/1994 |
| Fase E: Primera Fase Geodésica: | 10/abril/1994 – 28/septiembre/1994 |
| Fase F: Primera Fase Geodésica: | 28/septiembre/1994 – 21/marzo/1995 |
| Fase G: Fase Tandem: | 21/marzo/1995 – 5/junio/1996 |

ERS-2 tiene solamente la fase de misión A:

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Fase A: Fase Multidisciplinaria: | 29/abril/1996 - 2001 |
|----------------------------------|----------------------|

A escala regional, a partir de la detección automática o semiautomática de imágenes ERS se realizan aplicaciones de vigilancia en las costas, contaminación marina y cambios de uso del suelo. Sus principales aplicaciones se enfocan en el impacto de actividades humanas sobre el medio ambiente y el monitoreo de desastres naturales como inundaciones severas o terremotos (ESA).

La Figura 42 muestra la geometría de adquisición de ERS y sus principales parámetros como son el ángulo de incidencia (θ) y el ángulo off-nadir.

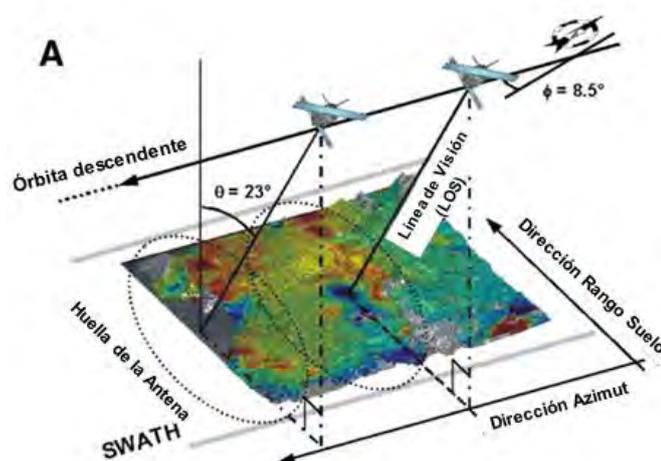


Figura 42: Geometría de adquisición de ERS. Fuente: Colesanti y Wasowski (2006)

En su modo principal de adquisición, ERS tiene una cobertura de re-visita de 35 días. ERS-2 opera en polarización vertical (VV) en banda C (frecuencia 5,3 GHz). Para procesamiento de imágenes SAR, ERS-2 es compatible con ERS-1. Las escenas ERS cubren aproximadamente un área de 100 x 100 Km (Colesanti y Wasowsky, 2006). Para sensores SAR como ERS-1/2 y ENVISAT ASAR que orbitan alrededor de 900 Km, huella cubierta por un solo pulso transmitido es alrededor de 5 Km de longitud en dirección acimut (SARMAP 2008).

La órbita de ERS-2 es elíptica, está sincronizada con el sol a una altitud aproximada de 800 Km y con 98° de inclinación. ERS da una vuelta completa al planeta una vez cada 100 minutos (NASA, 2011), (ESA, 2011). Las órbitas de adquisición de ERS son ascendentes y descendentes. En terrenos planos, el ángulo de incidencia (θ) que varía desde 19° en rango cercano, a 26° en rango lejano, es un poco más grande que el ángulo off-nadir debido a la curvatura de la superficie Terrestre (Colesanti Carlo 2006).

ERS está compuesto de varios instrumentos que permiten manejar un flujo continuo de información de la superficie de los océanos y emersión del suelo (NASA). A continuación se indican los instrumentos:

- SAR – Radar de Apertura Sintética
- SCAT – *Wind Scatterrometer*
- RA – Altimetro de radar (*Radar Altimeter*)
- ATSR – Radiómetro de Exploración (*Along-Track Scanning Radiometer*)
- *Microwave Sounder*
- GOME – Experimento de monitoreo global del ozono (*Global Ozon Monitoring Experiment*)
- PRARE – *Precise Range and Range-Rate Equipment*
- LRR – *Laser Retro-Reflector*

ERS-1 consiste de dos sensores radar y un explorador de infrarrojo térmico. El equipo más importante es el **instrumento activo de micro-ondas** (AMI, por sus siglas en inglés) que incluye un radar de imágenes y un dispersómetro de viento. El radar de imágenes se utiliza en modo imagen, trabajando en banda C (5,3 GHz), polarización vertical semejante, con una resolución espacial de 26 m en rango y entre 6 y 30 m en acimut, y un área cubierta de 102 Km, el ángulo medio de incidencia es 23° (Chuvienco, 2002). Sin embargo, para algunas

aplicaciones experimentales varía a más de 35° (CRISP, 2011). El instrumento **altímetro de radar**, mide con precisión variaciones en la altura del satélite sobre el nivel del mar y hielo. El **radiómetro de exploración** construye imágenes termales detalladas de mares y océanos a partir de mediciones de temperatura de la superficie (NASA, 2011). ERS-1 y ERS-2 tienen idéntico diseño, con la diferencia de que ERS-2 incluye el nuevo instrumento GOME, diseñado para monitorear niveles de ozono en la atmósfera y proporciona medidas del contenido en la atmósfera de diversos gases (ozono, dióxido de nitrógeno, oxígeno, etc.) (NASA, 2011), (ESA, 2011) (Chuvieco, 2002). Los parámetros del modo de imagen SAR se indican a continuación en la Tabla 10:

| | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Tamaño de la antena SAR | 10 m de longitud, 1 metro de ancho |
| Frecuencia | 5.3 GHz (banda C) |
| Ancho de banda | 15.55 MHz |
| Rango PRF | 1640-1720 Hz |
| Duración del pulso largo | 37.1 microsegundos |
| Longitud del pulso comprimido | 64 ns |
| Polarización | Vertical lineal |
| I and Q quantisation | 5 bits para OGRC, 6 bits para OBRC |
| Resolución radiométrica | 2.5 dB a sigma-nought = -18 dB |
| Ancho de la franja | 80.4 Km |
| Ángulo de incidencia | 23 ° |
| Velocidad de transmisión de datos | 105 Mbps |

Tabla 10: Principales parámetros del modo de imagen SAR de ERS. Fuente: CRISP (2011)

2.3. INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA - INSAR

Los SAR graban la amplitud y la fase del eco recibido, donde la amplitud y la fase se usan durante el proceso de focalización para construir la imagen. Según Colesanti y Wasowski (2006) la imagen enfocada SAR es una matriz de valores complejos, donde la *amplitud* es un mapa de la reflectividad del suelo del área escaneada y la *fase* depende de la reflectividad local y de la distancia sensor-objetivo (slant range o dirección de línea de vista - LOS “*Line Of Sight direction*”). La sensibilidad de la fase respecto a la distancia sensor-objetivo es muy alta ya que la fase es la diferencia de dos formas de camino de la longitud de onda (λ), es decir los caminos sensor-objetivo y objetivo-sensor. De acuerdo a Hanssen (2001), en las aplicaciones interferométricas la observación principal es la señal de fase relativa de dos dimensiones, que es el módulo 2π de la señal de fase absoluta que es desconocida.

La Figura 43-A muestra que la medida de distancia sensor-objetivo no puede distinguir los puntos P' y P en el mismo rango oblicuo, pero desplazados horizontalmente sobre el

terreno (*ground range*). Este problema se puede resolver por la observación de las diferencias angulares el puntos P' al cuerpo de referencia y el punto P a la altura H_p sobre este cuerpo de referencia, con el mismo rango R_1 al sensor. Por lo expuesto, interferometría de radar de apertura sintética InSAR resulta por la observación de ambos puntos a partir de una geometría ligeramente diferente (Figura 43-B) (Hanssen, 2001).

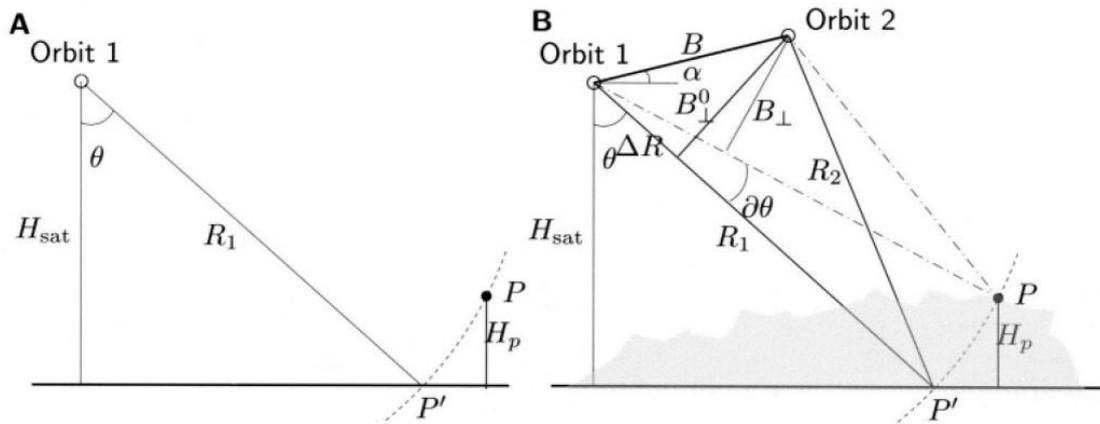


Figura 43: Pasada única y configuración interferométrica para una altura H_p . (A) la direncia entre el punto P' en la superficie de referencia ($H_p = 0$) y el punto P en el mismo rango pero a altura H_p . (B) configuración interferométrica. Fuente: Hanssen (2001)

La distancia efectiva entre los dos sensores, medida perpendicularmente a la dirección de la vista, se la conoce como **línea de base efectiva o perpendicular (B_{\perp})**. Debido a que el instrumento no es capaz de medir directamente las diferencias angulares pequeñas, esta información se deriva de las medidas de distancia entre los sensores y la resolución de celda en Tierra, al aplicar algoritmos simples indicados en la Figura 43-B.

La observación de fase para una única celda de resolución puede considerarse como la sumatoria de dos contribuciones: la fase proporcional a la distancia y la fase debido a las características de dispersión de la celda de resolución. Aunque el componente de la fase de dispersión no se puede predecir, este es una cantidad determinística, por ejemplo si la medida de la fase se repetiría exactamente bajo las mismas condiciones, se produciría el mismo resultado, por lo que bajo estas circunstancias se indica que la formación de las imágenes es coherente. El **grado de coherencia** es una medida directa de la similitud entre las dos observaciones. Como consecuencia la diferencia de fase entre los dos sensores para un sistema coherente solo depende de la diferencia en rango. En la práctica este método exige alta demanda en la configuración geométrica (parámetro de la base de línea espacial) y en el procesamiento interferométrico del dato SAR (Hanssen, 2001).

Usando la configuración interferométrica (Figura 43-B) resultan las relaciones físicas y geométricas entre las dos fases de observación para obtener la altura topográfica y estimar la deformación de la superficie. Ambas imágenes SAR están compuestas de una grilla de valores complejos denominados y_1 y y_2 , los cuales se descomponen en los componentes de amplitud (y_1) y fase (y_2) usando (Hanssen, 2001):

$$\begin{aligned} y_1 &= |y_1| \exp(j\psi_1) \\ y_2 &= |y_2| \exp(j\psi_2) \end{aligned} \quad (2-16)$$

Después de alinear y re muestrear la grilla y_2 a sus ubicaciones correspondientes en la grilla y_1 , un interferograma complejo se construye por la multiplicación compleja de dos veces los pixeles correspondientes en ambos datos:

$$v = y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(j(\psi_1 - \psi_2)) \quad (2-17)$$

El principio básico de interferometría se fundamenta en el hecho de que la fase de imágenes SAR es una medida ambigua (módulo -2π) de la distancia sensor-objetivo. Las variaciones de distancia se determinan al calcular en un píxel y su píxel base la diferencia de fase (fase interferométrica) relativa en dos imágenes SAR. El cálculo se realiza por el producto píxel por píxel de la imagen de referencia denominada “maestra” (*master - IM*) por el complejo conjugado de la imagen secundaria denominada “esclava” (*slave - IS*).

$$IM \cdot IS^* = A_M e^{-i\phi_M} \cdot A_S e^{-i\phi_S} = A_M A_S e^{i(\phi_S - \phi_M)} \quad (2-18)$$

Cada píxel de la imagen SAR es la suma coherente de todos los elementos que emiten ecos dentro de cada celda de resolución. Por lo que cada elemento contribuye con su propia reflectividad compleja (amplitud y fase) y su distancia individual al sensor. El supuesto básico para llevar a cabo mediciones interferométricas se conoce como ausencia de decorrelación o **coherencia completa**, la cual consiste en que mientras la reflectividad compleja del píxel en su conjunto (reflectividad de todos los elementos y de sus caminos diferenciales sensor-objetivo) no cambia en el tiempo transcurrido entre las adquisiciones radar, esto es cancelado desde la fase interferométrica. Sin embargo, en realidad el término denominado **reflectividad diferencial residual** siempre afecta la fase interferométrica y se conoce como **ruido de decorrelación**. Las áreas con vegetación son por lo general afectadas por la decorrelación temporal ya que su reflectividad compleja varía con el tiempo y/o posición de los elementos

que emiten el eco dentro de una celda de muestra, como pueden ser las hojas y las ramas pequeñas de los árboles (Colesanti y Wasowski, 2006).

Interferometría SAR solo funciona bajo condiciones coherentes, donde las señales de retorno están correlacionadas entre las dos imágenes SAR. La pérdida de coherencia se conoce como **decorrelación**, y se manifiesta por varios mecanismos, como el alineamiento y la interpolación de las imágenes que pueden reducirse al usar filtros bien diseñados. Hay otras fuentes de decorrelación que no son reversibles, las dos más importantes están relacionadas a la gradiente de fase y a la variación temporal en la distribución física de los elementos de dispersión (Hanssen, 2001). La pérdida de coherencia está primariamente asociada con la vegetación, la coherencia es alta en deslizamientos donde la superficie de la roca está expuesta (Fruneau et al., 1996).

La pérdida de correlación debido a la longitud de la base de línea perpendicular ocurre aproximadamente a 1 Km para ERS, y se denomina **línea de base crítica** $B_{\perp,crit}$. Massonnet y Feigl (1998) señalan la limitación de datos ERS para estudios de deformación. Parámetros como el ángulo de incidencia, la altitud, la frecuencia y el ancho de banda permiten calcular la línea de base crítica ($B_{\perp,crit}$), la cual expresa la máxima separación horizontal de dos satélites para realizar interferometría (Hanssen, 2001).

La **decorrelación temporal** es la segunda principal limitación para la aplicación de pases-repetidos de interferometría, especialmente cuando se usa un gran intervalo de tiempo. Para que ocurra decorrelación temporal, la sumatoria incoherente de las variables dispersadas dentro de un pixel debería ser una fracción significativa de la suma coherente de dispersadores estables. El clima, vegetación, actividad antrópica son las causas principales para la decorrelación temporal, las cuales son observables como ruido en los interferogramas. La fase interferométrica es una superposición de efectos de la altura topográfica, deformación de la superficie entre las adquisiciones, el estado de la atmósfera durante las adquisiciones, y posibles errores en la órbita del sensor. La interpretación de un interferograma SAR depende de un conocimiento previo de otras contribuciones, por ejemplo en un interferograma diferencial de dos-pases un error en el modelo de elevación produce artefactos en los mapas de deformación (Hanssen, 2001).

Algunas fuentes de decorrelación, expresadas por términos de correlación, son las siguientes:

- Decorrelación de línea de base o geometría, causada por la diferencia entre los ángulos de incidencia entre dos adquisiciones.
- Decorrelación del centroide Doppler, causada por las diferencias en los centroides Doppler entre las dos adquisiciones.
- Decorrelación de volumen, causada por la penetración de la onda de radar en el medio de dispersión.
- Ruido del sistema o termal, causado por las características del sistema, incluyendo factores de ganancia y características de la antena.
- Decorrelación temporal del terreno, causada por cambios físicos en el terreno, que afectan las características de dispersión de la superficie.
- Decorrelación inducida en el procesamiento, que resulta de los algoritmos elegidos.
- De acuerdo a Zebker & Villasenor (1992), la *decorrelación geométrica* se produce debido a la reflectividad compleja que cambia con la geometría de adquisición. El camino de viaje diferencial varía con la geometría de adquisición. El principal parámetro orbital que controla éste efecto es la línea de base normal (*baseline*, B_n) que es la medida de la diferencia de dos órbitas. La Figura 44 muestra la proyección perpendicular a la dirección de línea de vista (LOS) de la distancia de las órbitas relativas del satélite a las dos imágenes del interferograma.

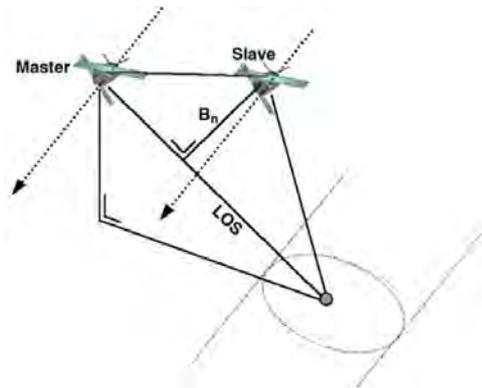


Figura 44: Geometría simplificada de medidas interferométricas. Fuente: Colesanti & Wasowski (2006)

La **decorrelación geométrica** (línea de base) es el resultado de la diferencia en el ángulo de incidencia entre los dos sensores (Hanssen (2001) cita a Gatelli et al. (1994)). La línea de base crítica ($B_{\perp, \text{crit}}$) es la línea de base que causa un desplazamiento espectral igual al ancho de banda (B_R). La línea de base crítica es una función de la longitud de onda (λ), el ángulo de incidencia (θ), y la pendiente local del terreno (α):

$$B_{\perp, \text{crit}} = \lambda (B_R / c) R_1 \tan (\theta - \alpha) \quad (2-19)$$

Para terrenos sin pendiente, la línea de base crítica para ERS es aproximadamente 1,1 Km y depende del ángulo de incidencia (Figura 45).

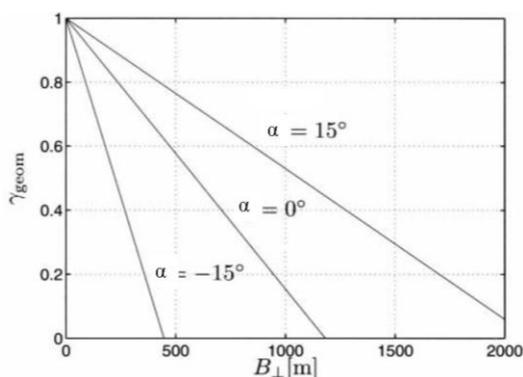


Figura 45: Decorrelación geométrica para ERS-1/2 como una función de la línea de base perpendicular y la pendiente local del terreno. Fuente: Hanssen (2001)

De acuerdo a Hanssen (2005), son dos los grupos de parámetros interferométricos que inciden en las aplicaciones potenciales y limitaciones en el monitoreamiento de deformación de la superficie terrestre usando sensores remotos. Estos grupos son los parámetros de diseño y los parámetros del medio ambiente (Tabla 11). Las longitudes de onda corta (3 cm) son dispersadas por pequeños objetos, como las hojas de los árboles, en la superficie terrestre. Un movimiento randómico de estos pequeños objetos causa distorsión en el análisis de la señal de fase, por lo que se prefieren longitudes de ondas más amplias. Una longitud de onda (λ) de 24 cm es reflejada más significativamente por grandes objetos, penetra a través del follaje, y refleja más cerca al suelo de los árboles.

| Parámetros de diseño | Parámetros de medio ambiente |
|---|--|
| Longitud de onda λ (3-24 cm), bandas L, C, X | Atmósfera |
| Baseline perpendicular (distancia efectiva entre los satélites) | Superficie |
| Baseline temporal (fechas de adquisición de imágenes) | Características específicas de deformación |
| Número de adquisiciones disponibles | |
| Ángulo de incidencia, inclinación | |

Tabla 11: Principales parámetros para el análisis de fiabilidad y exactitud. Fuente: Hanssen (2005)

La Tabla 12 muestra un listado de las principales misiones InSAR capaces de mapear deformación.

| Misión | Inicio-Fin | Intervalo de tiempo (días) | λ (cm) |
|-------------|------------|----------------------------|----------------|
| ERS-1 | 1991–2000 | 35(3) | 5,6 |
| ERS-2 | 1995– | 35 | 5,6 |
| ERS-1/ERS-2 | 1995–1996 | 1 | 5,6 |
| JERS | 1992–1998 | 44 | 23,6 |
| Radarsat | 1995– | 24 | 5,6 |
| Envisat | 2002– | 35 | 5,6 |
| ALOS | 2004– | 46 | 23,6 |

Tabla 12: Lista principal de satélites de misiones InSAR capaces de mapear deformación, se indica la duración de la misión, intervalo de revisita y longitud de onda (λ). Fuente: Hanssen (2005)

Las técnicas de interferometría permiten generar modelos digitales del terreno de gran precisión a partir de la diferencia de fase en el pulso radar para dos adquisiciones casi simultáneas. El principio trata de analizar las diferencias en la fase de la señal de retorno entre dos pulsos próximos en el tiempo. La diferencia se produce por la variación en altura sobre el terreno, o de movimientos en la superficie. Las diferencias de fase permiten analizar variaciones de tamaño inferior a la longitud de onda retro-dispersada. El problema estriba en que esas diferencias de fase requieren de un perfecto ajuste entre imágenes, por lo que las adquisiciones tienen que ser prácticamente simultáneas, o al menos que no haya cambios perceptibles entre las dos observaciones. En zonas semiáridas se han obtenido pares interferométricos con imágenes adquiridas hasta con varios meses de desfase, mientras en áreas de mayor densidad vegetal, incluso cambios en la intensidad del viento pueden hacer perder la coherencia entre imágenes (Chuvieco, 2002).

Casagli et al. (2008) señala que cuando ocurre un evento por deslizamiento, es crucial realizar un mapeo rápido de la extensión del daño para producir un plan de emergencia y estrategias de mitigación tan pronto como sea posible. Para este fin, las imágenes ópticas de muy alta resolución permiten detectar cambios antes y después de un evento. De acuerdo a Colesanti y Wasowski (2006), SAR con la técnica de InSAR permite producir datos como modelos del terreno en tres dimensiones que apoyan a investigaciones a escala regional. En el caso de movimientos en masa, estos modelos pueden ser una herramienta para evaluar susceptibilidad de falla en las pendientes. Por lo tanto, al combinar las imágenes ópticas e InSAR es posible definir la extensión espacial y la evolución temporal de los deslizamientos para estrategias de manejo de emergencias. Además, las imágenes de radar por medio de la técnica de InSAR proveen mediciones precisas del desplazamiento del terreno debido a inestabilidad en la pendiente.

InSAR es una técnica revolucionaria para medir y mapear cambios tan pequeños como pocos milímetros que han ocurrido en la superficie de la Tierra, debido a las actividades sísmica, volcánica, migración de agua subterránea y antrópica como el bombeo de aguas subterráneas, producción de hidrocarburos, etc. (UNAVCO, 2011). La interferometría provee una descripción más precisa de la deformación del suelo tanto en tiempo como en espacio (Fruneau et al., 1996). Por la señal de rebote del radar de la superficie en un mismo punto en el espacio pero en tiempos diferentes, el radar puede medir los cambios en distancia entre el satélite y el suelo como elevación y hundimiento de la superficie terrestre (Bawden, 2005).

Una de las ventajas de aplicaciones de InSAR es visualizar la extensión de eventos naturales, como el caso del sismo en la costa noreste de Honshu-Japón, el 11/marzo/2011 de magnitud 9,0, ocurrido a lo largo de la zona de subsidencia entre las placas tectónicas del Pacífico y la Norte-Americana. El sismo produjo un tsunami con más de 10 m de altura y una pérdida de alrededor 30.000 personas, además del gran daño causado en infraestructura. De acuerdo la información procesada por UNAVCO (Terremoto y Tsunami en Japón, 2011), el modo de observación ScanSAR de ALOS/PALSAR no fue exitoso en éste evento por tener extensas líneas de base, sin embargo al procesar imágenes con el modo Strip-map se obtuvo deformación (Hashimoto et al., 2011).

Se está incrementando el uso de InSAR para el estudio de la criósfera (movimiento de los glaciares y las capas de hielo) y atmósfera (agua contenida en la tropósfera). Varias misiones a nivel mundial están enfocadas al entrenamiento de nuevos científicos en el campo de interferometría y su interpretación, como el programa *EarthScope* de los Estados Unidos, la Misión de la NASA InSAR denominada DESDynI “*Deformation, Ecosystem Structure and Dynamics of Ice*”. Nuevas técnicas y aplicaciones se están desarrollando rápidamente, incluyendo stacking DInSAR, análisis de deformación de la superficie en series de tiempo, ScanSAR, InSAR polarimétrico, “*along-track interferometry*” (UNAVCO, 2011).

2.3.1. Imágenes multi-vista (multi-look)

El efecto “*speckle*” influye la calidad de imágenes SAR y es inducido por los mecanismos de formación de la imagen. El “*speckle*” se lo relaciona a una característica de ruido producida por sistemas coherentes como el SAR y Laser, pero no es ruido del sistema, es una medida electromagnética explotada en particular en InSAR y tiene una estructura randómica de píxeles causados por la interferencia de ondas electromagnéticas dispersados por los objetos o superficies. Al iluminar la escena, cada objeto contribuye con energía dispersada, y por la fase y cambio de energía todas las dispersiones son resumidas coherentemente. Ese resumen puede ser alto o bajo dependiendo de la interferencia constructiva o destructiva. La fluctuación estadística (varianza) o incertidumbre se la asocia con el brillo de cada píxel en la imagen de radar.

Para disminuir el ruido en la imagen, Goldstein (1998) propone un acercamiento ***multi-look*** (multi-vista) en el cual los datos del interferograma complejo en una ventana específica son promediados (Hanssen, 2001).

En el proceso de los datos ERS y ALOS para realizar correcciones de desplazamiento del par de imágenes y ubicar un pixel para el desenrollamiento de la fase, se utilizan imágenes que tienen multi-vista. Es necesario recalcar que estas imágenes son auxiliares y no son utilizadas en el proceso del interferograma.

Cuando se transforma la señal SAR en la imagen, luego del proceso de enfoque, se aplica el procesamiento multi-vista o promedio no-coherente. El procesamiento multi-vista durante el enfoque de la imagen se aplica para mejorar la exactitud radiométrica a costo de la resolución de imagen, y se aplica usualmente en el dominio del rango Doppler, al segmentar el espectro Doppler en un número de subconjuntos o vistas (Hanssen (2001) cita a Curlander y McDonough (1991)). El término multi-vista se refiere a promediar un número de celdas de resolución para mejorar la fase estadística (Hanssen, 2001). Una imagen multi-vista (L-look), donde L es el número de vistas, es la “convolution” de distribuciones exponenciales a un número dado de vistas (SARMAP, 2008).

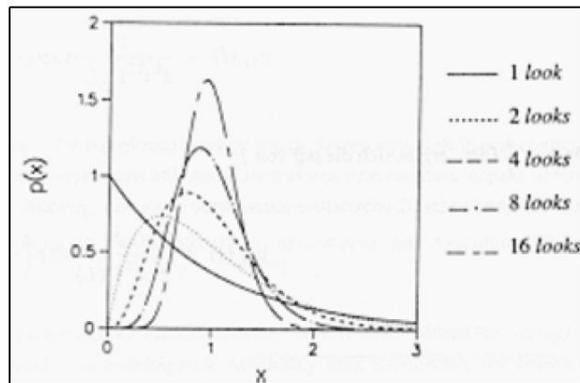


Figura 46: Distribuciones exponenciales L-look, donde L es el número de vistas. Fuente: SARMAP (2008)

2.3.2. Desenrollamiento de la fase

Hanssen (2001) propone tratar el problema del desenrollamiento de la fase como un ajuste y un problema de filtraje. Este acercamiento se basa en la disponibilidad de más de un interferograma del área en consideración. Se denota a la fase observada (*wrapped*) o envuelta como una función de un valor verdadero de fase (ϕ) desconocido, con

$$\phi^{\omega} = W\{\phi\} = \text{mod}\{\phi + \pi, 2\pi\} - \pi \quad , \text{ con (2-19)}$$

$$\phi = -\frac{4\pi\Delta R}{\lambda} + \phi N = 2\pi k + \phi N \quad (2-20)$$

Donde W es el operador “envolviendo” (*wrapping*), $\Delta R = R_1 - R_2$ es la diferencia en rango a la posición de los dos satélites, $\phi_N \in [-\pi, \pi]$ expresa el ruido de fase adicional, y k es el número entero de ambigüedad.

2.3.3. Generación de un interferograma diferencial DIFSAR

La **Interferometría diferencial** tiene como objetivo medir la deformación del suelo usando pares repetidos de interferometría. Hay varias formas de crear un interferograma diferencial. El **método dos-pases** usa un modelo de elevación digital DEM el cual se convierte a las coordenadas de radar, escalado usando la línea de base, y extraído desde el interferograma (Massonnet et al., 1993). Es necesario considerar que los errores presentes en el DEM se propagarán en los resultados de deformación, dependiendo de las características de la línea de base (Hanssen, 2001).

El segundo método se denomina **método de tres-pases** (Zebker et al., 1994), en el cual una tercera escena SAR se usa para combinarse con una adecuada escena y crear el **par topográfico**. Se asume que este par no tiene deformación y posee una adecuada línea de base que provee sensibilidad a la topografía y coherencia suficiente. Para aplicar este método se necesita que el par topográfico y el par de deformación tengan una imagen en común, la cual se usa como referencia para alinear las dos restantes. Otro método consiste en **cuatro-pases**, en el cual el par topográfico y el par de deformación son independientes. Diferencias prácticas con el método de tres-pases se manifiestan en la influencia de señales de la atmósfera en las 3 o 4 escenas durante el alineamiento (Hanssen, 2001).

Para producir un interferograma diferencial se requiere al menos de dos interferogramas (el par de deformación y el par topográfico) para que estén alineados a la misma grilla (Hanssen, 2001). Massonnet et al. (1993) desarrollaron la primera demostración de interferometría diferencial de radar al mapear el desplazamiento ocurrido por el sismo de Landers, al usar un modelo de elevación para remover la señal de la fase topográfica. Hanssen (2001) cita a Zebker et al. (1994), quienes reportaron el método de tres-pasadas para estudiar el mismo sismo. La técnica de interferograma diferencial de tres pasadas usa una imagen de referencia común, en la cual las otras dos imágenes son registradas y re muestreadas. Zebker et al. (1994) demostró esta técnica, la cual asume que (i) solo uno de los dos interferogramas

está afectado por la deformación de la superficie, y (ii) la deformación no afecta la altura topográfica al nivel de exactitud (Hanssen, 2001).

Colesanti y Wasowski (2006) enfatizan que la **pérdida de coherencia** es un problema típico en áreas con vegetación, y señalan los efectos atmosféricos como la principal limitante en la utilización de imágenes de radar. Sin embargo, estas dificultades se pueden superar al usar técnicas innovadoras de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética DIFSAR y analizar grandes series de imágenes SAR.

La estimación de la topografía ha sido el principal interés en las primeras aplicaciones de interferometría radar. Sin embargo, los experimentos de configuración de pasadas repetidas de plataformas satelitales demostraron claramente la aplicabilidad de interferometría radar para el monitoreo de deformación de la corteza terrestre. No obstante, un problema recurrente en ésta aplicación es que la señal de deformación se mezcla siempre con la señal de la topografía. Una solución a éste problema es el planteamiento de DIFSAR, donde la señal topográfica obtenida desde el interferograma topográfico es escalada a condiciones de la línea de base del interferograma de deformación y consecuentemente substraída, entregando así un interferograma diferencial (Gabriel et al., 1989).

Debido a que los interferogramas son proyectados en el DEM, el efecto de la topografía en un interferograma es removido utilizando un DEM, (Fruneau et al., 1996). Por lo tanto es ideal tener un DEM de mayor resolución espacial porque su precisión se refleja en el interferograma. Los autores (Zebker et al., 1994) lograron remover la topografía con el resultado del primer interferograma.

Fruneau et al. (1996) demostraron el potencial de DInSAR al mapear desplazamientos en la superficie y características de deslizamientos en un área pequeña usando imágenes ERS-1, al detectar un deslizamiento de 1 Km² de extensión. No obstante hay consideraciones para lograr este objetivo como la amplitud de los desplazamientos en el suelo, registrados en el orden de 1 cm/día, y debido a la presencia de vegetación en la pendiente es condicionante tener imágenes con una alta periodicidad de repetición. Es así que se obtuvo imágenes de pocos días de repetición, adquiridas en dos misiones Tandem. Los autores (Fruneau et al., 1996) señalan un periodo de adquisición de escenas para interferometría entre 15 y 30 días, para aplicaciones en áreas cubiertas por vegetación. Tener un tiempo corto de adquisición entre imágenes impide cualquier pérdida de coherencia. Además, hay que considerar la

exposición del área de estudio, por ejemplo imágenes de órbita descendente son ideales para estudio de laderas expuestas hacia el oeste.

Lanari et al. (2004b), Berardino et al. (2002) remarcan la necesidad de generar series temporales de deformación para estudiar la evolución de desplazamientos detectados como una clave para entender la dinámica del fenómeno de deformación. Para lograr éste fin, se procura crear una secuencia apropiada de interferogramas DIFSAR que relacionen pares de datos interferométricos con su fecha de adquisición. Se han propuesto algunos acercamientos basados en combinaciones de diferentes interferogramas de datos SAR disponibles relativos a un área específica (Lanari et al. (2004b) cita a Ferretti et al. (2000) y Mora et al. (2002)). Bajo este marco, Berardino et al. (2002) propone un nuevo acercamiento de pos-procesamiento aplicado a un conjunto de interferogramas desenrollados DIFSAR, que consiste en combinar todos los interferogramas disponibles caracterizados por una pequeña separación espacial entre órbitas (línea de base) para reducir la decorrelación espacial y los errores topográficos. Sin embargo, se remarca que ésta técnica no es adecuada en el estado presente para detectar deformaciones locales a escala espacial pequeña, como el caso de pequeños edificios que sufren estrés estructural.

Lanari et al. (2004b) y Berardino et al. (2002) citan a Gabriel (1989) y Massonnet (1993) al denotar que DIFSAR es una técnica de teledetección para generar mapas, a una escala grande, de deformación de la superficie terrestre, donde el desplazamiento se mide en la línea de vista del radar LOS, con una exactitud de centímetros a milímetros, al explorar las componentes de fase de ida y regreso de imágenes SAR en un área específica.

Berardino et al. (2002) cita a Massonnet (1993) y Borgia (2000) señalando acercamientos DIFSAR aplicados a análisis de un único episodio de deformación por la ocurrencia de eventos sísmicos y volcánicos respectivamente.

Sandwell y Price (1998) propusieron la técnica de *Stacking* para incrementar la claridad de las franjas y disminuir los errores debido a la atmósfera, al promediar varios interferogramas. La señal común es el promedio (stack) de N interferogramas, mientras que el ruido es la diferencia entre dos interferogramas. De acuerdo a los autores (Sandwell y Price, 1998) hay varias ventajas al trabajar con la gradiente de fase en lugar de la fase: (1) la gradiente de fase se calcula directamente desde los componentes real e imaginario del interferograma; (2) la corrección de Tierra-plana se expresa fácilmente en términos de gradiente de fase; (3) la gradiente de fase se promedia de varios interferogramas repetidos, y

el tener diferentes líneas de base eventualmente llena los vacíos debido a la decorrelación temporal y espacial. El promedio a largo tiempo debería minimizar los errores de fase debido al retardo en la tropósfera e ionósfera y se tiene una base precisa para interferogramas de detección de cambio. Sin embargo, esta aproximación tiene sus desventajas.

Samsonov et al.(2011) usa la técnica de inversión lineal de mínimos cuadrados, la cual se basa en el algoritmo SBAS (*small baseline subset*), para cálculo de una serie temporal y de velocidad de deformación lineal y media de un conjunto de interferogramas desenrollados. Para este objetivo realiza procedimientos previos como la aplicación de filtro de paso-alto para remover los residuos de órbita y otro ruido de amplias longitud de onda de los interferogramas; también realiza la estimación del desplazamiento/calibración para estimar y remover los desplazamientos en los interferogramas; realiza la aplicación inicial de *Stacking* (Samsonov, 2010) para crear una máscara en la cual los pixeles no coherentes en al menos uno de los interferogramas están enmascarados. La máscara se usa posteriormente para eliminar pixeles incoherentes desde la técnica de inversión. El algoritmo del *stacking* resulta:

$$V_{obs} = \frac{\sum \phi_{obs}^k}{\sum t^k} \quad (2-21)$$

Donde t^k es el intervalo de tiempo de cada interferograma ϕ_{obs}^k

La calibración se aplica para estimar y remover los desplazamientos en los interferogramas antes de realizar otros procesamientos. Los desplazamientos son causados por la variación temporal y espacial de artefactos atmosféricos como la presión, humedad, temperatura, variación en la ubicación del satélite durante las adquisiciones. Entonces se asume que el término atmosférico ϕ_{atm}^k puede ser reemplazado por su promedio espacial $\bar{\phi}_{atm}^k$ y una desviación desde el promedio $\tilde{\phi}_{atm}^k$ (Samsonov et al., 2011):

$$\phi_{atm}^k = \bar{\phi}_{atm}^k + \tilde{\phi}_{atm}^k \quad (2-22)$$

Donde el primer término es un desplazamiento causado por el componente de longitud de onda amplia del ruido atmosférico que necesita ser removido de cada interferograma, lo cual puede ejecutarse de tres maneras:

- Una o más (superior a nueve) regiones de referencia se seleccionan y se calcula el valor promedio de esas ubicaciones. Se asume que esas regiones son estables (cero

deformaciones), y el valor promedio es igual o cerca al desplazamiento de fase $\overline{\Phi}_{atm}^k$.

- El desplazamiento se calcula asumiendo que la deformación promedio de toda la región es igual a cero. Se calcula el desplazamiento como un valor promedio de toda la región.
- Cuando no es posible seleccionar regiones de referencia estable y la asunción de promedio de deformación cero no es válida, se sugiere resolver al menos para una ambigüedad de $2\pi n$ en la fase observada.

En base a lo mencionado por Samsonov et al.(2011) sobre el desplazamiento/calibración de los interferogramas, en el presente estudio la calibración consistió en:

- Identificar un punto de monitoreo GPS más cercano a cero
- Realizar la transformación de diferencia de altitud a centímetros, porque el interferograma fue transformado de unidad de radianes a centímetros.
- Identificar en todos los interferogramas el valor de pixel del punto correspondiente al punto de monitoreo GPS.
- Realizar la diferencia del valor del punto de monitoreo GPS con el par interferométrico que contiene la fecha de la campaña del monitorio por GPS diferencial.
- Sumar o restar en cada interferograma el valor resultante de la diferencia anterior, en cada uno de los interferogramas, con la finalidad de acercarse a cero.

Casagli et al. (2008) indica que en el caso de desplazamientos lentos del terreno de hasta unos pocos centímetros por año que afectan áreas construidas, la técnica denominada “*Permanent Scatterers PS*”, la cual fue desarrollada y patentada por el Telerilevamento Europa, registra la distribución espacial de desplazamientos y su rango de deformación en un periodo de tiempo. Además, PS distingue desplazamientos en áreas antiguas no estables, así como recientes. Berardino et al. (2002) citan a Ferretti et al. (2000) y (2001b), señalando que se propuso la técnica PS para maximizar el número de adquisiciones a usarse, al generar respecto a una imagen común conocida como master, un interferograma DIFSAR para cada una de las adquisiciones disponibles, aún si los datos se caracterizan por una gran línea de base más grande que la línea de base crítica. Adicionalmente, Colesanti & Wasowski (2006)

indican que PS supera algunas limitaciones de DIFSAR en estudios de movimientos en masa, pero que tanto ésta técnica como el progreso en DIFSAR permiten obtener deformación de pendiente con precisión milimétrica. Sin embargo, debido a que solamente se puede detectar la línea de radar de la proyección de vista (LOS) de los desplazamientos, PS es posible únicamente cuando existe suficiente disponibilidad de verdad de campo, y es adecuado para el monitoreamiento en condiciones favorables de medio ambiente. Por lo tanto, la verdad de campo es una información muy valiosa para detectar con radar la deformación del suelo. Debido a las dificultades relacionadas con la interpretación de los resultados de PS y la aplicación de datos SAR a problemas de escala local, se requiere una colaboración muy cercana entre expertos en movimientos en masa y especialistas en técnicas avanzadas de procesamiento de datos radar. Todos los tipos de movimientos en masa son de interés para los geólogos, se remarca la detección de ambos componentes de movimientos en direcciones vertical y horizontal para evaluar los mecanismos de falla de la pendiente. En dependencia con el ángulo de observación o visión y la geometría de adquisición del radar se pueden detectar las componentes del movimiento.

2.3.4. Geo codificación

La geo codificación se refiere a la transformación de coordenadas de radar (rango/acimut/altura) a coordenadas en un sistema de referencia geodético como el WGS84 (Φ , Λ , H) el cual usa Φ y Λ para la latitud y longitud geográfica respectivamente, y H para la altura sobre el cuerpo de referencia (elipsoide).

2.4. SOFTWARE

La tesis estuvo orientada en un inicio al procesamiento de datos ERS del producto SLC (nivel de procesamiento 1.1) en el software de acceso comercial ERDAS versión 8.7. Con las dos imágenes ERS-1/2 de la Misión Tandem, proporcionadas por el Instituto Espacial Ecuatoriano, en primera instancia se trató de leer el formato SLC (Single Look Complex) en ERDAS, lo cual fue imposible.

Posteriormente, con el software de acceso libre DORIS “*Delft Object-oriented Radar Interferometric Software*” versión 4.02 (Junio 8 del 2009), cuyo dato de ingreso es el producto SLC, se logró leer las imágenes ERS pero el software desplegó mensaje de alerta de

error en su lectura. Se concluyó que las imágenes ERS tenían alguna inconsistencia interna de formato de acuerdo a la especificación del formato CEOS, lo que imposibilitaba procesarlas en ERDAS y/o DORIS.

Los datos ALOS sensor PALSAR producto SLC proporcionados por la ESA se procesaron en ERDAS versión 9.2, porque esta versión es posterior al lanzamiento del satélite ALOS, sin embargo los resultados como el interferograma diferencial fue de difícil interpretación.

Debido a la inconsistencia de los datos ERS proporcionados por el IEE y a la difícil interpretación de productos ALOS, se tomó la decisión de procesar los interferogramas en el software de distribución libre ROI_PAC “*Repeat Orbit Interferometry PACkage*” versión.3.0.1 cuyo dato de ingreso es el producto RAW (nivel de procesamiento 1.0).

Sobre los datos ERS, el procesamiento en ROI_PAC, se ejecutó con éxito, pero fue necesario modificar en IDL campos de información de acuerdo a la definición del CEOS (2011) para continuar con el procesamiento.

Entonces, para obtener los productos interferométricos del presente trabajo de investigación, en ROI_PAC se procesaron los productos RAW de ERS-1/2 y ALOS sensor PALSAR.

Finalmente, el procesamiento resultante de ROI_PAC para obtener los mapas de desplazamiento en centímetros se realizó en el software comercial ENVI versión 4.1.

A continuación se provee un breve resumen sobre el software de distribución libre DORIS y ROI_PAC.

2.4.1. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software, DORIS

El Instituto de Observación de la Tierra y Sistemas Espaciales de la Universidad de Tecnología Delft desarrolló un software libre para generar interferogramas a partir de datos SAR SLC, llamado DORIS (Delft object-oriented radar interferometric software). DORIS genera productos interferométricos, DEMs (Modelos Digitales de Elevación) y mapas de desplazamiento. DORIS puede procesar datos que provienen de los satélites ERS-1/2, ENVISAT, JERS, RADARSAT, ALOS y TERRASAR-X (DORIS 2011).

La Figura 47 muestra el flujo de procesamiento interferométrico de imágenes SAR. En el diagrama, el bloque II consiste en el co-registro, donde la imagen esclava es co-registrada con la imagen master o principal. En el bloque III se calculan los productos interferométricos como mapa de coherencia e imagen de fase. El bloque IV calcula los productos finales como el DEM y mapa de deformación.

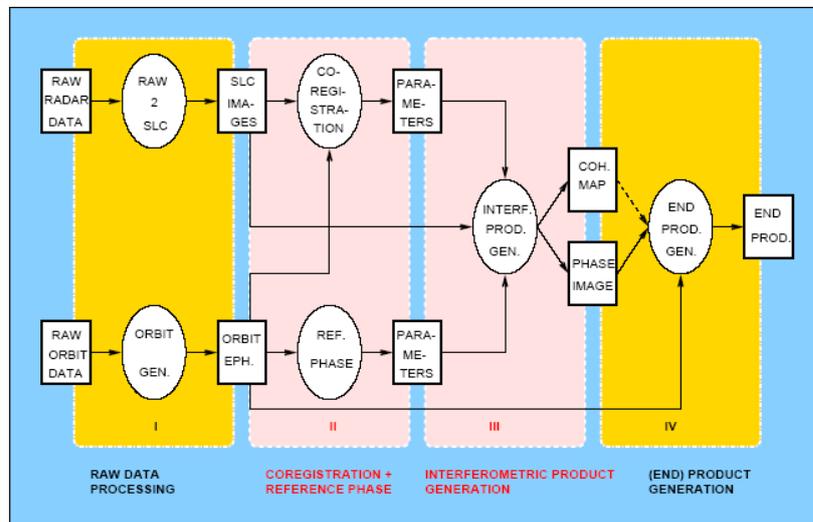


Figura 47: Flujo de procesamiento interferométrico de imágenes SAR. Fuente: DORIS (2011)

2.4.2. Repeat Orbit Interferometry PACKage, ROI_PAC

ROI PAC es una herramienta desarrollada por el “*Jet Propulsion Laboratory, JPL*” en Pasadena-USA, para procesar datos SAR del producto RAW (nivel de procesamiento 1.0) y producir interferogramas diferenciales. Es un software de libre distribución que actualmente procesa datos provenientes de los satélites ERS1/2, ENVISAT, JERS, Radarsat, ALOS-PALSAR y Seasat. El sitio de ROI_PAC provee información específica para el procesamiento de cada satélite.

En el caso de ERS-1 y ERS-2, ROI_PAC versión 3.0.1 reconoce el formato de datos del CEOS (*ESA-Earthnet-Online*). CEOS coordina y estandariza el manejo de datos de observación de la Tierra, formatos, servicios, aplicaciones y políticas (CEOS, 2011).

En el caso de los productos ALOS PALSAR, ROI_PAC trabaja con los modos de sensor “*Fine Beam Single-polarization, FBS*”, “*Fine Beam Dual-polarization, FBD*” y “*Polarimetric, PLR*”. Los desarrolladores que aportan al software de distribución libre diseñaron cuatro programas para manipular los datos RAW (ROI_PAC). Las principales funciones de los programas son las siguientes:

- *ALOS_pre_process*: toma el dato raw ALOS PALSAR y corregistra los datos en el rango cercano. Adicionalmente produce archivos con formato parámetro (*.PRM) que contienen la información esencial para focalizar los datos como imágenes “Single Look Complex, SLC”.
- *ALOS_baseline*: toma dos archivos con formato parámetro (*.PRM) de un par interferométrico y calcula los parámetros de cambio aproximado para corregistrar las dos imágenes, así como la línea de base interferométrica precisa al principio y al final del frame.
- *ALOS_merge*: anexa dos archivos imagen RAW y elimina líneas duplicadas. Además, realiza un nuevo archivo parámetro representando la nueva longitud del frame.
- *ALOS_fbd2fbs*: convierte el archivo imagen RAW del modo FBD (14 MHz) al modo de espaciamiento FBS (28 MHz) por medio de la transformación de Fourier de cada fila del archivo de imagen (un eco). Se crea un nuevo archivo con formato parámetro (*.PRM). Los interferogramas con la conversión FBD2FBS tienen menos ruido que los interferogramas resultantes de la conversión FBS2FBD (ROI_PAC).

El diagrama de flujo (Figura 48) muestra los pasos principales del *script perl process_2pass.pl*, donde las líneas entrecortadas indican procedimientos opcionales. Los pares a procesar deben tener la misma trayectoria de dirección de órbita, viendo la misma escena debe tener la misma órbita nominal por el tema de la línea de base que debe ser constante para toda la escena (Masuelli, 2010a).

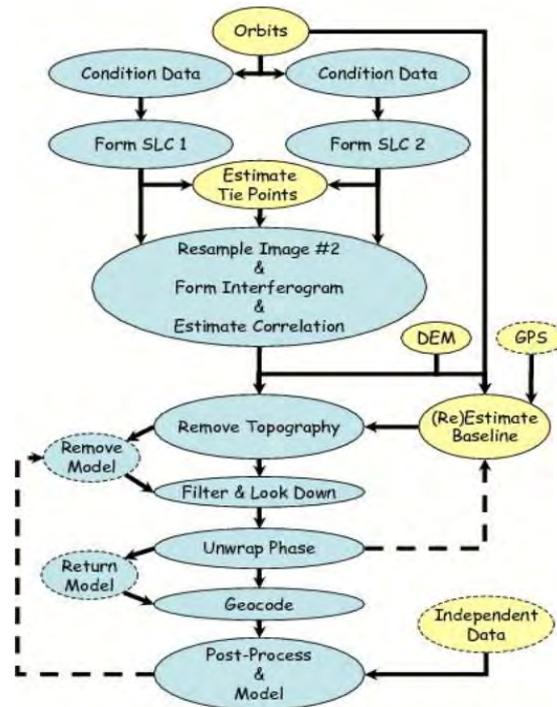


Figura 48: Procesamiento en ROI_PAC. Fuente: (ROI_PAC)

2.5. METODOLOGÍA

Es un hecho de que la validez de los resultados depende enteramente de la solidez de la metodología de investigación (Kumar Ranjit 2005). A continuación se muestra la metodología (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) del trabajo de investigación para alcanzar los objetivos planteados, la cual contempló cuatro fases de desarrollo:

1. Pre-procesamiento del dato crudo proporcionado por las Agencias Espaciales respectivas.
2. Procesamiento del dato crudo listo para ser procesado en ROI_PAC.
3. Pos-procesamiento de la salida de ROI_PAC en fase relativa en radianes, para determinar el desplazamiento del terreno en una serie temporal de acuerdo a la disponibilidad de imágenes. Se contrastó cada interferograma con la verdad de campo suministrada por el INIGEMM para determinar si en el interferograma la fase se desenrolló en el área de estudio. El desenrollamiento de fase es un indicativo de coherencia. La coherencia en el área de estudio es baja, apenas pocos píxeles muestran un rango de coherencia aceptable, por lo que pocos interferogramas estuvieron aptos para la siguiente fase. Antes de aplicar la técnica de Stacking DInSAR, se aplica la calibración de los interferogramas para atenuar los desplazamientos causados por la variación temporal y espacial de artefactos

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

atmosféricos como la presión, humedad, temperatura, variación en la ubicación del satélite durante las adquisiciones.

4. Análisis de los resultados y comparación con las medidas de desplazamiento en el terreno, proporcionadas por el INIGEMM.

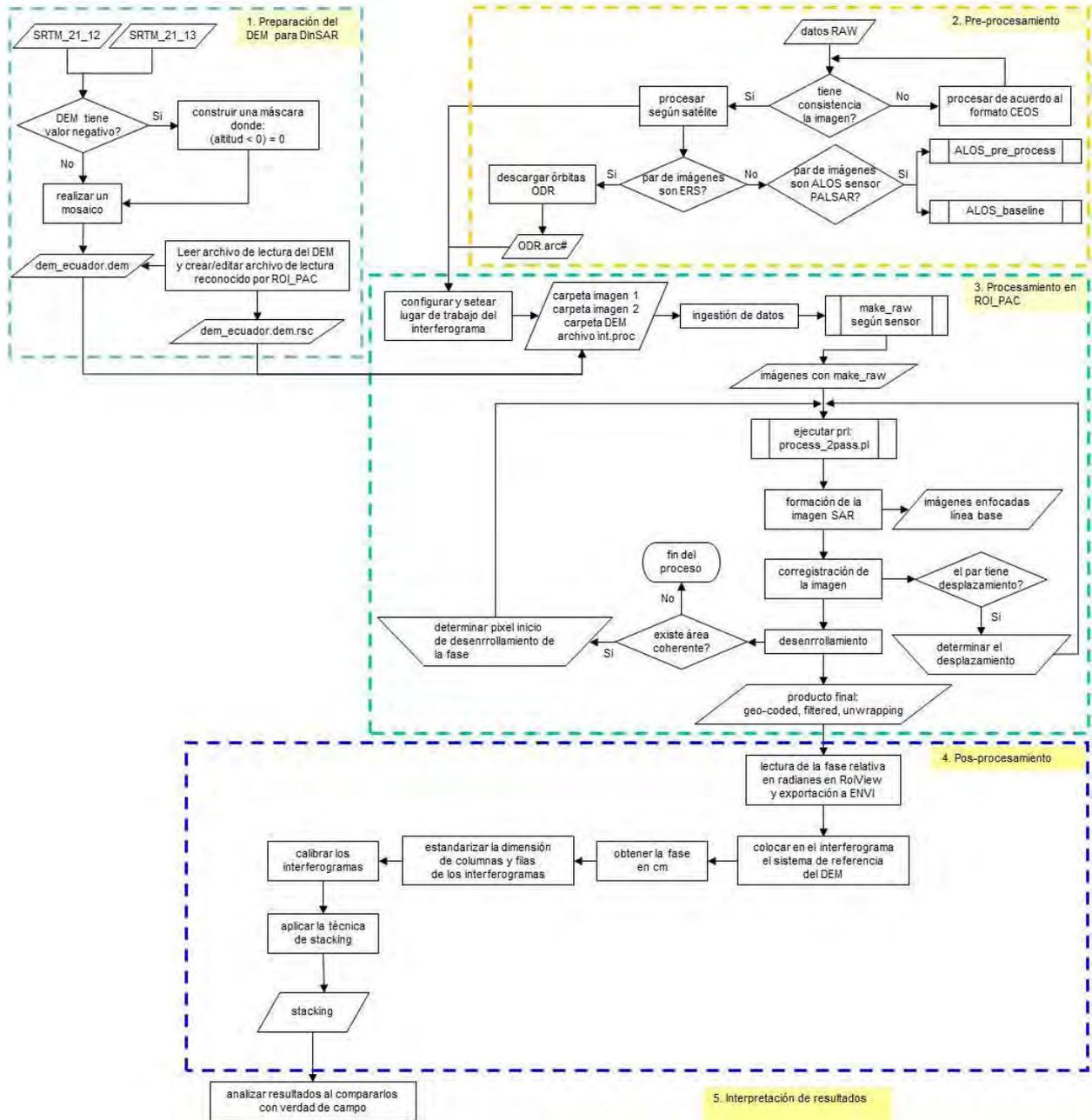


Figura 49: Metodología. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

3. ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO

Como un inicio en el procesamiento de interferometría se escogió los satélites ERS y ALOS sensor PALSAR. La elección de trabajar con ERS-1 y ERS-2 es porque entre ambos se tiene una serie temporal larga de operación y adquisición de datos. ERS-1 estuvo operacional durante 9 años, hasta el 10 de marzo del 2000 que fue declarado el fin de la Misión. Mientras que ERS-2 estuvo operacional durante 16 años, hasta el 2011 que fue el fin de la Misión, sin embargo en enero del 2001 ocurrió una falla de giro (ESA). La serie temporal de ERS permite comparar los procesamientos de este satélite con otros satélites (Ferretti et al., 2007), además ambos satélites ERS fueron controlados en órbitas sincronizadas por un periodo de aproximadamente un año durante una Misión en Tándem para proporcionar datos para interferometría con solo un día de diferencia entre dos pases sucesivos.

Por otra parte, se escogió trabajar con la banda L de ALOS porque de acuerdo a revisión de literatura (Raucoules et al., 2007), penetra más profundo en la cobertura de vegetación que la banda C de ERS. Wei & Sandwell (2010) en la Tabla 13 muestran una comparación de los principales parámetros de los dos satélites. Sobre el parámetro de la línea de base, según Ferretti et al. (2007) en el caso de ERS la línea de base óptima es 300-400 m, mientras que la línea de base crítica sobre la cual la fase interferométrica sería solo ruido es 1150 m (Wei & Sandwell, 2010). Zebker y Villasenor (1992) señalan que de acuerdo a las características de ERS-1 la línea de base que excede los 500 m no es apropiada para interferometría, cuando la línea de base es demasiado corta la sensibilidad a la diferencia de fases no se puede detectar; mientras que si la línea de base es demasiado larga un ruido adicional está presente por la decorrelación espacial que corrompe la señal. De acuerdo a Ferretti et al. (2007), la antena de ERS mira a la derecha, por lo que una pendiente principalmente orientada al Oeste podría tener el efecto de distorsión de escorzo en órbita ascendente, por lo tanto imágenes con órbita descendente serían lo recomendado a usar.

La Tabla 39 del anexo 4, muestra los valores de pixel del DEM, en unidad de grados, de la pendiente y orientación (aspecto) de los puntos de control indicando la ubicación de los

deslizamientos rotacionales, los puntos de monitoreo de GPS diferencial y extensómetro artesanal identificados por el INIGEMM.

| Parámetros | ERS | ALOS |
|--------------------|-----------|--------------------------|
| Longitud de onda | 56 mm | 236 mm |
| Altitud | 790 km | 700 km |
| Ángulo de visada* | 23° | 34.3° |
| Ancho de banda | 15.55 MHz | FBS: 28 MHz; FBD: 14 MHz |
| Línea base crítica | 1.1 km | FBS: 13 km; FBD: 6.5 km |

*Otros ángulos de visada están disponibles para ALOS, pero 34.3° es el principal

Tabla 13: Comparación de los satélites ERS y ALOS. Fuente: Wei & Sandwell (2010)

De lo expuesto, el objetivo de trabajar con los dos satélites ERS y ALOS es comparar resultados, como el de coherencia por ejemplo, y sugerir cuál de los dos satélites entregó mejores resultados de acuerdo al procesamiento que se detalla a continuación. Sin embargo, es necesario considerar las fechas de adquisiciones de ERS del presente trabajo y la disponibilidad temporal de órbitas precisas para ERS-1/2 (ver Anexo 5), por lo que anticipadamente para futuros trabajos de investigación para usar interferometría de radar en la detección de desplazamientos en el terreno, se advierte trabajar con imágenes satelitales ERS que tengan datos de órbitas precisas u órbitas de adquisición rápida (Scharroo, 2008). Mientras que trabajar con datos ERS de la Misión Tandem sería valioso para el cálculo de modelos digitales de elevación de precisión. Sandwell (2008) indica que la información de las órbitas precisas se usa para calcular la velocidad de la nave espacial.

El Centro de Levantamientos Integrados por Sensores Remotos CLIRSEN, a partir del 2012 denominado Instituto Espacial Ecuatoriano IEE, es un organismo estatal encargado de formar el inventario de los recursos naturales a nivel nacional y generar información que posibilite el uso, manejo y conservación de los mismos. Dentro de su infraestructura cuenta con la Estación Cotopaxi encargada de recibir, grabar y procesar datos satelitales para la realización de estudios y proyectos relacionados con los recursos naturales y el ambiente. Bajo el marco de investigación del presente trabajo, un total de 12 imágenes sin procesar (producto RAW) de radar del satélite ERS (Tabla 14) fueron proporcionadas por el IEE y por la Agencia Espacial Europea ESA, en el periodo comprendido de diciembre/1997 y abril/2008. El IEE proporcionó 2 escenas correspondientes a la Misión Tandem, en los productos RAW, PRI, SLC y GEC; y, ESA proporcionó 10 escenas en los productos RAW y SLC. El Servicio de Facilidades de Alaska (ASF) es el proveedor de la Agencia Japonesa de

Exploración del Espacio (JAXA) de datos ALOS para América, y para fines de investigación proporcionó 16 imágenes de radar en los productos SLC y GEC (Tabla 15) y 6 imágenes del producto RAW (Tabla 16); comprendidas en el periodo diciembre/2006 y junio/2009. Todo el proceso de adquisición de las imágenes de radar de las fuentes mencionadas fue canalizado por el CUSS (CONAE *User Segment Service*).

En un inicio se propuso procesar los interferogramas en el software comercial ERDAS, este software requiere como imagen de ingreso el producto SLC, por esta razón en la petición de las imágenes se solicitó este producto. Sin embargo, la salida no era clara y de difícil interpretación. Gracias al entrenamiento realizado en la División de Imágenes Satelitales del Instituto CEDIAC, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo, se procesó interferogramas utilizando el software ROI_PAC con las imágenes ERS y ALOS sensor PALSAR. De lo procesado en ROI_PAC, este software permite depurar con mayor sentido las imágenes de ingreso y su posterior corrección de desplazamiento del par y ubicación de pixel de desenrollamiento.

En el proceso de búsqueda de imágenes se utilizó el software EOLISA de la ESA (EOLi) y el sitio de internet del ASF del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks. La Tabla 14 y Tabla 16 muestran los productos RAW que fueron usados en este estudio.

| Fuente | Satélite | Sensor | Fecha adquisición (aaaammdd) | Número órbita | Dirección órbita | Centro del marco | Track | Ángulo de incidencia off-nadir | Polarizac. |
|--------|----------|--------|------------------------------|---------------|------------------|------------------|-------|--------------------------------|------------|
| IEE | ERS1 | AMI | 19981217 | 38819 | descendente | 3645 | 254 | 23° | VV |
| | ERS2 | AMI | 19981218 | 19146 | | 3645 | 254 | 23° | |
| ESA | ERS1 | AMI | 19971216 | 33580 | | 3645 | 25 | 23° | |
| | ERS1 | AMI | 19981201 | 38590 | | 3645 | 25 | 23° | |
| | ERS1 | AMI | 19991221 | 44101 | | 3645 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20030326 | 41462 | | 3645 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20001101 | 28937 | | 3667 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20020828 | 38456 | | 3667 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20021211 | 39959 | | 3667 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20080319 | 67514 | | 3667 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20011121 | 34448 | | 3647 | 25 | 23° | |
| | ERS2 | AMI | 20080423 | 68015 | | 3648 | 25 | 23° | |

Tabla 14: Adquisiciones de ERS-1/2 del producto RAW. Fuentes: (ESA), (IEE)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Fuente | Sensor | Modo del sensor | Fecha adquisición (aaaammdd) | Número órbita | Dirección órbita | Centro del marco | Path | Ángulo de incidencia off-nadir | Polarizac. |
|--------|--------|-----------------|------------------------------|---------------|------------------|------------------|-------|--------------------------------|------------|
| ASF | PALSAR | FBS | 20060726 | 02670 | ascendente | 7150 | 110 | 41.5° | |
| | PALSAR | FBS | 20061223 | 04858 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20070625 | 07542 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBD | 20070810 | 08213 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBS | 20071226 | 10226 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBS | 20080311 | 11342 | descendente | 3650 | 450 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBS | 20080327 | 11568 | ascendente | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20080512 | 12239 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBD | 20080627 | 12910 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBS | 20080727 | 13355 | descendente | 3650 | 450 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20080812 | 13581 | ascendente | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBS | 20081228 | 15594 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20090630 | 18278 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBD | 20090815 | 18949 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBS | 20091231 | 20962 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| PALSAR | FBD | 20100518 | 22975 | 7150 | | 110 | 34.3° | HH+HV | |

Tabla 15: Adquisiciones de ALOS sensor PALSAR de los productos 1.1 (SLC) y 1.5 (GEC). Fuente: (ASF)

| Fuente | Sensor | Modo del sensor | Fecha adquisición (aaaammdd) | Número órbita | Dirección órbita | Centro del marco | Path | Ángulo de incidencia off-nadir | Polarizac. |
|--------|--------|-----------------|------------------------------|---------------|------------------|------------------|------|--------------------------------|------------|
| ASF | PALSAR | FBS | 20061223 | 04858 | ascendente | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20070625 | 07542 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBD | 20070810 | 08213 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBS | 20071226 | 10226 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH |
| | PALSAR | FBD | 20080812 | 13581 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |
| | PALSAR | FBD | 20090630 | 18278 | | 7150 | 110 | 34.3° | HH+HV |

Tabla 16: Adquisiciones de ALOS sensor PALSAR del producto 1.0 (RAW). Fuente: (ASF)

Al procesar los datos ERS-1 y ERS-2 se descargó las órbitas precisas y órbitas de entrega-rápida generadas por el Instituto Delft para la Investigación del Espacio Orientado a la Tierra DEOS (Scharroo, 2011a) para obtener mejores interferogramas, su disponibilidad es de acceso libre. El Modelo Digital de Elevación con una resolución espacial de 90 m. se lo descargó libremente del Consorcio para la Información Espacial (Jarvis et al., 2008) y fue usado para simular y remover la contribución topográfica de la fase en los interferogramas.

En las imágenes de radar disponibles se identificaron varios volcanes (Figura 50) que sirvieron de referencia para ubicar el área de estudio. La Tabla 17 muestra información general de los volcanes presentes, de acuerdo a la información desplegada por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IGEPN.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Volcán | Estado | Última erupción | Conocimiento | Tipo | Área (Km ²) |
|--------------|-----------------------|-----------------|--------------|--------------------------|-------------------------|
| Tungurahua | En erupción | 1999-? | superior | Estrato-volcán compuesto | 170 |
| Chimborazo | Potencialmente activo | 550 | alto | Estrato-volcán compuesto | 220 |
| Iguualata | Extinto o dormido | desconocida | bajo | Estrato-volcán | 279 |
| Carihuairazo | Extinto o dormido | desconocida | moderado | Estrato-volcán compuesto | 174 |
| Puñalica | Potencialmente activo | desconocida | bajo | Estrato-volcán | 31 |
| Huisla | Extinto o dormido | desconocida | bajo | Estrato-volcán | 69 |
| Mulmul | Extinto o dormido | desconocida | mínimo | Estrato-volcán | 49 |
| Altar | Extinto o dormido | desconocida | bajo | Estrato-volcán | 86 |

Tabla 17: Información general de volcanes presentes en las imágenes de radar. Fuente: (IGEPN)

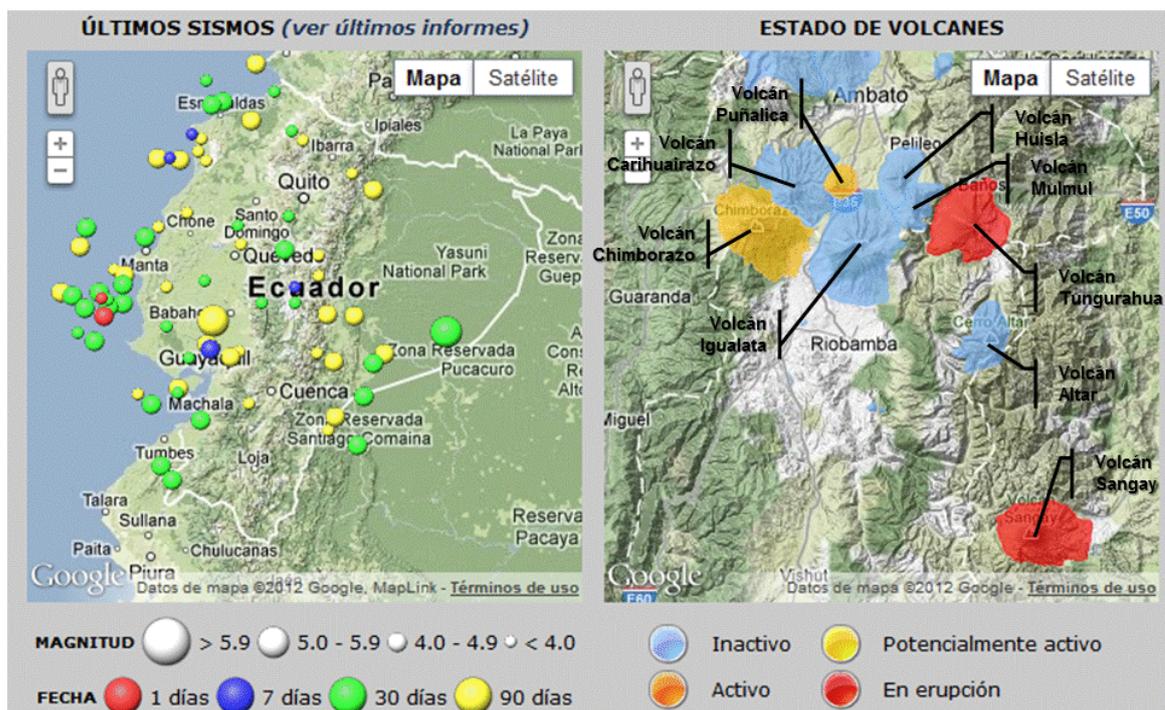


Figura 50: Monitoreo de sismos y volcanes en el territorio Ecuatoriano. Fuente: (IGEPN). Acceso: 12 Mayo 2012. Modificado por: Tannia Mayorga T.

A continuación el ítem 3.1 muestra la preparación del DEM para DInSAR, mientras que los ítems 3.2 y 3.3 muestran el procesamiento realizado para obtener interferogramas, a partir del producto RAW de los satélites ERS-1/2 y ALOS sensor PALSAR respectivamente, utilizando el software ROI_PAC.

3.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

La Misión Espacial Topográfica de Radar - SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) produjo datos de elevación a una escala casi global al generar la más completa base de datos topográfica digital de alta resolución de la Tierra. La misión se formó por una iniciativa conjunta de la NASA, la Agencia Nacional Geoespacial-Inteligencia, el Centro Aeroespacial Alemán (Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt DLR) y la Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana ASI), y voló en el transbordador espacial Endeavour el 11/febrero/2000, completando en 159 órbitas el mapa global durante 10 días (SRTM, 2009) (JPL, 2005). La misión empleó dos antenas de radar de apertura sintética, separadas unos 60 m gracias a un mástil instalado en el transbordador espacial (Chuvieco, 2002). Las bandas de los radares para adquirir datos interferométricos fueron: banda C (longitud de onda 5,6 cm; C-radar) y banda X (3,1 cm; X-radar). De acuerdo a Farr et al. (2007) la interferometría de radar de apertura sintética usa medidas de diferencia de fase derivadas de dos imágenes radar adquiridas con una base muy pequeña a la proporción de altura (típicamente 0,0002 radianes) para medir topografía. La exactitud se obtiene por medidas cuidadosas de la longitud de la línea de base y la orientación y ubicación de la plataforma relativa al sistema de coordenadas de referencia. Como la longitud de onda del radar proporciona buena señal de retorno desde superficies rugosas como el suelo desnudo, marea y vegetación, son estas superficies las que se representan en el DEM. En cambio, la vegetación frondosa no puede ser penetrada significativamente y el mapa topográfico no corresponderá a esa superficie de suelo en esas áreas. Además, superficies lisas como el agua calma y superficies de arena lisa no pueden dispersar suficiente energía de radar de regreso al sensor y no se puede producir una medida de altura. Para los Estados Unidos, los datos topográficos fueron puestos a disposición con una resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros en el Ecuador), pero para el resto del mundo el producto de 1 arco-segundo es degradado a 3 arco-segundo (aproximadamente 90 m en el Ecuador) (SRTM, 2004).

El DEM utilizado en el presente trabajo de investigación se descargó del sitio web del Consorcio para la Información Espacial (Jarvis et al., 2008) disponible a una resolución espacial de celda de 90 metros, y dos imágenes DEM (Figura 51-1) cubren totalmente la región Sierra de Ecuador continental. De acuerdo a Jarvis et al. (2008) los datos del DEM se

derivan del SRTM de la USGS/NASA y las áreas donde el SRTM original no tiene datos ha sido llenada usando métodos de interpolación descritos por Reuter et al. (2007). En el proceso de preparación del DEM para DInSAR se detectó que ambas imágenes registran valores negativos de altitud (Figura 51-2) correspondientes al mar, y como el área de estudio está ubicada en la Sierra sobre el nivel del mar, los valores negativos se colocaron a cero con la construcción y aplicación de una máscara con el rango de datos de los valores positivos de altitud de cada imagen. El siguiente paso consistió en hacer un mosaico. La Figura 52 muestra el DEM utilizado, denominado *dem_ecuador.dem*.

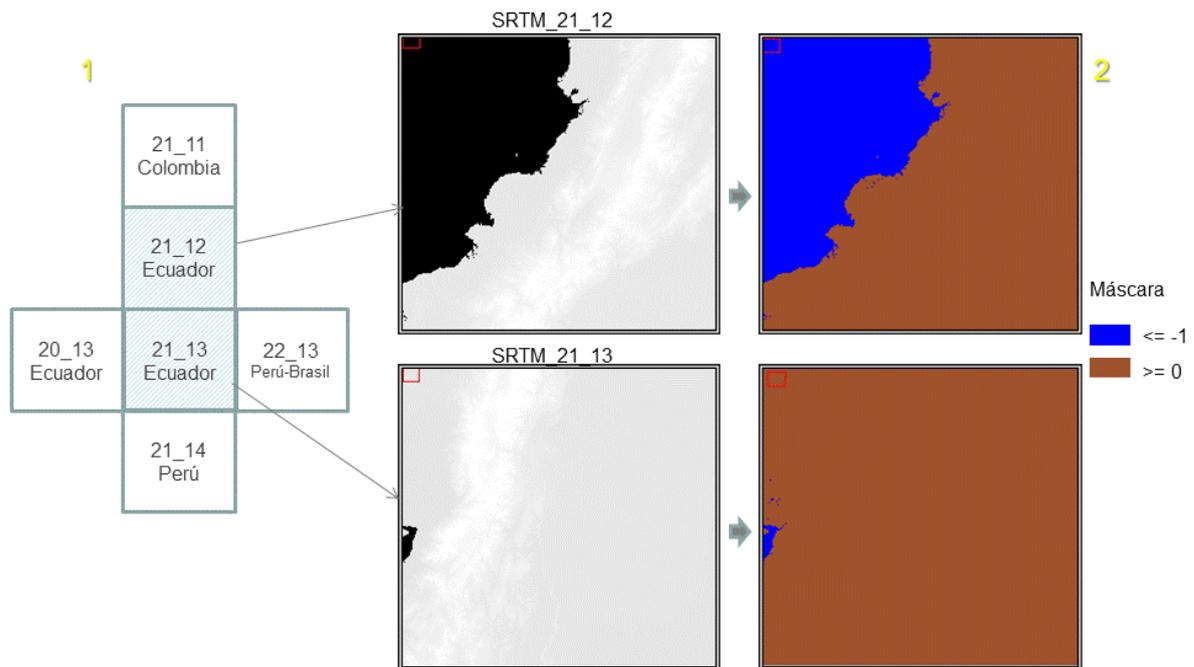


Figura 51: (1) Productos SRTM 90m DEM que cubren la región Sierra de Ecuador, (2) aplicación de máscara. Fuente: Jarvis et al. (2008)

Continuando con la preparación del DEM, se abre el archivo de lectura (header) del DEM y se crea/edita un archivo de lectura reconocido por ROI_PAC denominado *dem_ecuador.dem.rsc*, el cual tiene el siguiente contenido. Al procesar un par interferométrico se especifica el camino donde está almacenado el DEM.

```
FILE_DIR          /home/tania/ROI_PAC_3_0_1/trabajo21/DEM
WIDTH             6003
FILE_LENGTH      12002
XMIN              0
XMAX              6002
YMIN              0
YMAX              12001
X_FIRST           -80.00041642
Y_FIRST           5.00041664
X_STEP            8.3333000000e-004
Y_STEP            -8.3333000000e-004
X_UNIT            grados
```

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Y_UNIT degres
 Z_OFFSET 0
 Z_SCALE 1
 PROJECTION LATLON

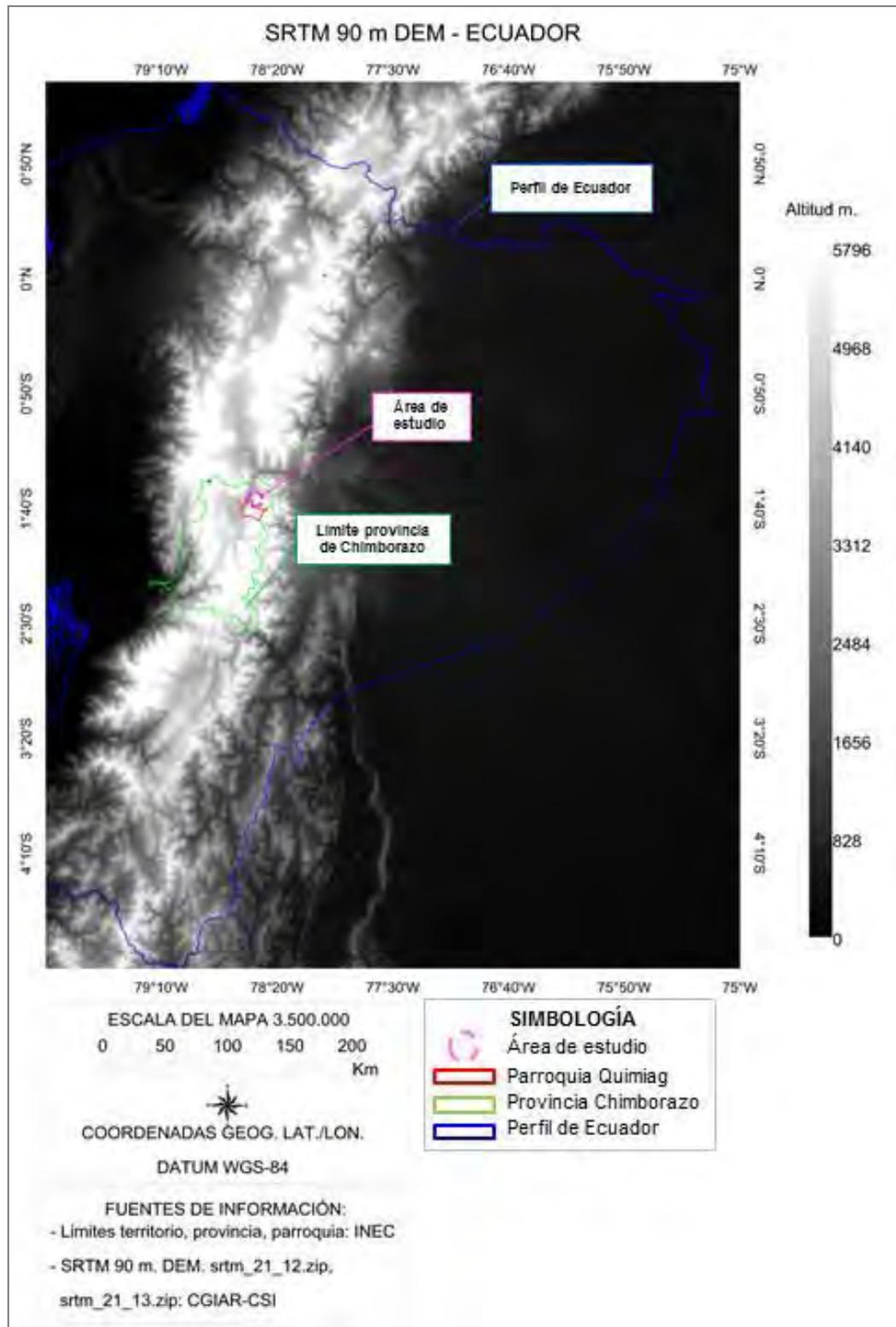


Figura 52: SRTM 90 m. Modelo Digital de Elevación de Ecuador. Fuente: CGIAR-CSI (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T.

A partir del DEM se creó mapas de pendiente y aspecto que cubren Ecuador continental (ver Anexo 4), además se describe los valores en grados de la pendiente y orientación de la ubicación de los puntos de control de los deslizamientos rotacionales, de los puntos de monitoreo con GPS diferencial y extensómetro artesanal identificados por el trabajo de campo realizado por el INIGEMM (León & Pilatasig, 2006), (León, 2006), (León et al., 2007_1), (León & Castillo, 2007). A continuación, la Tabla 18 y la Figura 53 muestran los valores en grados de pendiente y la orientación de los puntos de control de los deslizamientos rotacionales activos. De acuerdo al mapa de aspecto, la orientación del área de estudio es Oeste. Además, según los valores de pendiente, el deslizamiento nombrado A2DA2 tiene la pendiente más alta con un valor de 38°, mientras que el deslizamiento A2DA6 corresponde a la pendiente más baja con un valor de 28°.

| Monitoreo | Pendiente (0°-89°) | Aspecto | | Latitud | Longitud |
|-----------|-----------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|
| | | (0°-360°) | Orientación | | |
| A1DA1 | 28,26 | 277,05 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°32'37.52" |
| A2DA2 | 38,09 | 263,99 | Oeste | 1°37'37.40" | 78°32'49.52" |
| A2DA3 | 31,36 | 279,09 | Oeste | 1°37'49.40" | 78°32'52.52" |
| A2DA4 | 28,44 | 278,71 | Oeste | 1°37'52.40" | 78°32'49.52" |
| A2DA5 | 28,09 | 293,23 | Oeste | 1°37'58.40" | 78°32'52.52" |
| A2DA6 | 27,89 | 294,07 | Oeste | 1°38'01.40" | 78°32'49.52" |

Tabla 18: Valores de pendiente y orientación en grados de la ubicación de los puntos de control de los deslizamientos rotacionales. Fuente: SRTM 90 m. Ecuador (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T.

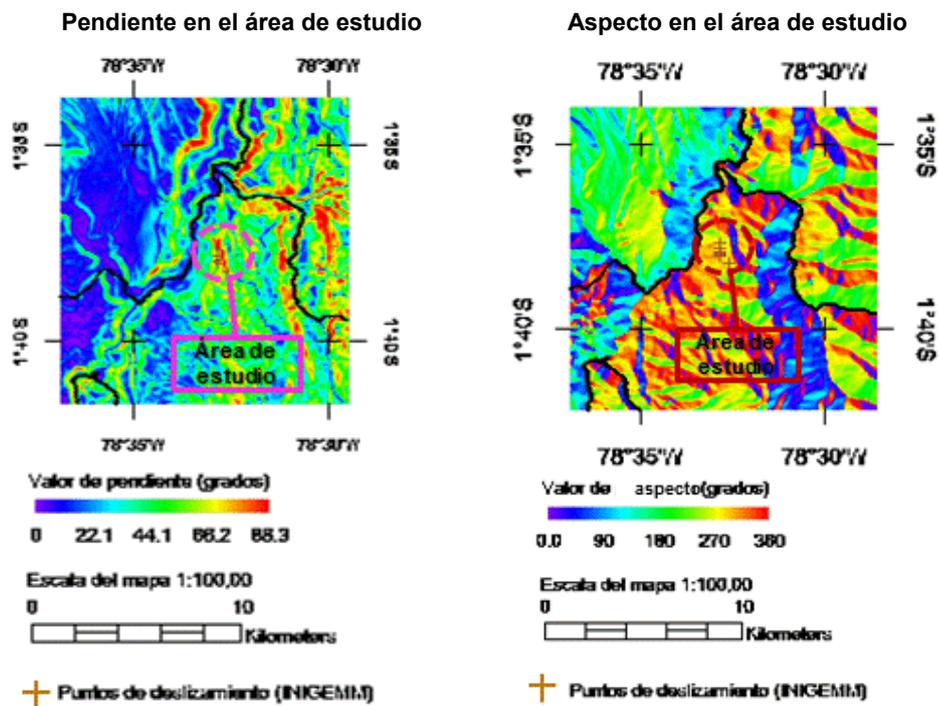


Figura 53: Pendiente y Orientación del área de estudio. Fuente: procesamiento del SRTM 90 m Ecuador (Jarvis et al., 2008). Elaborado por: Tannia Mayorga T.

3.2. DATOS ERS

Haciendo referencia a la metodología aplicada en el presente trabajo de investigación (sección 2.5), a continuación se describe brevemente los pasos desarrollados en el procesamiento de los datos ERS disponibles, luego los sub-ítems describen los procedimientos efectuados.

1. **Preparación del DEM para DInSAR:** la sección 3.1 describe los pasos ejecutados para tener un DEM del área de estudio. Para este objetivo fue necesario construir una máscara para eliminar valores negativos y luego realizar un mosaico de los SRTM que cubren Ecuador continental.
2. **Pre-procesamiento del dato crudo:** como se indicó en la sección 2.4.2 el dato de ingreso para ROI_PAC es el producto RAW. Luego de analizar los datos entregados, se detectó que los datos proporcionados por el IEE tienen denominación diferente a la estándar, por lo que fue necesario renombrarlos en IDL de acuerdo a la nominación del CEOS. Adicionalmente, los datos provistos por el IEE tenían inconsistencia interna, por lo que en IDL se corrigieron determinados campos, de acuerdo al formato del CEOS. En el software ROI_PAC al procesar datos ERS para obtener interferogramas, se puede especificar datos de órbitas precisas y de adquisición rápida para mejorar el cálculo de la línea de base y consecuentemente la calidad del interferograma. Por lo tanto, esta información fue descargada sin costo del sitio de la Universidad de Delft para procesar determinados pares, de acuerdo a la disponibilidad de órbitas (ver Anexo 5) de las escenas ERS.
3. **Procesamiento del dato RAW para ser procesado en ROI_PAC:** una vez listo el DEM, descargadas las órbitas de acuerdo a la disponibilidad de órbitas y de datos ERS, se procede a setear el lugar de trabajo del interferograma, y se ejecutan los programas “*make_raw.pl*” para tener el dato crudo de ERS reconocido por ROI_PAC, y a continuación el programa “*process_2pass.pl*” ejecuta toda la cadena de procesos (ver Sección 2.4.2, Figura 48) para obtener el producto final denominado “*geo-aaaammdd-aaaammdd.unw*” que es el interferograma final diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidades de radianes. Posteriormente, se procede a abrir las imágenes enfocadas a 16 vistas del par interferométrico, las cuales son imágenes auxiliares para localizar el pixel de desplazamiento (offset) del par interferométrico. Luego se calcula los

respectivos desplazamientos en X y en Y , considerando los valores en rango y acimut de la imagen de 16 vistas utilizada para localizar el pixel de desplazamiento.

Otro proceso realizado es la generación de la máscara de coherencia, la cual se construye en base a un valor de umbral establecido por el usuario. Entonces el usuario, en la imagen de coherencia a 4 vistas, localiza un pixel de inicio del algoritmo de desenrollado de fase, el cual debe estar ubicado en una zona de buena coherencia lo mejor conectado posible con todas las zonas de buena coherencia en la imagen. De esta manera el algoritmo puede desenrollar la fase minimizando los errores. Si el pixel elegido está aislado, aunque el mismo tenga coherencia alta, el algoritmo no logrará desenrollar la fase en el resto de la imagen. El establecimiento del pixel es independiente de la ubicación del área de interés dentro de la imagen. Si el área de interés está en una zona de baja coherencia, no se obtendrá un resultado útil. El usuario define un valor de umbral para el pixel desde el cual se desenrolle la fase. Con el ingreso de los desplazamientos respectivos del par y de las coordenadas para el desenrollamiento de la fase, nuevamente se ejecuta el programa “*process_2pass.pl*”.

Algunos pares, a pesar de ingresar la corrección del desplazamiento y mejorar el desenrollamiento de la fase, no culminan satisfactoriamente el proceso, debido en algunos casos a que las escenas tienen un mayor desplazamiento, entonces se ejecuta manualmente los programas “*ampcor*” y “*fitoff*” logrando que el programa “*process_2pass.pl*” se ejecute satisfactoriamente. Con esta última intervención se logra tener la máscara de coherencia, pero efectivamente debido al desplazamiento detectado el par no es coherente, por lo que no vale la pena seguir procesando el par.

4. **Pos-procesamiento de la salida de ROI_PAC en fase relativa en radianes:** Se procede a geocodificar el interferograma diferencial, el cual tiene la nominación de ROI_PAC “*aaaammdd-aaaammdd_sim_ORBITA_4rlks.int*”. De acuerdo a la presentación de uso de ROI_PAC desarrollado por Fielding (2009), los interferogramas citados están en formato *cpx* que corresponde al tipo de dato *complejo (complex)*, se necesita tener el tipo de dato *punto flotante (floating point)* para geocodificar. Para lograr este objetivo se ejecutan los programas “*cpx2_mag_phs*” para obtener la amplitud y fase, luego el programa “*magphs2rmg*” para obtener dos bandas en formato *rmg* que corresponde al tipo de dato *punto flotante*, y finalmente el programa “*geocode.pl*”. Luego en ENVI se coloca el

sistema de referencia y se forman las imágenes de amplitud y fase. La imagen de fase se transforma de radianes a centímetros para obtener el mapa de desplazamiento en unidad de centímetros.

3.2.1. Pre-procesamiento del dato RAW

La nominación de los archivos de cada imagen de los datos ERS, proporcionados por el IEE, presentaban una nominación diferente a la especificación del Comité de Satélites de Observación de la Tierra (CEOS, 2001), lo que imposibilitó que el software ERDAS lea el producto SLC, por lo que fue necesario en IDL renombrar cada archivo a su correspondiente nominación (Tabla 19). El Anexo 6 indica los comandos ingresado en IDL para la corrección de los datos ERS.

| Imagen | Nominación original | Nueva nominación | Fecha y hora de adquisición | Nominación en ROI_PAC |
|--------|---|--|-----------------------------|-----------------------|
| ERS-1 | 3645R.RAW 3645R.hdr1 3645R.hdr2 3645R.hdr3 | <i>DAT_01.001</i> <i>VDF_DAT.001</i> <i>LEA_01.001</i> <i>NUL_DAT.001</i> | 17 Dec 1998 15h31 44.909 | 19981217 |
| ERS-2 | 3645R2.RAW 3645R2.hdr1 3645R2.hdr2 3645R2.hdr3 | <i>DAT_01.001</i> <i>VDF_DAT.001</i> <i>LEA_01.001</i> <i>NUL_DAT.001</i> | 18 Dec 1998 15h31 54.257 | 19981218 |

Tabla 19: Detalle del par de imágenes ERS-1/2 del producto RAW proporcionado por el IEE

Luego se procedió a procesar el producto SLC en ERDAS, pero el software no culminó el procesamiento y se desconocía lo que ocasionaba el error. Entonces utilizando el software de acceso libre DORIS se logró leer el producto SLC confirmando que existía un error interno que imposibilitaba terminar el procesamiento en ERDAS, pero se desconocía el error. Se decidió entonces procesar los interferogramas partiendo de los datos crudos que no contienen errores. Para cumplir con este objetivo fue necesario realizar un entrenamiento del software ROI_PAC en el Instituto CEDIAC de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuyo en Mendoza. Sin embargo al procesar el producto crudo, el software no culminó su procesamiento. Entonces utilizando el lenguaje de programación IDL del software ENVI (Anexo 6) se procedió a la lectura del archivo líder del producto crudo y se detectó que los contenidos de los campos de la fecha de la imagen y del valor del marco de la escena diferían al contenido de la especificación del formato del CEOS (Grabak, 1998). Consecuentemente,

en IDL se modificó los campos identificados. El conjunto de datos proporcionados por la ESA no presentó las dificultades mencionadas anteriormente.

3.2.2. Procesamiento del dato RAW

El procesamiento en ROI_PAC para obtener productos interferométricos consiste en definir la ubicación de las imágenes de radar RAW que van a formar el par interferométrico, del DEM que se va a utilizar, y la configuración del archivo de procesamiento de parámetros (*int.proc*). En ROI_PAC se identifica a cada imagen con una nominación que corresponde a su fecha de adquisición, con la siguiente codificación *aaaammdd*.

De acuerdo al instructivo de ROI_PAC (Fielding, 2009), el archivo *int.proc* especifica dos directorios de imágenes y otros parámetros de procesamiento para un determinado interferograma. El archivo “int.proc” básicamente está compuesto por el siguiente conjunto de palabras claves:

```
SarDir1=fecha1  
SarDir2= fecha2  
IntDir=int_fecha1_fecha2  
DEM=/path/DEM/archivo.dem  
OrbitType=HDR
```

Donde *SarDir1* es el nombre del directorio de la imagen master con los datos crudos, mientras que *SarDir2* es el nombre del directorio de la imagen esclava. La palabra clave *OrbitType* indica el tipo de órbita del interferograma, cuando es HDR corresponde al archivo de lectura del archivo RAW. *IntDir* corresponde al nombre del directorio del interferograma (Fielding, 2009).

3.2.2.1. Órbita precisa

De acuerdo al instructivo del software ROI_PAC (Fielding, 2009), el archivo denominado *int.proc* es un archivo de tipo texto donde se especifican los comandos usados en el procesamiento de los interferogramas. Entre los campos que se especifican existe uno denominado *OrbitType*, que señala el tipo de órbita para procesar los datos satelitales. De acuerdo al sitio de ROI_PAC (2011), este software utiliza tres tipos de órbita para procesar datos ERS-1, ERS-2 y ENVISAT. Es así que la especificación *OrbitType=HDR* indica que los datos de órbita están en el archivo de lectura de la imagen. *OrbitType=PRC* procesa

órbitas precisas generadas por la ESA. Mientras que *OrbitType=ODR* procesa órbitas precisas generadas por el Instituto Delft para la Investigación del Espacio Orientado a la Tierra (DEOS, 2011). Para el procesamiento de las imágenes RAW ERS-1/2 se utilizó las órbitas generadas por el DEOS (Scharroo & Visser, 1998) porque de acuerdo a Scharroo (1997) son buenos datos y su disponibilidad es de acceso libre.

Los **R**egistros de **D**atos **O**rbitales (ODR) son archivos binarios que contienen las posiciones orbitales de un satélite como una función de tiempo (DEOS, 1997). Al utilizar las órbitas ODR se necesita instalar el paquete *getorb*, las indicaciones de instalación están en el sitio de la Universidad de Delft. El paquete *getorb* contiene utilidades como *getorb* y *convdate*, las cuales sirven para manipular los archivos de órbita de Delft como listar e interpolar las órbitas para cualquier época requerida o para un rango de épocas (Scharroo, 2008), y realizar conversiones de fechas.

De acuerdo a Scharroo (2011b) las órbitas precisas para ERS-1 están disponibles para todo el periodo hasta Junio de 1996, que fue cuando el altímetro de radar dejó de funcionar. El altímetro de radar se necesita para computar órbitas para ERS-1 con una buena precisión. Para fechas posteriores de la Misión ERS-1 se tienen entregas rápidas de órbitas que DEOS generó, sin embargo no son tan precisas como lo fueron las anteriores a 1996. Según las preguntas frecuentes desplegadas en el blog del DEOS sobre la determinación de órbitas precisas para ERS (DEOS, 2004), ERS-1 no fue rastreado por ningún sistema de laser entre el periodo Julio 1996 (cuando ERS-1 fue puesto en hibernación) y Julio 1998 (cuando fue oficialmente revivido). El rastreo del satélite por sistema de laser es una necesidad para la determinación de órbita precisa.

Entonces, según la información señalada anteriormente en el proceso de trabajar con ERS se descargó las órbitas de los satélites ERS conforme a las indicaciones del sitio DEOS (Scharroo, 2011a). Para ERS-1 se tienen dos opciones de descarga: órbitas precisas y órbitas de entrega-rápida. El DEOS, en las preguntas de los usuarios que han sido contestadas, especifica la pérdida de exactitud que se puede esperar para las órbitas de entrega-rápida y órbitas preliminares. Las órbitas de entrega-rápida son notablemente cercanas a las órbitas finales, la diferencia entre entrega-rápida y órbita precisa se ha reducido durante ERS-2 a 2 cm RMS en radial, 8 cm en la dirección a lo largo del rastreo (along-track) y 6 cm en la dirección de rastreo transversal (cross-track). Finalmente, se recalca que más cuidado se ha

invertido en las órbitas preliminares, las cuales se diferencian aproximadamente en los valores de 1 cm para RMS en radial, 4 cm en la dirección a lo largo del rastreo y 3 cm en la dirección de rastreo transversal. Las órbitas precisas están disponibles para el tiempo de vida de ERS-1 que fue hasta el final de la Misión Tandem el 6/junio/1996. Por lo tanto, para ERS-1 de acuerdo a los datos que fueron entregados con fines de investigación, se descargó las órbitas de entrega-rápida que están disponibles desde junio 18 de 1999 hasta el final de vida del satélite que fue 12/marzo/2000. Para ERS-2 se descargó las órbitas precisas disponibles desde el 28/abril/1995 hasta el 8/agosto/2003. El Anexo 5 muestra una tabla que indica la disponibilidad de datos de órbita para ERS-1/2.

3.2.2.2. Conformar los pares interferométricos

El siguiente paso consistió en armar los pares interferométricos tomando en cuenta que las imágenes deben tener la misma dirección de órbita, marco, rastreo (track) y ángulo de incidencia. Al armar los pares se eligió una imagen master e imágenes esclavas consecutivas en función del tiempo para que los pares estén referenciados a una sola imagen. A pesar de haber descargado las órbitas ODR de las imágenes disponibles, se procesaron los pares de acuerdo a la existencia de la misma órbita en las dos imágenes. La Tabla 20 muestra los pares procesados que son nombrados posteriormente como IM_{aaaammdd} a la primera imagen o imagen master, y IS_{aaaammdd} a la segunda imagen o imagen esclava. La codificación _{aaaammdd} corresponde a la fecha de adquisición de la escena.

| Adquisición 1ra imagen (aaaammdd) | Orbita | Marco | Adquisición 2da imagen (aaaammdd) | Orbita | Marco | Dirección órbita | Línea de base perpendicular B _⊥ (m) | Intervalo temporal (días) | Comando de órbita en roi_pac |
|---|--------|-------|---|--------|-------|---------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|
| 19981217 | 38819 | 3645 | 19981218 | 19146 | 3645 | descendente | 320 | 1 | HDR |
| 19971216 | 33580 | 3645 | 19981201 | 38590 | 3645 | | 620 | 345 | HDR |
| 19971216 | 33580 | 3645 | 19991221 | 44101 | 3645 | | 432 | 725 | HDR |
| 19971216 | 33580 | 3645 | 20030326 | 41462 | 3645 | | 209 | 1900 | HDR |
| 19981201 | 38590 | 3645 | 19991221 | 44101 | 3645 | | 187 | 380 | HDR |
| 19981201 | 38590 | 3645 | 20030326 | 41462 | 3645 | | 411 | 1555 | HDR |
| 19991221 | 44101 | 3645 | 20030326 | 41462 | 3645 | | 222 | 1175 | ODR |
| 20001101 | 28937 | 3667 | 20020828 | 38456 | 3667 | | 182 | 657 | ODR |
| 20001101 | 28937 | 3667 | 20021211 | 39959 | 3667 | | 105 | 760 | ODR |
| 20020828 | 38456 | 3667 | 20021211 | 39959 | 3667 | | 77 | 103 | ODR |

Tabla 20: Pares interferométricos procesados con ERS-1/2. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo & Visser, 1998)

3.2.2.3. Formación de la imagen enfocada

Al procesar los pares con el comando *make_raw.pl*, el software genera archivos RAW reconocidos por el software. La Tabla 21 describe algunas características de radar del producto RAW generado por ROI_PAC, como es la frecuencia de repetición del pulso (PRF) y la longitud de onda del radar (λ), además se señala el tamaño de la imagen por cantidad de pixeles. Se visualiza que las imágenes no tienen el mismo número de pixeles y en lugar de cortar las imágenes a una sola dimensión, se procedió a identificar los desplazamientos en X y Y del par, ingresar en el archivo *int.proc* los parámetros identificadas como x_start y y_start , el ítem 3.2.2.4 señala el procedimiento efectuado.

| Fecha (aaaammdd) | Dato RAW interno reconocido por ROI_PAC (aaaammdd.raw) | | | | | |
|---------------------|--|----------|------|-------|------|-------|
| | λ (m) | PRF (Hz) | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 19981217 | 0,0565646 | 1679,878 | 412 | 11812 | 0 | 27200 |
| 19981218 | | | 412 | 11812 | 0 | 27200 |
| 19971216 | | | 412 | 11812 | 0 | 29200 |
| 19981201 | | | 412 | 11812 | 0 | 29200 |
| 19991221 | | | 412 | 11812 | 0 | 29199 |
| 20030326 | | | 412 | 11812 | 0 | 29199 |
| 20001101 | | | 412 | 11636 | 0 | 29199 |
| 20020828 | | | 412 | 11636 | 0 | 29200 |
| 20021211 | | | 412 | 11636 | 0 | 29207 |
| 20080319 | | | 412 | 11636 | 0 | 29199 |
| 20011121 | | | 412 | 11812 | 0 | 29200 |
| 20080423 | | | 412 | 11636 | 0 | 29199 |

Tabla 21: Imágenes RAW ERS reconocidas por ROI_PAC

En el proceso de formación de la imagen SAR se generan las imágenes enfocadas e imágenes enfocadas a 16 vistas. Las imágenes a 16 vistas, imágenes multilooks, son imágenes auxiliares no aptas para interferometría, pero permiten ver la topografía del terreno e identificar pixeles comunes en un par para corregir el desplazamiento (offset) en caso de existir. Además, en el proceso de formación se crea la base de línea entre dos órbitas para el área cubierta por las imágenes (Fielding, 2009). La Tabla 22 describe las imágenes enfocadas con las vistas y el tamaño del pixel en rango y acimut, y el tamaño de la imagen por cantidad de pixeles. La Tabla 23 describe las imágenes enfocadas promediadas con 16 vistas en rango y la proporción del pixel (por defecto $pixel_ratio=5$)*16 vistas en acimut (Fielding, 2009). La Figura 54 y Figura 55 muestran los productos SLC a 16 vistas del área completa de las imágenes ERS en la proyección de radar, es decir en dirección acimut (a lo largo del rastreo) y en dirección de rango (a través del rastreo) (Ferretti et al., 2007).

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Fecha (aaaammdd) | Imagen enfocada (aaaammdd.slc) | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|---------|---------------------------|----------------------------|------|------|------|-------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño del pixel | Acimut tamaño del pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 19981217 | 1 | 1 | 7,904 | 4,497 | 0 | 5700 | 0 | 26963 |
| 19981218 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 26963 |
| 19971216 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 30079 |
| 19981201 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 30079 |
| 19991221 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 30078 |
| 20030326 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 30079 |
| 20001101 | | | | | 0 | 5612 | 0 | 30079 |
| 20020828 | | | | | 0 | 5612 | 0 | 30079 |
| 20021211 | | | | | 0 | 5612 | 0 | 30087 |
| 20080319 | | | | | 0 | 5612 | 0 | 30086 |
| 20011121 | | | | | 0 | 5700 | 0 | 30080 |
| 20080423 | | | | | 0 | 5612 | 0 | 30085 |

Tabla 22: Imágenes enfocadas ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

| Fecha (aaaammdd) | Imagen enfocada a 16 vistas (aaaammdd_16rlks.slc) | | | | | | | |
|---------------------|---|---------|---------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño del pixel | Acimut tamaño del pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 19981217 | 16 | 80 | 126,478 | 359,799 | 0 | 356 | 0 | 337 |
| 19981218 | | | | 359,799 | 0 | 356 | 0 | 337 |
| 19971216 | | | | 359,799 | 0 | 356 | 0 | 375 |
| 19981201 | | | | 359,802 | 0 | 356 | 0 | 375 |
| 19991221 | | | | 359,800 | 0 | 356 | 0 | 375 |
| 20030326 | | | | 359,792 | 0 | 356 | 0 | 375 |
| 20001101 | | | | 359,787 | 0 | 350 | 0 | 375 |
| 20020828 | | | | 359,793 | 0 | 350 | 0 | 375 |
| 20021211 | | | | 359,786 | 0 | 350 | 0 | 376 |
| 20080319 | | | | 359,790 | 0 | 350 | 0 | 376 |
| 20011121 | | | | 359,786 | 0 | 356 | 0 | 376 |
| 20080423 | | | | 359,800 | 0 | 350 | 0 | 376 |

Tabla 23: Imágenes enfocadas ERS a 16 vistas. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

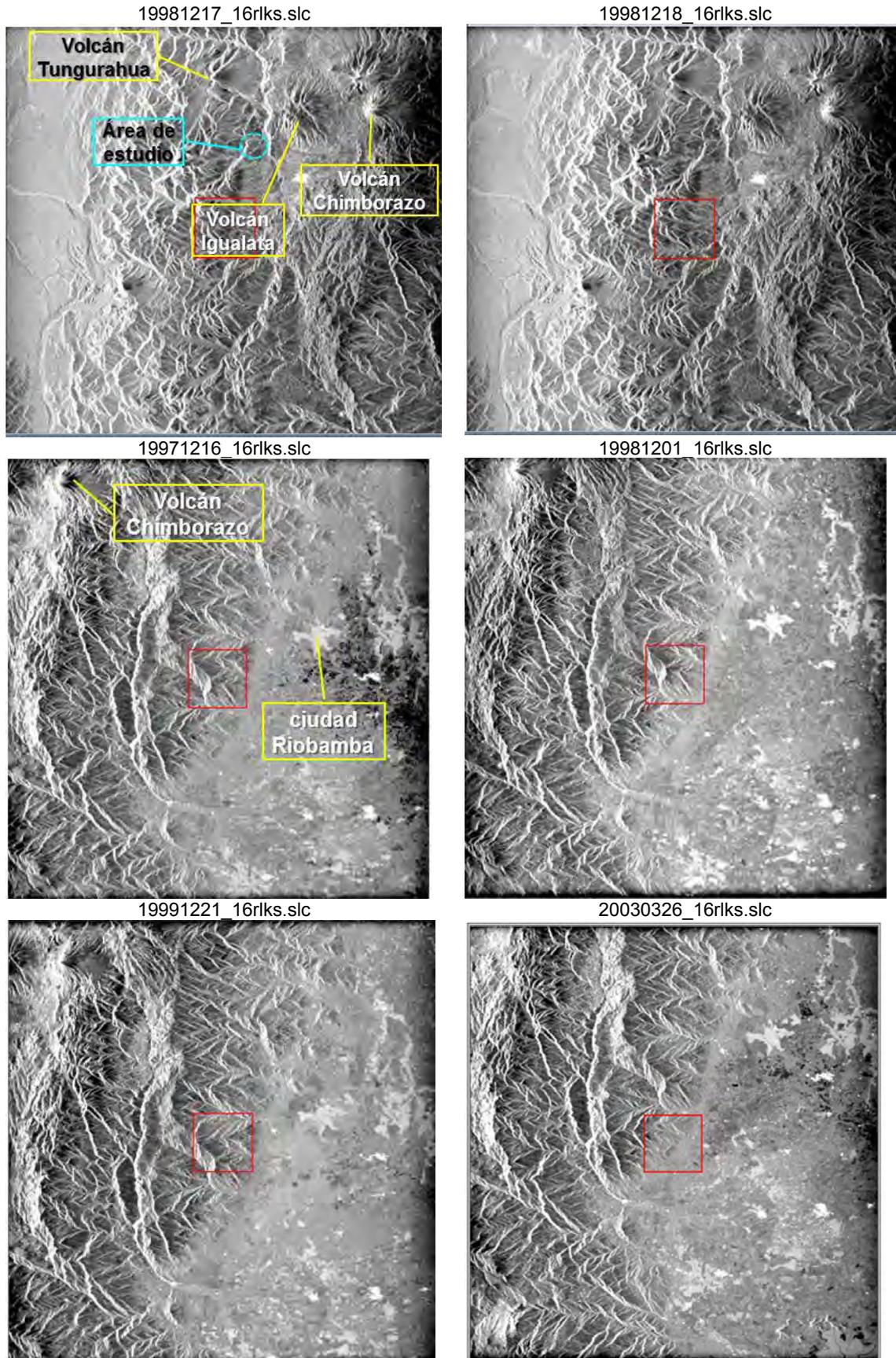


Figura 54: Productos SLC a 16 vistas de ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuentes: (IEE), (ESA)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

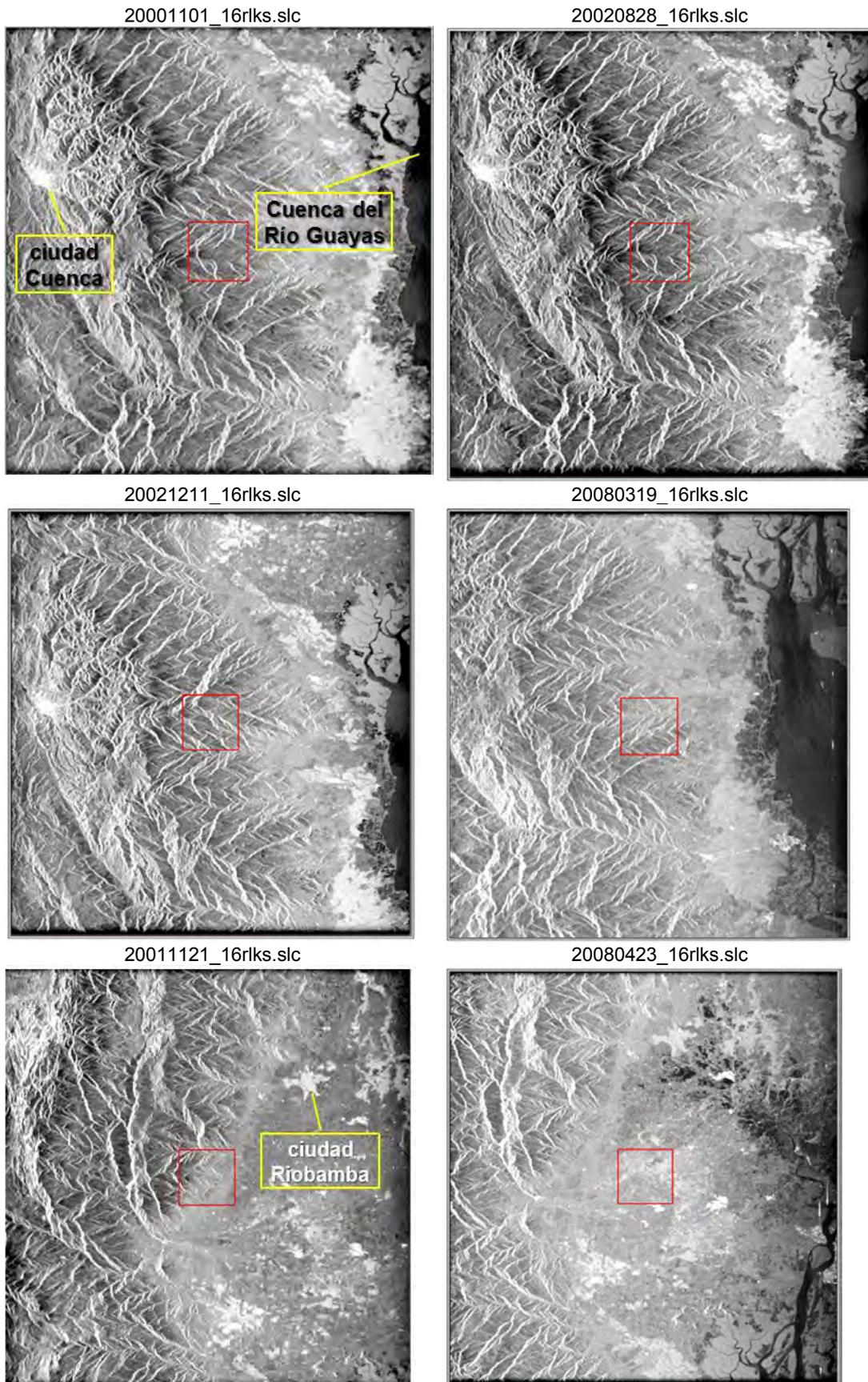


Figura 55: Productos SLC a 16 vistas de ERS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuente: (ESA)

3.2.2.4. Proceso de corrección de desplazamiento de las imágenes que conforman el par interferométrico

En el proceso de la corrección de las imágenes, algunos pares no completaron el proceso y fue necesario ejecutar las instrucciones desplegadas por el sitio de preguntas y respuestas de ROI_PAC (WikiRoiPac). Uno de los problemas detectados y que fue solucionado consistió en manualmente corregir los desplazamientos iniciales por medio de los comandos nombrados “*x_start*” y “*y_start*” (Fielding, 2009) que son ingresados en el archivo *int.proc*. El proceso consistió en abrir los productos SLC a 16 vistas, distinguir un pixel común en las dos imágenes, calcular la diferencia en pixeles de desplazamiento y nuevamente ejecutar el procesamiento. Como se abre el producto SLC a 16 vistas es necesario multiplicar el valor de las columnas por 16 vistas, y el valor de las filas por 80 vistas porque ROI_PAC trabaja con el dato RAW. La Tabla 24 muestra los comandos ingresados en el archivo *int.proc* de los pares definidos anteriormente. Se asigna el valor de 5 en el comando *pixel_ratio* porque las imágenes enfocadas tienen una resolución en acimut cinco veces más que la resolución en rango (Pritchard). En el interferograma IM20001101_IS20020828 al eliminar el comando *pixel_ratio=5* se completó el proceso, mientras que en el interferograma IM20001101_IS20021211 no se completó el proceso con y sin el comando *pixel_ratio*, fue necesario ejecutar instrucciones adicionales para su procesamiento, que se detallan en el ítem 3.2.2.5.

| 1ra imagen (aaaaamdd) | 2da imagen (aaaaamdd) | Línea de base perpendicular B _⊥ (m) | Intervalo (días) | Comandos del archivo int.proc | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--|---------------------|-------------------------------|---------|---------|-------------|-----------|-----------|------------|
| | | | | órbita | x_start | y_start | pixel_ratio | unw_seedx | unw_seedy | flattening |
| 19981217 | 19981218 | 320 | 1 | HDR | -16 | -80 | 5 | 1121 | 475 | topo |
| 19971216 | 19981201 | 620 | 345 | HDR | -32 | -560 | 5 | | | |
| 19971216 | 19991221 | 432 | 725 | HDR | -16 | 1120 | 5 | | | |
| 19971216 | 20030326 | 209 | 1900 | HDR | -16 | -4400 | 5 | | | |
| 19981201 | 19991221 | 187 | 380 | HDR | 16 | 1680 | 5 | 210 | 125 | topo |
| 19981201 | 20030326 | 411 | 1555 | HDR | 16 | -3840 | 5 | | | |
| 19991221 | 20030326 | 222 | 1175 | ODR | 0 | -5520 | 5 | | | |
| 20001101 | 20020828 | 182 | 657 | ODR | -16 | -480 | | 512 | 782 | |
| 20001101 | 20021211 | 105 | 760 | ODR | 32 | 4240 | | | | |
| 20020828 | 20021211 | 77 | 103 | ODR | 48 | 4720 | 5 | | | |

Tabla 24: Comandos del archivo int.proc de los pares definidos con ERS. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo y Visser, 1998)

3.2.2.5. Proceso de mejorar pixel de desenrollamiento de fase

Otra salida del procesamiento es el archivo de coherencia, con la codificación *aaaaamdd.cor*, que contiene la coherencia interferométrica. El archivo de coherencia tiene el formato *rmg* que corresponde al tipo de dato *punto flotante*, por lo que al abrirlo en ENVI se

visualizan la imagen de amplitud y la máscara de coherencia del par definido. Fielding (2009) señala que la amplitud de la imagen de correlación es el promedio de las amplitudes de las dos imágenes. Si el par muestra buena coherencia, el usuario puede establecer un pixel de buena coherencia que cumpla con un umbral, lo ideal es que el valor del pixel sea 0,7-0,8 o mayor, y a partir de este pixel se desenrolle la fase y nuevamente se ejecuta el procesamiento. La ubicación del pixel se ingresa en los comandos nombrados “*unw_seedx*” y “*unw_seedy*” en el archivo *int.proc*. La Tabla 25 describe las imágenes de coherencia con las vistas y el tamaño del pixel en rango y acimut, y el tamaño de la imagen por cantidad de pixel. La Tabla 26 describe las imágenes de coherencia promediadas con 4 vistas en rango y la proporción del pixel (por defecto *pixel_ratio=5*)*4 vistas en acimut (Fielding, 2009), que de igual manera que las imágenes enfocadas a 16 vistas, son imágenes auxiliares no aptas para interferometría, pero permiten localizar un pixel para el desenrollamiento de la fase.

| 1ra imagen (aaaammdd) | 2da imagen (aaaammdd) | Imagen de coherencia (aaaammdd-aaaammdd.cor) | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--|---------|-----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | | RVistas | AVistas | Rango tamaño pixel | Acimut tamaño pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 19981217 | 19981218 | 1 | 5 | 7.904 | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5384 |
| 19971216 | 19981201 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5908 |
| 19971216 | 19991221 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5788 |
| 19971216 | 20030326 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5140 |
| 19981201 | 19991221 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5681 |
| 19981201 | 20030326 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 5245 |
| 19991221 | 20030326 | | | | 22.487 | 0 | 5700 | 0 | 4914 |
| 20001101 | 20020828 | | | | 22.486 | 0 | 5612 | 0 | 5921 |
| 20001101 | 20021211 | | | | 22.486 | 0 | 5612 | 0 | 5161 |
| 20020828 | 20021211 | | | | 22.487 | 0 | 5612 | 0 | 5066 |

Tabla 25: Imágenes de coherencia de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

| 1ra imagen (aaaammdd) | 2da imagen (aaaammdd) | Imagen de coherencia a 4 vistas (aaaammdd-aaaammdd.cor) | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|---|---------|-----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | | RVistas | AVistas | Rango tamaño pixel | Acimut tamaño pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 19981217 | 19981218 | 4 | 20 | 31.619 | 89.949 | 0 | 1425 | 0 | 1346 |
| 19971216 | 19981201 | | | | 89.949 | 0 | 1425 | 0 | 1477 |
| 19971216 | 19991221 | | | | 89.949 | 0 | 1425 | 0 | 1477 |
| 19971216 | 20030326 | | | | 89.949 | 0 | 1425 | 0 | 1285 |
| 19981201 | 19991221 | | | | 89.950 | 0 | 1425 | 0 | 1420 |
| 19981201 | 20030326 | | | | 89.950 | 0 | 1425 | 0 | 1311 |
| 19991221 | 20030326 | | | | 89.950 | 0 | 1425 | 0 | 1228 |
| 20001101 | 20020828 | | | | 89.946 | 0 | 1403 | 0 | 1480 |
| 20001101 | 20021211 | | | | 89.946 | 0 | 1403 | 0 | 1290 |
| 20020828 | 20021211 | | | | 89.948 | 0 | 1403 | 0 | 1266 |

Tabla 26: Imágenes de coherencia a 4 vistas de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

La Figura 56 y Figura 57 muestran las máscaras de coherencia de los pares IM19971216_IS19991221, IM19981201_IS19991221, IM19981217_IS19981218 e IM20001101_IS20020828. En cada par se distingue la imagen de amplitud y la máscara de coherencia, esta última denota áreas donde hay coherencia (áreas blancas). Sin embargo, no necesariamente estas áreas contienen píxeles con valores por encima del umbral definido por el usuario. Además se observa que no existen áreas conectadas, salvo el par IM20001101_IS20020828 que tiene en un área aparentemente continua.

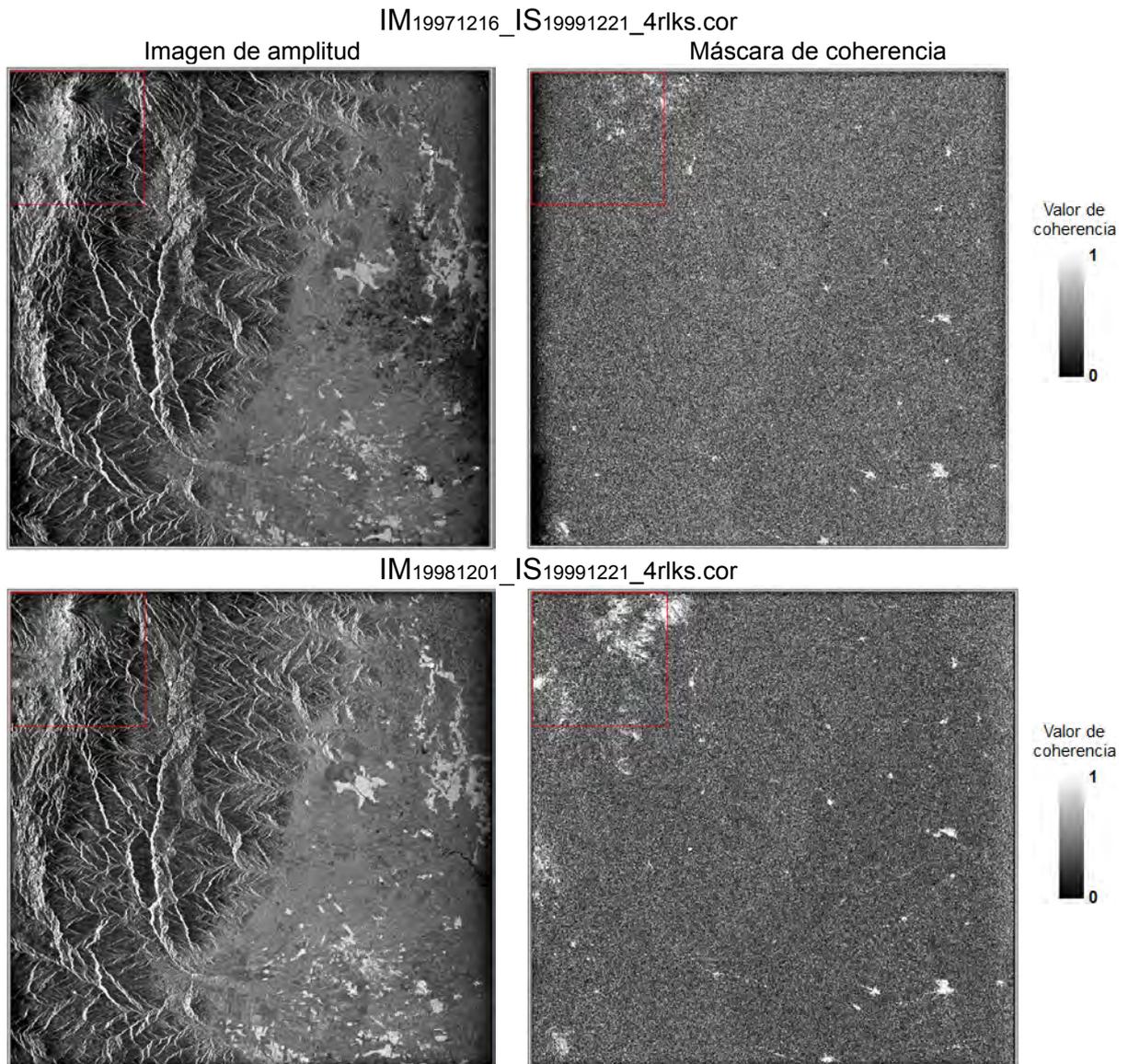


Figura 56: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

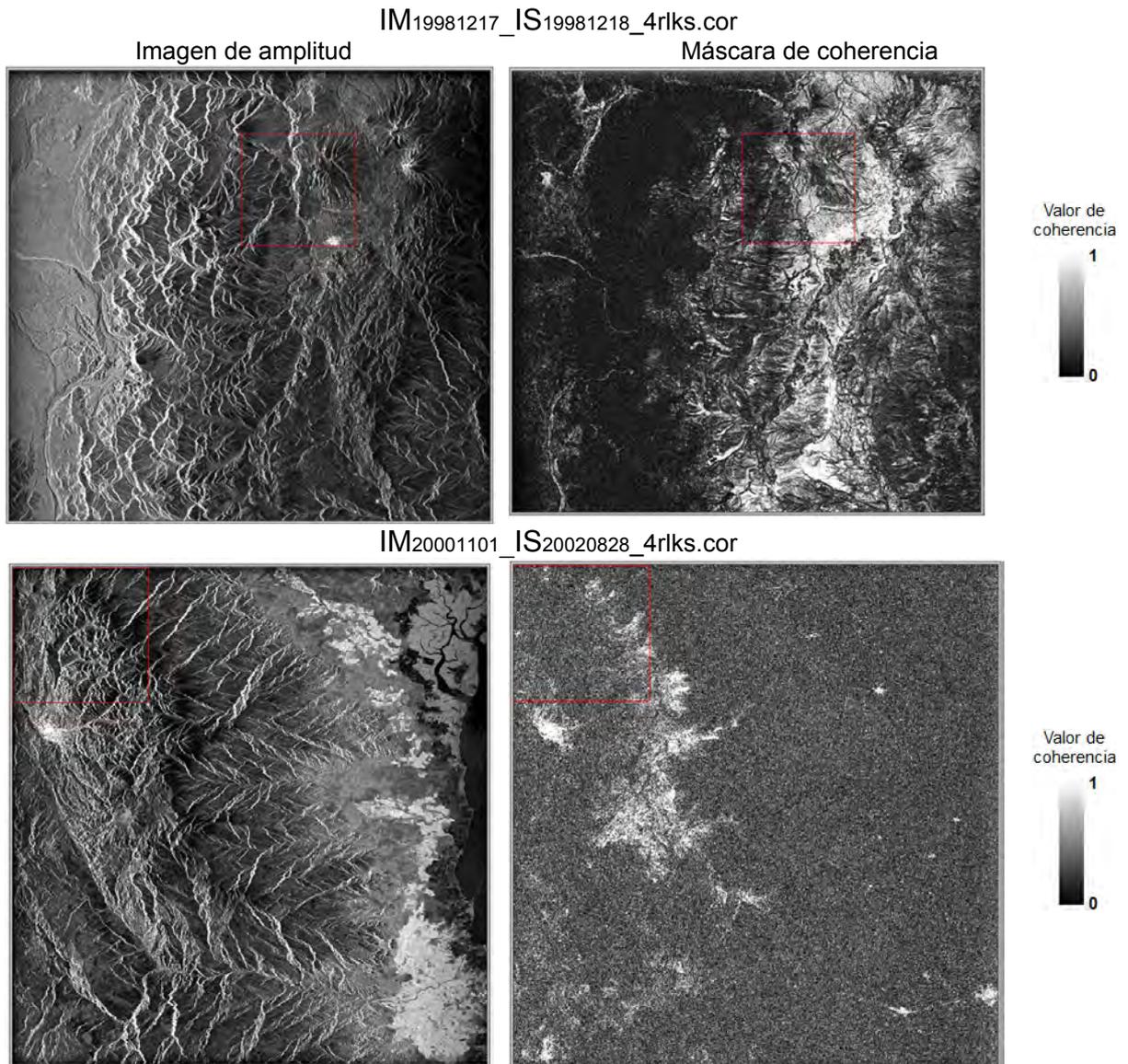


Figura 57: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

En los pares IM19981201_IS19991221, IM19981217_IS19981218 y IM20001101_IS20020828 se ingresó los parámetros *unw_seedx* y *unw_seedy* para mejorar el desenrollamiento de la fase (ver Tabla 14), sin embargo los resultados obtenidos no muestran una gran diferencia con procesamientos anteriores sin haber ingresado los parámetros mencionados. La Figura 59 muestra imágenes de coherencia a 4 vistas y compara el procesamiento realizado con y sin ingreso de los parámetros de desenrollamiento de fase. En el par IM19971216_IS19991221 no fue posible encontrar un área homogénea de buena coherencia. Se observa claramente que los pares no exhiben zonas definidas coherentes ni suaves, la pérdida de coherencia es un

problema típico en áreas con vegetación porque son factores que limitan la utilidad de datos disponibles.

De la Figura 56 y Figura 57, las máscaras de coherencia de los pares $IM_{19981201_IS_{19991221}}$, $IM_{19981217_IS_{19981218}}$ e $IM_{20001101_IS_{20000208}}$ muestran áreas aparentemente coherentes. El valor del umbral de coherencia escogido en los pares mencionados se indica a continuación. La Figura 58 muestra un acercamiento de las escenas, correspondiente al área donde se estableció el pixel para el desenrollamiento de la fase.

| 1ra imagen (aaaammdd) | 2da imagen (aaaammdd) | Columna | Fila | Valor de amplitud | Valor de correlación | Rango de amplitud | Rango de Correlación |
|--------------------------|--------------------------|---------|------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| 19981201 | 19991221 | 210 | 125 | 4.506935 | 0.612325 | | |
| 19981217 | 19981218 | 1220 | 362 | 1.236969 | 0.663915 | 0-20.316095 | 0-0.937656 |
| 20001101 | 20020828 | 512 | 782 | 1.282190 | 0.717532 | 0-6.689038 | 0-0.865680 |

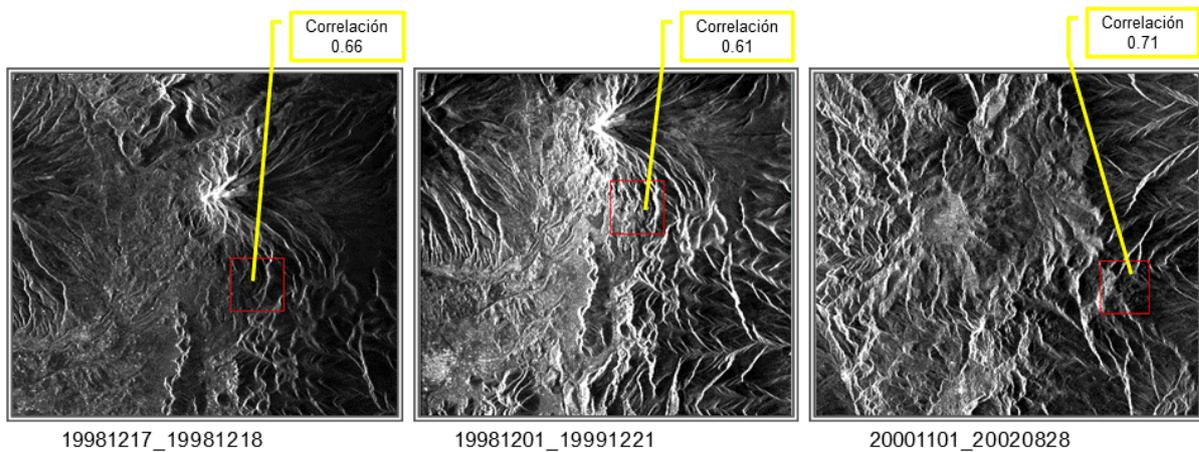


Figura 58: Ubicación del pixel de desenrollamiento

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

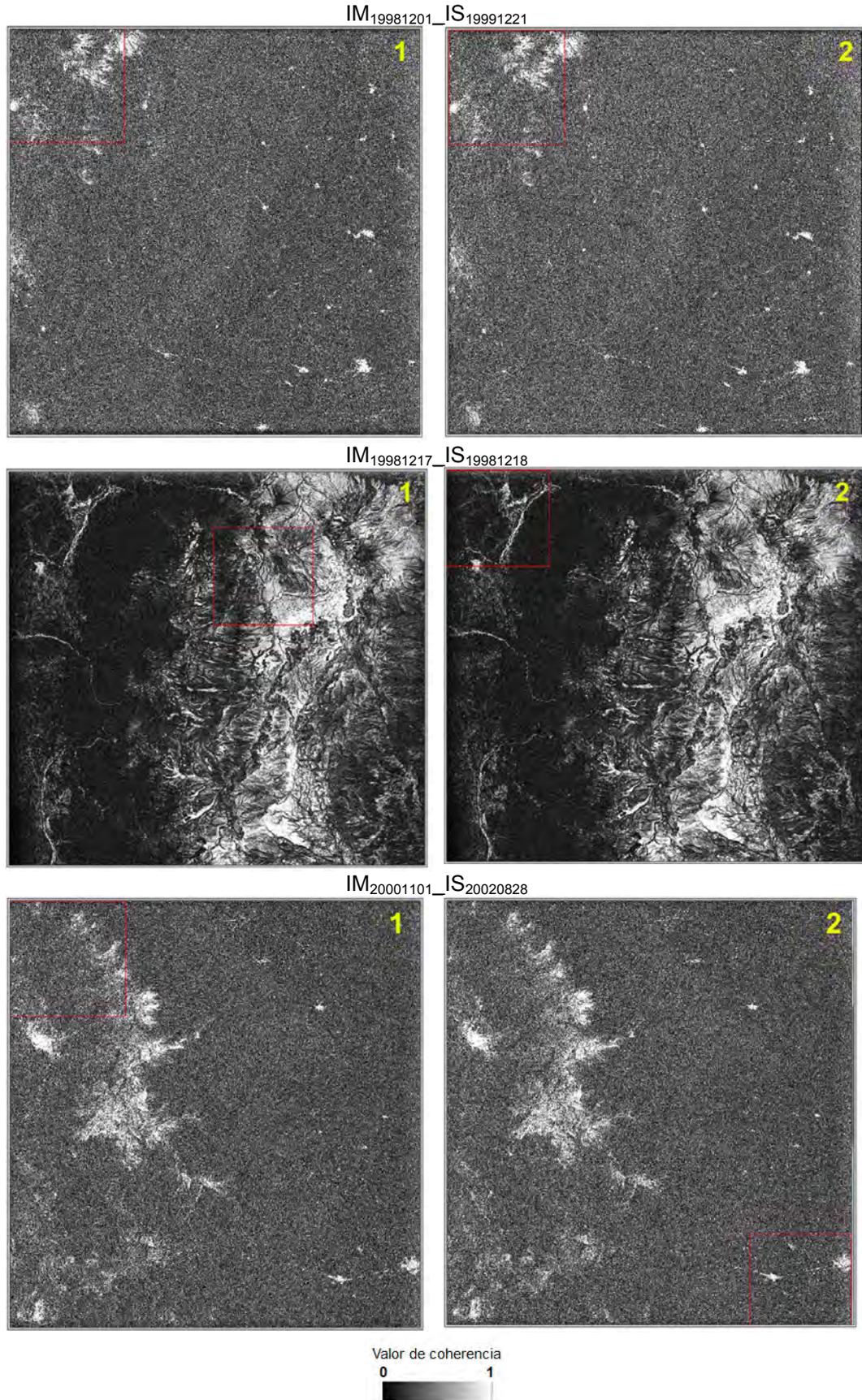


Figura 59: Máscaras de coherencia a 4 vistas: (1) procesamiento anterior, (2) procesamiento para mejorar el desenrollamiento de la fase. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

De acuerdo a Wei & Sandwell (2010) los pares IM19981217_IS19981218 y IM20020828_IS20021211 presentan decorrelación temporal en el área de bosque porque el intervalo de tiempo de adquisición de las dos imágenes es menor a 6 meses. Zebker & Villasenor (1992) indican que la decorrelación se incrementa con el tiempo.

En algunos interferogramas, sin embargo con la inclusión de los comandos de desplazamiento no se completó el proceso, por lo que fue necesario reducir el umbral ejecutando “*fitoff*” manualmente. De acuerdo a Fielding (2009) en el proceso de corrección de la imagen el programa “*make_offset.pl*” primero ejecuta una corrección gruesa para refinar los desplazamientos iniciales, luego el programa “*offset.pl*” ejecuta el programa “*ampcor*” donde el archivo de entrada corresponde a *aaaammdd-aaaammdd_ampcor_gross_in*. Luego el programa “*make_offset.pl*” ejecuta el programa “*fitoff*” que hace un ajuste de primer orden para afinar la transformación. El procesamiento consistió en abrir el archivo *ampcor.in* y editar los desplazamientos con los valores de desplazamiento encontrados manualmente. Luego ejecutar manualmente los programas “*ampcor*” y “*fitoff*”. Como resultado de esta modificación se logró obtener la imagen de coherencia de los pares IM19971216_IS20030326, IM19981201_IS20030326 e IM19991221_IS20030326, los cuales cubren la misma escena, pero la imagen 20030326 tiene un desfase. También se obtuvo la imagen de coherencia de los pares IM20001101_IS20021211 e IM20020828_IS20021211, los cuales cubren la misma escena. La Figura 60 y Figura 61 muestran los resultados obtenidos de este último procesamiento, pero la imagen de coherencia solo resalta las concentraciones de área urbana que actúan como reflectores especulares. Además se obtuvo los interferogramas diferencial y topográfico. Se concluye que debido a la inexistencia de coherencia los interferogramas diferenciales de los pares procesados y mencionados anteriormente no contienen información.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

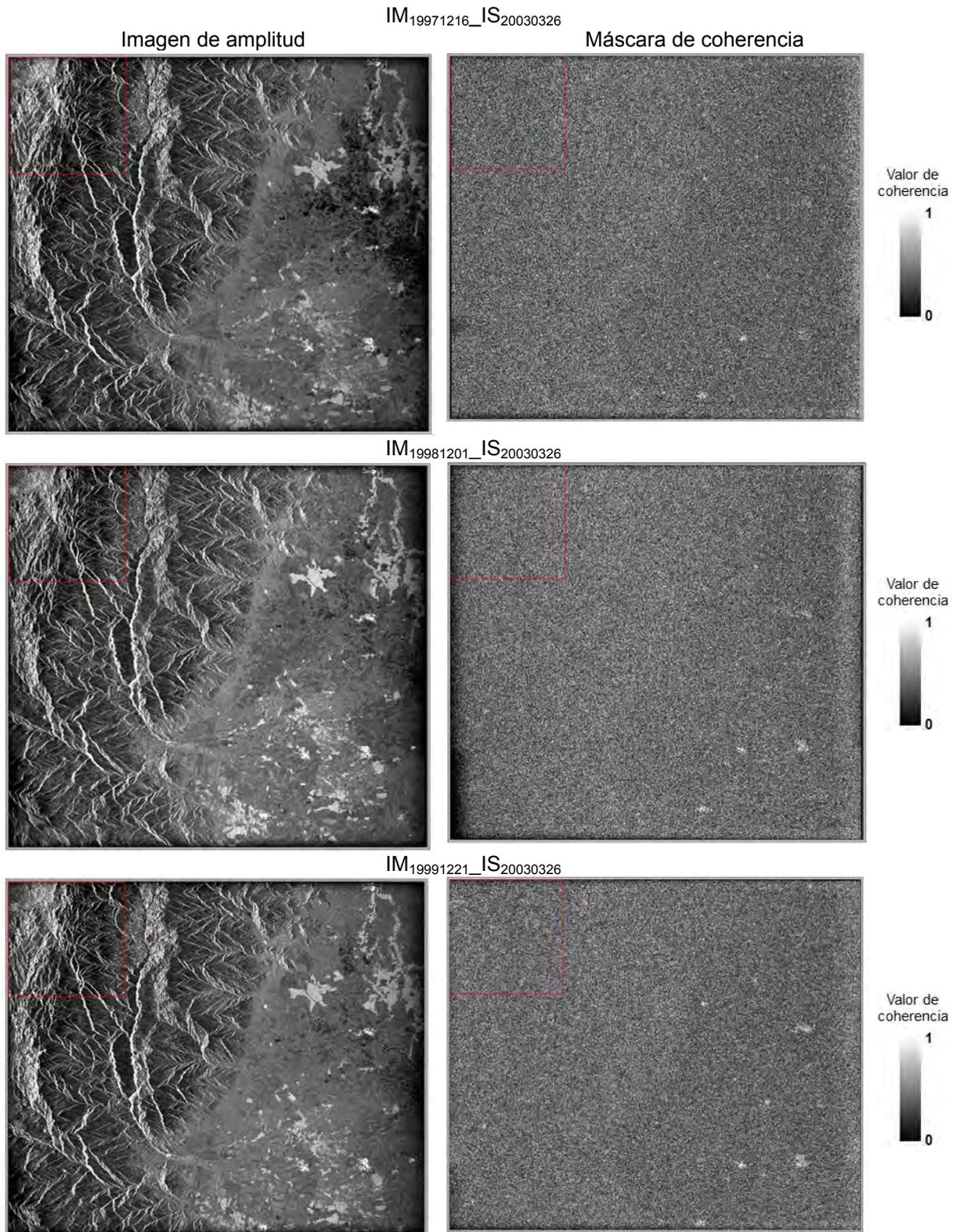


Figura 60: Imagen de coherencia a 4 vistas, mostrando las imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

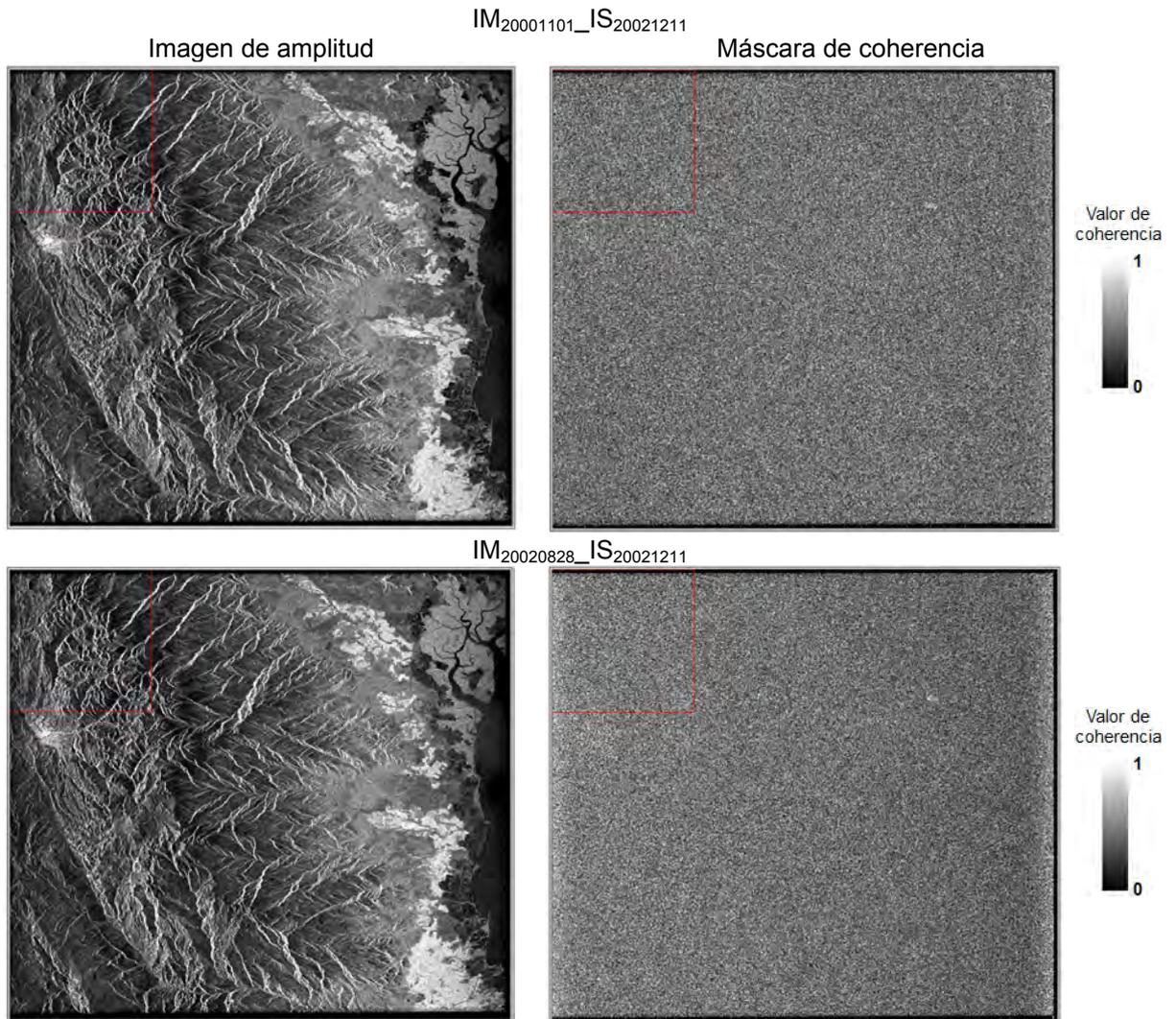


Figura 61: Imagen de coherencia a 4 vistas, mostrando las imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

El par IM₁₉₉₇₁₂₁₆_IS₁₉₉₈₁₂₀₁ se procesó sin inconvenientes, ambas escenas corresponden al mismo marco (frame), pero la máscara de coherencia es muy pobre, solo resalta área urbana (Figura 62).

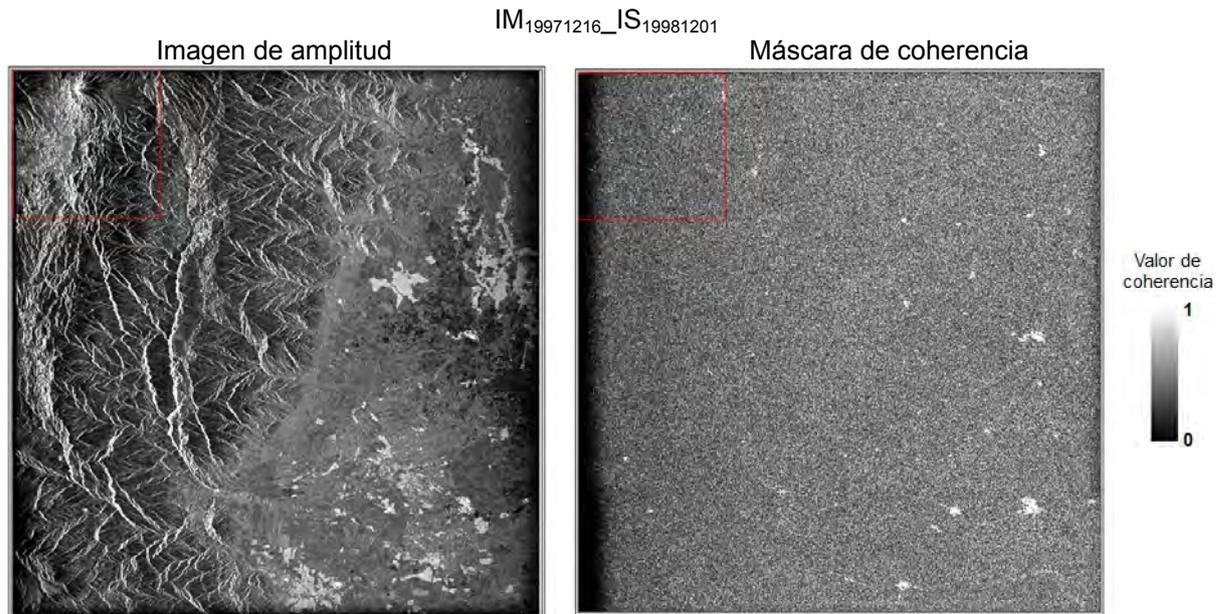


Figura 62: Imágenes de coherencia a 4 vistas del par IM₁₉₉₇₁₂₁₆_IS₁₉₉₈₁₂₀₁, mostrando la imagen de amplitud (izquierda) y la máscara de coherencia (derecha). Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

El sitio de la Universidad de Oregón (WikiRoiPac) indica que el mensaje de error “*Too few points left after culling*” que interrumpe el procesamiento de ROI_PAC, el cual estuvo presente en los procesamientos de los pares no procesados en primera instancia, ocurre porque no se corresponden fácilmente las imágenes debido a desplazamientos muy grandes, o si las imágenes no se enfocaron correctamente, o si existe predominio de presencia de agua en las imágenes. Además, se señala que la mayoría de estos inconvenientes pueden solucionarse manualmente al encontrar los desplazamientos existentes. Anteriormente se describió el trabajo realizado sobre los desplazamientos en rango y acimut, sin embargo es evidente que a pesar de la corrección manual varios pares no muestran máscaras de coherencia, con áreas amplias coherentes, para continuar con el trabajo. Con el fin de conocer un valor de umbral sobre desplazamientos entre dos imágenes que conforman el par y determinar si es procedente realizar el trabajo manual de cálculo de desplazamientos se realizó un análisis basado en la cantidad de pixeles de desplazamiento en rango y acimut de los pares definidos, el cual entrega un valor de porcentaje correspondiente a sus respectivos desplazamientos (Tabla 27).

A continuación se detalla lo encontrado en cada par y se concluye que aunque haya caminos para corregir los desplazamientos en rango y acimut, si el valor de desplazamiento es considerable y excede un umbral de alrededor 3000 pixeles en acimut en las imágenes enfocadas, no se obtiene una buena coherencia. También se observa que son el número de filas lo que más varía cuando se construye las imágenes enfocadas. Se observa que los

interferogramas que no entregan coherencia son los que tienen el mayor porcentaje de desplazamiento en acimut, aunque el par IM₁₉₉₇₁₂₁₆_IS₁₉₉₈₁₂₀₁ presenta porcentaje bajo de desplazamiento, el procesamiento no generó una máscara de coherencia que distinga un área coherente. De acuerdo a Ferretti et al. (2007) los pares que tienen una óptima línea de base, correspondiente al rango de 300-400 m, son:

IM₁₉₉₈₁₂₁₇_IS₁₉₉₈₁₂₁₈
 IM₁₉₉₇₁₂₁₆_IS₂₀₀₃₀₃₂₆
 IM₁₉₉₈₁₂₀₁_IS₁₉₉₉₁₂₂₁
 IM₁₉₉₉₁₂₂₁_IS₂₀₀₃₀₃₂₆
 IM₂₀₀₀₁₁₀₁_IS₂₀₀₂₀₈₂₈
 IM₂₀₀₀₁₁₀₁_IS₂₀₀₂₁₂₁₁
 IM₂₀₀₂₀₈₂₈_IS₂₀₀₂₁₂₁₁

Finalmente se concluye que a pesar de que los pares cumplen con la condición de la línea de base crítica (1.1 Km) según Wei y Sandwell (2010) y tienen correlación temporal, no se completa su procesamiento porque el desplazamiento de las dos imágenes del par es considerable.

| 1ra imagen (aaammdd) | 2da imagen (aaammdd) | Linea de base perpendicular B _⊥ (m) | Intervalo (días) | Comandos del archivo int.proc | | | Desplazamiento | |
|-------------------------|----------------------------|--|---------------------|----------------------------------|---------|---------|----------------|------------|
| | | | | órbita | x_start | y_start | rango (%) | acimut (%) |
| 19981217 | 19981218 | 320 | 1 | HDR | -16 | -80 | 0,28 | 0,29 |
| 19971216 | 19981201 | 620 | 345 | HDR | -32 | -560 | 0,56 | 1,86 |
| 19971216 | 19991221 | 432 | 725 | HDR | -16 | 1120 | 0,28 | 3,72 |
| 19971216 | 20030326 | 209 | 1900 | HDR | -16 | -4400 | 0,28 | 14,62 |
| 19981201 | 19991221 | 187 | 380 | HDR | 16 | 1680 | 0,28 | 5,58 |
| 19981201 | 20030326 | 411 | 1555 | HDR | 16 | -3840 | 0,28 | 12,76 |
| 19991221 | 20030326 | 222 | 1175 | ODR | 0 | -5520 | 0 | 18,35 |
| 20001101 | 20020828 | 182 | 657 | ODR | -16 | -480 | 0,28 | 1,59 |
| 20001101 | 20021211 | 105 | 760 | ODR | 32 | 4240 | 0,57 | 14,09 |
| 20020828 | 20021211 | 77 | 103 | ODR | 48 | 4720 | 0,85 | 15,69 |

Tabla 27: Porcentajes de desplazamiento en rango y acimut de los pares definidos. Fuente de las órbitas ODR: Instituto Delft (Scharroo y Visser, 1998)

A continuación se detalla lo encontrado en cada par en el análisis de los desplazamientos en rango y acimut. En el par IM₁₉₉₇₁₂₁₆_IS₁₉₉₉₁₂₂₁, su desplazamiento en rango representa el 0,28% y en acimut el 3,72% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes como referencia se observa al volcán Chimborazo.

En el par $IM_{19981201_IS_{19991221}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,28% y en acimut el 5,58% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa al volcán Chimborazo.

En el par $IM_{20001101_IS_{20020828}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,28% y en acimut el 1,59% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa el mismo río y región montañosa.

En el par $IM_{19971216_IS_{20030326}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,28% y en acimut el 14,62% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa la misma zona urbana con un desplazamiento en acimut considerable, y al volcán Chimborazo solamente en una de las imágenes.

En el par $IM_{19981201_IS_{20030326}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,28% y en acimut el 12,76% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa la misma zona urbana con un desplazamiento en acimut considerable, y al volcán Chimborazo solamente en una de las imágenes.

En el par $IM_{19991221_IS_{20030326}}$, no existe desplazamiento en rango, el desplazamiento en acimut corresponde al 18,35% del total de las filas del producto SLC. En ambas imágenes se observa el mismo río con un desplazamiento considerable en acimut, y al volcán Chimborazo solamente en una de las imágenes.

En el par $IM_{20001101_IS_{20021211}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,57% y en acimut el 14,09% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa el mismo río con un desplazamiento considerable en acimut.

En el par $IM_{20020828_IS_{20021211}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,85% y en acimut el 15,69% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa el mismo río con un desplazamiento considerable en acimut.

En el par $IM_{19971216_IS_{19981201}}$, su desplazamiento en rango representa el 0,56% y en acimut el 1,86% del total de columnas y filas respectivamente del producto SLC. En ambas imágenes se observa al volcán Chimborazo.

3.2.2.6. Interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

Cuando ROI_PAC procesa con éxito el par interferométrico, el producto final es el interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes, denominado “*geo-aaaammdd-aaaammdd.unw*”. Con el ingreso de los parámetros de corrección de desplazamiento en el par y de ubicación de pixel para el desenrollamiento de la fase, se obtuvo el producto final que es el interferograma relativo en radianes de los pares IM₁₉₉₈₁₂₁₇_IS₁₉₉₈₁₂₁₈ (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) e IM₂₀₀₀₁₁₀₁_IS₂₀₀₂₀₈₂₈ (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), indicando la fase desenrollada del par definido. El par IM₁₉₉₈₁₂₀₁_IS₁₉₉₉₁₂₂₁ no logró desenrollarse.

La Figura 63 corresponde al área de estudio contenida en la provincia de Chimborazo, la escena de radar contienen también parte el sur de la provincia de Tungurahua. La Figura 64 contiene la provincia de Azuay, y parte de las provincias de Guayas y El Oro.

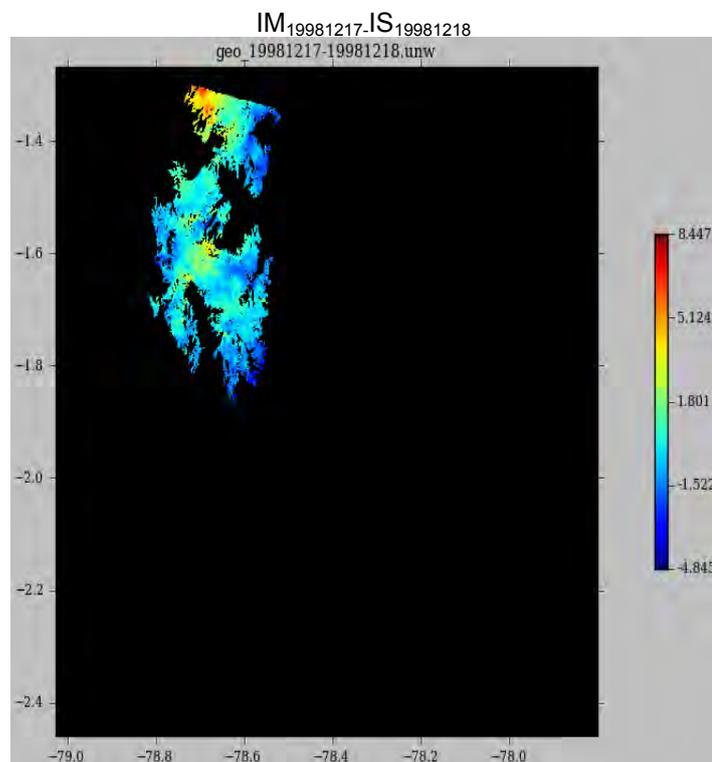


Figura 63: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par IM₁₉₉₈₁₂₁₇-IS₁₉₉₈₁₂₁₈, en unidad de radianes. Fuente: (IEE)

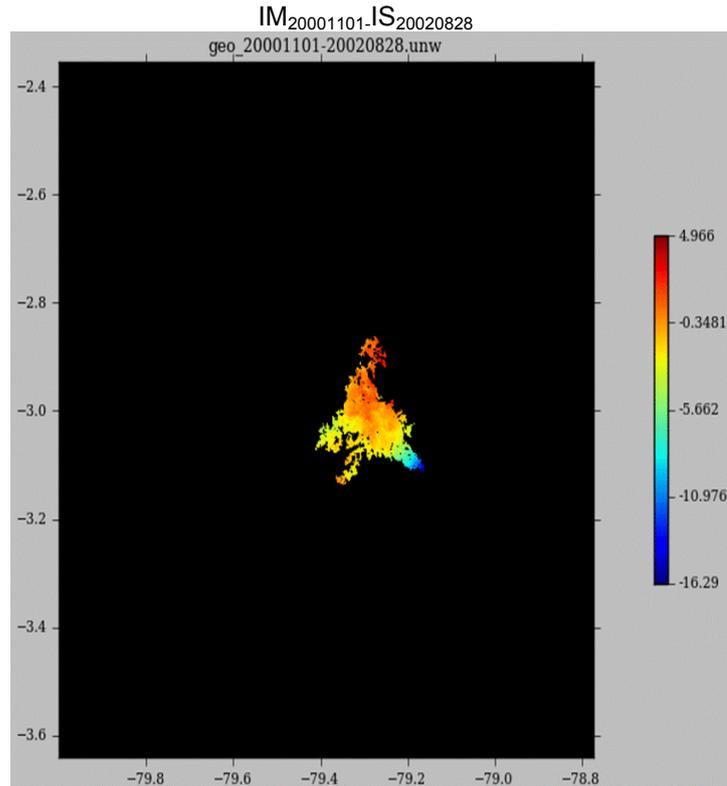


Figura 64: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par **IM₂₀₀₀₁₁₀₁-IS₂₀₀₂₀₈₂₈**, en unidad de radianes. Fuentes: (ESA); datos de órbita (Scharroo, 2008)

3.2.3. Pos-procesamiento

Para obtener la deformación relativa del terreno en centímetros, en ENVI se transforma la fase de unidad de radianes a centímetros de todos los interferogramas, con el ingreso del siguiente algoritmo (Berardino et al., 2002) (Ferretti et al., 2007) donde el valor de λ corresponde a la longitud de onda de ERS:

$$\phi = \frac{4\pi R}{\lambda} \quad (3-1)$$

A continuación se muestra el intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa en centímetros, de los interferogramas donde se desenrolló la fase:

| Pares (IM _{aaaammdd} -IS _{aaaammdd}) | Intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa (cm) | |
|--|--|-------|
| | min | max |
| IM ₁₉₉₈₁₂₁₇ -IS ₁₉₉₈₁₂₁₈ | -1,798 | 3,038 |
| IM ₂₀₀₀₁₁₀₁ -IS ₂₀₀₂₀₈₂₈ | -6,466 | 1,469 |

La Figura 65 muestra el interferograma relativo diferencial, geo referenciado, filtrado, desenrollado, correspondiente al par $IM_{19981217}$ - $IS_{19981218}$, con la denominación en ROI_PAC de *geo-19981217-19981217.unw*, con la fase en unidad de centímetros.

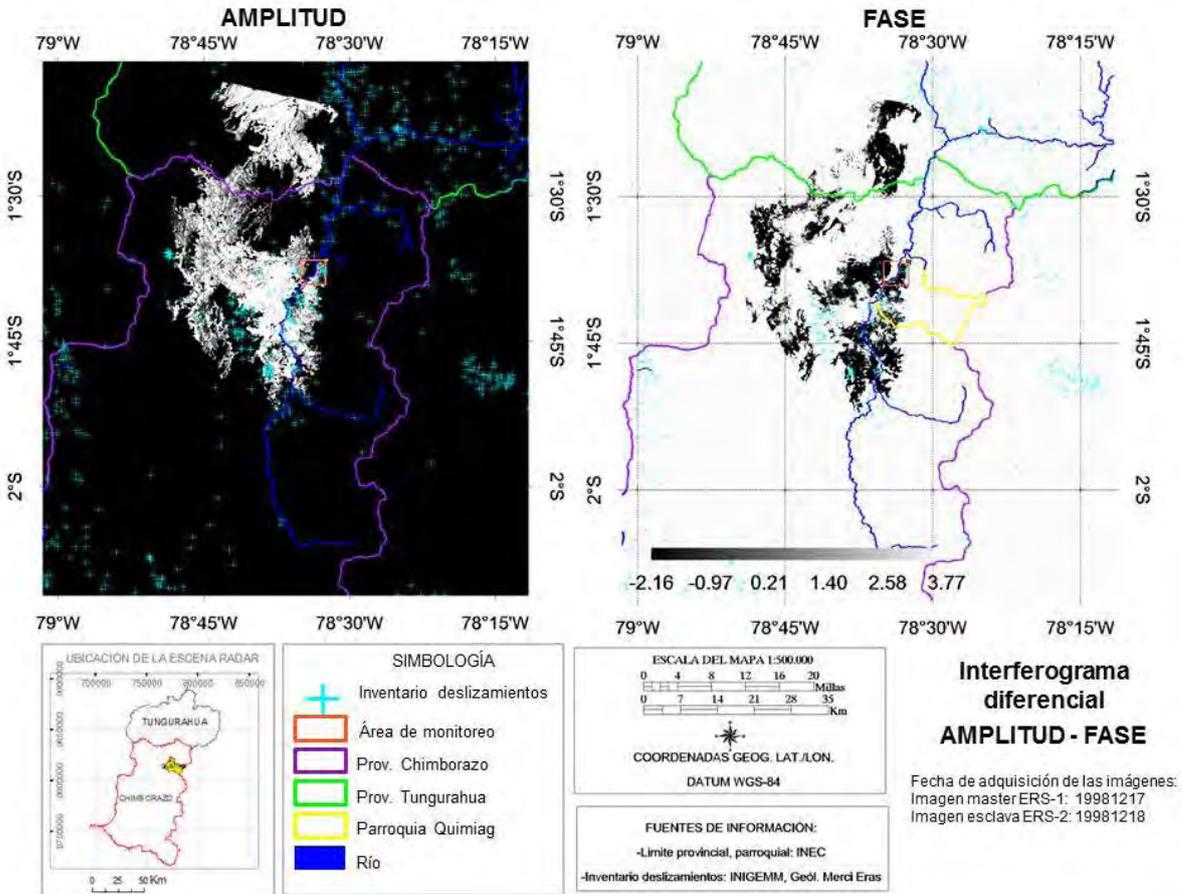


Figura 65: Interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado del par $IM_{19981217}$ - $IS_{19981218}$, fase en centímetros. Paleta de colores de la fase: B-W LINEAR. Fuente: (IEE)

Con el ingreso de comandos se puede geocodificar los productos que entrega ROI_PAC en el procesamiento del interferograma. A continuación se indican los comandos desarrollados por ROI_PAC (Fielding, 2009), los cuales se utilizaron para geocodificar el interferograma diferencial $IM_{20001101}$ - $IS_{20020828}$:

- *cpx2mag_phs*: el archivo de ingreso es el dato complejo, en este caso corresponde al archivo con la nominación *aaaammdd_aaaammdd_sim_ODR_4rlks.int*, el cual tiene la estructura de archivo cpx, con el sufijo de archivo .int. Con el ingreso de este comando se extraen la imagen de amplitud y la imagen de fase.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

- *mag_phs2rmg*: los archivos de ingreso son las imágenes de amplitud y fase extraídas en el paso anterior, y la salida es una imagen con estructura de archivo *rmg*, con el sufijo de archivo *.cor*.
- *geocode.pl*: el archivo de ingreso corresponde a la salida del proceso anterior y como resultado se tiene el interferograma diferencial geo codificado, en amplitud y fase.

La Figura 66 muestra el interferograma diferencial, correspondiente al par $IM_{20001101}$ - $IS_{20020828}$, con la denominación en ROI_PAC de *20001101-20020828_sim_ODR_4rlks.int*, con la fase en unidad de centímetros.

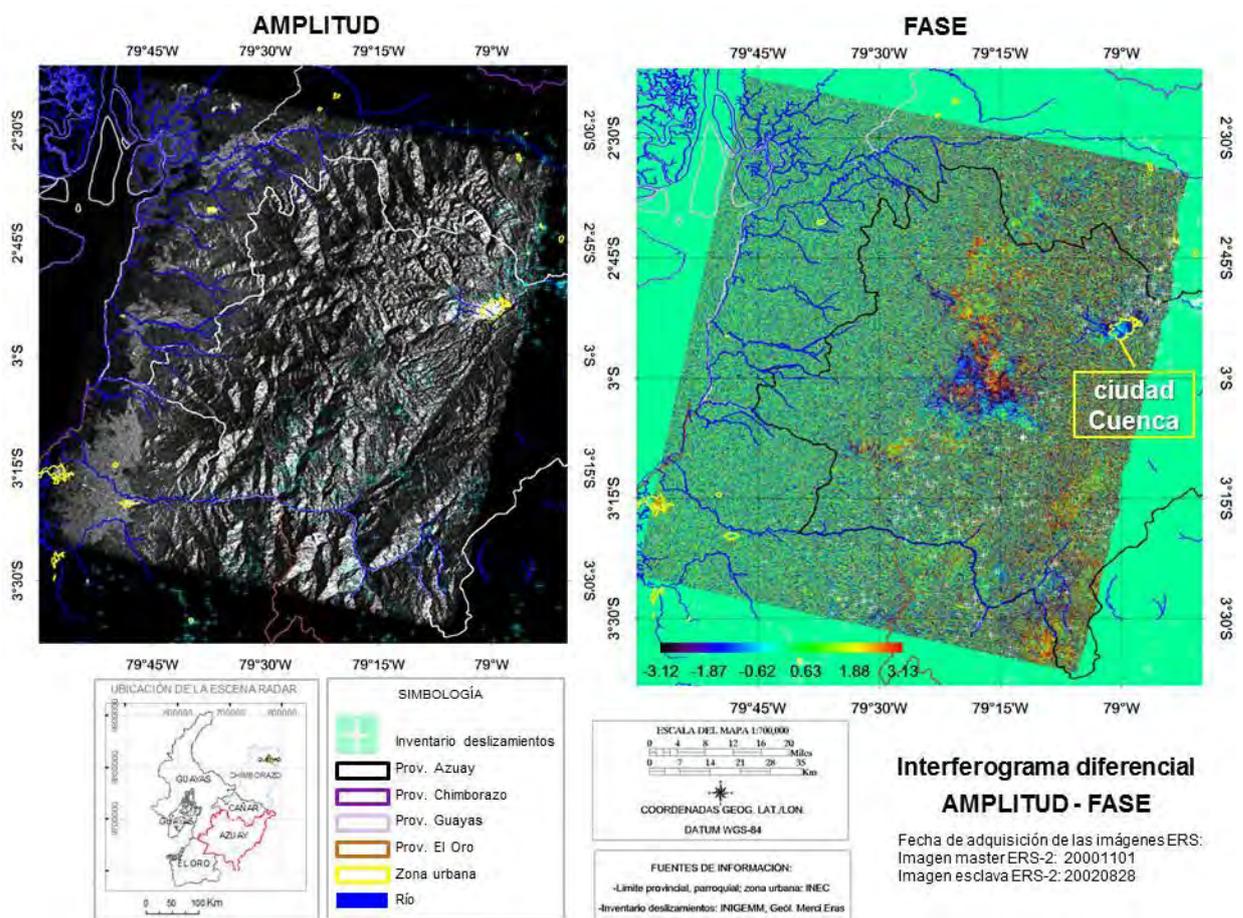


Figura 66: Interferograma relativo diferencial del par $IM_{20001101}$ - $IS_{20020828}$, fase en centímetros. Paleta de colores de la fase: RAINBOW. Fuente: (ESA)

3.2.4. Conclusiones del procesamiento con ERS

- Para mejorar los resultados en el procesamiento de los pares interferométricos, es necesario tener con la mayor cantidad de imágenes disponibles del área de estudio.

- La ocurrencia de movimientos en masa está presente en todo el territorio, independientemente de su región, por lo que es imperativo el acercamiento del IEE con Agencias Espaciales de otros países para tener la mayor cantidad de imágenes para investigación y aplicaciones.

3.3. DATOS ALOS PALSAR

El método de recolección de datos de los productos ALOS sensor PALSAR se basó en la búsqueda de imágenes SAR en el catálogo del ASF, en primera instancia del producto SLC con dirección de órbita ascendente y descendente del área de estudio (Tabla 15). El rango del intervalo temporal fue enero/2006-enero/2011, porque durante este periodo ALOS tuvo su vida útil. Además, debido a la escasa disponibilidad de imágenes se permitió tener algo de cobertura de nubes. Sin embargo, este indicador significa tener cobertura de nubes en los pares interferométricos, que se traduce en artefactos atmosféricos que causan ruido al producto y exageran los valores extremos de desplazamiento en el interferograma. El producto SLC es la imagen de ingreso para procesarla en ERDAS.

Luego, en base a las imágenes de los pares interferométricos procesados en ERDAS, en los cuales se obtuvieron un valor aceptable de coherencia (superior a 0,6, el óptimo es 1,0), se solicitó al ASF imágenes en el producto RAW (Tabla 16) para procesar interferogramas en ROI_PAC.

El procesamiento de los datos ALOS sensor PALSAR en ROI_PAC contiene los pasos desarrollados en el ítem 3.2 sobre el procesamiento de datos ERS, con las siguientes diferencias:

1. **Pre-procesamiento del dato crudo:** El software ROI_PAC al procesar datos ERS y ENVISAT permite especificar datos de órbitas precisas, mientras que con ALOS sensor PALSAR no es necesario ya que la especificación de la órbita está contenida en el archivo leader.

Como se indicó en la sección 2.4.2, en cada escena ALOS se ejecutan varios programas propios de la especificación del software para procesar el satélite ALOS. Así se ejecuta el programa *ALOS_pre_process* para tener un formato de dato reconocido por

ROI_PAC. Además, se ejecuta *ALOS_baseline* para determinar la línea de base interferométrica del par especificado.

También se ejecuta el programa *ALOS_fbd2fbs*, para modificar la frecuencia de muestreo del modo FBD al FBS porque FBS tiene la polarización HH y se necesita tener igual polarización en las imágenes para armar los pares y realizar el procesamiento respectivo.

2. **Procesamiento del dato RAW para ser procesado en ROI_PAC:** una vez listo el DEM, se setea el lugar de trabajo del interferograma, de la misma manera de lo realizado con ERS y se ejecuta el programas “*make_raw_alos.pl*” para tener el dato crudo de ALOS reconocido por ROI_PAC, y a continuación el programa “*process_2pass.pl*” ejecuta toda la cadena de procesos (ver Sección 2.4.2, Figura 48) para obtener el producto final denominado “*geo-aaaamdd-aaaamdd.unw*” que es el interferograma final diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidades de radianes.

De igual manera se abren las imágenes enfocadas a 16 vistas del par interferométrico, para utilizar como imágenes auxiliares en la identificación del pixel de desplazamiento (offset) del par. Luego se calcula los respectivos desplazamientos en X y en Y , considerando los valores en rango y acimut de la imagen de 16 vistas utilizada para localizar el pixel de desplazamiento.

Se genera la máscara de coherencia en base a un valor de umbral establecido por el usuario. El usuario, en la imagen de coherencia a 4 vistas, localiza un pixel de inicio del algoritmo de desenrollado de fase, el cual que procura que esté ubicado en una zona de buena coherencia lo mejor conectado posible con todas las zonas de buena coherencia en la imagen, para que el algoritmo puede desenrollar la fase minimizando los errores. Entonces, con el ingreso de los desplazamientos respectivos del par y de las coordenadas para el desenrollamiento de la fase, nuevamente se ejecuta el programa “*process_2pass.pl*”.

Debido a la penetración en vegetación de la banda L, todos los pares identificados se procesaron con éxito.

3. **Pos-procesamiento de la salida de ROI_PAC en fase relativa en radianes:** de todos los pares se tiene el interferograma relativo diferencial geocodificado, filtrado y

desenrollado, en unidad de radianes. Este producto se recuperó en ENVI, se colocó el sistema de referencia y se formaron las imágenes de amplitud y fase. La imagen de fase se transforma de radianes a centímetros para obtener el interferograma relativo en centímetro.

Luego se realiza la calibración de cada interferograma para atenuar la presencia de artefactos atmosféricos, y finalmente se aplica la técnica de stacking para formar el mapa de desplazamiento en unidad de centímetros del área de estudio.

3.3.1. Pre-procesamiento del dato RAW

3.3.1.1. Estimación del parámetro Línea de Base

De acuerdo a Wei y Sandwell (2010), los valores de línea de base crítica para el modo FBS es 13 Km, mientras que para el modo FBD es 6,5 Km. Según el parámetro de línea de base de la Tabla 28 todos los pares definidos son aptos para interferometría. Las Figuras 67, 68, 69 y 70 muestran gráficamente los valores de línea de base perpendicular & tiempo de adquisición (aaaamm) de los pares formados por una misma imagen master. En la Figura 67 la imagen master corresponde a la fecha de adquisición 20061223, en la Figura 68 la imagen master corresponde a 20070625, en la Figura 69 la imagen master corresponde a 20070810, y en la Figura 70 la imagen master corresponde a 20071216.

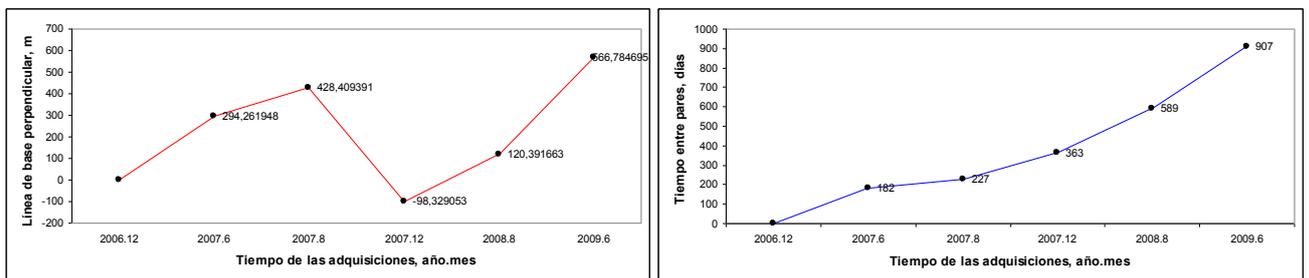


Figura 67: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM₂₀₀₆₁₂₂₃

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

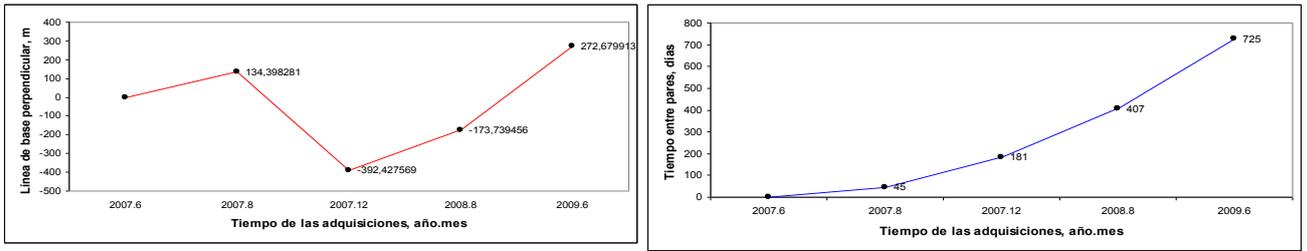


Figura 68: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM₂₀₀₇₀₆₂₅

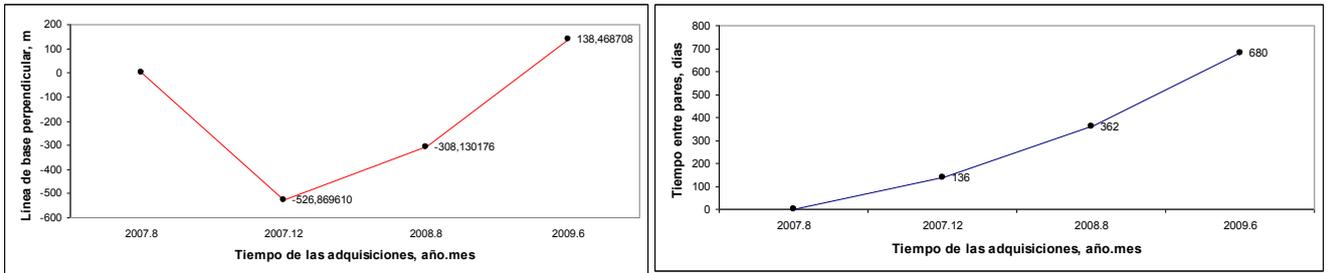


Figura 69: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM₂₀₀₇₀₈₁₀

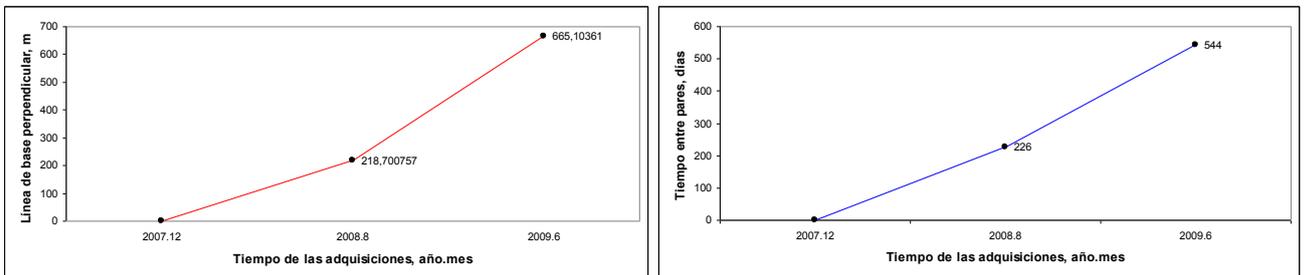


Figura 70: Valores de línea de base perpendicular en los pares con IM₂₀₀₇₁₂₂₆

3.3.1.2. Modificación de la frecuencia de muestreo del modo FBD al FBS

En ROI_PAC se procesó los pares definidos en la Tabla 28. La Tabla 16 muestra las seis escenas del producto RAW procesadas y se observa que las escenas tienen los modos de sensor FBS y FBD, que corresponden a las frecuencias de 28 MHz y 14 MHz, respectivamente. ROI_PAC permite formar un par con frecuencias distintas, pero es necesario modificar la frecuencia de muestreo del modo FBD al FBS para que sea posible realizar el procesamiento interferométrico. Además se selecciona trabajar con la polarización HH porque es la que traen las imágenes FBS. En realidad se puede hacer la conversión de FBD a FBS o viceversa, pero se escogió la primera conversión porque es la que tiene menos ruido que los interferogramas resultantes de la conversión FBS a FBD (ROI_PAC).

3.3.2. Procesamiento del dato RAW

En base a la disponibilidad de imágenes ALOS sensor PALSAR se formaron quince pares, eligiendo una imagen master ($IM_{aaaaammdd}$) e imágenes esclavas ($IS_{aaaaammdd}$) consecutivas posteriores a la fecha de la master, para que los pares estén referenciados a una sola imagen. La Tabla 28 muestra los pares definidos, el valor de línea de base perpendicular entre los pares, su intervalo temporal y el tipo de órbita. ALOS en el archivo de lectura contiene los datos de órbita, por lo que se especifica únicamente el parámetro de $OrbitType=HDR$ (JAXA, 2011).

| Adquisición 1ra imagen (aaaaammdd) | Modo | Adquisición 2da imagen (aaaaammdd) | Modo | Dirección órbita | Línea de base perpendicular B_{\perp} (m) | Intervalo temporal (días) | Comando de órbita en roi_pac |
|------------------------------------|------|------------------------------------|------|------------------|---|---------------------------|------------------------------|
| 20061223 | FBS | 20070625 | FBD | ascendente | 294,261 | 182 | HDR |
| 20061223 | FBS | 20070810 | FBD | | 428,409 | 227 | |
| 20061223 | FBS | 20071226 | FBS | | -98,329 | 363 | |
| 20061223 | FBS | 20080812 | FBD | | 120,391 | 589 | |
| 20061223 | FBS | 20090630 | FBD | | 566,784 | 907 | |
| 20070625 | FBD | 20070810 | FBD | | 134,398 | 45 | |
| 20070625 | FBD | 20071226 | FBS | | -392,427 | 181 | |
| 20070625 | FBD | 20080812 | FBD | | -173,739 | 407 | |
| 20070625 | FBD | 20090630 | FBD | | 272,679 | 725 | |
| 20070810 | FBD | 20071226 | FBS | | -526,869 | 136 | |
| 20070810 | FBD | 20080812 | FBD | | -308,130 | 362 | |
| 20070810 | FBD | 20090630 | FBD | | 138,468 | 680 | |
| 20071226 | FBS | 20080812 | FBD | | 218,700 | 226 | |
| 20071226 | FBS | 20090630 | FBD | | 665,103 | 544 | |
| 20080812 | FBS | 20090630 | FBD | | 446,343 | 318 | |

Tabla 28: Pares interferométricos procesados con ALOS sensor PALSAR

3.3.2.1. Formación de la imagen enfocada

Al procesar los pares con el comando *make_raw_alos.pl*, el software genera archivos RAW reconocidos por el software. La Tabla 29 describe algunas características de radar del producto RAW generado por ROI_PAC, como es la frecuencia de repetición del pulso (PRF), la longitud de onda del radar (λ), además se señala el tamaño de la imagen por cantidad de píxeles. Sobre el tamaño de la imagen en número de píxeles, se observa que todas las escenas tienen igual número de columnas, y el número de filas se diferencia con un pixel en dos imágenes.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Fecha (aaaammdd) | Dato crudo interno reconocido por ROI_PAC (aaaammdd.raw) | | | | | |
|---------------------|--|----------|------|-------|------|-------|
| | λ (m) | PRF (Hz) | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 20061223 | 0,236 | 2141,328 | 413 | 21020 | 0 | 35118 |
| 20070625 | | | | | | 35118 |
| 20070810 | | | | | | 35117 |
| 20071226 | | | | | | 35118 |
| 20080812 | | | | | | 35117 |
| 20090630 | | | | | | 35118 |

Tabla 29 Imágenes RAW ALOS reconocidas por ROI_PAC:

En el proceso de formación de la imagen SAR se generan las imágenes enfocadas e imágenes enfocadas a 16 vistas. Las imágenes a 16 vistas, como se mencionó en el acápite de ERS son imágenes auxiliares no aptas para interferometría, pero permiten ver la topografía del terreno e identificar pixeles comunes en un par para corregir el desplazamiento (offset) en caso de existir. La Tabla 30 muestra algunos parámetros de las imágenes enfocadas, se nota que todas las imágenes tienen igual número de pixeles en las columnas, y existe una diferencia de 1 a 2 pixeles en las filas. Tener igual número de pixeles en las columnas y filas de la imagen SAR no significa que las imágenes no presenten desplazamiento. La Tabla 31 describe las imágenes enfocadas promediadas con 16 vistas en rango y la proporción del pixel (por defecto pixel_ratio=5)*16 vistas en acimut (Fielding, 2009). Se nota que las imágenes enfocadas a 16 vistas tienen igual número de pixeles de columnas y filas, sin embargo es necesario verificar si existen desplazamientos en los pares definidos.

| Fecha (aaaammdd) | Imagen enfocada (aaaammdd.slc) | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|---------|---------------------------|----------------------------|------|-------|------|-------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño del pixel | Acimut tamaño del pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 20061223 | 1 | 1 | 4,684 | 3,547 | 0 | 10303 | 0 | 40474 |
| 20070625 | | | | 3,547 | 0 | 10303 | 0 | 40473 |
| 20070810 | | | | 3,547 | 0 | 10303 | 0 | 40473 |
| 20071226 | | | | 3,547 | 0 | 10303 | 0 | 40473 |
| 20080812 | | | | 3,548 | 0 | 10303 | 0 | 40472 |
| 20090630 | | | | 3,547 | 0 | 10303 | 0 | 40474 |

Tabla 30: Imágenes enfocadas ALOS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

| Fecha (aaaammdd) | Imagen enfocada a 16 vistas (aaaammdd_16rlks.slc) | | | | | | | |
|---------------------|---|---------|---------------------------|----------------------------|------|------|------|------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño del pixel | Acimut tamaño del pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| 20061223 | 16 | 80 | 74,948 | 283,833 | 0 | 643 | 0 | 505 |
| 20070625 | | | | 283,835 | 0 | 643 | 0 | 505 |
| 20070810 | | | | 283,821 | 0 | 643 | 0 | 505 |
| 20071226 | | | | 283,823 | 0 | 643 | 0 | 505 |
| 20080812 | | | | 283,845 | 0 | 643 | 0 | 505 |
| 20090630 | | | | 283,833 | 0 | 643 | 0 | 505 |

Tabla 31: Imágenes enfocadas ALOS a 16 vistas. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

La Figura 71 muestra los productos SLC a 16 vistas del área completa de las imágenes ALOS en la proyección de radar, es decir en dirección acimut (a lo largo del rastreo) y en dirección de rango (a través del rastreo) (Ferretti et al., 2007).

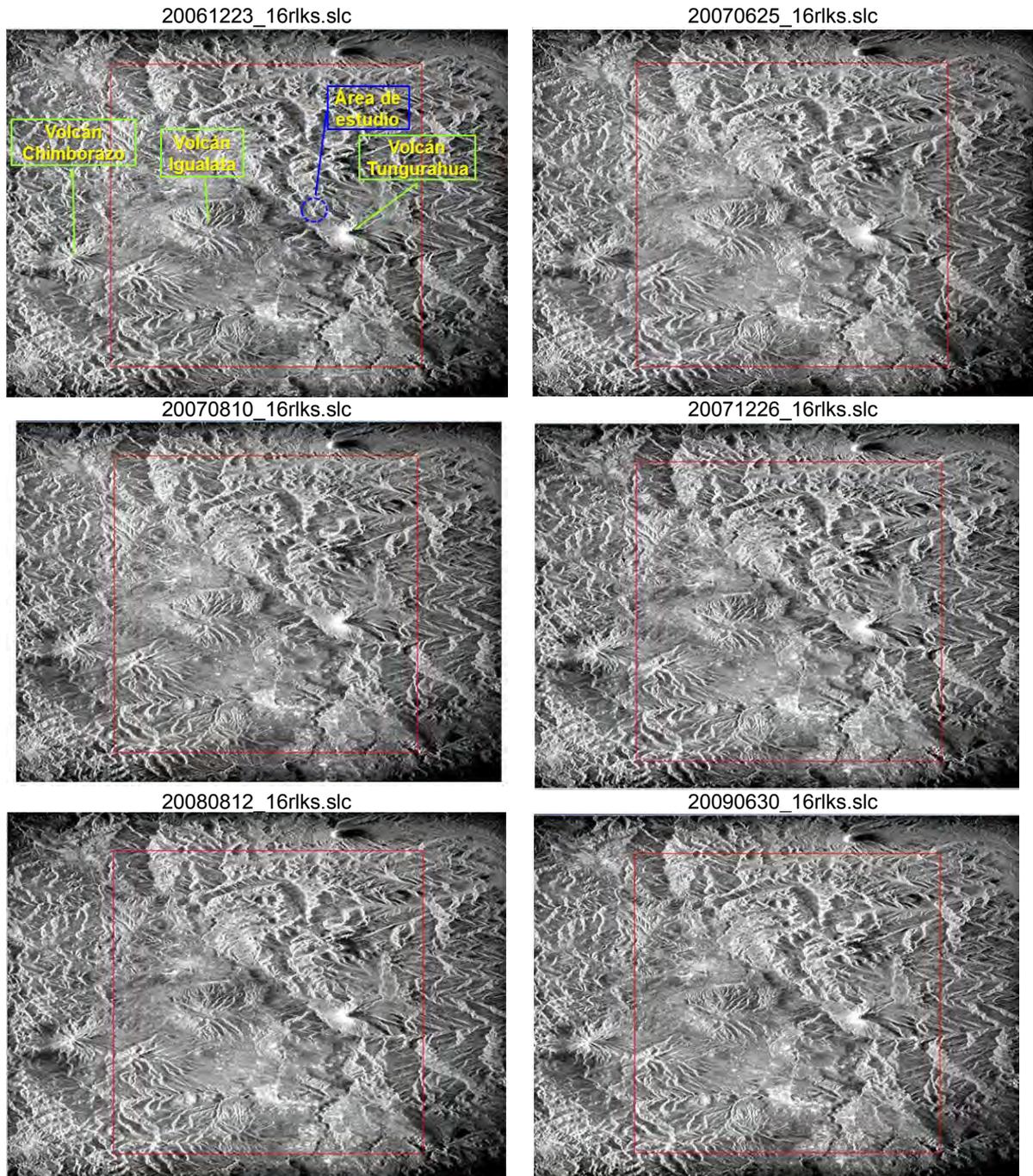


Figura 71: Productos SLC a 16 vistas de ALOS. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas). Fuente: (ASF)

3.3.2.2. Proceso de corrección de desplazamiento de las imágenes que conforman el par interferométrico

Con los comandos nombrados “*x_start*” y “*y_start*”, descritos en el mismo acápite de los datos ERS, se corrige manualmente los desplazamientos iniciales. La Tabla 32 muestra los pares procesados que son nombrados posteriormente como *IMaaaaamdd* a la primera imagen o

imagen master, y $IS_{aaaammdd}$ a la segunda imagen o imagen esclava. La codificación *aaaammdd* corresponde a la fecha de adquisición de la escena.

Debido a la culminación con éxito del procesamiento de los pares, se trató de escoger la ubicación del mismo pixel para el desenrollamiento de la fase de los interferogramas.

Como se observa en la Tabla 30 la diferencia de filas entre las escenas es de uno a dos pixeles, sin embargo una vez identificado la diferencia de cantidad de pixeles en las imágenes enfocadas a 16 vistas con su transformación respectiva a aplicarse en las imágenes enfocadas, existe un valor distinto de desplazamiento en los pares definidos (ver columnas *x_start* y *y_start* en la Tabla 32).

| 1ra imagen (aaaammdd) | 2da imagen (aaaammdd) | Línea de base perpendicular B_{\perp} (m) | Intervalo temporal (días) | Comandos del archivo int.proc | | | | |
|--------------------------|--------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| | | | | órbita | x_start | y_start | unw_seedx | unw_seedy |
| 20061223 | 20070625 | 294,261 | 182 | HDR | -80 | 80 | 1170 | 880 |
| 20061223 | 20070810 | 428,409 | 227 | HDR | -48 | 80 | 1170 | 880 |
| 20061223 | 20071226 | -98,329 | 363 | HDR | 16 | 80 | 1170 | 880 |
| 20061223 | 20080812 | 120,391 | 589 | HDR | 16 | -80 | 1170 | 874 |
| 20061223 | 20090630 | 566,784 | 907 | HDR | | | | |
| 20070625 | 20070810 | 134,398 | 45 | HDR | 32 | 0 | 1170 | 880 |
| 20070625 | 20071226 | -392,427 | 181 | HDR | 96 | 0 | 1170 | 880 |
| 20070625 | 20080812 | -173,739 | 407 | HDR | 80 | -160 | 1170 | 880 |
| 20070625 | 20090630 | 272,679 | 725 | HDR | -16 | 0 | 1170 | 880 |
| 20070810 | 20071226 | -526,869 | 136 | HDR | 64 | 0 | 1170 | 880 |
| 20070810 | 20080812 | -308,130 | 362 | HDR | 48 | -160 | 1170 | 880 |
| 20070810 | 20090630 | 138,468 | 680 | HDR | -64 | 0 | 1170 | 880 |
| 20071226 | 20080812 | 218,700 | 226 | HDR | -16 | -160 | 1170 | 880 |
| 20071226 | 20090630 | 665,103 | 544 | HDR | -128 | -80 | 1170 | 880 |
| 20080812 | 20090630 | 446,343 | 318 | HDR | -112 | 160 | 1170 | 880 |

Tabla 32: Comandos del archivo int.proc de los pares definidos con ALOS

3.3.2.3. Proceso de mejorar pixel de desenrollamiento de fase

La imagen de coherencia, con la codificación *aaaammdd.cor*, contiene la coherencia interferométrica. Al abrir la imagen de coherencia se tiene dos imágenes: la imagen de amplitud multi-vista y la máscara de coherencia (Fielding, 2009). Esta última permite que el usuario identifique visualmente un área coherente, para posteriormente ubicar un pixel y con el ingreso de los comandos nombrados “*unw_seedx*” y “*unw_seedy*” en el archivo *int.proc*, se indica que a partir de allí se realice el desenrollamiento de la fase.

La Tabla 33 describe las imágenes de coherencia con las vistas y el tamaño del pixel en rango y acimut, y el tamaño de la imagen por cantidad de pixel. La Tabla 34 describe las imágenes de coherencia promediadas con 4 vistas en rango y la proporción del pixel (por

defecto $\text{pixel_ratio}=5$)*4 vistas en acimut (Fielding, 2009), que de igual manera que las imágenes enfocadas a 16 vistas, son imágenes auxiliares no aptas para interferometría, pero permiten localizar un pixel para el desenrollamiento de la fase.

| Pares (IM _{aaaaamdd} -IS _{aaaaamdd}) | Imagen de coherencia (aaaaamdd-aaaaamdd.cor) | | | | | | | |
|--|--|---------|-----------------------|------------------------|------|-------|------|------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño pixel | Acimut tamaño pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₆₂₅ | 1 | 5 | 4,684 | 17,739 | 0 | 10303 | 0 | 8074 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | | | | 17,739 | | | | 8074 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 17,739 | | | | 8073 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 17,739 | | | | 8079 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 17,739 | | | | 8081 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | | | | 17,739 | | | | 8093 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 17,739 | | | | 8091 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 17,739 | | | | 8062 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 17,739 | | | | 8087 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 17,738 | | | | 8091 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 17,738 | | | | 8061 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 17,738 | | | | 8087 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 17,738 | | | | 8059 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 17,738 | | | | 8084 |
| IM ₂₀₀₈₀₈₁₂ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 17,740 | | | | 8066 |

Tabla 33: Imágenes de coherencia de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

| Pares (IM _{aaaaamdd} -IS _{aaaaamdd}) | Imagen de coherencia a 4 vistas (aaaaamdd-aaaaamdd.cor) | | | | | | | |
|--|---|---------|-----------------------|------------------------|------|------|------|------|
| | RVistas | AVistas | Rango tamaño pixel | Acimut tamaño pixel | xmin | xmax | ymin | ymax |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₆₂₅ | 4 | 20 | 18,737 | 70,958 | 0 | 2575 | 0 | 2018 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | | | | 70,958 | | | | 2018 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 70,958 | | | | 2018 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 70,958 | | | | 2019 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 70,958 | | | | 2020 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | | | | 70,958 | | | | 2023 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 70,958 | | | | 2022 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 70,958 | | | | 2015 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 70,958 | | | | 2021 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | | | | 70,955 | | | | 2022 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 70,955 | | | | 2015 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 70,955 | | | | 2021 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | | | | 70,955 | | | | 2014 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 70,955 | | | | 2021 |
| IM ₂₀₀₈₀₈₁₂ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | | | | 70,961 | | | | 2016 |

Tabla 34: Imágenes de coherencia a 4 vistas de los pares interferométricos. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

Las Figuras 72, 73 y 74 muestran las máscaras de coherencia de los pares definidos anteriormente, donde se visualizan dos áreas coherentes claramente definidas. Las áreas no

están conectadas en toda la escena, excepto el par $IM_{20070625}-IS_{20070810}$ en el cual casi totalmente se desplegó la fase.

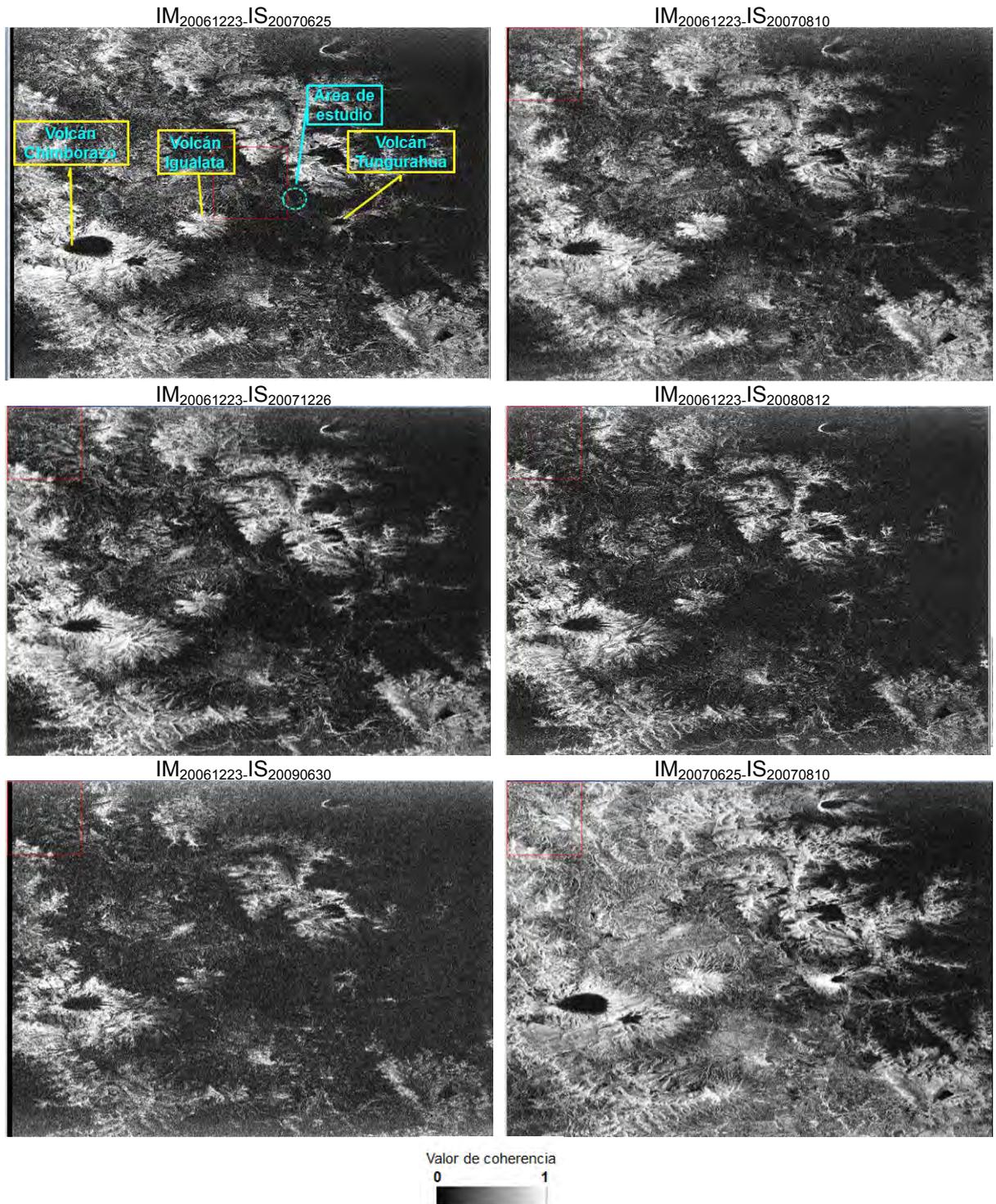


Figura 72: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

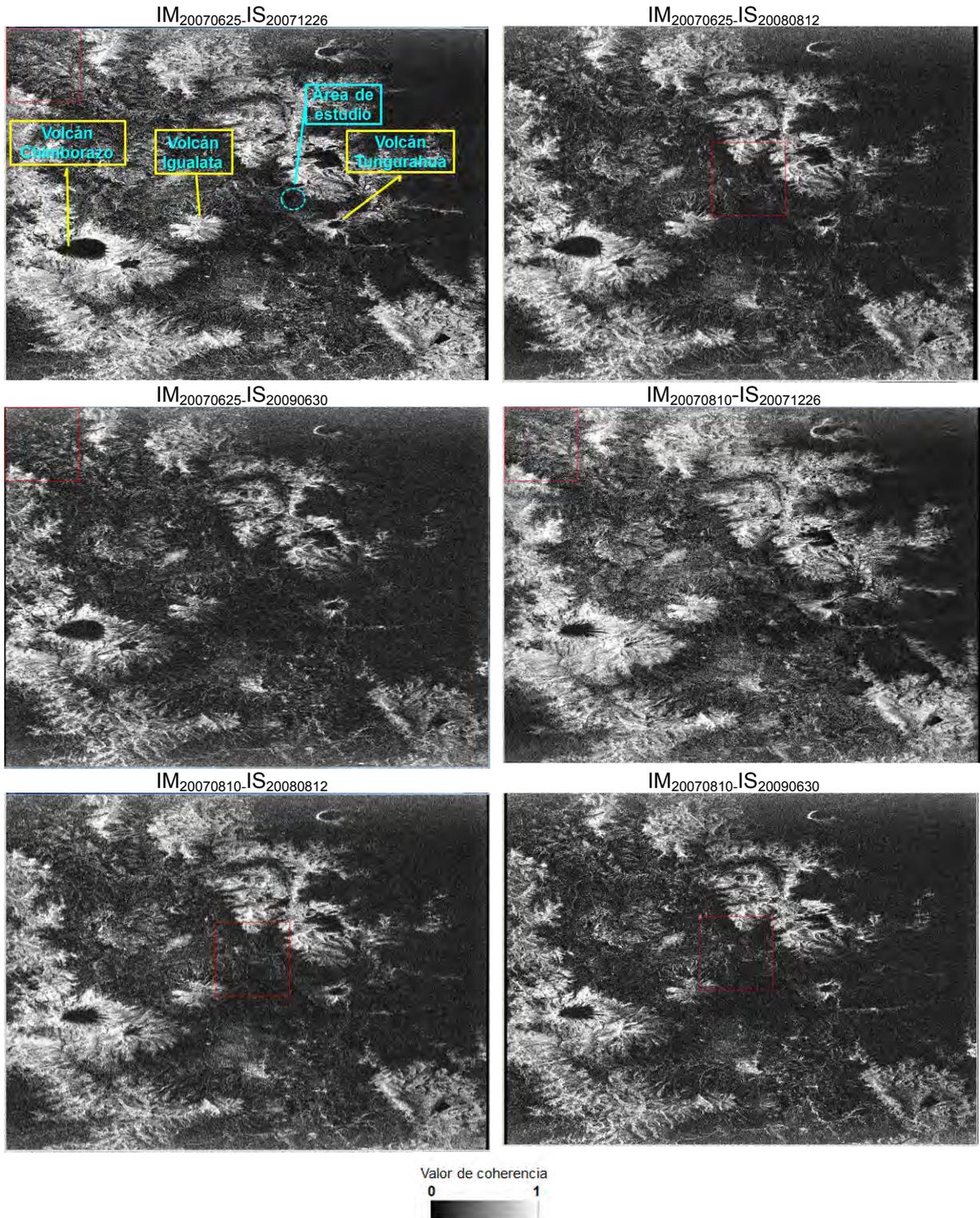


Figura 73: Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

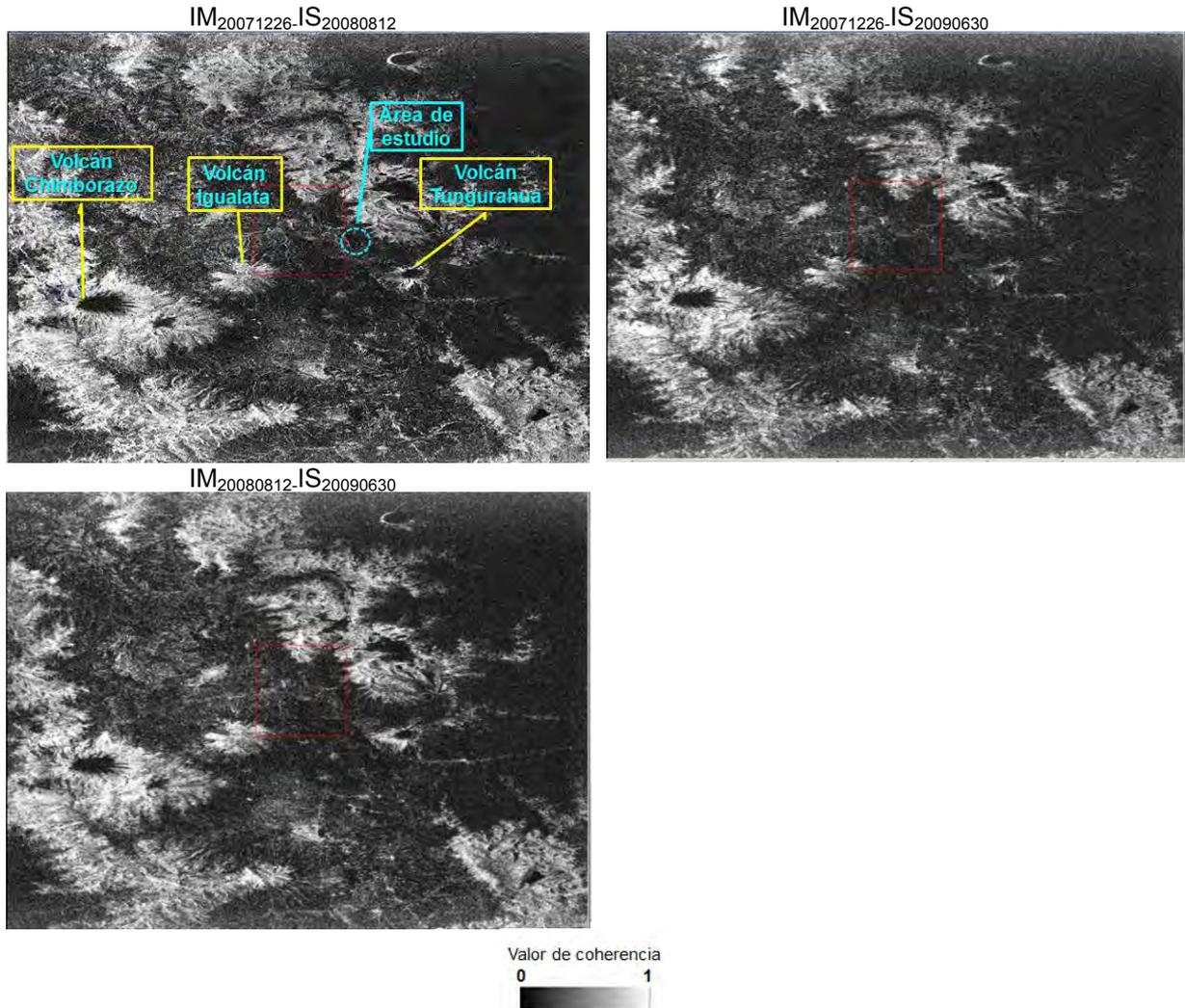


Figura 74_ Imágenes de coherencia a 4 vistas, mostrando la máscara de coherencia. Proyección: coordenadas de radar en rango (columnas) y acimut (filas)

3.3.2.4. Interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

El producto final es el interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes, denominado “*geo-aaaammdd-aaaammdd.unw*”. Con el ingreso de los parámetros de corrección de desplazamiento en el par y de ubicación de pixel para el desenrollamiento de la fase, se obtuvo el producto final de los quince pares definidos indicando la fase desenrollada.

A pesar de no tener similar cantidad de pares de ERS, donde se desenrolló la fase, en este punto resalta la diferencia de trabajar con datos ERS que penetran poco en la vegetación y trabajar con datos ALOS que penetran la vegetación. Las Figuras 75, 76, 77 y 78 muestran los interferogramas relativos en unidad de radianes.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

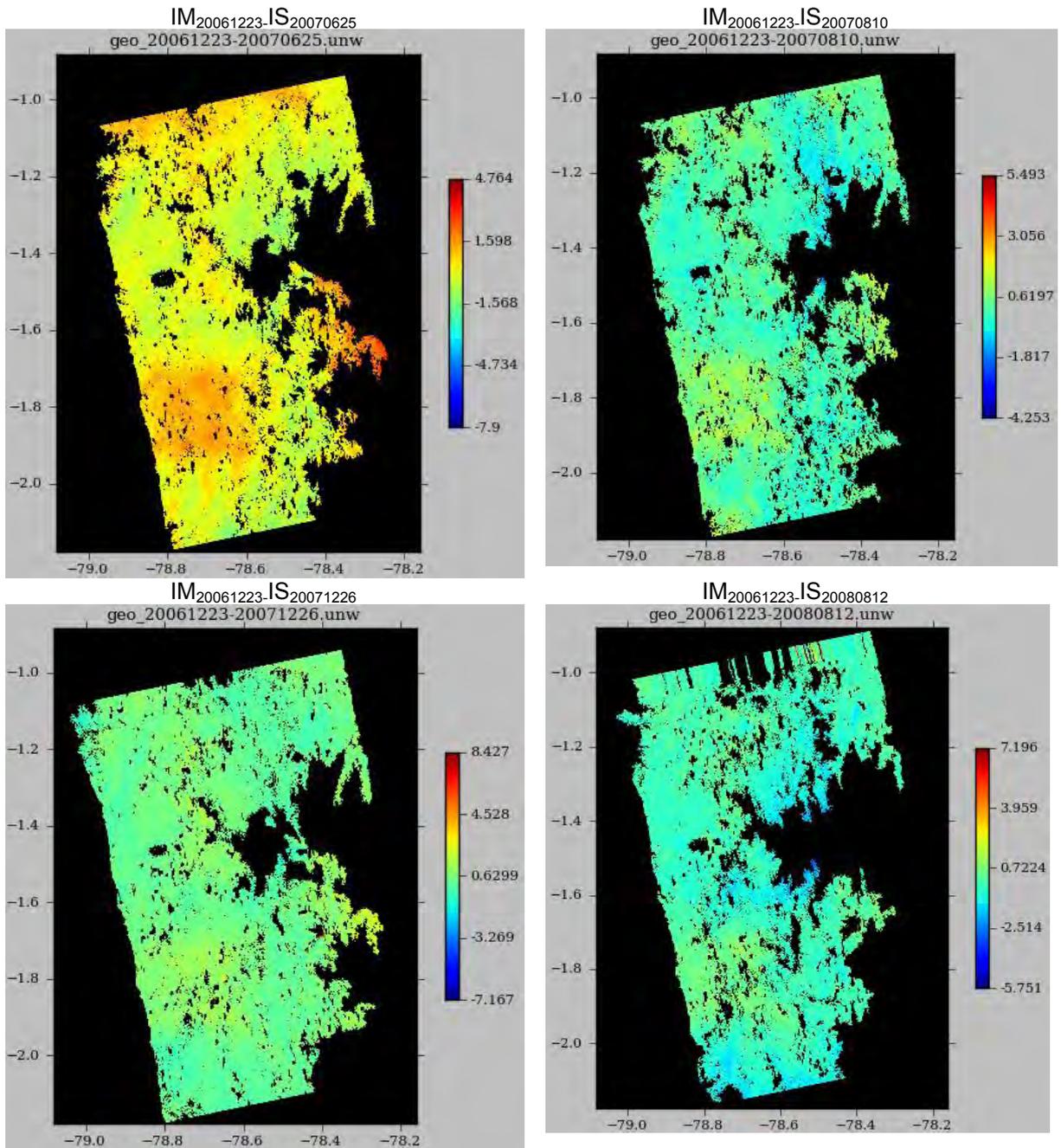


Figura 75: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

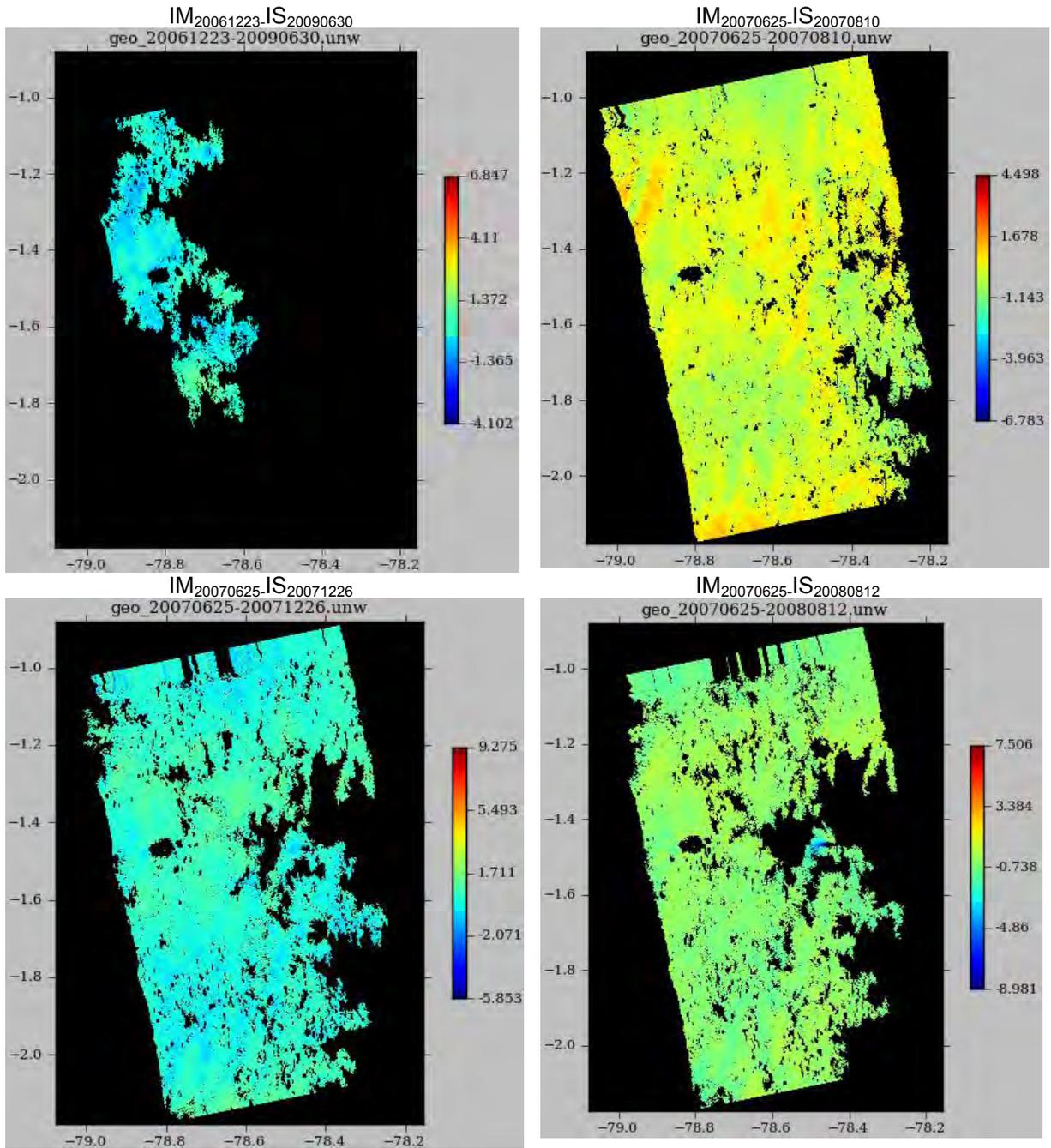


Figura 76: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

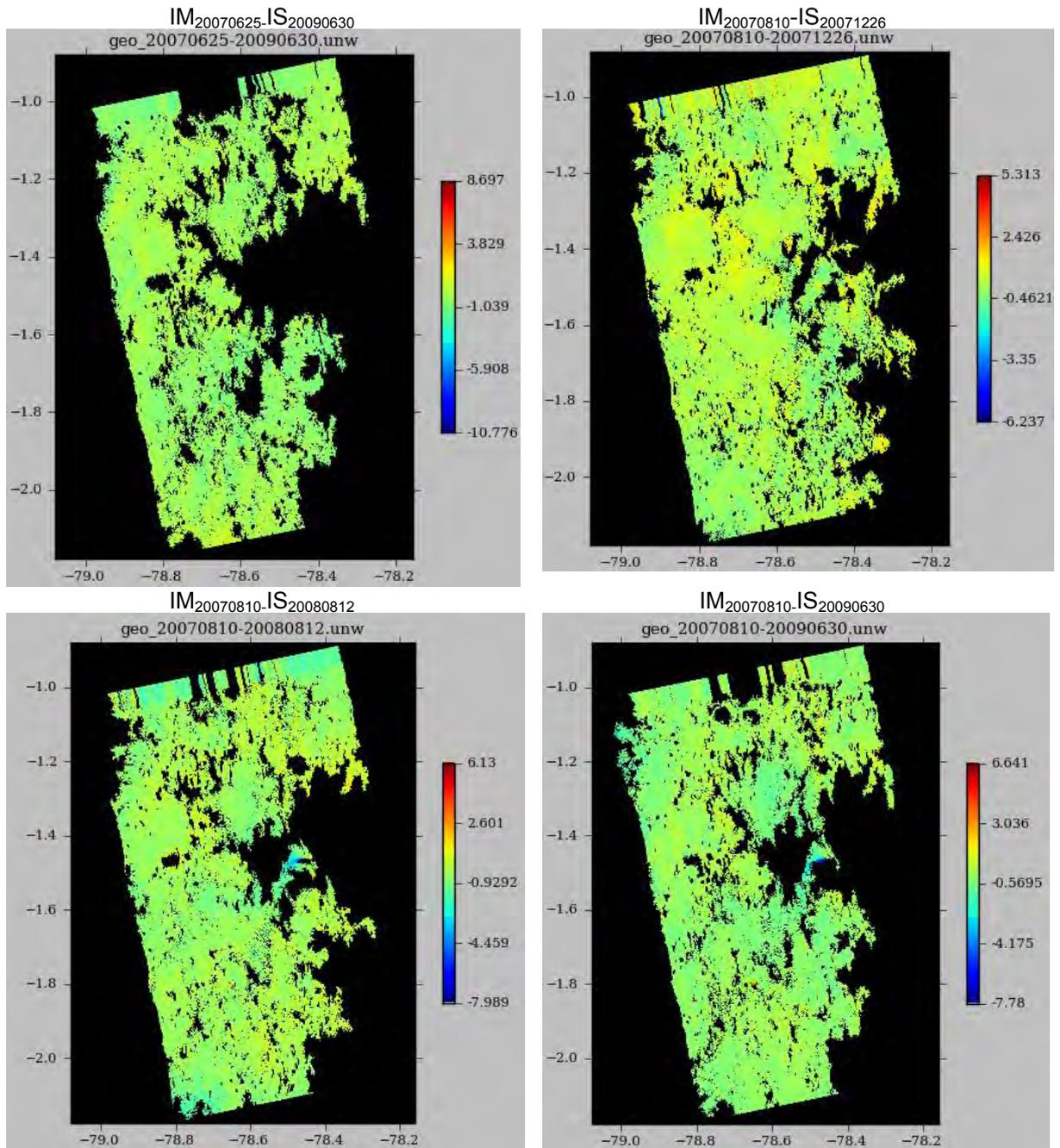


Figura 77: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)

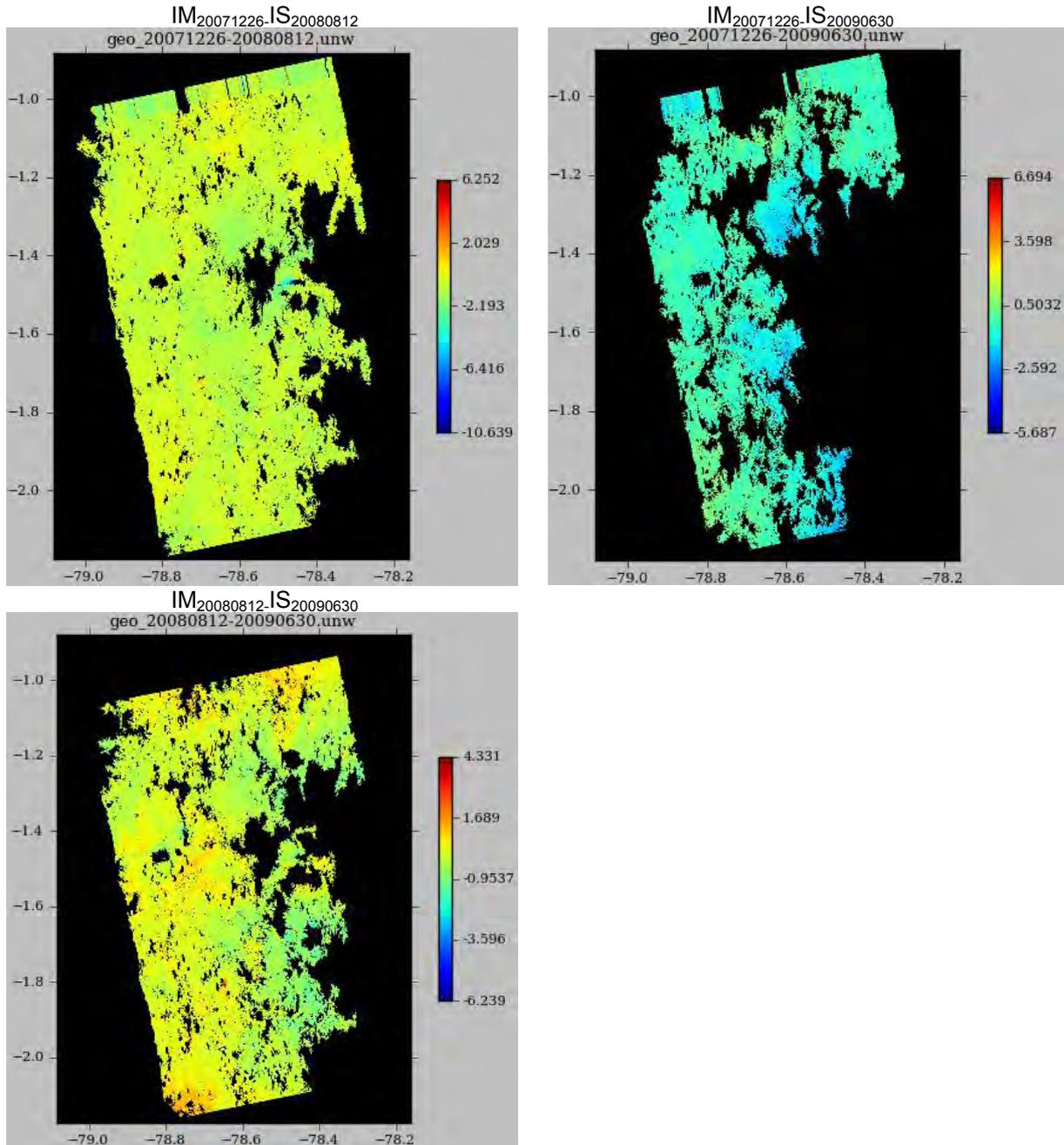


Figura 78: Interferogramas relativo diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado, en unidad de radianes. Fuente: (ASF)

3.3.3. Conclusiones del procesamiento con ALOS

- Para obtener mejor coherencia se volvió a re-hacer todos los pares interferométricos, con la inclusión en el archivo denominado “int.proc” de la ubicación de columna y fila de un píxel con buen valor de coherencia, ubicado en un área cercana al área de estudio. A pesar de haber realizado éste procedimiento, el área de estudio en su totalidad muestra baja coherencia, apenas pocos píxeles tienen un valor superior a 0,6. Como se indicó en el

fundamento teórico los efectos de acortamiento (*foreshortening*), *layover* y sombra dependen si la pendiente local del terreno está frente al sensor. Las imágenes crudas ALOS PALSAR procesadas corresponden a adquisición ascendente.

- En el área de estudio, un resultado fundamental es la máscara de coherencia, que permite visualizar claramente la diferencia de trabajar con datos ALOS y ERS.
- Sobre los resultados de las máscaras de coherencia es importante tener buena coherencia en el área de estudio para que la fase se desenrolle en esa área. Caso contrario, como se puede visualizar en los resultados de los interferogramas relativos de ERS y ALOS, existen áreas en los interferogramas donde no se desenrolló la fase, y consecuentemente no es posible analizar esas áreas. Lamentablemente se visualiza en los interferogramas que el área de estudio está en el borde de área que no fue desenrollada. Apenas pocos interferogramas contienen completamente el monitoreo de los movimientos en masa.
- De la aplicación de DInSAR en el área de estudio, el resultado obtenido puede tener una significancia más sólida si se lo compara con el monitoreo de los extensómetros artesanales, porque las fechas del monitoreo coinciden con las fechas de las imágenes ALOS. Lamentablemente el registro manual del monitoreo no fue realizado de la manera adecuada y se perdió información valiosa.
- El grado de certeza con el que se midió la deformación producida durante los deslizamientos fue correcta, porque en el proceso de corrección de los interferogramas de ALOS se formó un interferograma con pocos días de diferencia del monitoreo realizado por el GPS diferencial. Posteriormente ambos datos sirvieron para establecer el factor de corrección para el resto de interferogramas que contenían al pixel GPS de referencia para la calibración.
- Con los medios que se tuvieron al alcance se entregó todo el esfuerzo para realizar la corrección de los interferogramas y atenuar/disminuir la decorrelación y contaminación atmosférica. El presente trabajo de investigación tuvo una dosis de determinación de procedimientos para lidiar con estas dos principales limitaciones en la aplicación de InSAR.

- Con las imágenes sin procesar de radar ALOS sensor PALSAR se logró realizar una secuencia temporal de interferogramas, los cuales pueden apoyar a detectar lugares de elevación y/o hundimiento en el área cubierta por la imagen.

4. RESULTADOS CON ALOS PALSAR

ROI_PAC entrega como producto final la deformación relativa del terreno en radianes entre pares de fechas de adquisición de dos imágenes. Interferometría de pases repetidos graba la diferencia de fase, módulo 2π , entre la imagen de referencia y las pasadas siguientes. Debido a que la diferencia de fase absoluta no se mide, la cantidad fundamental en el interferograma es la gradiente de la fase local (Sandwell y Price, 1998).

Según Hanssen (2001) la diferencia de fase en los interferogramas diferenciales necesitan ser interpretadas con precaución, ya que es importante darse cuenta que el interferograma contiene solamente información relativa de fase, no existe un punto de calibración absoluto. Como segundo punto, se indica que la variación de fase se debe a la variabilidad espacial durante los dos tiempos de adquisiciones de las imágenes de radar con diferentes estados atmosféricos. Por lo tanto, la ambigüedad es un factor limitante en la interpretación de datos si solo se une dos imágenes SAR. Sin embargo, al usar diferentes combinaciones se supera esta ambigüedad.

El presente capítulo muestra el pos-procesamiento de los interferogramas para realizar un análisis de secuencia temporal en el área de estudio.

Como primer paso se realizó la conversión de radianes a una señal de desplazamiento en centímetros, a través de la multiplicación por el factor de corrección señalado en la ecuación (4-1), donde la λ de ALOS PALSAR corresponde a 23,6 cm, por lo que la conversión entrega la fase en centímetros.

El siguiente paso fue corregir los pares obtenidos para atenuar la contaminación atmosférica presente. Uno de los enfoques más prometedores es usar levantamiento de campo por GPS en combinación con InSAR, ya que las dos técnicas se complementan entre sí y el GPS puede corregir los errores de InSAR (LeGéologue, 2009). El INIGEMM proporcionó medidas de desplazamiento del terreno del deslizamiento en Tumba-San Francisco, realizado en el monitoreo con extensómetro artesanal y GPS diferencial, además entregó la digitalización de los deslizamientos registrados.

Posteriormente, esta información fue contrastada con los interferogramas absolutos en unidad de centímetros para identificar interferogramas tentativos que contengan el monitoreo

y posteriormente aplicar la técnica de “Stacking DInSAR” para examinar la deformación de movimientos en masa en una secuencia temporal. Con la aplicación de esta técnica se asegura la validez y confiabilidad de la presente investigación en el cumplimiento de los objetivos planteados.

4.1. POS-PROCESAMIENTO

El procesamiento de los datos ALOS contempla realizar la transformación de la fase relativa en unidad de radianes a fase relativa en unidad de centímetro, y posteriormente corregir los interferogramas que contienen el área de monitoreo de Tumba, con el objetivo de atenuar la contaminación atmosférica para la posterior aplicación de la técnica Stacking DInSAR.

4.1.1. Transformación de radianes a centímetros

Cuando se construye un interferograma entre una imagen master y una imagen esclava se realiza la operación señalada en 2-18. Es decir que la interpretación de que desplazamientos de signo negativo representen subsidencia y desplazamientos de signo positivo representen sollevamiento depende de que la conversión de fase a desplazamiento se haga de la siguiente manera (Euillades, 2011):

$$dLOS = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi \quad (4-1)$$

Con (4-1) se transforma la fase relativa de radianes a centímetros de todos los interferogramas, donde el valor de λ corresponde a la longitud de onda en ALOS.

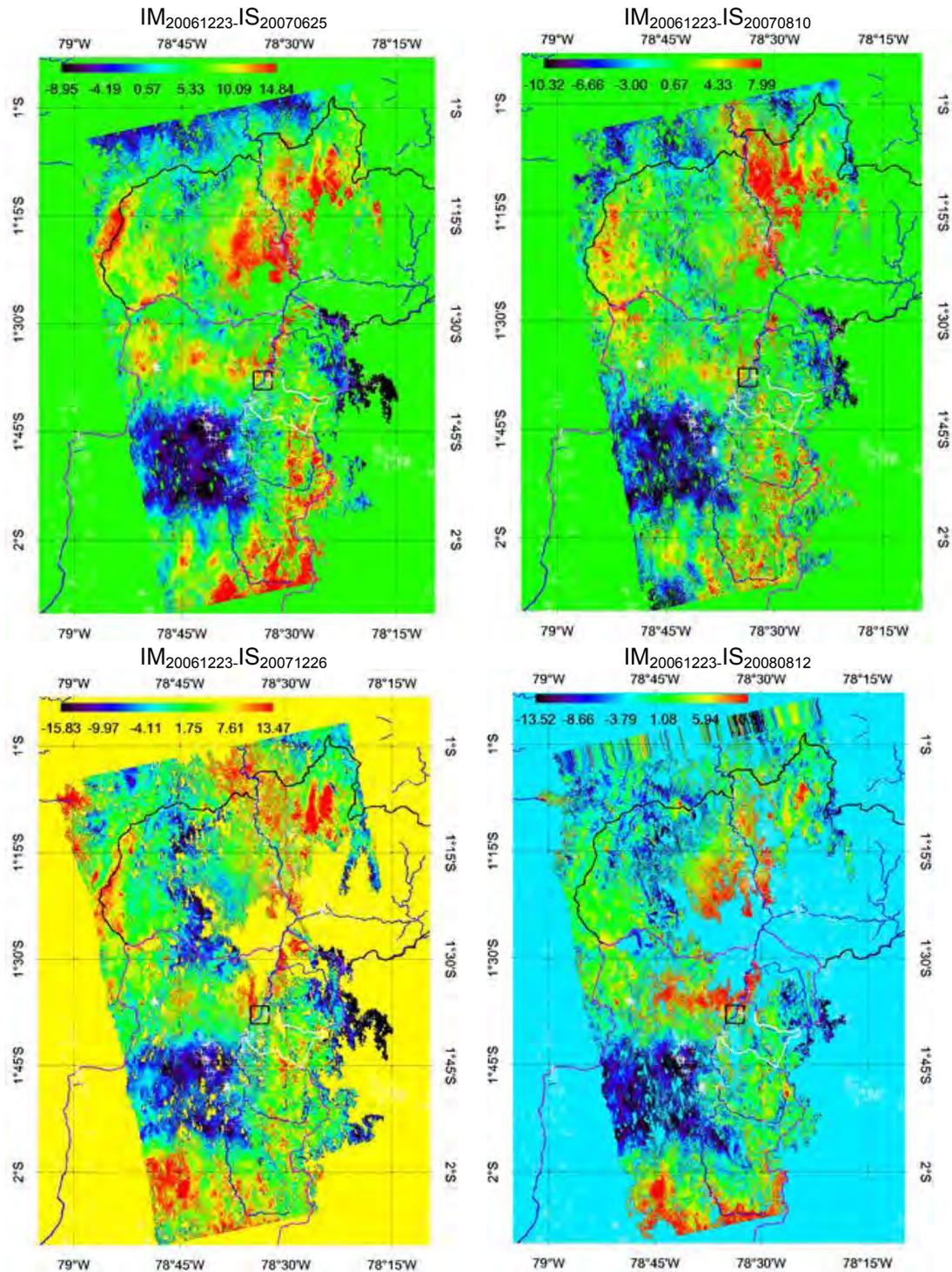
A continuación la Tabla 35 muestra el intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa en centímetros, de cada interferograma. Las Figuras 79, 80, 81 y 82 muestran las fases relativas en unidad de centímetros de los interferogramas diferencial, geo referenciado, filtrado, desenrollado, señalados en la Tabla 35.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Pares (IM _{aaaaamdd} -IS _{aaaaamdd}) | Intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa (cm) | |
|--|--|--------|
| | min | max |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₆₂₅ | -7,601 | 14,844 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | -9,386 | 4,466 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | -13,885 | 4,688 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | -12,382 | 10,456 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | -8,399 | 7,566 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | -7,061 | 11,033 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | -13,698 | 15,096 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | -11,951 | 11,902 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | -9,527 | 11,278 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | -11,465 | 12,327 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | -12,473 | 12,492 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | -6,930 | 17,261 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | -7,831 | 7,238 |
| IM ₂₀₀₈₀₈₁₂ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | -4,988 | 7,567 |

Tabla 35: Intervalo del valor de la fase relativa de la imagen completa en centímetros, de cada interferograma

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)



| | | | |
|--|--|--|--|
| <p>ESCALA DEL MAPA 1:700,000</p> <p>0 4 8 12 16 20 0 7 14 21 28 35 Miles</p> <p>0 7 14 21 28 35 Km</p> <p>COORDENADAS GEOG. LAT./LON. DATUM WGS-84</p> | | <p>SIMBOLOGÍA</p> <p>+ Inventario deslizamientos</p> <p>□ Área de monitoreo</p> <p>□ Prov. Chimborazo</p> <p>□ Prov. Tungurahua</p> <p>□ Parroquia Quimiag</p> <p>□ Río</p> | |
| <p>FUENTES DE INFORMACIÓN:</p> <p>-Limite provincial, parroquial: INEC</p> <p>-Inventario deslizamientos: INIGEMM, Geól. Mercú Eras</p> | | | |

Figura 79: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

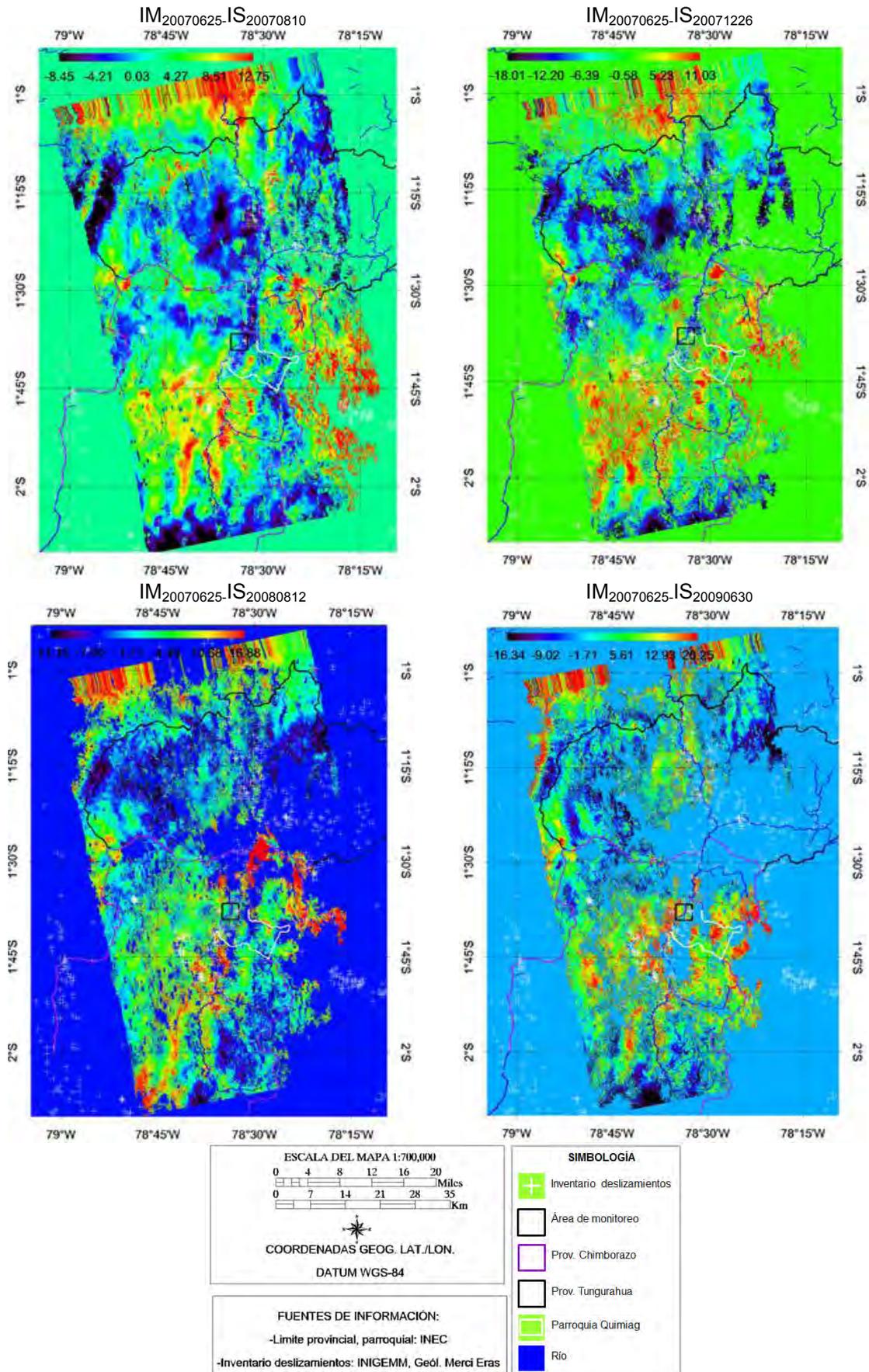


Figura 80: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

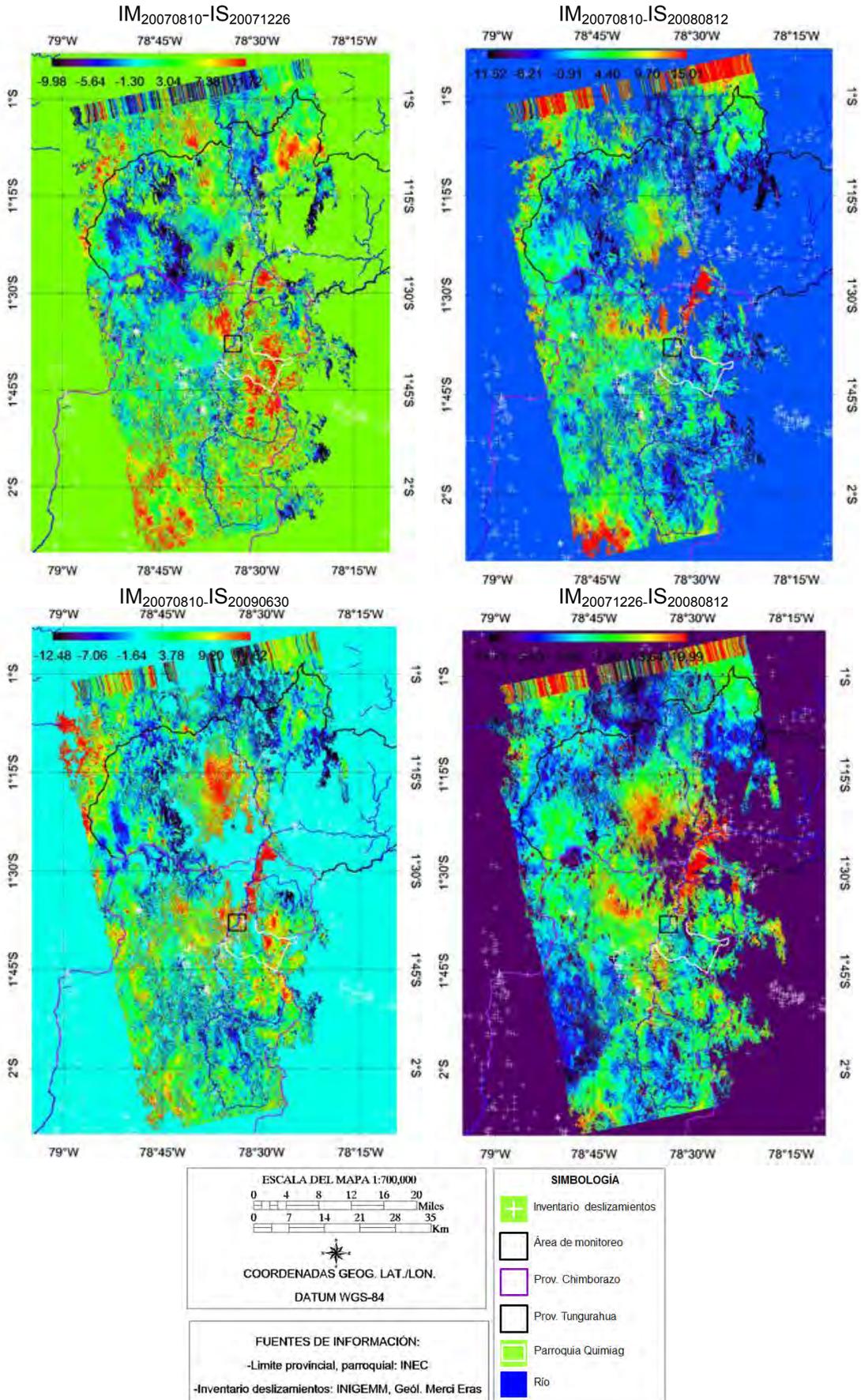


Figura 81: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

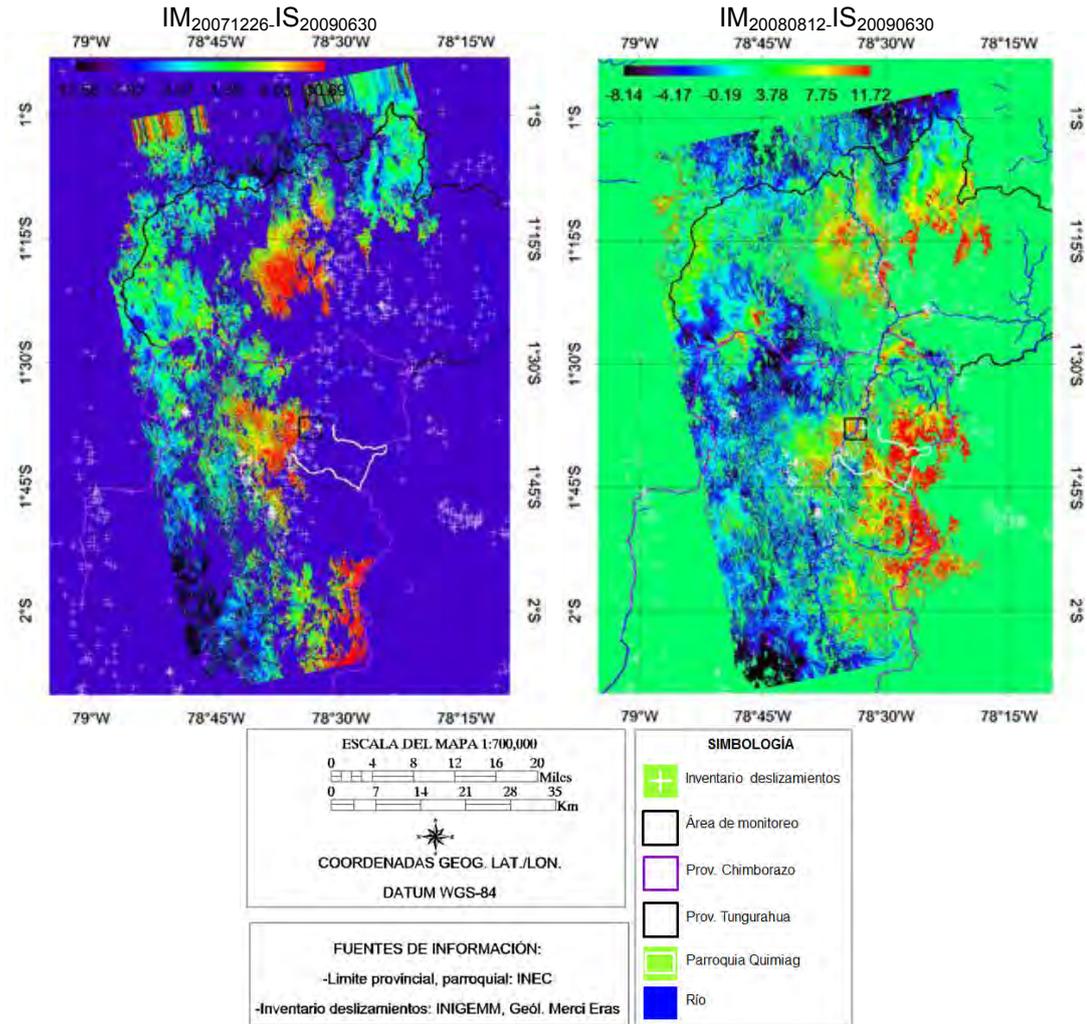


Figura 82: Fase relativa en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

4.1.2. Calibración de los interferogramas

El INIGEMM suministró medidas de desplazamiento en el terreno de los puntos de monitoreo de GPS diferencial y extensómetro artesanal, señalados en el capítulo 1. Para la calibración de los interferogramas se utiliza el monitoreo de GPS diferencial, el cual se realizó en dos campañas correspondientes a los periodos 14-16/junio/2007 y 18-20/julio/2007. En el monitoreo con GPS los valores que se registraron en ambas campañas fueron las coordenadas X (longitud), Y (latitud) y altitud (m.s.n.m.).

El punto de control GPS denominado QR15, en la diferencia de altitud entre las dos campañas registra un valor de desplazamiento de 0,2 cm en 33 días, y está ubicado en una zona con pendiente baja donde según León y Castillo (2007) no se evidencia desplazamientos. Por lo tanto, para la calibración de los interferogramas se escogió este punto de control que es cercano a cero. De acuerdo a los registros de monitoreo proporcionados por el INIGEMM, el punto QR15 fue tomado los días 16/06/2007 y 19/07/2007.

El interferograma $IM_{20070625}-IS_{20070810}$ tiene un intervalo temporal de 46 días, y se formó de dos imágenes con fechas de adquisición 25/06/2007 y 10/08/2007. Este interferograma es el único que contiene de cierta manera al registro del punto QR15, por lo que se lo va a utilizar para la corrección de los interferogramas.

El intervalo temporal en que se produce el desplazamiento medido con InSAR es 46 días, mientras que el intervalo temporal en que se caracteriza el desplazamiento mediante GPS es 33 días.

Debido a que los intervalos no son completamente coincidentes se calcula el desplazamiento diario con GPS, que corresponde a 0,00606 cm. La estimación del desplazamiento en el punto QR15 que se espera tener en 44 días es 0,2666 cm. Se realiza una diferencia para obtener el resto entre la estimación del desplazamiento de QR15 y el interferograma $IM_{20070625}-IS_{20070810}$. La diferencia entre el punto GPS y el interferograma corresponde al valor de -0,7164, y este valor se utiliza para corregir los interferogramas relativos que contienen al punto de control QR15. Con la aplicación de este método se espera superar los efectos producidos por la contaminación atmosférica.

El propósito de la corrección de los interferogramas es acercarse al valor cero, por lo que se adiciona o resta el valor de corrección -0,7164 al valor del pixel (Tabla 36, ver

columna “valor de píxel de QR15”) que contiene el punto QR15 en cada interferograma. Como resultado se tiene un nuevo valor de corrección (Tabla 36, ver columna “valor de corrección”) el cual será aplicado al interferograma respectivo de la siguiente manera:

$$\text{corrección} = \frac{\text{valor de corrección} * ND}{ND_{\text{pixel}}} \quad (4-2)$$

Donde ND representa a la imagen, para normalizar el resultado se divide para el valor del píxel que contiene a QR15 (ND_{pixel}). La muestra la calibración de los interferogramas con el punto de control QR15:

| Pares (IM _{aaaaamdd} - IS _{aaaaamdd}) | Valor de píxel de QR15 (cm) | Valor de corrección (cm) | Valor de píxel QR15 luego de corrección (cm) | Rango de desplazamiento relativo de la imagen (cm) | | Rango de desplazamiento absoluto de la imagen (cm) | |
|--|--------------------------------------|--------------------------------|--|--|--------|---|--------|
| | | | | min | max | min | max |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₆₂₅ | 1,013 | 0,2966 | 0,173 | -7,601 | 14,844 | -2,225 | 4,346 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | 0,198 | -0,5184 | -0,185 | -9,386 | 4,466 | -11,694 | 24,576 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | -0,38 | 0,3364 | 0,337 | -13,885 | 4,688 | -4,15 | 12,291 |
| IM ₂₀₀₆₁₂₂₃ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | 1,741 | 1,0246 | 1,393 | -12,382 | 10,456 | -7,287 | 6,153 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₀₈₁₀ | -0,983 | -0,2666 | -0,266 | -8,399 | 7,566 | -2,278 | 2,052 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | -0,534 | 0,1824 | 0,147 | -7,061 | 11,033 | -3,768 | 2,411 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | 0,298 | -0,4184 | -0,418 | -13,698 | 15,096 | -21,195 | 19,232 |
| IM ₂₀₀₇₀₆₂₅ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | 1,4 | 0,6836 | 0,684 | -11,951 | 11,902 | -5,835 | 5,811 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₇₁₂₂₆ | 0,228 | -0,4884 | -1,645 | -9,527 | 11,278 | -24,160 | 20,409 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | -0,121 | 0,5954 | 0,597 | -11,465 | 12,327 | -60,658 | 56,417 |
| IM ₂₀₀₇₀₈₁₀ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | 1,092 | 0,3756 | 0,375 | -12,473 | 12,492 | -4,290 | 4,296 |
| IM ₂₀₀₇₁₂₂₆ -IS ₂₀₀₈₀₈₁₂ | 1,886 | 1,1696 | 1,189 | -6,930 | 17,261 | -4,298 | 10,704 |
| IM ₂₀₀₈₀₈₁₂ -IS ₂₀₀₉₀₆₃₀ | 0,709 | -0,0074 | -0,007 | -4,988 | 7,567 | -0,078 | 0,052 |

Tabla 36: Valores de corrección de los interferogramas con punto de control GPS “QR15”. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

El interferograma IM₂₀₀₇₁₂₂₆-IS₂₀₀₉₀₆₃₀ se eliminó porque la fase no se desenrolló en el área de estudio. La Tabla 36, en la columna “rango de desplazamiento absoluto de la imagen” muestra el rango de desplazamiento en unidad de centímetros de la imagen, luego de la aplicación de la formulación 4-2, en algunos interferogramas se atenuó la contribución de la atmósfera que perturba la señal de radar, al lograr disminuir el rango de la imagen. Sin embargo, algunos interferogramas resultantes de la corrección, señalados con color rojo, muestran valores de rango elevado, en estos interferogramas no se logró atenuar la componente atmosférica y no se los va a utilizar en la aplicación de la técnica Stacking porque el rango incrementó significativamente. Con los productos corregidos se aplicó posteriormente la técnica de Stacking DInSAR. A continuación las Figuras 83, 84, 85 y 86 muestran los interferogramas corregidos.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

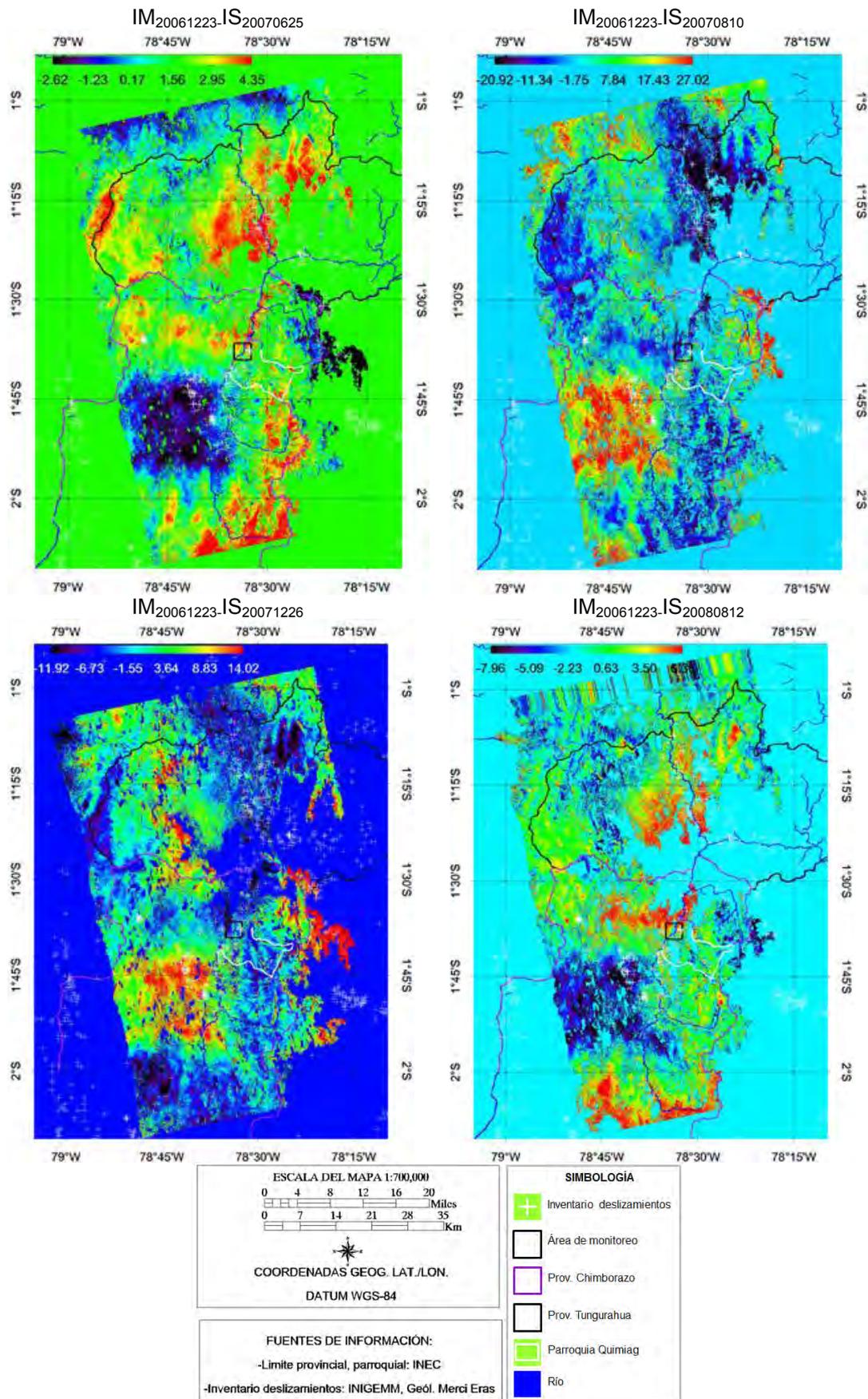
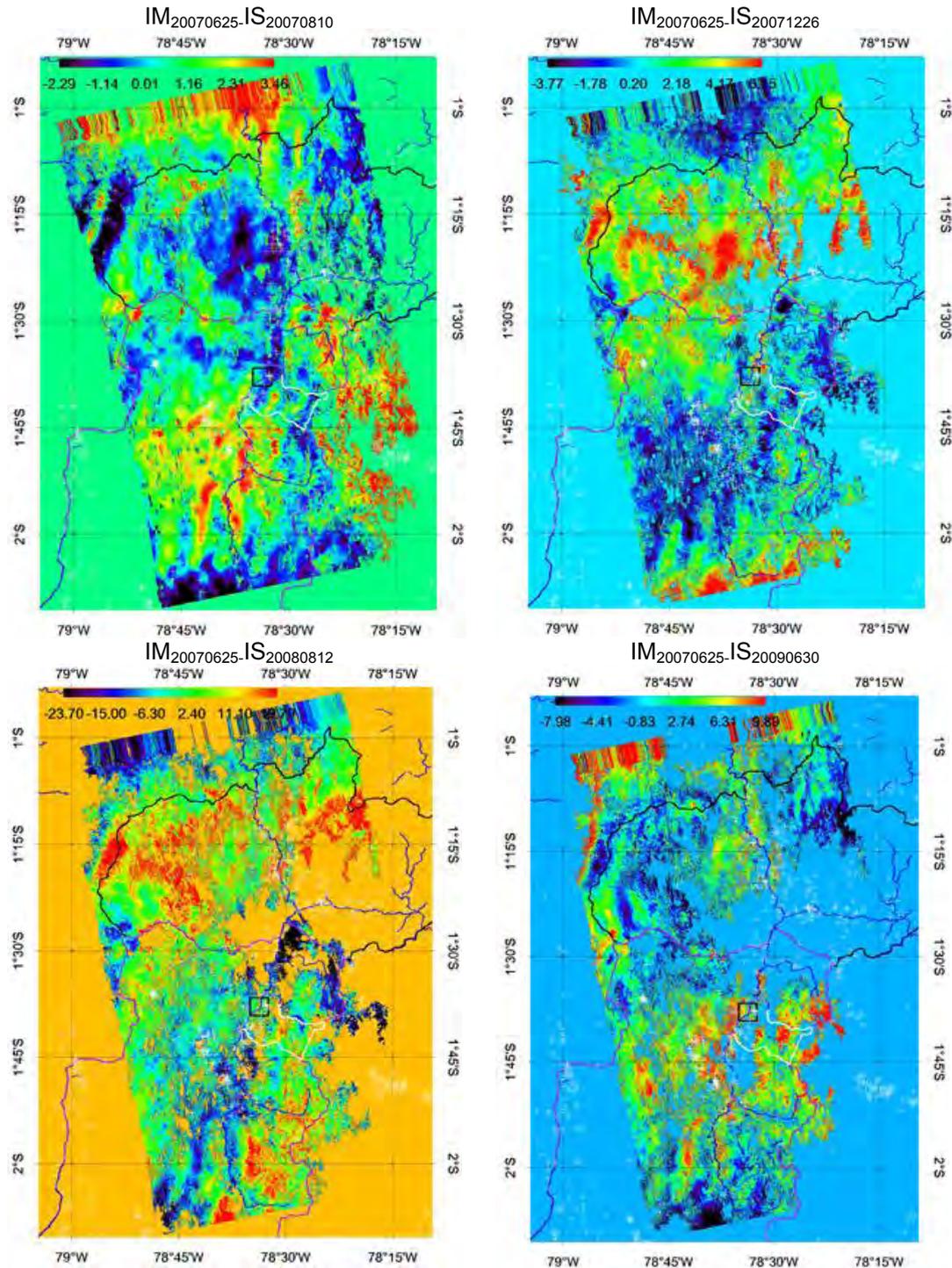


Figura 83: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

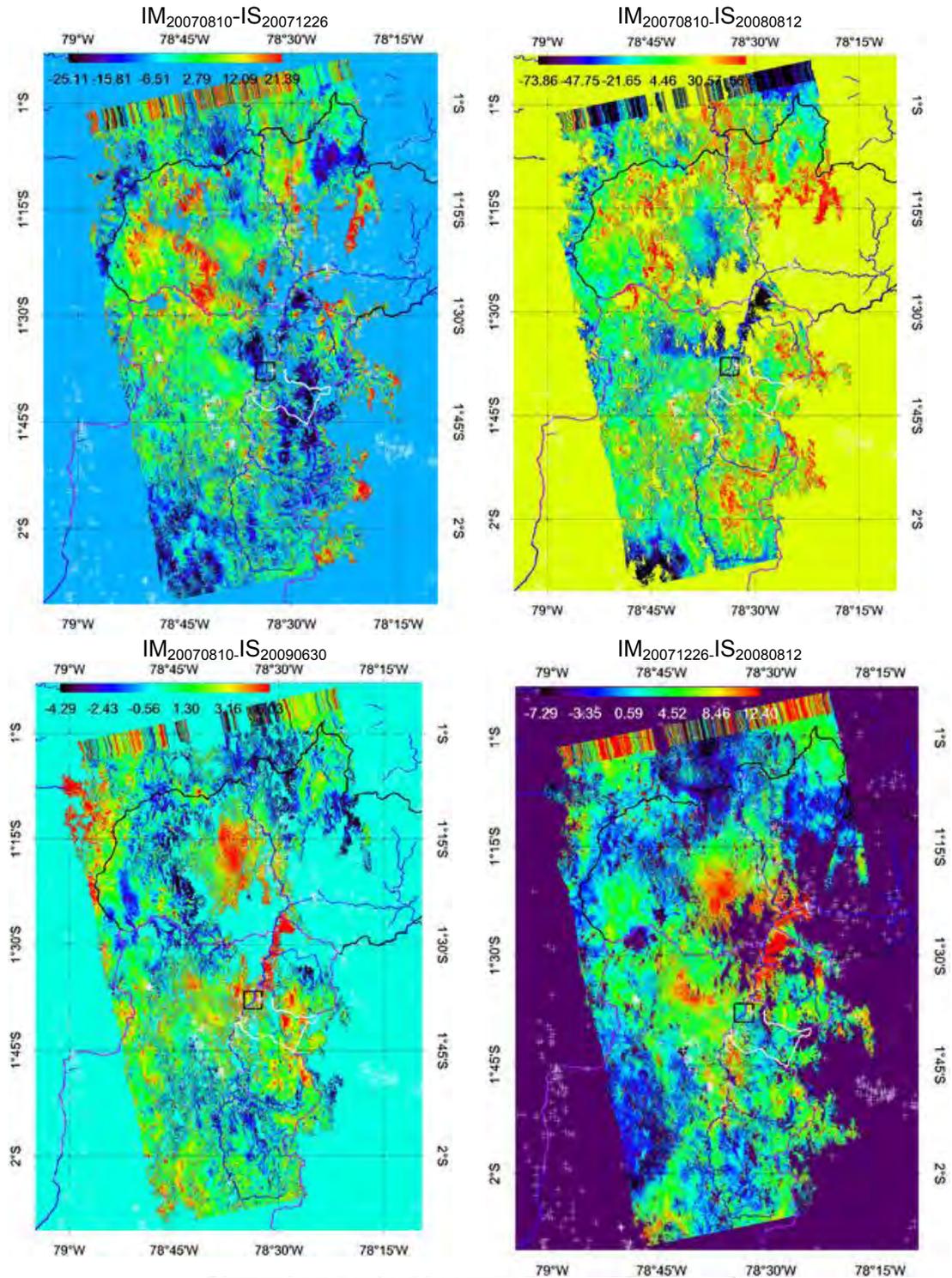
DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)



| | |
|---|--|
| <p>ESCALA DEL MAPA 1:700,000</p> <p>0 4 8 12 16 20 Miles 0 7 14 21 28 35 Km</p> <p>COORDENADAS GEOG. LAT./LON. DATUM WGS-84</p> | <p>SIMBOLOGÍA</p> <ul style="list-style-type: none"> Inventario deslizamientos Área de monitoreo Prov. Chimborazo Prov. Tungurahua Parroquia Quimiag Río |
| <p>FUENTES DE INFORMACIÓN:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Limite provincial, parroquia: INEC -Inventario deslizamientos: INIGEMM, Geól. Mercí Eras | |

Figura 84: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)



| | | | |
|---|--|--|--|
| <p>ESCALA DEL MAPA 1:700,000</p> <p>0 4 8 12 16 20 Miles</p> <p>0 7 14 21 28 35 Km</p> <p>COORDENADAS GEOG. LAT./LON.</p> <p>DATUM WGS-84</p> | | <p>SIMBOLOGÍA</p> <p>+ Inventario deslizamientos</p> <p>□ Área de monitoreo</p> <p>□ Prov. Chimborazo</p> <p>□ Prov. Tungurahua</p> <p>□ Parroquia Quimiag</p> <p>□ Río</p> | |
| <p>FUENTES DE INFORMACIÓN:</p> <p>-Límite provincial, parroquial: INEC</p> <p>-Inventario deslizamientos: INIGEMM, Geól. Mercú Eras</p> | | | |

Figura 85: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

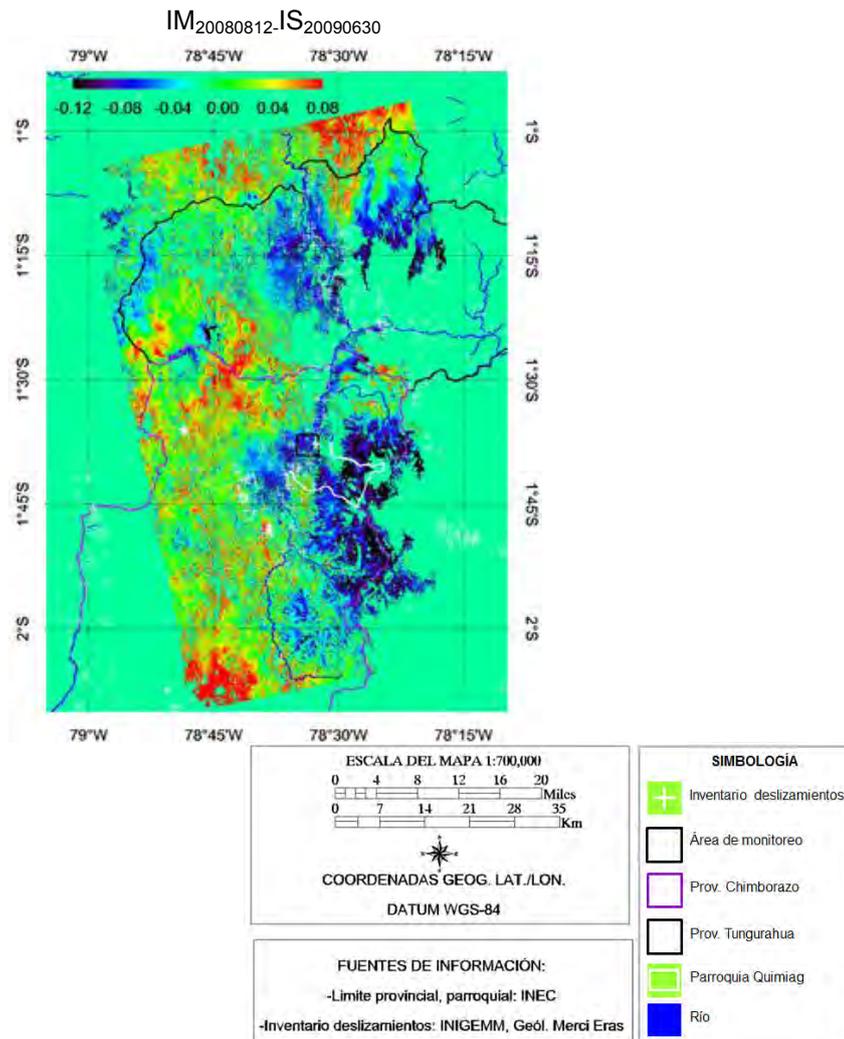


Figura 86: Fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado. Paleta de colores: RAINBOW. Fuente: (ESA)

Se creó una cobertura con la geometría de rectángulo (área correspondiente a 22 Km²) que muestra una ampliación de la escena de radar, la cual contiene información vectorial del monitoreo con GPS diferencial y extensómetro artesanal realizado por el INIGEMM (ver ítem 1.4.2 y Figura 4), para identificar interferogramas con el desenrollamiento de la fase en el área del monitoreo, ya que en algunos interferogramas la fase no se desenrolló en el área. El Anexo 7 muestra la ampliación de los interferogramas señalados en las Figuras 83, 84, 85 y 86. Las Figuras contenidas en el Anexo 7 muestran para cada interferograma la ampliación del área de monitoreo con las paletas de colores B-W LINEAR y RAINBOW. En la paleta B-W LINEAR se distingue claramente el fondo donde no se desenrolló la fase y por consiguiente no existe información.

4.2. STACKING DINSAR

Para la aplicación de la técnica Stacking DInSAR se definieron los siguientes criterios para escoger interferogramas más adecuados para el área de estudio:

1. Distinguir interferogramas con buena coherencia en el área de estudio, ya que la coherencia permite tener franjas definidas.
2. Discriminar un subconjunto de interferogramas con una imagen master y esclavas consecutivas en función del tiempo. Este criterio tiene la ventaja de registrar las imágenes a una sola imagen master.
3. Sobreponer la información proporcionada por el INIGEMM de la digitalización de la extensión de los eventos monitoreados en los interferogramas y así determinar los interferogramas que contienen completamente el área de estudio.

De acuerdo al Anexo 7, la Tabla 37 muestra los interferogramas que contienen completamente el área de monitoreo y sus respectivas líneas de base perpendicular e intervalo de tiempo. Cabe recordar que el interferograma $IM_{20070625}-IS_{20070810}$ se usó para calibrar el resto de interferogramas.

| Pares ($IM_{aaaaamdd}-IS_{aaaaamdd}$) | Valor de píxel de QR15 (cm) | Valor de píxel QR15 luego de corrección (cm) | Rango de desplazamiento absoluto de la imagen (cm) | | Línea de base perpendicular B_{\perp} (m) | Intervalo temporal (días) |
|--|--------------------------------------|--|---|--------|---|---------------------------------|
| | | | min | máx. | | |
| $IM_{20061223}-IS_{20071226}$ | -0,38 | 0,337 | -4,15 | 12,291 | -98,329 | 363 |
| $IM_{20061223}-IS_{20080812}$ | 1,741 | 1,393 | -7,287 | 6,153 | 120,391 | 589 |
| $IM_{20070625}-IS_{20070810}$ | -0,983 | -0,266 | -2,278 | 2,052 | 134,398 | 45 |
| $IM_{20070810}-IS_{20090630}$ | 1,092 | 0,375 | -4,290 | 4,296 | 138,468 | 680 |
| $IM_{20071226}-IS_{20080812}$ | 1,886 | 1,189 | -4,298 | 10,704 | 218,700 | 226 |

Tabla 37: Interferogramas propuestos para aplicar la técnica de Stacking DInSAR

Sandwell y Price (1998) demostraron la técnica de Stacking al promediar seis interferogramas diferentes, los cuales tenían un rango de línea de base perpendicular de 18-406 m. Los autores (Sandwell y Price, 1998) usaron datos SAR de alta calidad de la Misión Tandem para demostrar la técnica Stacking.

La decorrelación temporal es una de las principales limitaciones en interferometría de radar, Wei y Sandwell (2010) escogieron en California tres áreas con vegetación para examinar las propiedades de correlación entre los satélites ALOS y ERS. En áreas con vegetación frondosa de bosque en el norte de California, ALOS mantiene correlación sobre el

intervalo temporal de dos años, mientras que ERS con un intervalo temporal y espacial similar perdía correlación. En el centro de California, se encontró un patrón similar de decorrelación. En el sur de California, ambos satélites ALOS y ERS tienen baja correlación en granjas, ALOS tiene baja correlación en algunas superficies de arena que ERS. Los resultados en general señalan que los interferogramas de banda L con fechas de adquisición de temporadas similares tienen alta correlación que aquellos con temporadas distintas. Para las bandas L y C, la correlación en áreas con vegetación disminuye para intervalos de tiempo menores a 1 año y luego se mantiene relativamente constante en intervalos de tiempo mayores. El tiempo de decorrelación para la banda L es más de 2 años para bosque en California, mientras que para banda C es menor a 6 meses. De acuerdo a lo señalado por los autores (Wei y Sandwell, 2010), los interferogramas de la Tabla 37 tienen buena correlación temporal y espacial.

Debido a la longitud de onda larga de L, la sensibilidad a pequeña deformación en periodos cortos de tiempo es limitada y la interpretación de un único interferograma es complicado debido a la presencia de ruido atmosférico y topográfico, por lo que los procedimientos de stacking y SBAS son los métodos elegidos en la mayoría de estudios con ALOS (Samsonov, 2010). El interferograma $IM_{20070625}-IS_{20070810}$ no se va a utilizar en el procedimiento de stacking porque su intervalo de tiempo es muy corto, 45 días.

Para la aplicación del procedimiento Stacking DInSAR se utilizan los interferogramas $IM_{20061223}-IS_{20071226}$, $IM_{20061223}-IS_{20080812}$, $IM_{20070810}-IS_{20090630}$, $IM_{20071226}-IS_{20080812}$, aplicando la formulación 2-21, previa estandarización de tamaño de las escenas, con la división por la cantidad de interferogramas utilizados. La Figura 87 muestra el stacking de los pares identificados en la Tabla 37, indicando el promedio de deformación en unidad de centímetro por año de la escena completa.

La $\text{¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.}$ muestra el resultado del procedimiento de Stacking DInSAR en el área de estudio que comprende la instrumentación de monitoreo implementado por el INIGEMM, con la superposición de coberturas vectoriales.

Mientras que la Figura 89 muestra una ampliación del resultado de Stacking en el área de monitoreo, y sugiere que el área donde se registraron los seis puntos de deslizamiento es sensible a la subsidencia del terreno, durante el periodo 20061223-20090630.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

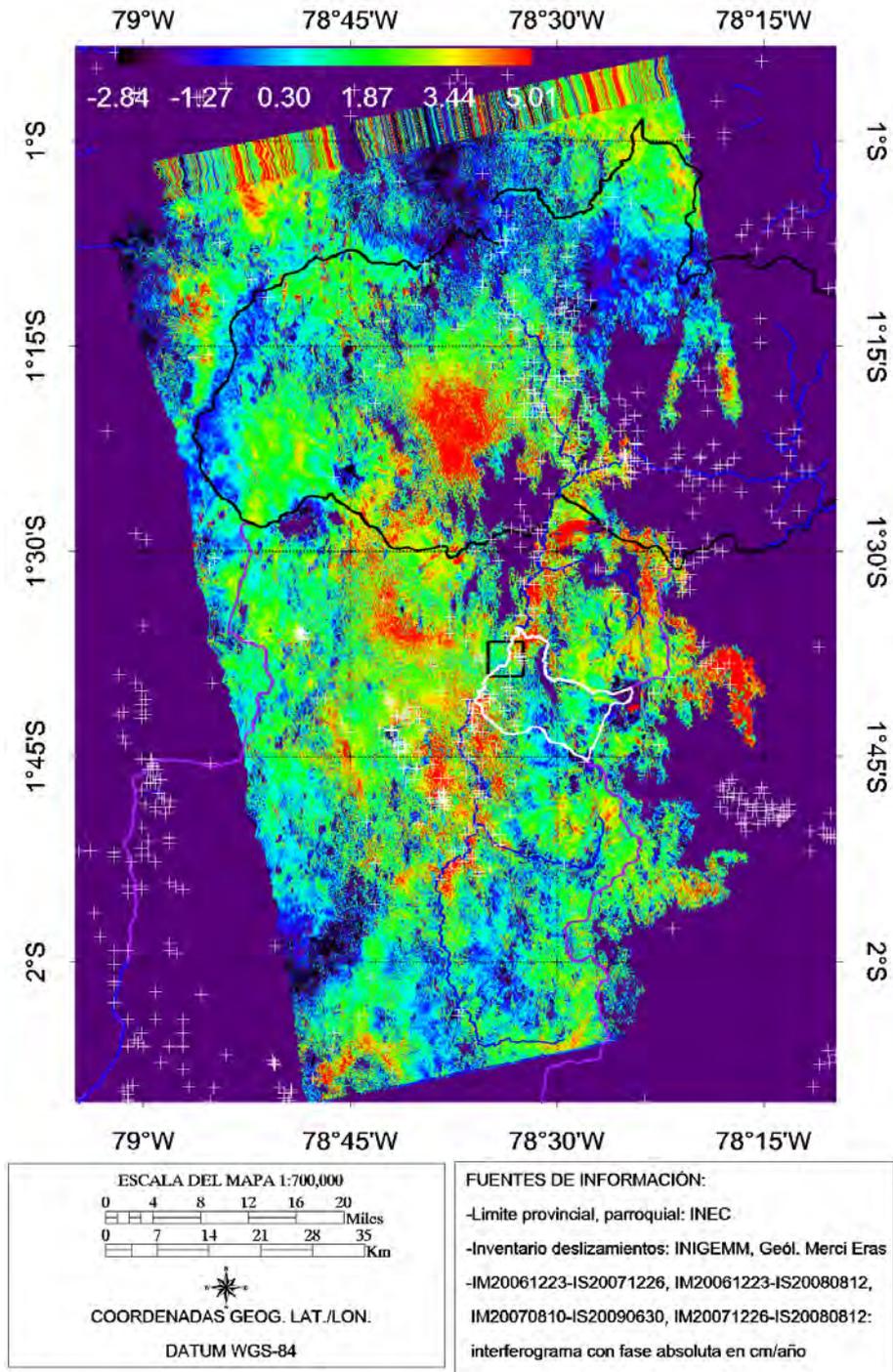


Figura 87: Procesamiento con Stacking DInSAR

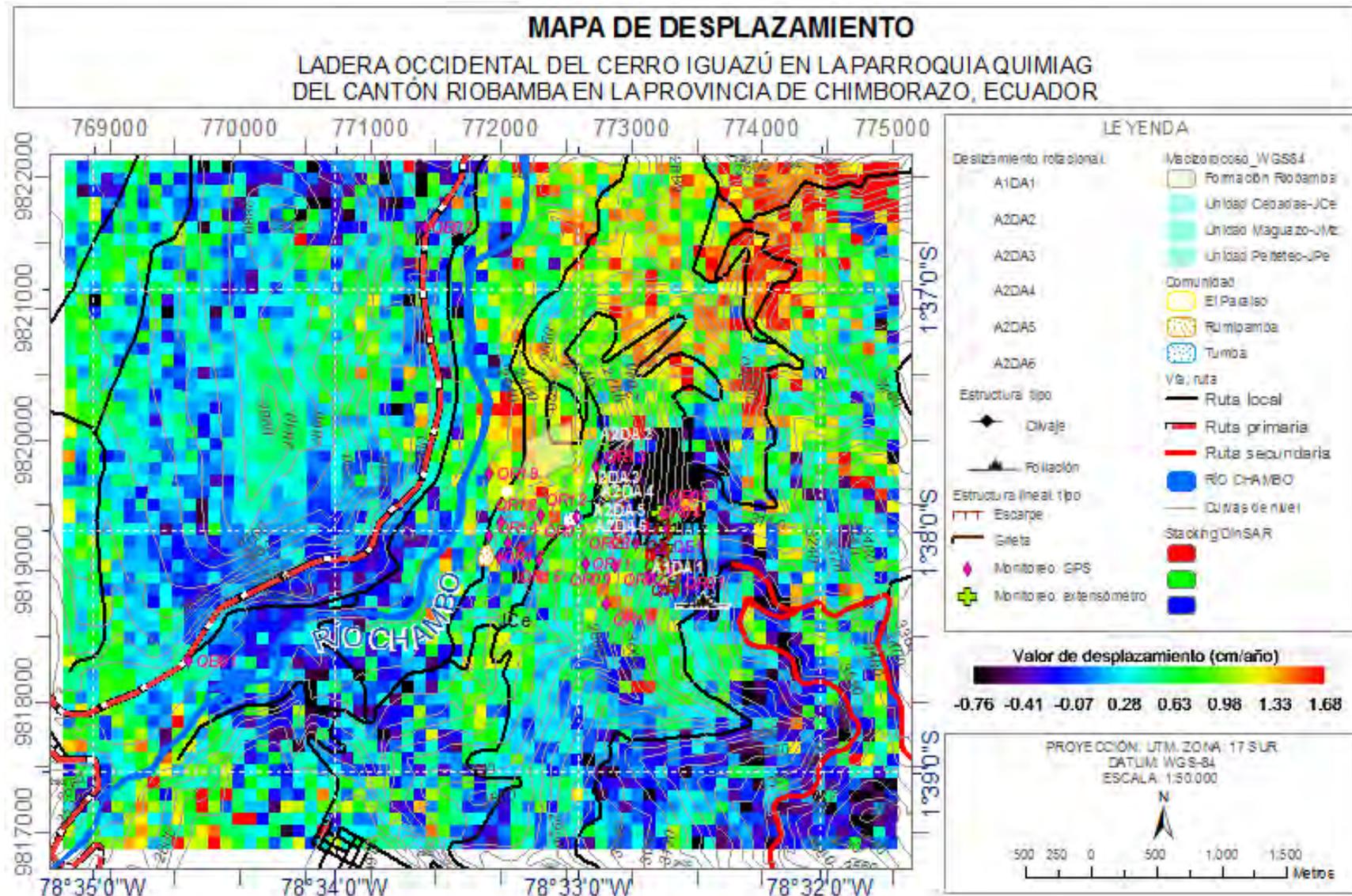


Figura 88: Resultado del stacking en el periodo 20061223-20090630, área de estudio

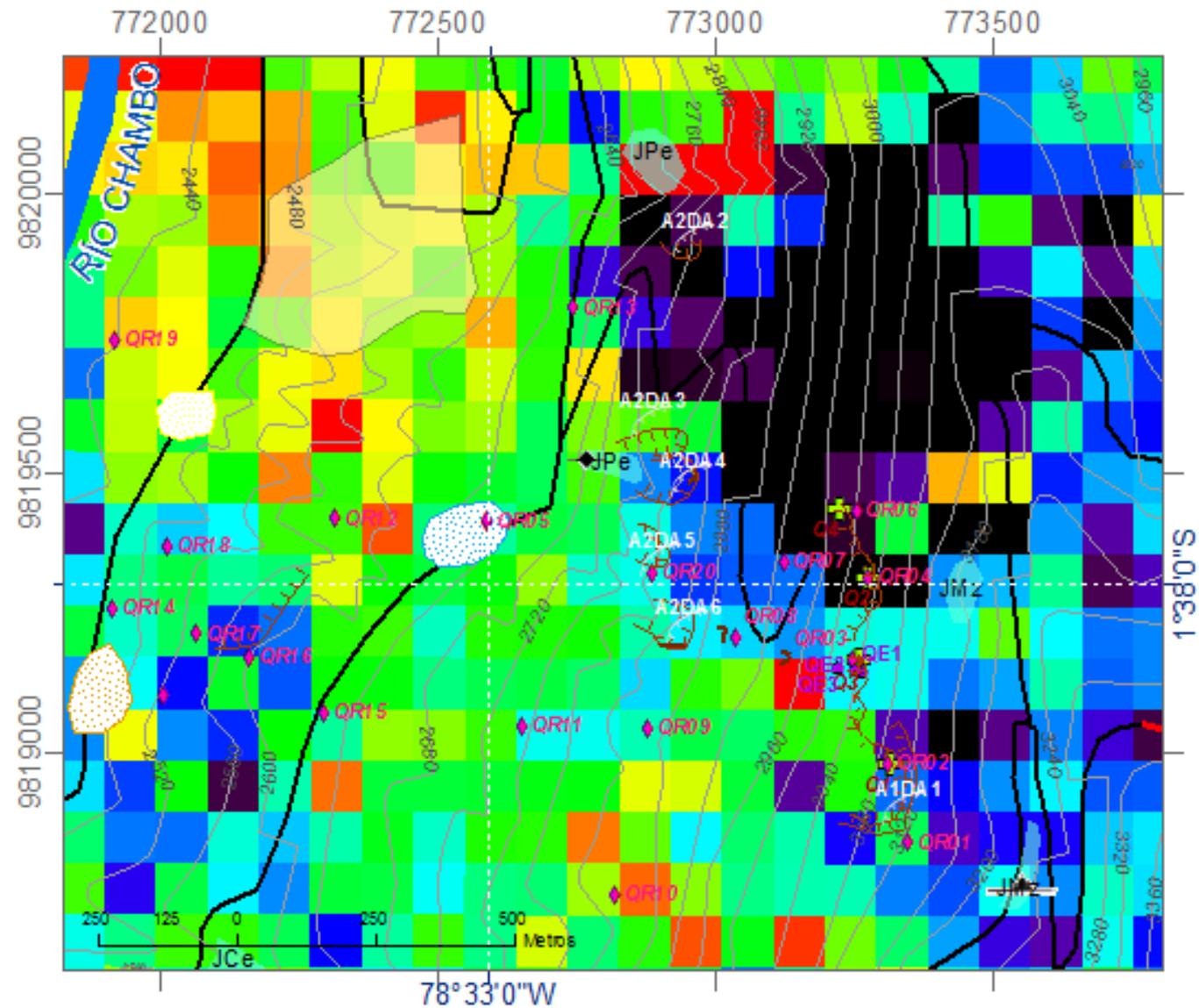


Figura 89: Resultado del stacking en el periodo 20061223-20090630, ampliación del área de estudio

Es importante el resultado de stacking al norte-este del monitoreo identificado por el INIGEMM, que presenta valores de subsidencia en el rango de -1 cm/año. En octubre 2011 ocurrió el deslizamiento en el área de estudio, no se dispone de información sobre este evento, no obstante esta área necesita atención para contrarrestar lo ocurrido en el 2011.

Del registro de monitoreo realizado por el INIGEMM y los resultados que entrega el procedimiento aplicado para determinar desplazamientos en el terreno, durante el periodo 20061223-20090630, se tiene lo siguiente (Tabla 38):

| monitoreo | | GPS diferencia en altura (cm) junio-julio 2007 | Extensóm. (cm/año) enero-junio 2007 | Extensóm. (cm/año) marzo 2007-junio 2008 | Extensóm. (cm/año) diciembre 2006-junio 2008 | Extensóm. (cm/año) octubre 2007-junio 2008 | Extensóm. (cm/año) agost.-nov. 2008 | Extensóm. (cm/año) sept.2009- feb.2010 | Stacking (cm/año) 20060223- 20090630 |
|-----------|------|--|--|--|--|--|--|---|---|
| Extens. | Q1 | | 28,56 | | | 82,85 | | 68,60 | 0,207 |
| | Q2 | | | | 38,29 | | | 49,03 | 0,020 |
| | Q3 | | | 75,17 | | | 102,35 | 56,19 | 0,523 |
| | Q4 | | | | | | | | 0,077 |
| GPS | QR01 | -2,5 | | | | | | | 0,675 |
| | QR02 | 8,5 | | | | | | | 0,207 |
| | QR03 | 4,2 | | | | | | | 0,551 |
| | QR04 | 0,2 | | | | | | | 0,020 |
| | QR05 | -0,2 | | | | | | | 0,616 |
| | QR06 | -3,3 | | | | | | | 0,077 |
| | QR07 | -4,2 | | | | | | | 0,401 |
| | QR08 | -5,0 | | | | | | | 0,494 |
| | QR09 | -1,1 | | | | | | | 0,590 |
| | QR10 | 0,0 | | | | | | | 0,878 |
| | QR11 | 1,8 | | | | | | | 0,544 |
| | QR12 | 0,1 | | | | | | | 0,792 |
| | QR13 | -1,1 | | | | | | | 0,667 |
| | QR14 | 3,3 | | | | | | | 0,574 |
| | QR15 | 0,2 | | | | | | | 0,614 |
| | QR16 | -1,0 | | | | | | | 0,341 |
| QR17 | 7,9 | | | | | | | 0,318 | |
| QR18 | -2,0 | | | | | | | 0,49 | |
| QR19 | 2,2 | | | | | | | 1,004 | |
| QR20 | -0,4 | | | | | | | 0,548 | |

Tabla 38: Comparación resultado Stacking DInSAR, monitoreo GPS y extensómetro artesanal

Como se indicó en detalle en el capítulo 1, el registro de monitoreo con extensómetro artesanal no es confiable porque las lecturas las tomaban las personas de las comunidades, no existió un control permanente de su funcionamiento, lo que se refleja en las varias calibraciones realizadas. La Tabla 38 muestra distintos periodos donde se analizó la información de los extensómetros (Anexo 2). El resultado de monitoreo que entrega el procedimiento Stacking es más consistente, no obstante fue mencionado la complejidad de considerar la existencia de correlación espacial y temporal para su aplicación.

El monitoreo con GPS diferencial fue realizado en dos campañas específicas, junio y julio 2007. El stacking comprende el periodo 2006-2009, lo que dificulta realizar una

comparación. Con color azul se señaló los puntos GPS que tienen una diferencia con stacking de 0,4 cm.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) brinda la oportunidad de determinar la deformación de la superficie terrestre, causada por la elevación y/o hundimiento del suelo.
- A nivel internacional, interferometría se va desarrollando con nuevas y revolucionarias investigaciones, dirigidas a la identificación de amenazas naturales.
- En Ecuador, interferometría es un tema de conocimiento nuevo e innovador que está empezando a desarrollarse, en el caso del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en las temáticas de erupciones volcánicas y sismos; mientras que en el INIGEMM se desarrolla en la temática de movimientos en masa.
- La aplicación y uso de esta herramienta contribuiría a la instalación de sistemas de monitoreo. No obstante, dependerá de las instituciones pertinentes programar un continuo y adecuado sistema de monitoreo para enriquecer la información que en primera instancia la proporciona InSAR.
- El procesamiento de InSAR permite una alerta temprana a áreas sensibles que indican deformación de la superficie terrestre. Sin embargo, es indiscutible que no se puede obviar tener verdad de campo para comparar los resultados obtenidos en el procesamiento de las imágenes con datos de mediciones en el terreno.
- Para aplicación de InSAR en movimientos en masa lo ideal es contar con datos de mayor resolución espacial, sin embargo las características geomorfológicas y fisiográficas de Ecuador exige de cierta manera tener datos que atraviesen la vegetación. Por lo tanto trabajar con datos de banda X en Ecuador, en zonas de vegetación frondosa no sería adecuado para aplicaciones de deslizamientos.
- El área de aplicación de la herramienta de interferometría corresponde a un área con vegetación frondosa de Sierra. Ecuador tiene 4 regiones naturales: Costa, Sierra, Oriente y región Insular; donde cada región se caracteriza por la presencia de vegetación específica. Fue muy útil e instructivo procesar datos de las bandas C y L porque se enfrentó a dificultades de procesamiento de dos satélites diferentes.

- El objetivo primordial del presente trabajo es usar adecuadamente la herramienta InSAR para detectar zonas sensibles de desplazamientos en el terreno, que afectan a asentamientos humanos y obras de infraestructura de interés nacional, porque en Ecuador resulta una inversión económica muy alta movilizar a personal y equipos para realizar monitoreo puntual.
- Definitivamente vale la pena caracterizar fenómenos de remoción en masa en Ecuador utilizando InSAR. Actualmente el INIGEMM cuenta con una recopilación de ocurrencia de más de 3.000 deslizamientos identificados. Sin embargo, no se tiene información de monitoreo continuo, ubicación, intensidad, periodicidad del evento, tiempo de ocurrencia. Es una falencia no contar con esta información valiosa que permitiría una aplicación amplia de herramientas como InSAR.
- De la investigación realizada, se concluye que es imprescindible contar con un registro preciso de la fecha, ubicación y extensión de eventos de remoción en masa, lo que permitiría escoger imágenes del antes y después del evento para determinar los desplazamientos.
- En el caso de monitoreo puntual, es necesario tener un monitoreo continuo para determinar valores de desplazamiento acumulativo, caso contrario no se puede aseverar con certeza si el desplazamiento es verdadero o falso.
- InSAR permite identificar los límites de zonas de deslizamientos. Una tarea de los técnicos encargados de monitoreo de movimientos en masa sería completar el estudio al identificar sus mecanismos de origen (como pueden ser de caída, derrumbe, deslizamiento, expansión y flujo), y así entregar a los tomadores de decisiones información para los planes de ordenamiento territorial.
- Lamentablemente el número y tiempo de adquisición de las escenas de radar ERS y ALOS no es el deseado. Las imágenes procesadas estuvieron en dependencia de su disponibilidad, así como de las especificaciones de polarización, ángulo de incidencia y dirección de órbita.
- Sobre la decorrelación espacial, la disponibilidad de imágenes permitió formar pares idóneos para InSAR.

- Sobre la decorrelación temporal, representa un gran esfuerzo trabajar con InSAR en Ecuador por sus características de vegetación frondosa, sin embargo el empleo a futuro de otras técnicas de procesamiento, permitirán obtener mejores resultados.
- Sobre la contaminación atmosférica, por revisión de literatura hay diversos métodos propuestos para atenuar este componente e incluso determinar el residuo topográfico que afecta el par interferométrico. Lo realizado en el presente estudio representa un primer acercamiento a la resolución de estos inconvenientes.
- ROI_PAC es un software robusto para el procesamiento de interferogramas, y por su libre distribución resulta atractivo para su uso en instituciones públicas en Ecuador, las cuales están impulsando el uso de software libre. Sin embargo, es necesario concientizar las dificultades de trabajar con este recurso, el conocimiento previo y adquirido, y continuar desarrollando destrezas para obtener mejores resultados.
- ROI_PAC permite de cierta manera forzar el procesamiento del interferograma, siempre y cuando cumpla con requerimientos previos. Este procesamiento implica tiempo y tener una capacidad alta de almacenamiento, por lo que su uso debe ser meditado de acuerdo a las probabilidades del par de obtener buenos resultados en el área de estudio.

5.1. LÍNEAS A FUTURO

- Adquirir para fines de investigación datos ENVISAT para tener mayor cantidad de imágenes en polarización VV y trabajar en conjunto con datos ERS y sus órbitas respectivas, porque ROI_PAC permite especificar el parámetro de órbitas precisas al procesar datos ERS y ENVISAT.
- Adquirir datos ENVISAT con polarización HH para discriminar las diferencias de trabajar con polarización VV. La literatura indica que VV es adecuado para vegetación arbórea, mientras que HH para vegetación frondosa, pero se desconoce el efecto que tendrán ambas polarizaciones al trabajar al mismo tiempo en casos puntuales en Ecuador.
- Considerar la influencia de trabajar con distintos ángulos de incidencia, en el presente trabajo se trabajó con ALOS con el ángulo de incidencia $34,3^\circ$ debido a la disponibilidad de escenas del área de estudio.

- De acuerdo a Wei y Sandwell (2010) las imágenes ALOS con pasada de órbita ascendente permiten identificar los movimientos verticales a lo largo de un sistema de fallas, mientras que con órbita descendente tienen mejor geometría para medir movimientos por deslizamiento. En el presente trabajo de investigación se procesaron datos ERS con dirección de órbita descendente, y para ALOS con órbita ascendente. La utilización de ERS fue adecuada por la forma como ERS mira a la superficie y por la ubicación del área de estudio, mientras que la elección de ALOS fue por la disponibilidad de la mayor cantidad de escenas. Se prevé trabajar a futuro con datos de la próxima misión ALOS (2014?) donde se tenga mayor cantidad de escenas en órbita descendente.
- Trabajar con datos ALOS para áreas con vegetación frondosa, sin embargo su vida útil fue 2006-abril 2011, entonces es necesario un fortalecimiento de procesamiento con datos aerotransportados de banda L, para obtener datos actuales.
- Procesar interferogramas con un DEM de mejor resolución espacial. El tamaño de píxel del DEM es de suma importancia, ya que el producto InSAR resultante tendrá el tamaño de píxel del DEM de referencia.
- La Agencia Espacial Europea (ESA) ha otorgado 85 imágenes ERS para poder continuar el trabajo de investigación, por lo tanto el trabajo con interferometría va a tener una continuidad para seguir explorando todas las bondades que ofrece ésta rama de conocimiento.
- Para mejorar los resultados en formas de procesamiento, la técnica Stacking DInSAR ha sido probada en el caso de deslizamientos, sin embargo su algoritmo inicial ha sido modificado por otros autores y mejorada. Por lo tanto, se quiere incursionar en el manejo de técnicas como PS (*Permanent Scatterer*), SBAS, LS (*Least Square*) para obtener mejores resultados en áreas con vegetación frondosa.
- Conocer en primera instancia la pendiente local del terreno y así solicitar imágenes con la trayectoria de órbita más conveniente.

BIBLIOGRAFÍA

Arias Andrea (2007). Definición de Prioridades de Manejo del Recurso Hídrico por Microcuencas en la Provincia de Chimborazo. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí, Escuela Politécnica del Ejército. **Ingeniera Geográfica y del Medio Ambiente: 119.**

ASF. "Alaska Satellite Facility." Servicio de Facilidades de Alaska, Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks Retrieved Mayo 2011, from <http://www.asf.alaska.edu/>.

Aspen J. A., Litherland M. (1992). "The geology and Mesozoic collisional/accretionary history of the Cordillera Real, Ecuador." Tectonophysics **205**.

Bakker W., Grabmaier K., Huurneman G., Van der Meer F., Prakash A., Tempfli K., Gieske A., Hecker C., Janssen L., Parodi G., Reeves C., Weir M., Gorte B., Horn J., Kerle N., Pohl C., Van Ruitenbeek F., Woldai T. (2004). Principles of Remote Sensing: An introductory textbook. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. pg. 250.

Bawden Gerald. (2005). "Measuring Human-Induced Land Subsidence from Space." USGS, from <http://pubs.usgs.gov/fs/fs06903/>.

Berardino Paolo, Fornaro Gianfranco, Lanari Riccardo, Sansosti Eugenio (2002). "A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **40**(N. 11): 9.

Bonnard Christophe (2008a). Characteristics of landslides. Universidad de Ginebra-Certificado de especialización para la examinación y manejo de riesgo geológico (CERG). Ginebra-Suiza.

Bonnard Christophe (2008b). Monitoring on landslide movements and groundwater criteria for hazard assessment. Universidad de Ginebra-Certificado de especialización para la examinación y manejo de riesgo geológico (CERG). Ginebra-Suiza.

Borgia A., Lanari R., Sansosti E., Tesauro M., Berardino P., Fornaro G., Neri M., Murray J. (2000). "Actively growing anticlines beneath Catania from the distal motion of Mount Etna's decollement measured by SAR interferometry and GPS." Geophysical Research Letters **27**: 3409-3412.

British Geological Survey. (2012). "Landslides at BGS." from http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html.

Caizaluisa Alicia, López María (2012). Formulación de la propuesta del plan de ordenamiento territorial (POT) del cantón Guano, provincia de Chimborazo mediante el uso de herramientas SIG. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí, Escuela Politécnica del Ejército. **Ingeniera Geográfica y del Medio Ambiente**: 216.

Calero Bolívar (2007). Monitoreo y ubicación de extensómetro experimental: deslizamiento de Tumba-San Francisco. Enero, Ministerio de Minas y Petróleos - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 17.

Calero Bolívar, Escárte Rojas Sonia (2008). Monitoreo, recalibración de extensómetros y charla informativa con la población: deslizamiento de Tumba-San Francisco. Abril, Ministerio de Minas y Petróleos - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 19.

Casagli Nicola, Colombo Davide, Ferretti Alessandro, Guerri Letizia, Righini Gaia (2008). Case Study on Local Landslide Risk Management During Crisis by Means of Remote Sensing Data. The First World Landslide Forum, Tokyo.

CCRS. (2001). "Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares." Canada Centre for Remote Sensing CCRS, Natural Resources Canada, from <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internat/glbsar2/indexe.html>.

CEOS. (2011). "Committee on Earth Observation Satellites." from <http://www.ceos.org>.

Colesanti Carlo, Wasowski Janusz (2006). "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry." Engineering Geology **88**(173-199): 28.

CRISP. (2011). "ERS-1/2." Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing, from <http://www.crisp.nus.edu.sg/ers/ers.html>.

Cruden D.M., Varnes D.j. (1996). "Landslide Types and Processes." Landslides: Investigation and Mitigation. Special Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C: National Academy Press (247): 36-75.

Curlander John C., McDonough Robert N. (1991). Synthetic aperture radar: systems and signal processing, John Wiley & Sons, Inc.

Chuvieco Salinero Emilio (2002). La observación de la Tierra desde el Espacio. Teledetección ambiental, 1.a edición: mayo. pg. 586.

DEOS. (1997, Julio 28). "Manual de los Registros de Datos Orbitales (ODR)." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, from http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/tools/getorb/docs/odr_fmt.txt.

DEOS. (2004, Febrero 11). "Preguntas frecuentes para la Determinación de Órbitas Precisas para ERS." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research Eelco Doornbos. from <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/faq.shtml#001001>.

DORIS. (2011). "Delft object-oriented radar interferometric software." from <http://doris.tudelft.nl/>.

EOLi. "Earth Observation Link (EOLi). Catálogo de Observación de la Tierra." Retrieved Mayo, 2011, from earth.esa.int/EOLi/EOLi.html

ESA-Earthnet-Online. (2011, Agosto 1, 1998). "ERS SAR.RAW SPECIFICATIONS." Ola Grabak. from http://earth.esa.int/ers/ers_archive/00fee.html#LEADER.

ESA. "Agencia Espacial Europea." Retrieved Mayo, 2011, from <https://earth.esa.int/web/guest/home>.

ESA. "Misión ERS." from <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar>.

Euillades Pablo (2011). Interferometría de radar de apertura sintética. Facultad de Ingeniería-CEDIAC. Mendoza, Universidad de Cuyo.

European Space Agency. (2011). "ERS overview." from http://www.esa.int/esaEO/SEMGWH2VQUD_index_0_m.html.

FAO (1990). Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas. Departamento de Pesca. <http://www.fao.org/docrep/003/T0355S/T0355S02.htm>: 212.

Farr Tom G., Rosen Paul A., Caro Edward, Crippen Robert, Duren Riley, Hensley Scott, Kobrick Michael, Paller Mimi, Rodriguez Ernesto, Roth Ladislav, Seal David, Shaffer Scott, Shimada Joanne, Umland Jeffrey, Werner Marian, Oskin Michael, Burbank Douglas, Alsdorf Douglas (2007). "The Shuttle Radar Topography Mission." Reviews of Geophysics **45**(RG2004): 33.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000). "Nonlinear subsidence interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **38**: 2202-2212.

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001b). "Permanent Scatterers in SAR interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **39**: 8-20.

Ferretti Alessandro, Monti-Guarnieri Andrea, Prati Claudio, Rocca Fabio, Massonnet Didier (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19, Febrero 2007). K. Fletcher, Agencia Espacial Europea Publicaciones. ESTEC. Postbus 2009. 2200 AG Noordwijk. The Netherlands.

Fielding Eric (2009). ROI_pac Internals, Agosto 17-19. Under the Hood, Jet Propulsion Laboratory, California Instituto of Technology.

Fielding Eric (Agosto 17-19, 2009). ROI_pac Internals. Under the Hood, Jet Propulsion Laboratory, California Instituto of Technology.

Fruneau B., Achache J., Delacourt C. (1996). "Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry." Tectonophysics **265**(181-190): 10.

Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. (1989). "Mapping small elevation changes over large areas: Differential interferometry." **94**: 9183-9191.

Gatelli F., Monti Guarnieri A., Parizzi F., Pasquali P., Prati C., Rocca F. (1994). "The wavenumber shift in SAR Interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **32** (4)(855-865).

Goldstein R., Zebker H., Werner C., (1998). "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping " Radio Science **23**(4): 713-720.

Grabak Ola. (1998, Agosto 1ro.). "Especificaciones del formato ERS SAR.RAW CCT y Exabyte." Agencia Espacial Europea Documento N. ER-IS-EPO-GS-5902.1. Issue 3.0. from <http://earth.esa.int/ers/sysutil/sarraw.html#LEADER>.

Guadalupe Rolando (2011). Análisis del uso del método GIN (Grouting Intensity Number) en el proyecto hidroeléctrico Mazar. Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Quito, Escuela Politécnica Nacional. **Ingeniero Geólogo**: 261.

Hanssen Ramon (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Delft University of Technology, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.

Hanssen Ramon (2005). "Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation **6**(253-260): 8.

Hashimoto Manabu, Fukushima Yo, Takada Youichiro. (2011). "Coseismic Interferogram of the 2011 Great off Pacific Coast of Tohoky Earthquake derived from ALOS/PALSAR." Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, from http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/~hasimoto/Manabu/Intf_2011EQ.htm.

IEE. "Centro de Levantamientos Integrados por Sensores Remotos." from <http://www.clirsens.gob.ec>.

IGEPN. "Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional." Retrieved 12 Mayo 2012, from <http://www.igepn.edu.ec>.

INEC. (2011). "Instituto Nacional de Estadística y Censos." from <http://www.inec.gob.ec/cpv/>.

INIGEMM. (2011, Octubre). "INIGEMM instaló en Riobamba sistema único de monitoreo." Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. from <http://www.inigemmm.gob.ec/sala-de-prensa/noticias/49-institucional/129-inigemmm-instalo-en-riobamba-sistema-de-unico-de-monitoreo>.

INIGEMM. (2012, Marzo). "Proyecto Zonificación de Susceptibilidad y Peligros/Amenazas por Procesos de Movimientos en Masa, a escala 1:50,000, del Territorio Ecuatoriano_Fase 1." Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. from <http://www.inigemm.gob.ec/proyectos-de-inversion/170-proyecto-zonificacion-de-susceptibilidad-y-peligros-amenazas-por-procesos-de-movimientos-en-masa-a-escala-150000-del-territorio-ecuatorianofase-1>.

International Charter. (2012). "International Charter Space and Major Disasters ", from http://www.disasterscharter.org/web/charter/activation_details?p_r_p_1415474252_assetId=ACT-391.

Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. (2008). "Hole-filled seamless SRTM data V4." International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), from <http://srtm.csi.cgiar.org/>.

JAXA (2008). ALOS Data Users Handbook. Earth Observation Research and Application Center, Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA. **Revision C**.

JAXA. (2011). "Advanced Land Observing Satellite." Earth Observation Research Center JAXA EORC. 2010, from http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm.

JPL. (2005, Agosto 28). "Shuttle Radar Topography Mission." Jet Propulsion Laboratory. from <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/mission.html>.

Kumar Ranjit (2005). Research methodology: a step-by-step guide for beginners. London, SAGE Publications.

Lanari Riccardo, Mora Oscar, Manunta Michele, Mallorquí Jordi J., Berardino Paolo, Sansosti Eugenio (2004b). "A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **42**(N. 7): 10.

Lateltin Olivier (2008a). Landslide prone areas: Typology. Universidad de Ginebra-Certificado de especialización para la examinación y manejo de riesgo geológico (CERG). Ginebra-Suiza.

Lateltin Olivier (2008b). Landslide process types and principles. Swiss Virtual Campus "Dealing with Natural Hazards". Module 03: Landslide types & process, Universidad de

Ginebra-Certificado de especialización para la examinación y manejo de riesgo geológico (CERG).

LeGéologue. (2009). "InSAR, a tool for measuring earth's surface deformation." from <http://www.legeologue.com/2010/04/insar-a-tool-for-measuring-earth%E2%80%99s-surface-deformation/>.

León Edwin (2006). Procesos geodinámicos en la ladera occidental del cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, Provincia de Chimborazo-Ecuador, Diciembre. Quito-Ecuador, Ministerio de Energía y Minas - Dirección Nacional de Geología DINAGE.

León Edwin (2010). Deslizamiento de Tumba-San Francisco, parroquia Quimiag, Riobamba-Chimborazo, Febrero. Quito-Ecuador, Ministerio de Recursos Naturales No Renovables.

León Edwin, Castillo Washington (2007). Monitoreo del deslizamiento Tumba-San Francisco con GPS diferencial, provincial de Chimborazo: Primera Campaña. Junio, Ministerio de Energía y Minas - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 15.

León Edwin, Castillo Washington (Junio 2007). Monitoreo del deslizamiento Tumba-San Francisco con GPS diferencial, provincial de Chimborazo: Primera Campaña, Ministerio de Energía y Minas & Dirección Nacional de Geología-DINAGE: 15.

León Edwin, Pilatasig Luis (2006). Procesos geodinámicos en la ladera occidental del cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, Riobamba-Chimborazo. Noviembre. Quito, Ministerio de Energía y Minas - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 37.

León Edwin, Pilatasig Luis (Noviembre 2006). Procesos geodinámicos en la ladera occidental del cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, Riobamba-Chimborazo. Quito, Ministerio de Energía y Minas & Dirección Nacional de Geología-DINAGE: 37.

León Edwin, Pilatasig Luis, Ibadango Elias, Oleas Marcelo (2007_1). Monitoreo de los deslizamientos de Tumba-San Francisco y Cerro Baizan-Shobol, Provincia de Chimborazo: Periodo del 27 de diciembre de 2006 hasta el 14 de febrero 2007. Enero, Ministerio de Energía y Minas - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 19.

León Edwin, Pilatasig Luis, Ibadango Elias, Oleas Marcelo (Enero 2007). Monitoreo de los deslizamientos de Tumba-San Francisco y Cerro Baizan-Shobol, Provincia de Chimborazo, Ministerio de Energía y Minas & Dirección Nacional de Geología-DINAGE: 19.

León Edwin, Pilatasig Luis, Oleas Marcelo (2007_2). Monitoreo de los deslizamientos de Tumba-San Francisco y Cerro Baizan-Shobol. 27 Diciembre 2006 - 14 Febrero 2007. Febrero, Ministerio de Energía y Minas - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 9.

Lopinto Ettore (2010). An introduction to the Synthetic Aperture Radar. Agencia Espacial Italiana ASI: 528.

Massonnet D., Feigl K. (1998). "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface." Reviews of Geophysics **36**(4): 441-500.

Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Ardagna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaut T. (1993). "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry." Nature **364**: 138-142.

Masuelli Sergio (2003). Procesamiento básico de imágenes SAR. Informe del trabajo de la beca ASI-CONAE.

Masuelli Sergio (2010a). Aplicación de imágenes de Radar de Apertura Sintética-Clase 1. Maestría Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich". Córdoba-Argentina: 91.

Masuelli Sergio (2010b). Aplicación de imágenes de Radar de Apertura Sintética-Clase 2. Maestría Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich". Córdoba-Argentina: 79.

Mayorga Torres Tannia M. (2007). Evaluation of common data and usefulness of a national SDI to confront multi-risk in Ecuador. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation - ITC. Enschede-Los Países Bajos, Universidad de Twente. **Master of Science**: 117.

MontevideoLibre. (2007). "Open software, open nets, open minds." from http://montevideolibre.org/manuales.libros:wndw:capitulo_2:onda_de_radio.

Monti Guarnieri A. (2002). Unpublished university lecture notes on Radar Theory and Technique. Politecnico di Milano. Italy.

Mora O., Mallorquí J. J., Duro J. (2002). "Generation of deformation maps at low resolution using differential interferometric SAR data." Proc. IGARSS 5: 2696-2698.

NASA. (2011). "ERS, NASA Science Missions." Retrieved April, 2011, from <http://science.nasa.gov/missions/mission.2007-08-30.9274228994/>.

Oleas Marcelo, Calero Bolivar (2007). Monitoreo y reubicación de extensómetros deslizamiento de Tumba-San Francisco. Octubre, Ministerio de Minas Petróleo - Dirección Nacional de Geología DINAGE: 8.

Olmsted Coert (1993). Scientific SAR User's Guide. Julio, Alaska SAR Facility. **ASF-SD-003**: 57.

Pritchard Matt. "Sugerencias de los estudiantes de la Universidad de Cornell para resolver problemas." Eric Trautmann. from <http://www.geo.cornell.edu/eas/PeoplePlaces/Faculty/matt/2a.html>.

Pulupa Roberto (2012a). Reporte quincenal de monitoreo del 16 al 29 de febrero del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Pulupa Roberto (2012b). Reporte quincenal de monitoreo del 01 al 07 de marzo del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
4.

Pulupa Roberto (2012c). Reporte quincenal de monitoreo del 27 de marzo al 03 de abril del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Pulupa Roberto (2012d). Reporte quincenal de monitoreo del 5, 6, 7, 8 y 9 de abril del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 3.

Pulupa Roberto (2012e). Reporte quincenal de monitoreo del 10-16 de abril del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 3.

Pulupa roberto (2012f). Reporte quincenal de monitoreo del 27-30/abril del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Pulupa roberto (2012g). Reporte quincenal de monitoreo del 1-15 de mayo del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 5.

Pulupa Roberto (2012h). Reporte quincenal de monitoreo del 16-31 de mayo del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 5.

Pulupa Roberto (2012i). Reporte quincenal de monitoreo del 01-15 de junio del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 5.

Pulupa Roberto (2012j). Reporte quincenal de monitoreo del 16-30 de junio del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Pulupa Roberto (2012k). Reporte quincenal de monitoreo del 01-15 de julio del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Pulupa Roberto (2012l). Reporte quincenal de monitoreo del 16-31 de julio del 2012. Geología Aplicada: Proyecto Zonificación, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico: 4.

Raucoules Daniel, Colesanti Carlo, Carnec Claudie (2007). "Use of SAR interferometry for detecting and assessing ground subsidence." C. R. Geoscience **339**(289-302): 14.

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2008). 45 familias de Quimiag, en alerta por la inestabilidad de un cerro. El Comercio. Riobamba, Junio 2: http://www.elcomercio.com/noticias/familias-Quimiag-alerta-inestabilidad-cerro_0_166183593.html.

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2010a). El riesgo de deslizamientos persiste en Tumba. El Comercio. Riobamba, Noviembre 9: http://www.elcomercio.com/pais/riesgo-deslizamientos-persiste-Tumba_0_368963108.html.

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2010b). Un cerro se desmorona en Tumba. El Comercio. Riobamba, Diciembre 31: http://www.elcomercio.com/pais/cerro-desmorona-Tumba_0_400160009.html.

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2012a). 50 comunas en riesgo por los deslizamientos. El Comercio. Riobamba, Febrero 26. **Año 107, N. 38967, regional N. 39: 1.**

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2012b). Emergencia en Chimborazo por las lluvias. El Comercio. Riobamba, Octubre 22: http://www.elcomercio.com/pais/lluvia-emergencia-Chimborazo-ecuador-invierno-familia_0_796720350.html.

Redacción Sierra Centro, Chimborazo (2012c). Cerro Iguazú podría generar más derrumbes por las lluvias. El Comercio, Octubre 23: http://www.elcomercio.com/pais/Cerro-Iguazu-generar-derrumbes-lluvias-Chimborazo_0_796720469.html.

Reuter H.I, Nelson A., Jarvis A. (2007). "An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data." International Journal of Geographic Information Science **21(9)**: 25.

ROI_PAC. (Agosto 10, 2011). "Repeat Orbit Interferometry PACKage (ROI_PAC)." Eric Fielding. from <http://www.roipac.org>.

ROI_PAC. (2011, Noviembre 16). "Usando ROI_PAC para procesar ERS-1 y ERS-2." Eric Fielding. from <http://www.roipac.org/ERS>.

Rosenqvist Ake, Shimada Masanobu, Watanabe Manabu (2004). ALOS PALSAR: Technical outline and mission concepts. 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical from SAR Data for Land Applications, Innsbruck, Austria, Japan Aerospace Exploration Agency.

Samsonov Sergery (2010). "Topographic Correction for ALOS PALSAR Interferometry." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

Samsonov Sergery, Van der Kooij Marco, Tiampo Kristy (2011). "A simultaneous inversion for deformation rates and topographic errors of DInSAR data utilizing linear least square inversion technique." Computer and Geosciences.

Sandwell David T. (2008). SAR image formation: ERS SAR processor coded in Matlab. SIO 239. Enero: 22.

Sandwell David T., Price Evelyn J. (1998). "Phase gradient approach to stacking interferograms." Journal of Geophysical Research **103**(N. B12): 30, 183-30, 204.

SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency (2008). Synthetic Aperture Radar and SARscape.

Scharroo Remko. (1997, Marzo 10). "Estabilidad de Órbitas de DUT y UT/CSR para ERS-1." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, from <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/mssl/>.

Scharroo Remko. (2008, Noviembre 25). "Orbitas Delft." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research Remko Scharroo. from <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/tools/getorb/>.

Scharroo Remko. (2011a). "Los Satélites ERS." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research Remko Scharroo. from <http://www.deos.tudelft.nl/ers>.

Scharroo Remko. (2011b). "Determinación de las Orbitas Precisas para ERS y Envisat." Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, from <http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs/>.

Scharroo Remko, Visser P. N. A. M. (1998). "Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites." Journal Geophys. Res., **103**, C4: 8113-8127.

Schwabisch M, Siegmund R. (2002). Study on concepts for radar interferometry satellites for ocean (and land) application. (KoRIOLIS). Section 5 Technical Issues.

Skolnik Merrill I. (1990). Radar Handbook. Second Edition, McGraw Hill.

SRTM. (2004). "Shuttle Radar Topography Mission." Global Land Cover Facility, University of Maryland, 2012, from <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/srtm/>.

SRTM. (2009, Junio 17). "Shuttle Radar Topography Mission: The Mission to Map the World." 2012, from <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

The Geological Society. (2012a). "Landslide & Slope Instability Geohazards: Classification Schemes - Varnes." from http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification_varnes.htm.

The Geological Society. (2012b). "Landslide & Slope Instability Geohazards." from http://www.ukgeohazards.info/pages/eng_geol/landslide_geohazard/eng_geol_landslides_classification.htm.

UNAVCO. (2011). "A Non-profit Membership-Governed Consortium, Facilitates Geoscience Research and Education using Geodesy." from <http://www.unavco.org/>.

UNAVCO Terremoto y Tsunami en Japón. (2011). "UNAVCO Community Response to the 11 March 2011, Mw=9.0 Tohoku, Japan Earthquake and Tsunami ", from http://www.unavco.org/community_science/science_highlights/2011/M8.9-Japan.html.

USGS. (2009). "Landslide Types and Processes." from <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>.

Varnes D. J. (1978). "Slope movement types and processes." Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report, National Research Council, Washington, D.C.(176): 11-33.

Wei Meng, Sandwell David T (2010). "Decorrelation of L-Band and C-Band Interferometry Over Vegetated Areas in California." Geoscience and Remote Sensing **48**(7): 11.

WikiRoiPac. "Troubleshooting: "Too few points left after culling"." Retrieved Marzo 4, 2010, from <http://pages.uoregon.edu/das/WikiRoiPac/doku.php?id=faa>.

Zamora Patricio (2007). Clasificaciones geomecánicas del macizo rocoso y aplicaciones para el túnel de conducción del proyecto hidroeléctrico "San Francisco". Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Quito, Escuela Politécnica Nacional. **Ingeniero Geólogo**: 215.

Zebker H. A., Rosen P. A., Goldstein R. M., Gabriel A., Werner C. L. (1994). "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake." Journal of Geophysical Research **99 (B10)**(19617-19634).

Zebker H. A., Villasenor John (1992). "Decorrelation in Interferometric Radar Echoes." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing **30(5)**: 10.

ANEXOS

Anexo 1: Datos obtenidos antes de la recalibración en los extensómetros Q1, Q2 y Q3 (periodo 25/octubre/2007-22/abril/2008) y experimentales E1, E2 (periodo 14/noviembre/2007-22/abril/2008)

Fuente: Calero y Escárte (2008)

MONITOREO EN Q1:

| FECHA | LECTURAS(cm) | DESPLAZAMIENTO | Nº DIAS | VELOCIDAD cm /año |
|-----------------|--------------|-------------------------|---------|----------------------|
| 25-X-07 | 35,7 | 35,7 | 14 | 930,75 |
| 04-XII-07 | 32,5 | 3,2 | 40 | 29,2 |
| 17-XII-07 | 29,3 | 3,2 | 13 | 89,84615385 |
| 27-XII-07 | 27,1 | 2,2 | 10 | 80,3 |
| 22-I-08 | 21,7 | 5,4 | 26 | 75,80769231 |
| 06-II-08 | 19,2 | 2,5 | 15 | 60,83333333 |
| 8 - II -2.008 | 18,5 | 0,7 | 2 | 127,75 |
| 17 - II -2008 | 17,3 | 1,2 | 9 | 48,66666667 |
| 09 - III - 2008 | 14,4 | 2,9 | 21 | 50,4047619 |
| 14 - III - 2008 | 12,4 | 2 | 5 | 146 |
| 30 - III -2008 | 9,5 | 2,9 | 16 | 66,15625 |
| 04 - IV - 2.008 | 8,8 | 0,7 | 4 | 63,875 |
| 14-IV-2008 | 7,3 | 1,5 | 10 | 54,75 |
| 21-IV-2008 | 6,1 | 1,2 | 7 | 62,57142857 |
| | | Datos con recalibración | | |
| 21-IV-2008 | 38 | 0 | | |
| 22-IV-2008 | 37,8 | 0,2 | 1 | 73 |

MONITOREO EN Q2:

| FECHA | LECTURAS(cm) | DESPLAZAMIENTO | Nº DIAS | VELOCIDAD cm / año |
|--------------|--------------|-------------------------|---------|-----------------------|
| 11-X-2007 | 38 | | | |
| 25-X-2007 | 36,5 | 1,5 | 14 | 39,10714286 |
| 04-XII-2007 | 32,2 | 4,3 | 40 | 39,2375 |
| 17-XII-2007 | 30,3 | 1,9 | 13 | 53,34615385 |
| 27-XII-2007 | 30,9 | 0,6 | 10 | 21,9 |
| 22-I-2008 | 25 | 5,9 | 26 | 82,82692308 |
| 06-II-2008 | 24,1 | 0,9 | 15 | 21,9 |
| 8-II-.008 | 24,3 | 0,2 | 2 | 36,5 |
| 17-II-008 | 22,9 | 1,4 | 9 | 56,77777778 |
| 09-III-2.008 | 20,9 | 2 | 21 | 34,76190476 |
| 14-III-2.008 | 19,2 | 1,7 | 5 | 124,1 |
| 30-III-2008 | 16,3 | 2,9 | 16 | 66,15625 |
| 04-IV-2008 | 16,2 | 0,1 | 4 | 9,125 |
| 14-IV-2008 | 15,1 | 1,1 | 10 | 40,15 |
| 21-IV-2008 | 14,4 | 0,7 | 7 | 36,5 |
| | | Datos con recalibración | | |
| 21-IV-2008 | 38 | | | |
| 22-IV-2008 | 38 | 0 | 1 | 0 |

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

MONITOREO EN Q3:

| FECHA | LECTURAS(cm) | DESPLAZAMIENTO | Nº DIAS | VELOCIDAD cm/año |
|------------------|--------------|-------------------------|---------|---------------------|
| Dato Inicial | 2 | | | |
| 25-X-2007 | 6 | 4 | 14 | 104,285714 |
| 04-XII-2007 | 17,2 | 11,2 | 40 | 102,2 |
| 17-XII-2007 | 21 | 3,8 | 13 | 106,692308 |
| 27-XII-2007 | 24 | 3 | 10 | 109,5 |
| 22-I-2008 | 31,7 | 7,7 | 26 | 108,096154 |
| 06-II-2008 | 35,3 | 3,6 | 15 | 87,6 |
| 8 - II -2.008 | 35,6 | 0,3 | 2 | 54,75 |
| 17 - II -2008 | 38,1 | 2,5 | 9 | 101,388889 |
| 09 - III -2008 | 42,9 | 4,8 | 21 | 83,4285714 |
| 14 - III - 2.008 | 45,8 | 2,9 | 5 | 211,7 |
| 30 - III - 2.008 | 53,2 | 7,4 | 16 | 168,8125 |
| 04 - IV -2.008 | 52,4 | 0,8 | 16 | 18,25 |
| 14 - IV - 2.008 | 55,9 | 3,5 | 10 | 127,75 |
| 21 - IV - 2.008 | 56,1 | 0,2 | 7 | 10,4285714 |
| | | Datos con recalibración | | |
| 22 - IV - 2.008 | 2 | | 7 | 0 |
| 22 - IV - 2.008 | 2,3 | 0,3 | 1 | 109,5 |

MONITOREO EN EXPERIMENTAL 1 (E1):

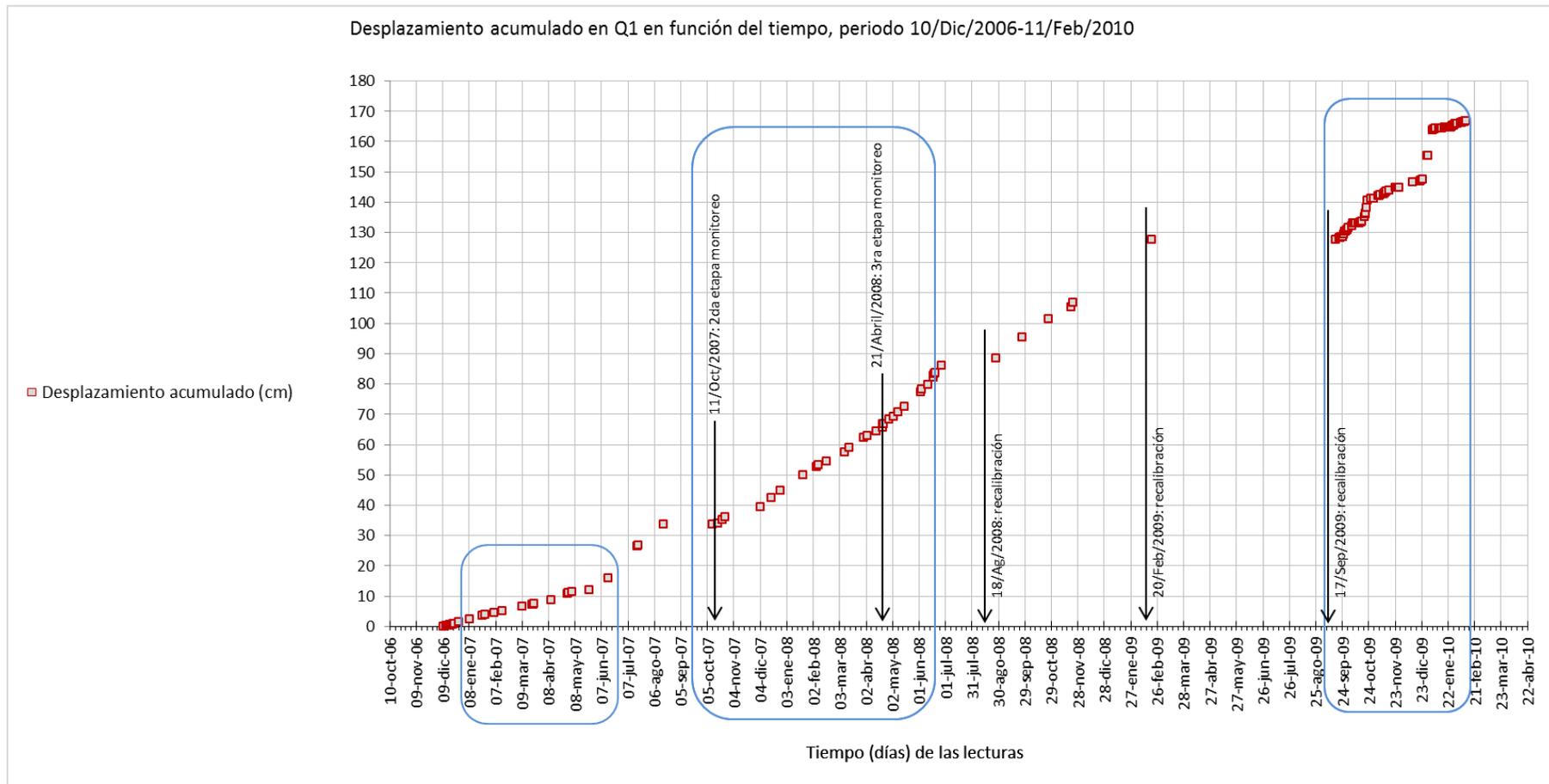
| FECHA | LECTURAS(cm) | DESPLAZAMIENTO | Nº días | VELOCIDAD cm/año |
|-----------------|--------------|-------------------------|---------|---------------------|
| 14-XI-2007 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 04-XII-2007 | 5,8 | 5,8 | 21 | 100,809524 |
| 17-XII-2007 | 9,8 | 4 | 13 | 112,307692 |
| 27-XII-2007 | 12,8 | 3 | 10 | 321,2 |
| 22-I-2008 | 19,7 | 6,9 | 26 | 234,442308 |
| 06-II-2008 | 23,5 | 3,8 | 15 | 403,933333 |
| 8 - II -2.008 | 24,5 | 1 | 2 | 3777,75 |
| 17 - II -2008 | 26,4 | 1,9 | 9 | 1030,11111 |
| 09 - III - 2008 | 32,3 | 5,9 | 21 | 528,380952 |
| 14 - III - 2008 | 33,9 | 1,6 | 5 | 2044 |
| 30 - III - 2008 | 41 | 7,1 | 16 | 898,8125 |
| 04 -IV - 2008 | 40,4 | 0,6 | 4 | 3038,625 |
| 14-IV- 2008 | 33,9 | 6,5 | 10 | 1215,45 |
| | | Datos con recalibración | | |
| 21-IV- 2008 | 44,2 | 10,3 | 7 | 1965,78571 |
| 22-IV- 2008 | 44,4 | 0,2 | 1 | 12446,5 |

MONITOREO EN EXPERIMENTAL 2 (E2):

| FECHA | LECTURAS(cm) | DESPLAZAMIENTO | NºDIAS | VELOCIDAD cm/año |
|-----------------|--------------|-------------------------|--------|---------------------|
| 14-XI-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 04-XII-07 | 0,45 | | 21 | 0 |
| 17-XII-07 | 1,3 | 0,85 | 13 | 23,8653846 |
| 27-XII-07 | 1,6 | 0,3 | 10 | 10,95 |
| 22-I-08 | 1,9 | 0,3 | 26 | 4,21153846 |
| 06-II-08 | 2,1 | 0,2 | 15 | 4,86666667 |
| 8 - II -2.008 | 2,5 | 0,4 | 2 | 73 |
| 17 - II 2008 | 2,8 | 0,3 | 9 | 12,1666667 |
| 09 - III-2008 | 3,2 | 0,4 | 21 | 6,95238095 |
| 14 - III - 2008 | 2,95 | 0,25 | 5 | -18,25 |
| 30 - III - 2008 | 2,95 | 0 | 16 | 0 |
| 04 -IV - 2008 | 2,4 | 0,55 | 4 | 50,1875 |
| 14- IV- 2008 | 2,8 | 0,4 | 10 | 14,6 |
| | | Datos con recalibración | | |
| 21-IV-2008 | 2,8 | 0 | 7 | 0 |
| 22-IV-2008 | 3,2 | 0,4 | 1 | 146 |

Anexo 2: Monitoreo con los extensómetros durante el periodo 10/12/2006 – 11/02/2010

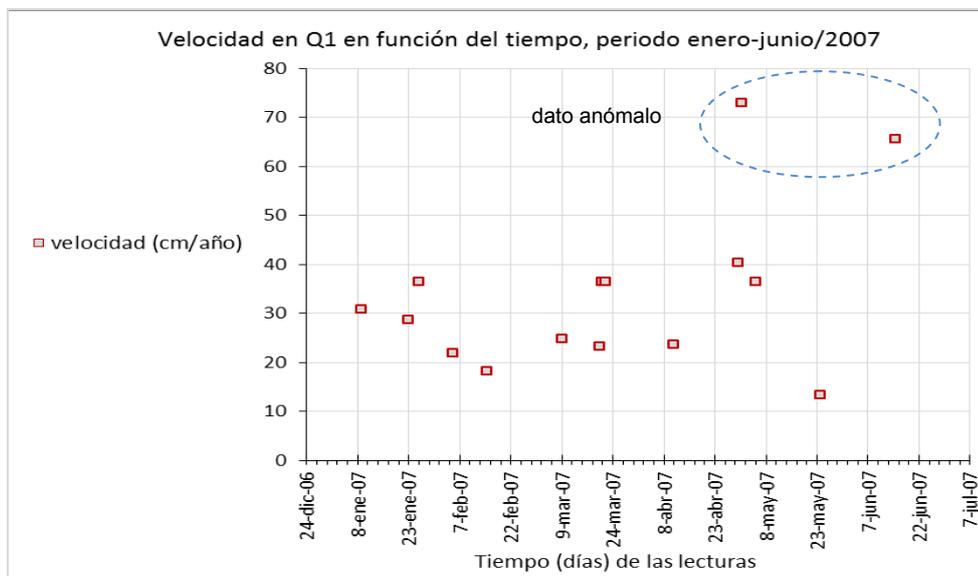
Fuentes: Informes Técnicos del INIGEMM y registro en hoja de excel del monitoreo de los extensómetros Q1, Q2 y Q3. Edición de tablas y realización de gráficos: Tannia Mayorga Torres.



DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

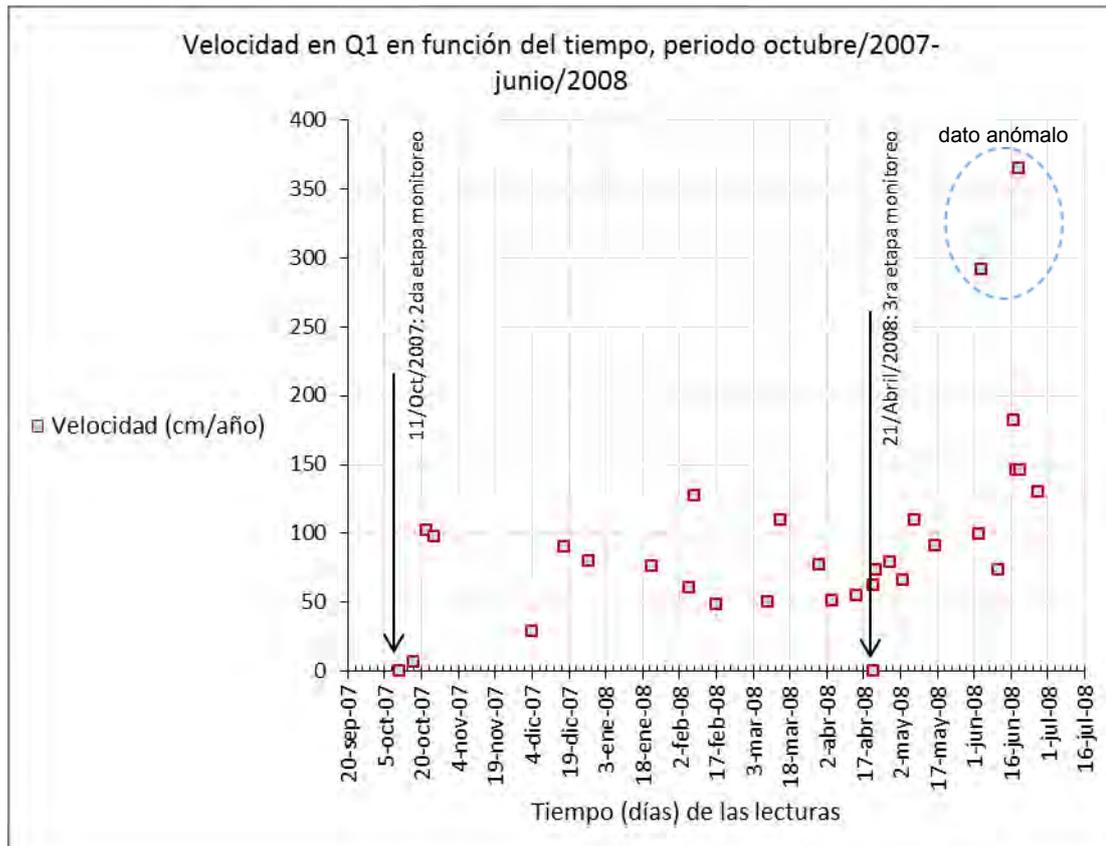
Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro **Q1**,
durante el periodo **enero-junio/2007**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| 9-ene-07 | 30,88461538 | 2,45 | 1,1 | 13 |
| 23-ene-07 | 28,67857143 | 3,55 | 1,1 | 14 |
| 26-ene-07 | 36,5 | 3,85 | 0,3 | 3 |
| 5-feb-07 | 21,9 | 4,45 | 0,6 | 10 |
| 15-feb-07 | 18,25 | 4,95 | 0,5 | 10 |
| 9-mar-07 | 24,88636364 | 6,45 | 1,5 | 22 |
| 20-mar-07 | 23,22727273 | 7,15 | 0,7 | 11 |
| 21-mar-07 | 36,5 | 7,25 | 0,1 | 1 |
| 22-mar-07 | 36,5 | 7,35 | 0,1 | 1 |
| 11-abr-07 | 23,725 | 8,65 | 1,3 | 20 |
| 30-abr-07 | 40,34210526 | 10,75 | 2,1 | 19 |
| 1-may-07 | 73 | 10,95 | 0,2 | 1 |
| 5-may-07 | 36,5 | 11,35 | 0,4 | 4 |
| 24-may-07 | 13,44736842 | 12,05 | 0,7 | 19 |
| 15-jun-07 | 65,53409091 | 16 | 3,95 | 22 |



Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro Q1,
durante el periodo octubre/2007-junio/2008.

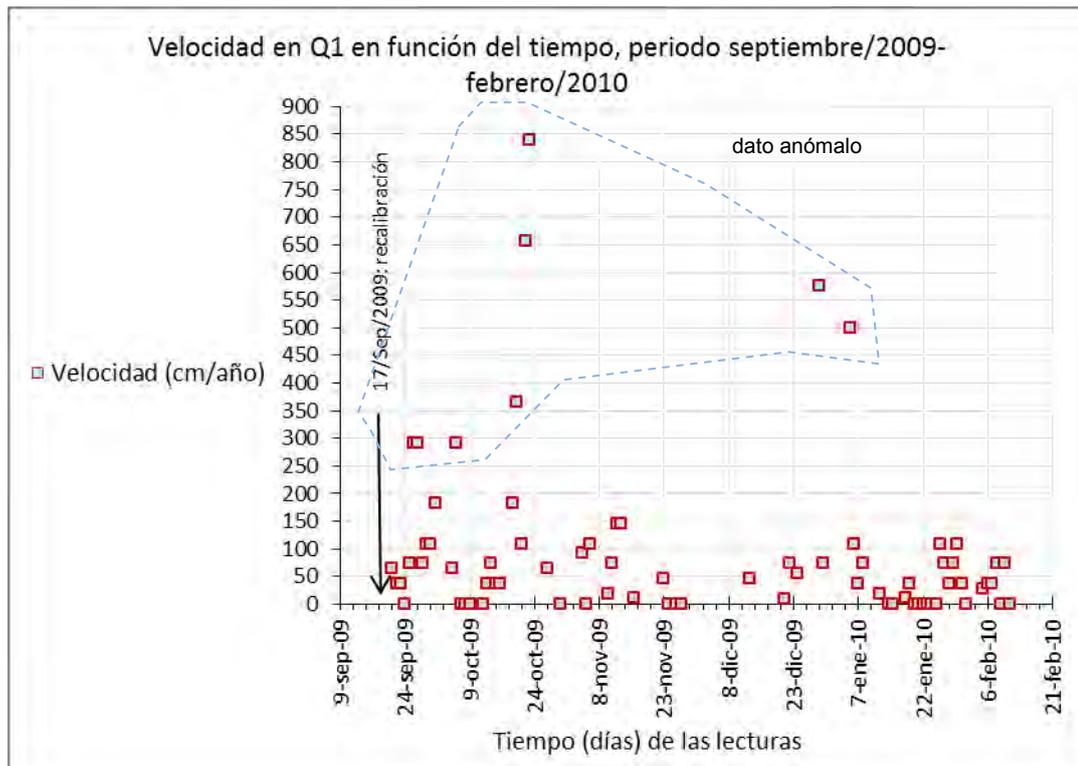
| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| 11-oct-07 | 0 | 33,75 | 0 | 0 |
| 17-oct-07 | 6,083333333 | 33,85 | 0,1 | 6 |
| 22-oct-07 | 102,2 | 35,25 | 1,4 | 5 |
| 25-oct-07 | 97,33333333 | 36,05 | 0,8 | 3 |
| 4-dic-07 | 29,2 | 39,25 | 3,2 | 40 |
| 17-dic-07 | 89,84615385 | 42,45 | 3,2 | 13 |
| 27-dic-07 | 80,3 | 44,65 | 2,2 | 10 |
| 22-ene-08 | 75,80769231 | 50,05 | 5,4 | 26 |
| 6-feb-08 | 60,83333333 | 52,55 | 2,5 | 15 |
| 8-feb-08 | 127,75 | 53,25 | 0,7 | 2 |
| 17-feb-08 | 48,66666667 | 54,45 | 1,2 | 9 |
| 9-mar-08 | 50,4047619 | 57,35 | 2,9 | 21 |
| 14-mar-08 | 109,5 | 58,85 | 1,5 | 5 |
| 30-mar-08 | 77,5625 | 62,25 | 3,4 | 16 |
| 4-abr-08 | 51,1 | 62,95 | 0,7 | 5 |
| 14-abr-08 | 54,75 | 64,45 | 1,5 | 10 |
| 21-abr-08 | 62,57142857 | 65,65 | 1,2 | 7 |
| 21-abr-08 | 0 | 66,65 | 0 | 0 |
| 22-abr-08 | 73 | 66,85 | 0,2 | 1 |
| 28-abr-08 | 79,08333333 | 68,15 | 1,3 | 6 |
| 3-may-08 | 65,7 | 69,05 | 0,9 | 5 |
| 8-may-08 | 109,5 | 70,55 | 1,5 | 5 |
| 16-may-08 | 91,25 | 72,55 | 2 | 8 |
| 3-jun-08 | 99,36111111 | 77,45 | 4,9 | 18 |
| 4-jun-08 | 292 | 78,25 | 0,8 | 1 |
| 11-jun-08 | 73 | 79,65 | 1,4 | 7 |
| 17-jun-08 | 182,5 | 82,65 | 3 | 6 |
| 18-jun-08 | 146 | 82,25 | -0,4 | 1 |
| 19-jun-08 | 365 | 83,25 | 1 | 1 |
| 20-jun-08 | 146 | 83,65 | 0,4 | 1 |
| 27-jun-08 | 130,3571429 | 86,15 | 2,5 | 7 |

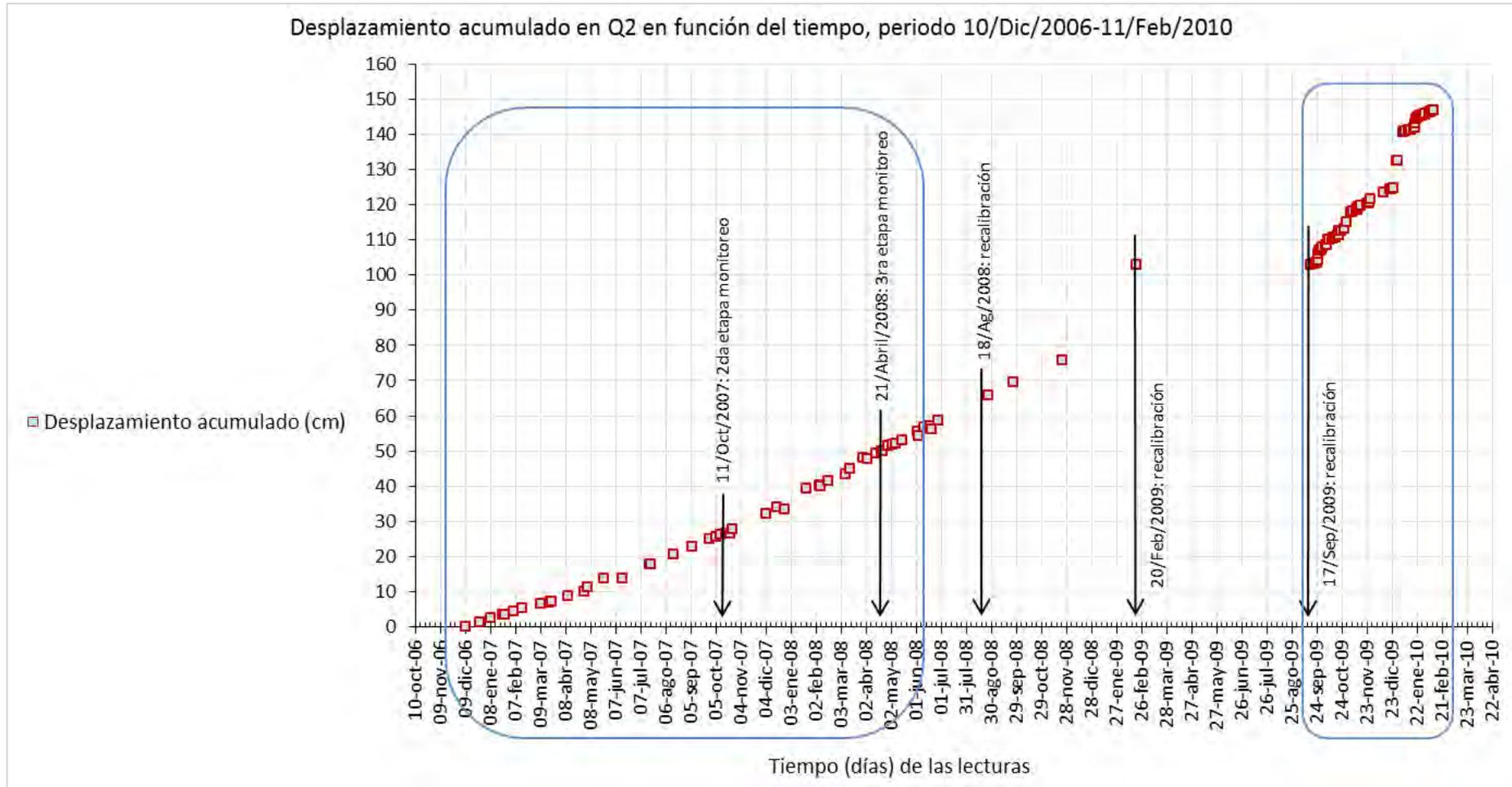


DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro Q1, durante el periodo **septiembre/2009-febrero/2010**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días | Lectura de pluviometro (cm) |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|-----------------------------|
| 21-sep-09 | 63,875 | 128,25 | 0,7 | 4 | 0 |
| 22-sep-09 | 36,5 | 128,35 | 0,1 | 1 | 0 |
| 23-sep-09 | 36,5 | 128,45 | 0,1 | 1 | 0 |
| 24-sep-09 | 0 | 128,45 | 0 | 1 | 0 |
| 25-sep-09 | 73 | 128,65 | 0,2 | 1 | |
| 26-sep-09 | 232 | 129,45 | 0,8 | 1 | |
| 27-sep-09 | 232 | 130,25 | 0,8 | 1 | |
| 28-sep-09 | 73 | 130,45 | 0,2 | 1 | |
| 29-sep-09 | 109,5 | 130,75 | 0,3 | 1 | |
| 30-sep-09 | 109,5 | 131,05 | 0,3 | 1 | |
| 1-oct-09 | 182,5 | 131,55 | 0,5 | 1 | |
| 5-oct-09 | 63,875 | 132,25 | 0,7 | 4 | |
| 6-oct-09 | 232 | 133,05 | 0,8 | 1 | |
| 7-oct-09 | 0 | 133,05 | 0 | 1 | |
| 8-oct-09 | 0 | 133,05 | 0 | 1 | |
| 9-oct-09 | 0 | 133,05 | 0 | 1 | 0 |
| 12-oct-09 | 0 | 133,05 | 0 | 3 | 1 |
| 13-oct-09 | 36,5 | 133,15 | 0,1 | 1 | |
| 14-oct-09 | 73 | 133,35 | 0,2 | 1 | 3 |
| 15-oct-09 | 36,5 | 133,45 | 0,1 | 1 | |
| 16-oct-09 | 36,5 | 133,55 | 0,1 | 1 | |
| 19-oct-09 | 182,5 | 135,05 | 1,5 | 3 | |
| 20-oct-09 | 365 | 136,05 | 1 | 1 | 6 |
| 21-oct-09 | 109,5 | 136,35 | 0,3 | 1 | 7 |
| 22-oct-09 | 657 | 138,15 | 1,8 | 1 | 7 |
| 23-oct-09 | 839,5 | 140,45 | 2,3 | 1 | 7 |
| 27-oct-09 | 63,875 | 141,15 | 0,7 | 4 | 7 |
| 30-oct-09 | 0 | 141,15 | 0 | 3 | 7 |
| 4-nov-09 | 91,25 | 142,15 | 1 | 4 | 7 |
| 5-nov-09 | 0 | 142,15 | 0 | 1 | 7 |
| 6-nov-09 | 109,5 | 142,45 | 0,3 | 1 | 7 |
| 10-nov-09 | 18,25 | 142,65 | 0,2 | 4 | |
| 11-nov-09 | 73 | 142,85 | 0,2 | 1 | |
| 12-nov-09 | 146 | 143,25 | 0,4 | 1 | |
| 13-nov-09 | 146 | 143,65 | 0,4 | 1 | |
| 16-nov-09 | 12,16666667 | 143,75 | 0,1 | 3 | |
| 23-nov-09 | 46,92857143 | 144,65 | 0,9 | 7 | |
| 24-nov-09 | 0 | 144,65 | 0 | 1 | |
| 26-nov-09 | 0 | 144,65 | 0 | 2 | |
| 27-nov-09 | 0 | 144,65 | 0 | 1 | |
| 13-dic-09 | 45,625 | 146,65 | 2 | 16 | |
| 21-dic-09 | 9,125 | 146,85 | 0,2 | 8 | |
| 22-dic-09 | 73 | 147,05 | 0,2 | 1 | |
| 24-dic-09 | 54,75 | 147,35 | 0,3 | 2 | |
| 29-dic-09 | 576,7 | 155,25 | 7,9 | 5 | |
| 30-dic-09 | 73 | 155,45 | 0,2 | 1 | 8 |
| 5-ene-10 | 498,8333333 | 163,65 | 8,2 | 6 | |
| 6-ene-10 | 109,5 | 163,95 | 0,3 | 1 | |
| 7-ene-10 | 36,5 | 164,05 | 0,1 | 1 | |
| 8-ene-10 | 73 | 164,25 | 0,2 | 1 | 8,2 |
| 12-ene-10 | 18,25 | 164,45 | 0,2 | 4 | |
| 14-ene-10 | 0 | 164,45 | 0 | 2 | |
| 15-ene-10 | 0 | 164,45 | 0 | 1 | |
| 18-ene-10 | 12,16666667 | 164,55 | 0,1 | 3 | 9 |
| 19-ene-10 | 36,5 | 164,65 | 0,1 | 1 | 9,5 |
| 20-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | |
| 21-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | |
| 22-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | 9,5 |
| 23-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | 8,5 |
| 24-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | 8,5 |
| 25-ene-10 | 0 | 164,65 | 0 | 1 | 9 |
| 26-ene-10 | 109,5 | 164,95 | 0,3 | 1 | 9,1 |
| 27-ene-10 | 73 | 165,15 | 0,2 | 1 | 9,1 |
| 28-ene-10 | 36,5 | 165,25 | 0,1 | 1 | 9,2 |
| 29-ene-10 | 73 | 165,45 | 0,2 | 1 | 9,2 |
| 30-ene-10 | 109,5 | 165,75 | 0,3 | 1 | 9,2 |
| 31-ene-10 | 36,5 | 165,85 | 0,1 | 1 | 9,2 |
| 1-feb-10 | 0 | 165,85 | 0 | 1 | 9,2 |
| 5-feb-10 | 27,375 | 166,15 | 0,3 | 4 | |
| 6-feb-10 | 36,5 | 166,25 | 0,1 | 1 | |
| 7-feb-10 | 36,5 | 166,35 | 0,1 | 1 | |
| 8-feb-10 | 73 | 166,55 | 0,2 | 1 | 10,3 |
| 9-feb-10 | 0 | 166,55 | 0 | 1 | 10,5 |
| 10-feb-10 | 73 | 166,75 | 0,2 | 1 | 10,5 |
| 11-feb-10 | 0 | 166,75 | 0 | 1 | 10,5 |



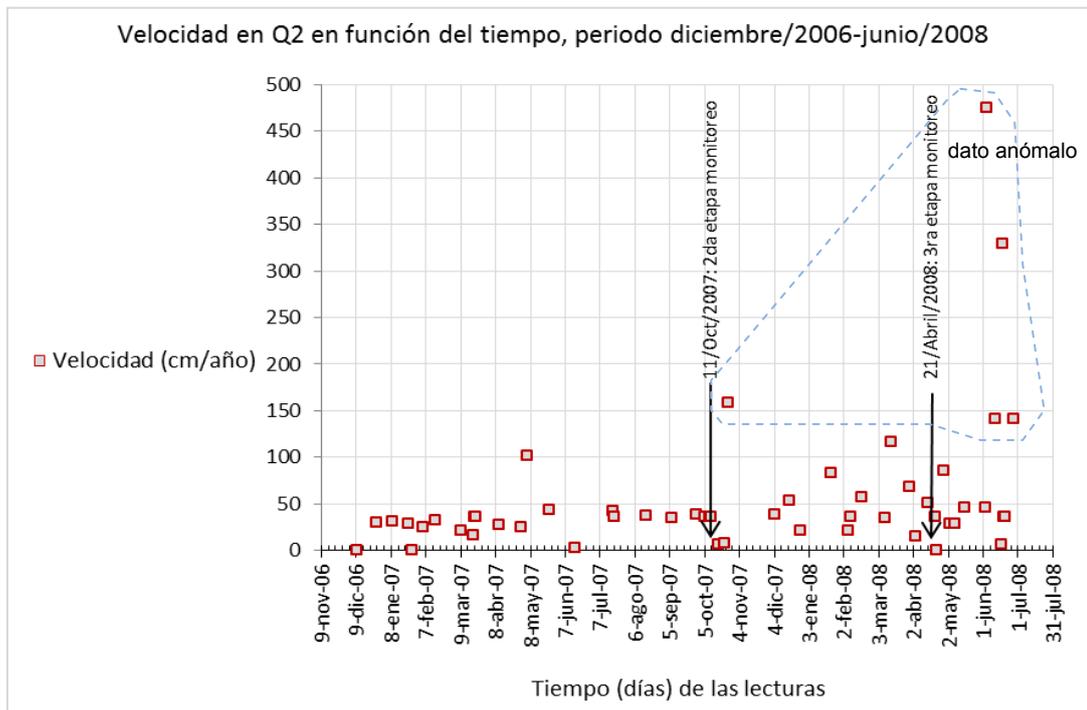


DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro Q2,
durante el periodo **diciembre/2006-junio/2008**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| 10-dic-06 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27-dic-06 | 30,05882353 | 1,4 | 1,4 | 17 |
| 9-ene-07 | 30,88461538 | 2,5 | 1,1 | 13 |
| 23-ene-07 | 28,67857143 | 3,6 | 1,1 | 14 |
| 26-ene-07 | 0 | 3,6 | 0 | 3 |
| 5-feb-07 | 25,55 | 4,3 | 0,7 | 10 |
| 15-feb-07 | 32,85 | 5,2 | 0,9 | 10 |
| 9-mar-07 | 21,56818182 | 6,5 | 1,3 | 22 |
| 20-mar-07 | 16,59090909 | 7 | 0,5 | 11 |
| 21-mar-07 | 36,5 | 7,1 | 0,1 | 1 |
| 22-mar-07 | 36,5 | 7,2 | 0,1 | 1 |
| 11-abr-07 | 27,375 | 8,7 | 1,5 | 20 |
| 30-abr-07 | 24,97368421 | 10 | 1,3 | 19 |
| 5-may-07 | 102,2 | 11,4 | 1,4 | 5 |
| 24-may-07 | 44,18421053 | 13,7 | 2,3 | 19 |
| 15-jun-07 | 3,318181818 | 13,9 | 0,2 | 22 |
| 18-jul-07 | 42,03030303 | 17,7 | 3,8 | 33 |
| 19-jul-07 | 36,5 | 17,8 | 0,1 | 1 |
| 16-ago-07 | 37,80357143 | 20,7 | 2,9 | 28 |
| 7-sep-07 | 34,84090909 | 22,8 | 2,1 | 22 |
| 28-sep-07 | 38,23809524 | 25 | 2,2 | 21 |
| 5-oct-07 | 36,5 | 25,7 | 0,7 | 7 |
| 10-oct-07 | 36,5 | 26,2 | 0,5 | 5 |
| 11-oct-07 | 36,5 | 26,3 | 0,1 | 1 |
| 17-oct-07 | 6,083333333 | 26,4 | 0,1 | 6 |
| 22-oct-07 | 7,3 | 26,5 | 0,1 | 5 |
| 25-oct-07 | 158,1666667 | 27,8 | 1,3 | 3 |
| 4-dic-07 | 39,2375 | 32,1 | 4,3 | 40 |
| 17-dic-07 | 53,34615385 | 34 | 1,9 | 13 |
| 27-dic-07 | 21,9 | 33,4 | -0,6 | 10 |
| 22-ene-08 | 82,82692308 | 39,3 | 5,9 | 26 |
| 6-feb-08 | 21,9 | 40,2 | 0,9 | 15 |
| 8-feb-08 | 36,5 | 40 | -0,2 | 2 |
| 17-feb-08 | 56,77777778 | 41,4 | 1,4 | 9 |
| 9-mar-08 | 34,76190476 | 43,4 | 2 | 21 |
| 14-mar-08 | 116,8 | 45 | 1,6 | 5 |

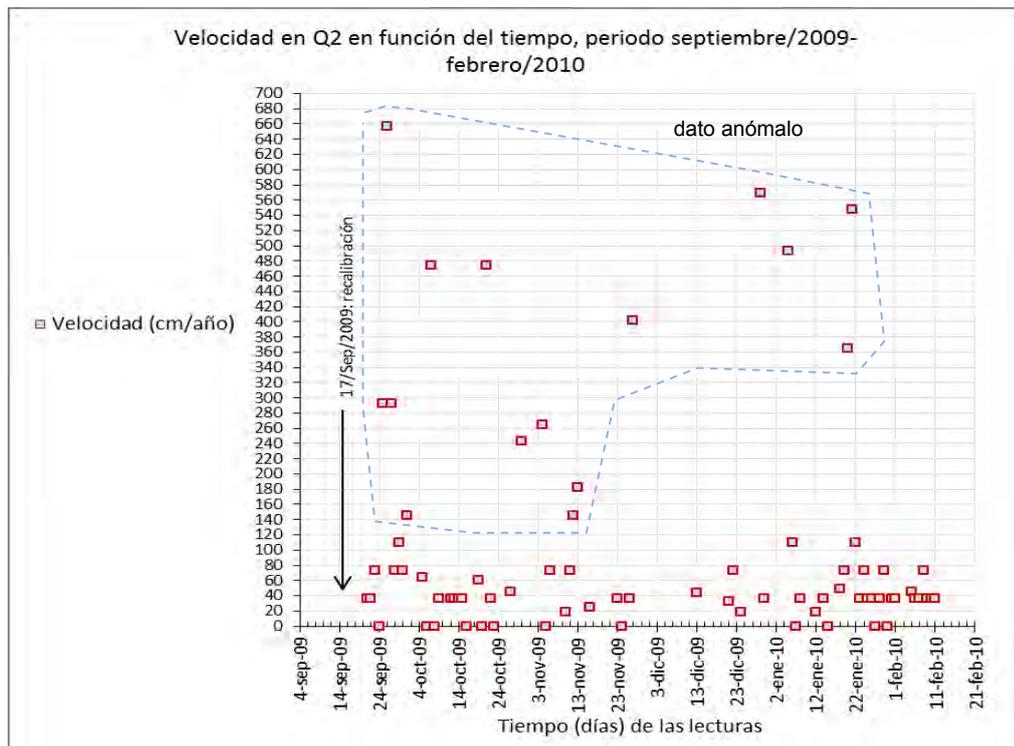
| | | | |
|-----------|-------------|------|------|
| 30-mar-08 | 68,4375 | 48 | 3 |
| 4-abr-08 | 14,6 | 47,8 | -0,2 |
| 14-abr-08 | 51,1 | 49,2 | 1,4 |
| 21-abr-08 | 36,5 | 49,9 | 0,7 |
| 22-abr-08 | 0 | 49,9 | 0 |
| 28-abr-08 | 85,16666667 | 51,3 | 1,4 |
| 3-may-08 | 29,2 | 51,7 | 0,4 |
| 8-may-08 | 29,2 | 52,1 | 0,4 |
| 16-may-08 | 45,625 | 53,1 | 1 |
| 3-jun-08 | 46,63888889 | 55,4 | 2,3 |
| 4-jun-08 | 474,5 | 54,1 | -1,3 |
| 11-jun-08 | 140,7857143 | 56,8 | 2,7 |
| 17-jun-08 | 6,083333333 | 56,9 | 0,1 |
| 18-jun-08 | 328,5 | 56 | -0,9 |
| 19-jun-08 | 36,5 | 56,1 | 0,1 |
| 20-jun-08 | 36,5 | 56 | -0,1 |
| 27-jun-08 | 140,7857143 | 58,7 | 2,7 |

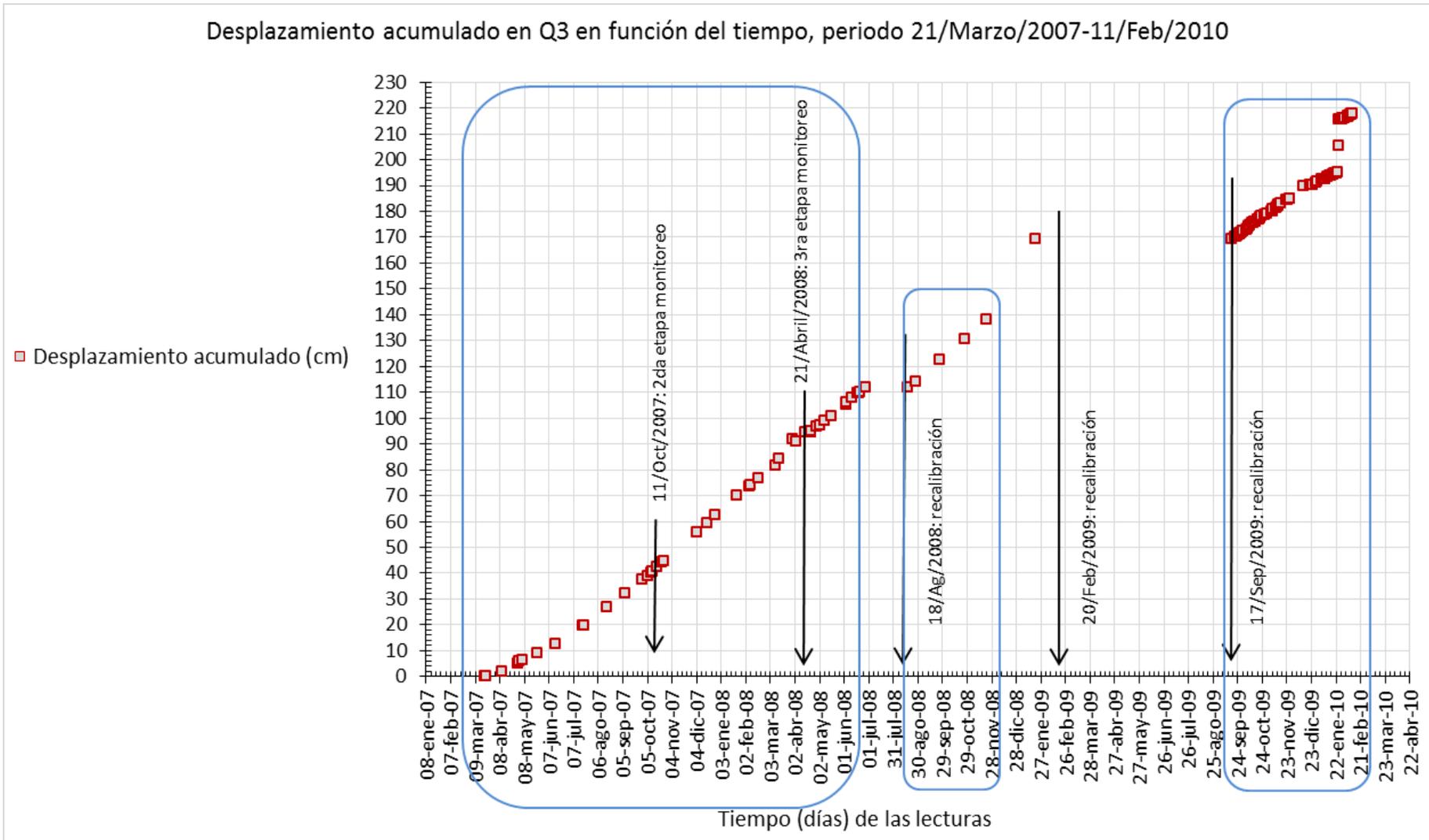


DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro Q2, durante el periodo **septiembre/2009-febrero/2010**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días | Lectura de pluviometro (cm) | |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|-----------------------------|-----|
| 17-sep-09 | | 102,7 | 0 | 0 | 0 | |
| 21-sep-09 | 36,5 | 103,1 | 0,4 | 4 | 0 | |
| 22-sep-09 | 36,5 | 103,2 | 0,1 | 1 | 0 | |
| 23-sep-09 | 73 | 103,4 | 0,2 | 1 | 0 | |
| 24-sep-09 | 0 | 103,4 | 0 | 1 | 0 | |
| 25-sep-09 | 232 | 104,2 | 0,8 | 1 | | |
| 26-sep-09 | 657 | 106 | 1,8 | 1 | | |
| 27-sep-09 | 232 | 106,8 | 0,8 | 1 | | |
| 28-sep-09 | 73 | 107 | 0,2 | 1 | | |
| 29-sep-09 | 109,5 | 107,3 | 0,3 | 1 | | |
| 30-sep-09 | 73 | 107,5 | 0,2 | 1 | | |
| 1-oct-09 | 146 | 107,9 | 0,4 | 1 | | |
| 5-oct-09 | 63,875 | 108,6 | 0,7 | 4 | | |
| 6-oct-09 | 0 | 108,6 | 0 | 1 | | |
| 7-oct-09 | 474,5 | 109,9 | 1,3 | 1 | | |
| 8-oct-09 | 0 | 109,9 | 0 | 1 | | |
| 9-oct-09 | 36,5 | 110 | 0,1 | 1 | 0 | |
| 12-oct-09 | 36,5 | 110,3 | 0,3 | 3 | 1 | |
| 13-oct-09 | 36,5 | 110,4 | 0,1 | 1 | | |
| 14-oct-09 | 36,5 | 110,5 | 0,1 | 1 | 3 | |
| 15-oct-09 | 36,5 | 110,6 | 0,1 | 1 | | |
| 16-oct-09 | 0 | 110,6 | 0 | 1 | | |
| 19-oct-09 | 60,83333333 | 111,1 | 0,5 | 3 | | |
| 20-oct-09 | 0 | 111,1 | 0 | 1 | 6 | |
| 21-oct-09 | 474,5 | 112,4 | 1,3 | 1 | 7 | |
| 22-oct-09 | 36,5 | 112,5 | 0,1 | 1 | 7 | |
| 23-oct-09 | 0 | 112,5 | 0 | 1 | 7 | |
| 27-oct-09 | 45,625 | 113 | 0,5 | 4 | 7 | |
| 30-oct-09 | 243,3333333 | 115 | 2 | 3 | 7 | |
| 4-nov-09 | 264,625 | 117,9 | 2,9 | 4 | 7 | |
| 5-nov-09 | 0 | 117,9 | 0 | 1 | 7 | |
| 6-nov-09 | 73 | 118,1 | 0,2 | 1 | 7 | |
| 10-nov-09 | 18,25 | 118,3 | 0,2 | 4 | | |
| 11-nov-09 | 73 | 118,5 | 0,2 | 1 | | |
| 12-nov-09 | 146 | 118,9 | 0,4 | 1 | | |
| 13-nov-09 | 182,5 | 119,4 | 0,5 | 1 | | |
| 16-nov-09 | 24,33333333 | | | | 119,6 | 0,2 |
| 23-nov-09 | 36,5 | | | | 120,3 | 0,7 |
| 24-nov-09 | 0 | | | | 120,3 | 0 |
| 26-nov-09 | 36,5 | | | | 120,5 | 0,2 |
| 27-nov-09 | 401,5 | | | | 121,6 | 1,1 |
| 13-dic-09 | 43,34375 | | | | 123,5 | 1,9 |
| 21-dic-09 | 31,9375 | | | | 124,2 | 0,7 |
| 22-dic-09 | 73 | | | | 124,4 | 0,2 |
| 24-dic-09 | 18,25 | | | | 124,5 | 0,1 |
| 29-dic-09 | 569,4 | | | | 132,3 | 7,8 |
| 30-dic-09 | 36,5 | | | | 132,4 | 0,1 |
| 5-ene-10 | 492,75 | | | | 140,5 | 8,1 |
| 6-ene-10 | 109,5 | | | | 140,8 | 0,3 |
| 7-ene-10 | 0 | | | | 140,8 | 0 |
| 8-ene-10 | 36,5 | | | | 140,9 | 0,1 |
| 12-ene-10 | 18,25 | | | | 141,1 | 0,2 |
| 14-ene-10 | 36,5 | | | | 141,3 | 0,2 |
| 15-ene-10 | 0 | | | | 141,3 | 0 |
| 18-ene-10 | 48,66666667 | | | | 141,7 | 0,4 |
| 19-ene-10 | 73 | | | | 141,9 | 0,2 |
| 20-ene-10 | 365 | | | | 142,9 | 1 |
| 21-ene-10 | 547,5 | | | | 144,4 | 1,5 |
| 22-ene-10 | 109,5 | | | | 144,7 | 0,3 |
| 23-ene-10 | 36,5 | | | | 144,8 | 0,1 |
| 24-ene-10 | 73 | | | | 145 | 0,2 |
| 25-ene-10 | 36,5 | | | | 145,1 | 0,1 |
| 26-ene-10 | 36,5 | | | | 145,2 | 0,1 |
| 27-ene-10 | 0 | | | | 145,2 | 0 |
| 28-ene-10 | 36,5 | | | | 145,3 | 0,1 |
| 29-ene-10 | 73 | | | | 145,5 | 0,2 |
| 30-ene-10 | 0 | | | | 145,5 | 0 |
| 31-ene-10 | 36,5 | | | | 145,6 | 0,1 |
| 1-feb-10 | 36,5 | | | | 145,7 | 0,1 |
| 5-feb-10 | 45,625 | | | | 146,2 | 0,5 |
| 6-feb-10 | 36,5 | | | | 146,3 | 0,1 |
| 7-feb-10 | 36,5 | | | | 146,4 | 0,1 |
| 8-feb-10 | 73 | | | | 146,6 | 0,2 |
| 9-feb-10 | 36,5 | | | | 146,7 | 0,1 |
| 10-feb-10 | 36,5 | | | | 146,8 | 0,1 |
| 11-feb-10 | 36,5 | | | | 146,9 | 0,1 |



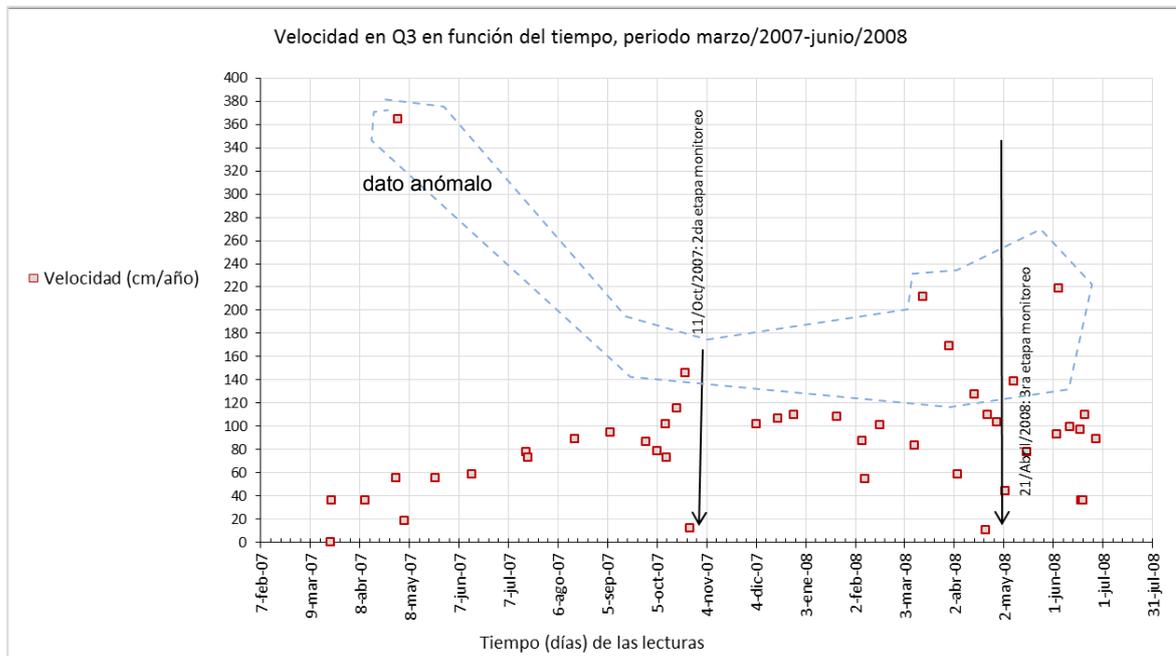


DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro **Q3**, durante el periodo **marzo/2007-junio/2008**.

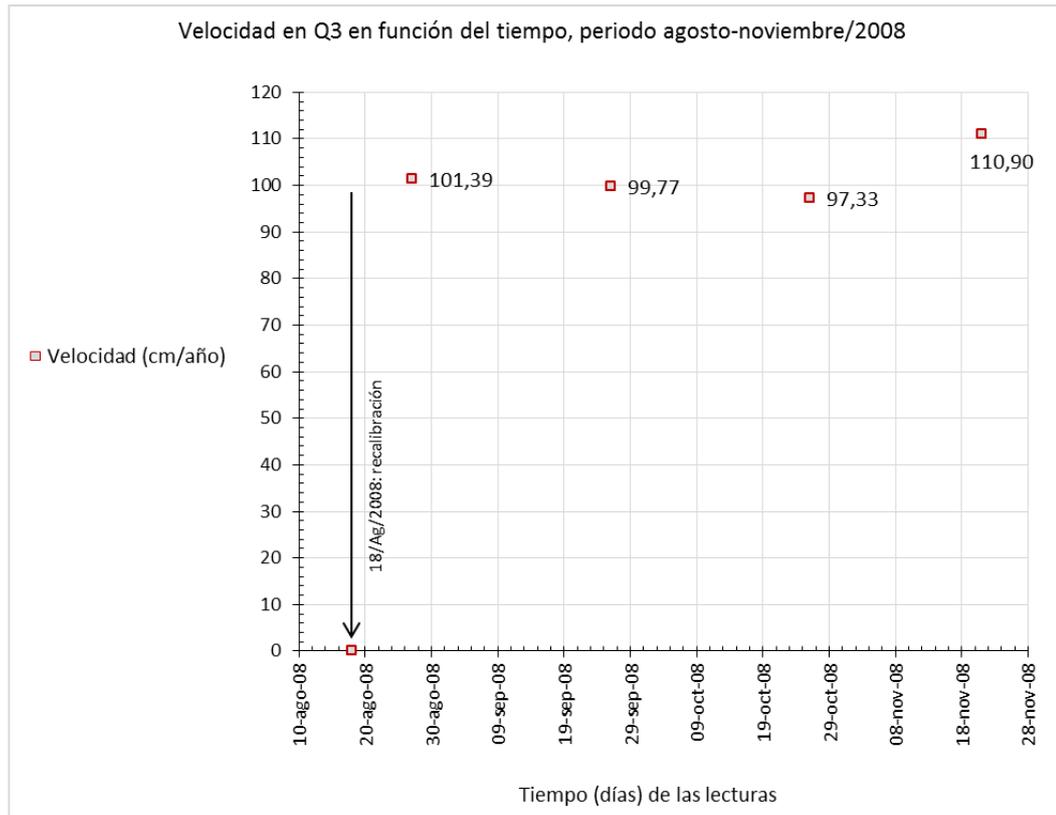
| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| 21-mar-07 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22-mar-07 | 36,5 | 0,1 | 0,1 | 1 |
| 11-abr-07 | 36,5 | 2,1 | 2 | 20 |
| 30-abr-07 | 55,71052632 | 5 | 2,9 | 19 |
| 1-may-07 | 365 | 6 | 1 | 1 |
| 5-may-07 | 18,25 | 6,2 | -0,2 | 4 |
| 24-may-07 | 55,71052632 | 9,1 | 2,9 | 19 |
| 15-jun-07 | 58,89772727 | 12,65 | 3,55 | 22 |
| 18-jul-07 | 77,97727273 | 19,7 | 7,05 | 33 |
| 19-jul-07 | 73 | 19,9 | 0,2 | 1 |
| 16-ago-07 | 88,64285714 | 26,7 | 6,8 | 28 |
| 7-sep-07 | 94,56818182 | 32,4 | 5,7 | 22 |
| 28-sep-07 | 86,9047619 | 37,4 | 5 | 21 |
| 5-oct-07 | 78,21428571 | 38,9 | 1,5 | 7 |
| 10-oct-07 | 102,2 | 40,3 | 1,4 | 5 |
| 11-oct-07 | 73 | 40,5 | 0,2 | 1 |
| 17-oct-07 | 115,5833333 | 42,4 | 1,9 | 6 |
| 22-oct-07 | 146 | 44,4 | 2 | 5 |
| 25-oct-07 | 12,16666667 | 44,5 | 0,1 | 3 |
| 4-dic-07 | 102,2 | 55,7 | 11,2 | 40 |
| 17-dic-07 | 106,6923077 | 59,5 | 3,8 | 13 |
| 27-dic-07 | 109,5 | 62,5 | 3 | 10 |
| 22-ene-08 | 108,0961538 | 70,2 | 7,7 | 26 |
| 6-feb-08 | 87,6 | 73,8 | 3,6 | 15 |
| 8-feb-08 | 54,75 | 74,1 | 0,3 | 2 |
| 17-feb-08 | 101,3888889 | 76,6 | 2,5 | 9 |
| 9-mar-08 | 83,42857143 | 81,4 | 4,8 | 21 |
| 14-mar-08 | 211,7 | 84,3 | 2,9 | 5 |
| 30-mar-08 | 168,8125 | 91,7 | 7,4 | 16 |
| 4-abr-08 | 58,4 | 90,9 | -0,8 | 5 |
| 14-abr-08 | 127,75 | 94,4 | 3,5 | 10 |
| 21-abr-08 | 10,42857143 | 94,6 | 0,2 | 7 |
| 22-abr-08 | 109,5 | 94,9 | 0,3 | 1 |
| 28-abr-08 | 103,4166667 | 96,6 | 1,7 | 6 |
| 3-may-08 | 43,8 | 97,2 | 0,6 | 5 |
| 8-may-08 | 138,7 | 99,1 | 1,9 | 5 |

| | | | | |
|-----------|-------------|-------|-----|----|
| 16-may-08 | 77,5625 | 100,8 | 1,7 | 8 |
| 3-jun-08 | 93,27777778 | 105,4 | 4,6 | 18 |
| 4-jun-08 | 219 | 106 | 0,6 | 1 |
| 11-jun-08 | 99,07142857 | 107,9 | 1,9 | 7 |
| 17-jun-08 | 97,33333333 | 109,5 | 1,6 | 6 |
| 18-jun-08 | 36,5 | 109,6 | 0,1 | 1 |
| 19-jun-08 | 36,5 | 109,7 | 0,1 | 1 |
| 20-jun-08 | 109,5 | 110 | 0,3 | 1 |
| 27-jun-08 | 88,64285714 | 111,7 | 1,7 | 7 |



Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro **Q3**,
durante el periodo **agosto-noviembre/2008**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|
| 18-ago-08 | 0 | 111,7 | 0 | 52 |
| 27-ago-08 | 101,3888889 | 114,2 | 2,5 | 9 |
| 26-sep-08 | 99,76666667 | 122,4 | 8,2 | 30 |
| 26-oct-08 | 97,33333333 | 130,4 | 8 | 30 |
| 21-nov-08 | 110,9038462 | 138,3 | 7,9 | 26 |



DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

Fecha de lectura, desplazamiento acumulado (cm) y velocidad (cm/año) del extensómetro Q3, durante el periodo **septiembre/2009-febrero/2010**.

| Fecha | Velocidad (cm/año) | Desplazamiento acumulado (cm) | Movimiento efectivo (cm) | días | Lectura de pluviometro (cm) |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|------|-----------------------------|
| 17-sep-09 | | 169,2 | 0 | 0 | |
| 21-sep-09 | 73 | 170 | 0,8 | 4 | 0 |
| 22-sep-09 | 73 | 170,2 | 0,2 | 1 | 0 |
| 23-sep-09 | 219 | 170,8 | 0,6 | 1 | 0 |
| 24-sep-09 | 0 | 170,8 | 0 | 1 | 0 |
| 25-sep-09 | 36,5 | 170,9 | 0,1 | 1 | |
| 26-sep-09 | 109,5 | 171,2 | 0,3 | 1 | |
| 27-sep-09 | 73 | 171,4 | 0,2 | 1 | |
| 28-sep-09 | 73 | 171,6 | 0,2 | 1 | |
| 29-sep-09 | 219 | 172,2 | 0,6 | 1 | |
| 30-sep-09 | 36,5 | 172,3 | 0,1 | 1 | |
| 1-oct-09 | 0 | 172,3 | 0 | 1 | |
| 5-oct-09 | 36,5 | 172,7 | 0,4 | 4 | |
| 6-oct-09 | 292 | 173,5 | 0,8 | 1 | |
| 7-oct-09 | 182,5 | 174 | 0,5 | 1 | |
| 8-oct-09 | 0 | 174 | 0 | 1 | |
| 9-oct-09 | 292 | 174,8 | 0,8 | 1 | 0 |
| 12-oct-09 | 73 | 175,4 | 0,6 | 3 | 1 |
| 13-oct-09 | 73 | 175,6 | 0,2 | 1 | |
| 14-oct-09 | 73 | 175,8 | 0,2 | 1 | 3 |
| 15-oct-09 | 36,5 | 175,9 | 0,1 | 1 | |
| 16-oct-09 | 36,5 | 176 | 0,1 | 1 | |
| 19-oct-09 | 121,6666667 | 177 | 1 | 3 | |
| 20-oct-09 | 0 | 177 | 0 | 1 | 6 |
| 21-oct-09 | 182,5 | 177,5 | 0,5 | 1 | 7 |
| 22-oct-09 | 36,5 | 177,6 | 0,1 | 1 | 7 |
| 23-oct-09 | 146 | 178 | 0,4 | 1 | 7 |
| 27-oct-09 | 45,625 | 178,5 | 0,5 | 4 | 7 |
| 30-oct-09 | 85,16666667 | 179,2 | 0,7 | 3 | 7 |
| 4-nov-09 | 73 | 180 | 0,8 | 4 | 7 |
| 5-nov-09 | 0 | 180 | 0 | 1 | 7 |
| 6-nov-09 | 36,5 | 181 | 1 | 1 | 7 |
| 10-nov-09 | 45,625 | 181,5 | 0,5 | 4 | |
| 11-nov-09 | 73 | 181,7 | 0,2 | 1 | |
| 12-nov-09 | 182,5 | 182,2 | 0,5 | 1 | |
| 13-nov-09 | 109,5 | 182,5 | 0,3 | 1 | |
| 16-nov-09 | 60,83333333 | | 183 | 0,5 | |
| 23-nov-09 | 78,21428571 | | 184,5 | 1,5 | |
| 24-nov-09 | 0 | | 184,5 | 0 | |
| 26-nov-09 | 54,75 | | 184,8 | 0,3 | |
| 27-nov-09 | 73 | | 185 | 0,2 | |
| 13-dic-09 | 107,21875 | | 189,7 | 4,7 | |
| 21-dic-09 | 22,8125 | | 190,2 | 0,5 | |
| 22-dic-09 | 73 | | 190,4 | 0,2 | |
| 24-dic-09 | 0 | | 190,4 | 0 | |
| 29-dic-09 | 58,4 | | 191,2 | 0,8 | |
| 30-dic-09 | 73 | | 191,4 | 0,2 | |
| 5-ene-10 | 66,91666667 | | 192,5 | 1,1 | |
| 6-ene-10 | 0 | | 192,5 | 0 | |
| 7-ene-10 | 0 | | 192,5 | 0 | |
| 8-ene-10 | 36,5 | | 192,6 | 0,1 | |
| 12-ene-10 | 82,125 | | 193,5 | 0,9 | |
| 14-ene-10 | 54,75 | | 193,8 | 0,3 | |
| 15-ene-10 | 0 | | 193,8 | 0 | |
| 18-ene-10 | 36,5 | | 194,1 | 0,3 | |
| 19-ene-10 | 73 | | 194,3 | 0,2 | |
| 20-ene-10 | 73 | | 194,5 | 0,2 | |
| 21-ene-10 | 0 | | 194,5 | 0 | |
| 22-ene-10 | 36,5 | | 194,6 | 0,1 | |
| 23-ene-10 | 36,5 | | 194,7 | 0,1 | |
| 24-ene-10 | 182,5 | | 195,2 | 0,5 | |
| 27-ene-10 | 73 | | 195,7 | 0,2 | |
| 28-ene-10 | 36,5 | | 195,8 | 0,1 | |
| 29-ene-10 | 0 | | 195,8 | 0 | |
| 30-ene-10 | 36,5 | | 195,9 | 0,1 | |
| 31-ene-10 | 36,5 | | 196 | 0,1 | |
| 1-feb-10 | 73 | | 196,2 | 0,2 | |
| 5-feb-10 | 45,625 | | 196,7 | 0,5 | |
| 6-feb-10 | 109,5 | | 197 | 0,3 | |
| 7-feb-10 | 36,5 | | 197,1 | 0,1 | |
| 8-feb-10 | 109,5 | | 197,4 | 0,3 | |
| 9-feb-10 | 0 | | 197,4 | 0 | |
| 10-feb-10 | 146 | | 197,8 | 0,4 | |
| 11-feb-10 | 36,5 | | 197,9 | 0,1 | |

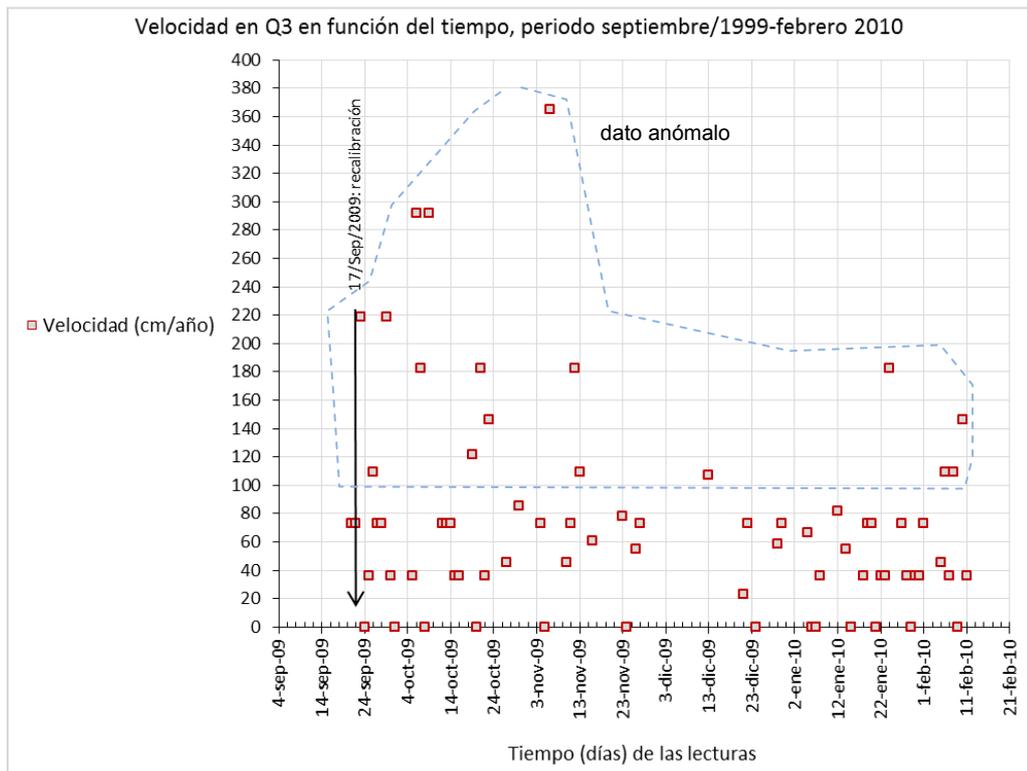
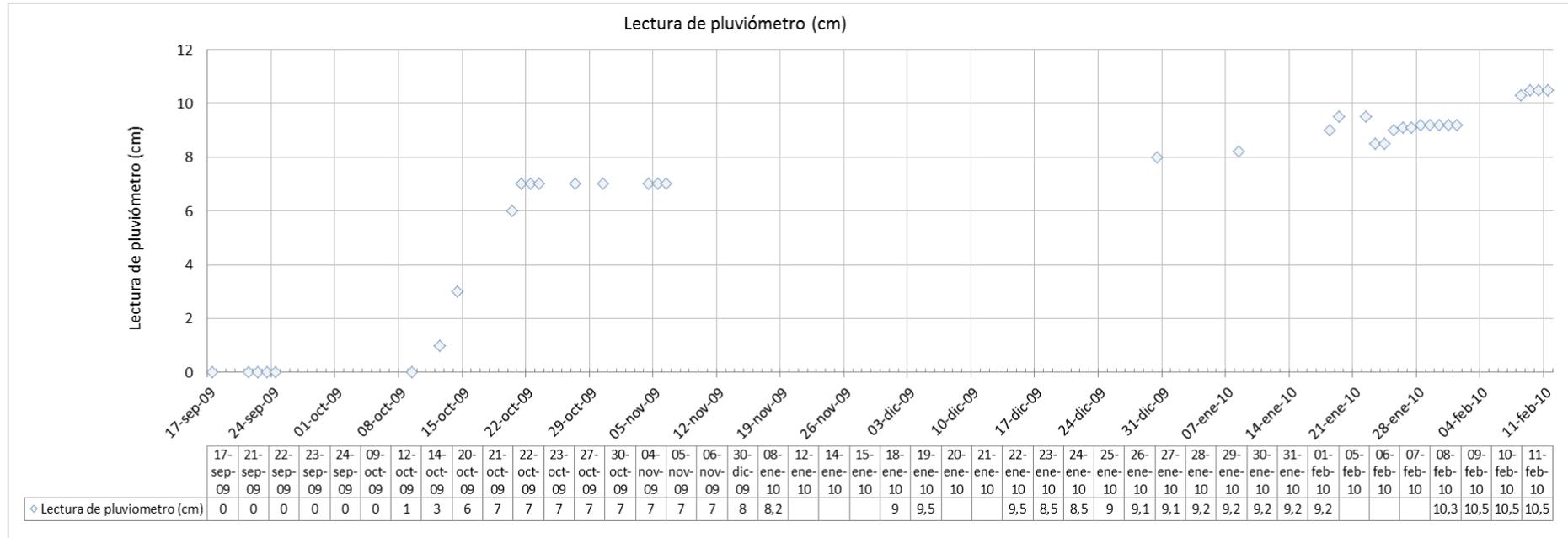


Gráfico de lectura de pluviómetro (cm) durante septiembre/2009-febrero/2010. Las fechas del registro del pluviómetro no corresponden en su totalidad a las fechas de las lecturas de los extensómetros Q1, Q2 y Q3.



Anexo 3: Monitoreo con GPS diferencial durante la primera (14-16 Junio del 2007) y segunda campaña (18-20 Julio del 2007)

Fuente: INIGEMM (León y Castillo, 2007).

| Estaciones | DA X (1era campaña) | error 95 % (m) | DA X (2da campaña) | error 95 % (m) | Diferencia X (m) | DA Y (1era campaña) | error 95 % (m) | DA Y (2da campaña) | error 95 % (m) | Diferencia Y (m) | (m.s.n.m) (1era campaña) | error 95 % (m) | (m.s.n.m) (2da campaña) | error 95 % (m) | Diferencia Z (m) |
|------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------|------------------|
| QB01 | 769609,100 | 0,000 | 769609,100 | 0,000 | 0,000 | 9818298,062 | 0,000 | 9818298,062 | 0,000 | 0,000 | 2535,104 | 0,000 | 2535,104 | 0,000 | 0,000 |
| QB02 | 771419,479 | 0,000 | 771419,479 | 0,000 | 0,000 | 9821602,798 | 0,000 | 9821602,798 | 0,000 | 0,000 | 2560,204 | 0,000 | 2560,204 | 0,000 | 0,000 |
| QR01 | 773342,804 | 0,008 | 773342,762 | 0,010 | 0,042 | 9818827,695 | 0,010 | 9818827,697 | 0,010 | -0,002 | 3166,447 | 0,012 | 3166,472 | 0,012 | -0,025 |
| QR02 | 773305,171 | 0,010 | 773305,086 | 0,008 | 0,085 | 9818969,066 | 0,010 | 9818969,057 | 0,008 | 0,009 | 3134,257 | 0,012 | 3134,172 | 0,010 | 0,085 |
| QR03 | 773240,262 | 0,010 | 773240,200 | 0,010 | 0,062 | 9819153,668 | 0,008 | 9819153,665 | 0,008 | 0,003 | 3067,760 | 0,012 | 3067,718 | 0,010 | 0,042 |
| QR04 | 773267,902 | 0,010 | 773267,868 | 0,010 | 0,034 | 9819302,733 | 0,008 | 9819302,722 | 0,008 | 0,011 | 3062,710 | 0,014 | 3062,708 | 0,012 | 0,002 |
| QR05 | 772584,493 | 0,006 | 772584,496 | 0,006 | -0,003 | 9819401,705 | 0,006 | 9819401,674 | 0,008 | 0,031 | 2681,168 | 0,008 | 2681,170 | 0,008 | -0,002 |
| QR06 | 773247,573 | 0,008 | 773247,575 | 0,008 | -0,002 | 9819420,847 | 0,008 | 9819420,850 | 0,008 | -0,003 | 3041,269 | 0,012 | 3041,302 | 0,012 | -0,033 |
| QR07 | 773119,656 | 0,010 | 773119,655 | 0,008 | 0,001 | 9819330,283 | 0,010 | 9819330,300 | 0,008 | -0,017 | 2961,326 | 0,012 | 2961,368 | 0,010 | -0,042 |
| QR08 | 773031,984 | 0,008 | 773031,938 | 0,008 | 0,046 | 9819193,413 | 0,010 | 9819193,440 | 0,006 | -0,027 | 2939,743 | 0,010 | 2939,793 | 0,010 | -0,050 |
| QR09 | 772876,229 | 0,008 | 772876,202 | 0,008 | 0,027 | 9819034,025 | 0,008 | 9819034,027 | 0,008 | -0,002 | 2913,123 | 0,010 | 2913,134 | 0,008 | -0,011 |
| QR10 | 772810,752 | 0,008 | 772810,764 | 0,008 | -0,012 | 9818736,356 | 0,008 | 9818736,371 | 0,010 | -0,015 | 2892,726 | 0,010 | 2892,726 | 0,010 | 0,000 |
| QR11 | 772649,369 | 0,010 | 772649,380 | 0,008 | -0,011 | 9819034,290 | 0,008 | 9819034,286 | 0,006 | 0,004 | 2790,038 | 0,010 | 2790,020 | 0,008 | 0,018 |
| QR12 | 772313,066 | 0,008 | 772313,066 | 0,006 | 0,000 | 9819412,432 | 0,006 | 9819412,453 | 0,006 | -0,021 | 2621,914 | 0,010 | 2621,913 | 0,008 | 0,001 |
| QR13 | 772737,263 | 0,006 | 772737,258 | 0,008 | 0,005 | 9819787,567 | 0,006 | 9819787,551 | 0,008 | 0,016 | 2695,392 | 0,012 | 2695,403 | 0,008 | -0,011 |
| QR14 | 771910,940 | 0,008 | 771910,939 | 0,008 | 0,001 | 9819242,750 | 0,008 | 9819242,768 | 0,006 | -0,018 | 2496,555 | 0,012 | 2496,522 | 0,010 | 0,033 |
| QR15 | 772290,576 | 0,006 | 772290,563 | 0,008 | 0,013 | 9819057,668 | 0,010 | 9819057,656 | 0,006 | 0,012 | 2666,764 | 0,010 | 2666,762 | 0,010 | 0,002 |
| QR16 | 772152,131 | 0,008 | 772152,126 | 0,006 | 0,005 | 9819156,305 | 0,006 | 9819156,299 | 0,008 | 0,006 | 2638,104 | 0,010 | 2638,114 | 0,010 | -0,010 |
| QR17 | 772060,440 | 0,006 | 772060,328 | 0,006 | 0,112 | 9819201,614 | 0,006 | 9819201,634 | 0,006 | -0,020 | 2572,726 | 0,010 | 2572,647 | 0,008 | 0,079 |
| QR18 | 772008,765 | 0,006 | 772008,743 | 0,008 | 0,022 | 9819355,480 | 0,008 | 9819355,488 | 0,008 | -0,008 | 2532,431 | 0,010 | 2532,451 | 0,010 | -0,020 |
| QR19 | 771912,439 | 0,008 | 771912,435 | 0,006 | 0,004 | 9819724,935 | 0,008 | 9819724,917 | 0,006 | 0,018 | 2475,739 | 0,010 | 2475,717 | 0,008 | 0,022 |
| QR20 | 772879,709 | 0,008 | 772879,717 | 0,008 | -0,008 | 9819310,471 | 0,008 | 9819310,449 | 0,008 | 0,022 | 2841,100 | 0,010 | 2841,104 | 0,010 | -0,004 |

Anexo 4: Mapas de Pendiente y Aspecto del SRTM 90 m. DEM de Ecuador Continental

A continuación la Tabla 39 muestra los valores de pixel del DEM, en unidad de grados, de la pendiente y orientación (aspecto) de los puntos de control indicando la ubicación de los deslizamientos rotacionales, los puntos de monitoreo de GPS diferencial y extensómetro artesanal, los cuales fueron identificados por el INIGEMM (León & Pilatasig, Noviembre 2006), (León et al., Enero 2007), (León & Castillo, Junio 2007).

| Monitoreo | Pendiente (0°-89°) | Aspecto | | Latitud | Longitud |
|-----------|-----------------------|-----------|-------------|-------------|--------------|
| | | (0°-360°) | Orientación | | |
| A1DA1 | 28,26 | 277,05 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°32'37.52" |
| A2DA2 | 38,09 | 263,99 | Oeste | 1°37'37.40" | 78°32'49.52" |
| A2DA3 | 31,36 | 279,09 | Oeste | 1°37'49.40" | 78°32'52.52" |
| A2DA4 | 28,44 | 278,71 | Oeste | 1°37'52.40" | 78°32'49.52" |
| A2DA5 | 28,09 | 293,23 | Oeste | 1°37'58.40" | 78°32'52.52" |
| A2DA6 | 27,89 | 294,07 | Oeste | 1°38'01.40" | 78°32'49.52" |
| Q1 | 28,26 | 277,05 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°32'37.52" |
| Q2 | 37,96 | 282,54 | Oeste | 1°37'58.40" | 78°32'40.52" |
| QR01 | 27,84 | 270,00 | Oeste | 1°38'25.40" | 78°32'46.52" |
| QR02 | 29,68 | 280,46 | Oeste | 1°38'22.40" | 78°32'46.52" |
| QR03 | 33,14 | 283,10 | Oeste | 1°38'16.40" | 78°32'49.52" |
| QR04 | 30,55 | 288,86 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°32'49.52" |
| QR05 | 17,79 | 279,92 | Oeste | 1°38'07.40" | 78°33'10.52" |
| QR06 | 23,89 | 286,85 | Oeste | 1°38'07.40" | 78°32'49.52" |
| QR07 | 24,00 | 282,49 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°32'52.52" |
| QR08 | 23,10 | 279,87 | Oeste | 1°38'13.40" | 78°32'55.52" |
| QR09 | 25,87 | 269,99 | Oeste | 1°38'19.40" | 78°33'01.52" |
| QR10 | 25,67 | 293,16 | Oeste | 1°38'28.40" | 78°33'01.52" |
| QR11 | 20,47 | 264,79 | Oeste | 1°38'19.40" | 78°33'07.52" |
| QR12 | 21,24 | 266,31 | Oeste | 1°38'07.40" | 78°33'19.52" |
| QR13 | 14,03 | 290,90 | Oeste | 1°37'55.40" | 78°33'04.52" |
| QR14 | 10,33 | 314,80 | Oeste | 1°38'13.40" | 78°33'31.52" |
| QR15 | 14,86 | 290,87 | Oeste | 1°38'19.40" | 78°33'19.52" |
| QR16 | 16,07 | 297,68 | Oeste | 1°38'16.40" | 78°33'22.52" |
| QR17 | 16,18 | 312,55 | Oeste | 1°38'13.40" | 78°33'25.52" |
| QR18 | 9,58 | 300,47 | Oeste | 1°38'07.40" | 78°33'28.52" |
| QR19 | 2,17 | 289,16 | Oeste | 1°37'55.40" | 78°33'31.52" |
| QR20 | 25,11 | 286,59 | Oeste | 1°38'10.40" | 78°33'01.52" |

Tabla 39: Valor de pendiente y aspecto del pixel del DEM, el cual contiene los puntos de control de la ubicación de los movimientos en masa, monitoreo de desplazamiento mediante GPS diferencial y extensómetro artesanal. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

A continuación el Mapa de Pendiente (Figura 90) extraído del SRTM 90m DEM en el área de estudio. La extensión del mapa contiene las provincias de Tungurahua y Chimborazo.

Como referencia del área de estudio se denota la ubicación de los volcanes Igualata, Tungurahua y Chimborazo.

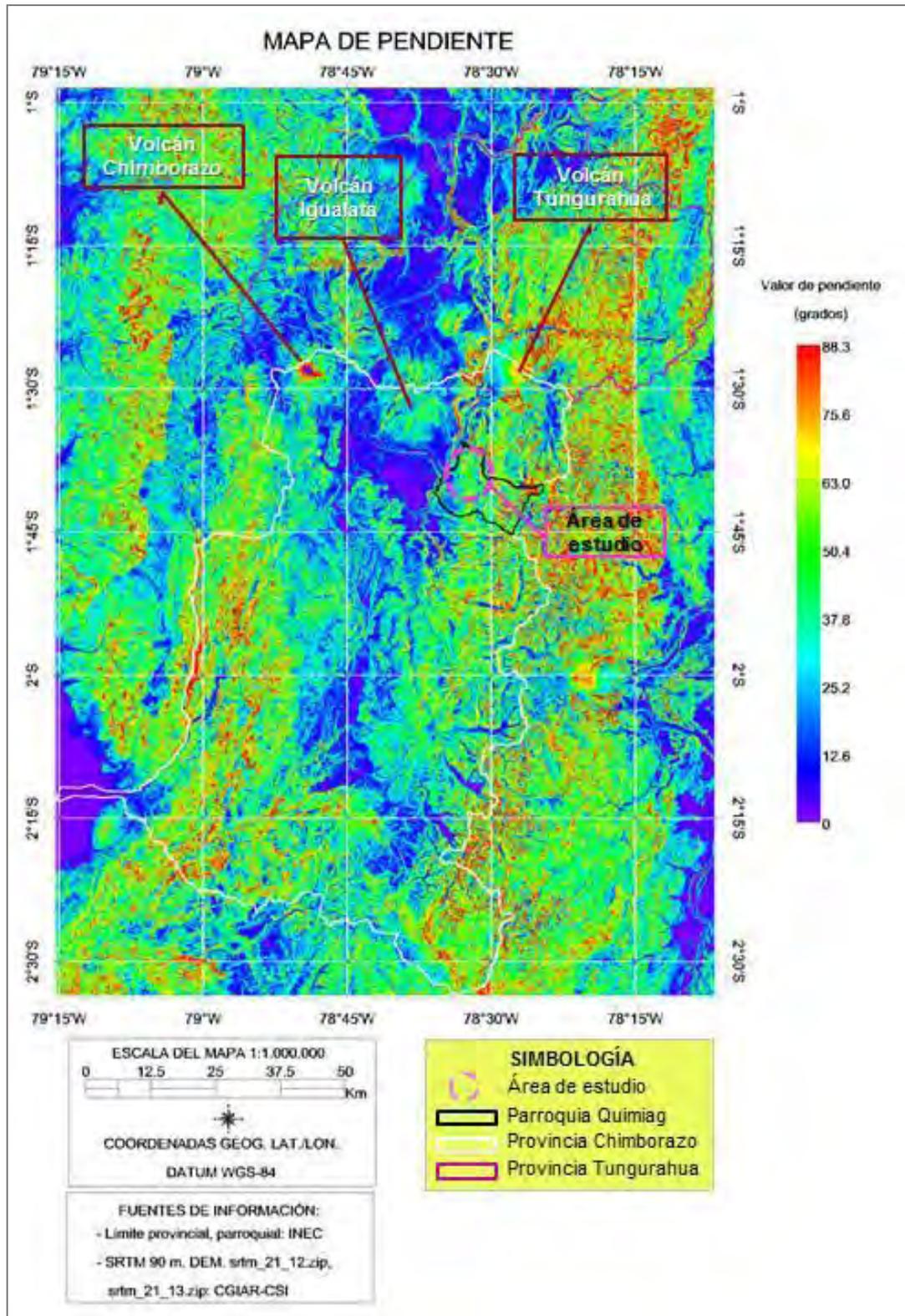


Figura 90: Mapa de Pendiente de las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

A continuación el Mapa de Aspecto (Figura 91) extraído del SRTM 90m DEM en el área de estudio. La extensión del mapa contiene las provincias de Tungurahua y Chimborazo. De acuerdo al valor de grados del mapa de aspecto se obtiene la orientación del DEM.

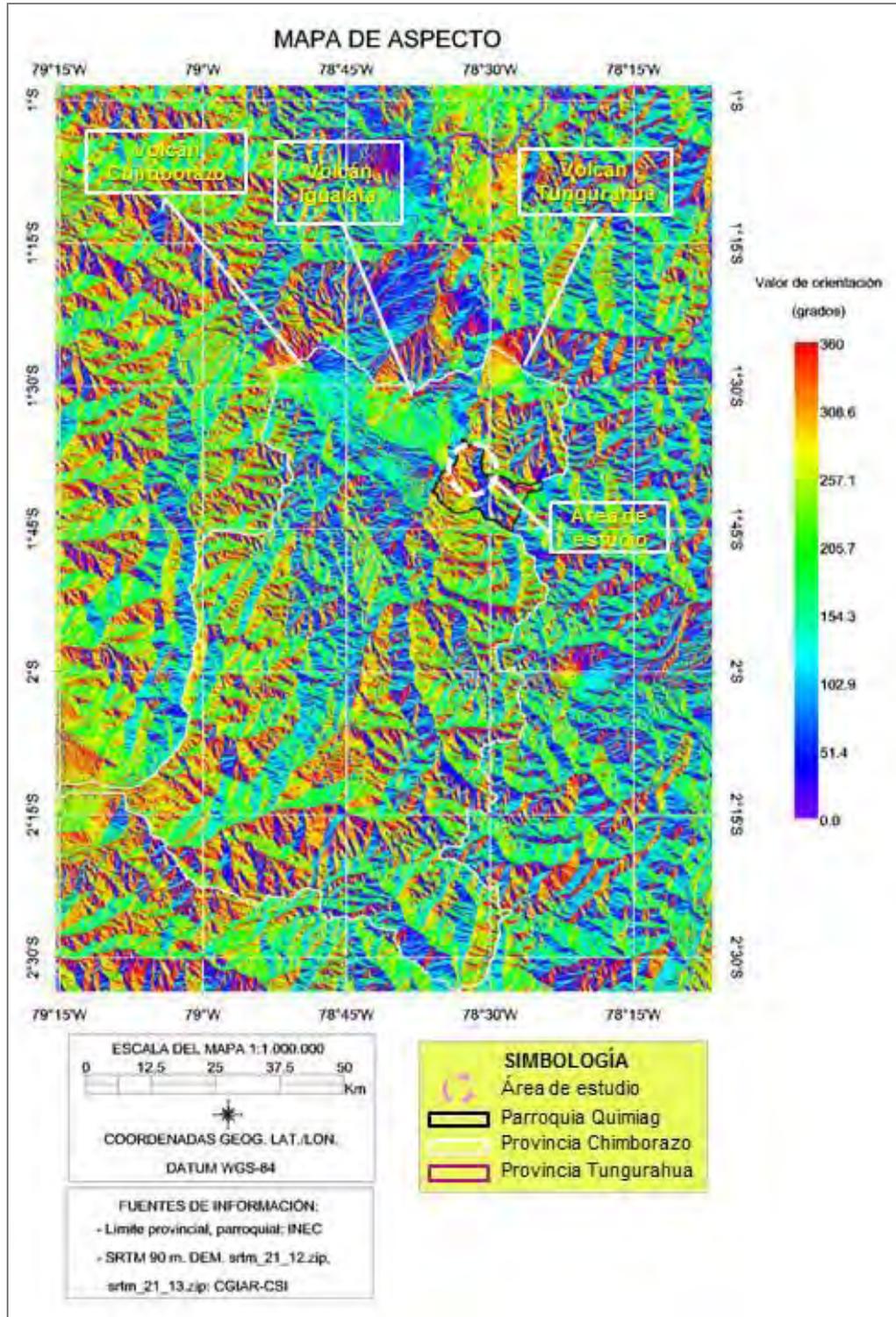


Figura 91: Mapa de Aspecto de las provincias de Tungurahua y Chimborazo. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

Anexo 5: Disponibilidad de órbitas para ERS-1/2

La Tabla 40 muestra las fechas de adquisición de las imágenes ERS y la disponibilidad de órbitas para ERS-1/2. A continuación los colores de la leyenda indican los periodos de disponibilidad de órbitas, daños operativos de los satélites.

-  Disponibilidad de órbitas precisas para ERS-1 en el periodo 30 Julio 1991–31 Mayo 1996
-  Órbitas de entrega-rápida para ERS-1, no completas todo el mes
-  ERS-1 no fue rastreado por ningún sistema de laser de satélite entre Julio 1996 (cuando ERS-1 fue puesto en hibernación) y Julio 1998 cuando fue oficialmente revivido, por lo tanto en ese periodo fue imposible proveer órbitas precisas
-  Disponibilidad de órbitas de entrega-rápida para ERS-1 en el periodo 18 Junio 1999-12 Marzo 2000 (fin de vida)
-  Disponibilidad de órbitas precisas para ERS-2 en el periodo 28 abril 1995–8 agosto 2003
-  Después de noviembre 1999 la calidad de las órbitas se va degradando de poco a poco debido a los periodos de alta actividad solar. Además, Sandwell (2008) señala que a finales de 1999 el giroscopio en ERS-2 falló y fue difícil controlar el ángulo oblicuo (squint angle) de la nave espacial, por lo que datos adquiridos posteriores a esta fecha pueden tener el centroide Doppler fuera del rango aceptable y ser menos útiles para fines de interferometría.

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR (RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

| Año | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|------|-------|---------|------------|-----------|------|----------|-------|-----------|------------|---------|------------|--|
| 1991 | | | | | | | | | | | | |
| 1992 | | | | | | | | | | | | |
| 1993 | | | | | | | | | | | | |
| 1994 | | | | | | | | | | | | |
| 1995 | | | | | | | | | | | | |
| 1996 | | | | | | | | | | | | |
| 1997 | | | | | | | | | | | | ERS1-Dic16 |
| 1998 | | | | | | | | | | | | ERS1-Dic01 ERS1-Dic17 ERS2-Dic18 |
| 1999 | | | | | | 18 Junio | | | | | | ERS1-Dic21 |
| 2000 | | | 12 Marzo | | | | | | | | ERS2-Nov01 | |
| 2001 | | | | | | | | | | | ERS2-Nov21 | |
| 2002 | | | | | | | | ERS2-Ag28 | | | | ERS2-Dic11 |
| 2003 | | | ERS2-Mar26 | | | | | | | | | |
| 2004 | | | | | | | | | | | | |
| 2005 | | | | | | | | | | | | |
| 2006 | | | | | | | | | | | | |
| 2007 | | | | | | | | | | | | |
| 2008 | | | ERS2-Mar19 | ERS2-Ab23 | | | | | | | | |

Tabla 40: Disponibilidad de órbitas para ERS-1/2. Elaborado por: Tannia Mayorga T.

Anexo 6: Ingreso de comandos en IDL para corregir datos ERS

A continuación con el comando *file_move* se procedió a renombrar cada uno de los archivos que forman una escena ERS del producto RAW:

```
ENVI> cd,'C:\ERS'  
ENVI> file_move,'3663.raw','DAT_01.001'  
ENVI> file_move,'3663.hdr2','LEA_01.001'  
ENVI> file_move,'3663.hdr1','VDF_DAT.001'  
ENVI> file_move,'3663.hdr3','NUL_DAT.001'
```

Para cambiar la codificación de la fecha de adquisición de la imagen de radar:

```
ENVI> cd,'C:\ERS'  
ENVI> leader=file_info('LEA_01.001')  
ENVI> print,leader  
{ C:\ERS\LEA_01.001 1 1 1 0 1 0 0 0 0 0 0  
 0 0 0 438 1355234723 1355234723  
 1353603234 28228}  
ENVI> print,leader.SIZE  
28228  
ENVI> lea=bytarr(leader.SIZE)  
ENVI> openr,1,'LEA_01.001'  
ENVI> readu,1,lea  
ENVI> close,1  
ENVI> print,string(lea[720+68:720+100])  
17-DEC-1998_15:31:44.909
```

De acuerdo al formato CEOS, el formato de contenido de la fecha es el siguiente:

<YYYYMMDDhhmmssttt\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$\$>. A continuación se ingresó los siguientes comandos para

el cambio de la codificación de la fecha:

```
ENVI> fechamedia2=string('19981217153144909')  
ENVI> lea[720+68:720+68+32-1]=byte(0)  
ENVI> lea[720+68:720+68+strlen(fechamedia2)-1]=byte(fechamedia2)  
ENVI> print,string(lea[720+68:720+68+strlen(fechamedia2)-1])  
19981217153144909  
ENVI> openw,1,'LEA_01.001'  
ENVI> writeu,1,lea  
ENVI> print,string(lea[720+68:720+68+17-1])  
19981217153144909  
ENVI> close,1
```

Aumentar espacio en blanco:

```
ENVI> print,string(lea[720+324:720+331])  
13600  
ENVI> print,byte(string('13600',format='(I8)'))  
32 32 32 49 51 54 48 48  
ENVI> print,string(byte(string('13600',format='(I8)')))  
13600  
ENVI> lea[720+324:720+331]=byte(string('13600',format='(I8)'))  
ENVI> print,string(lea[720+324:720+331])  
13600  
ENVI> openw,1,'LEA_01.001'  
ENVI> writeu,1,lea  
ENVI> close,1
```

Anexo 7: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

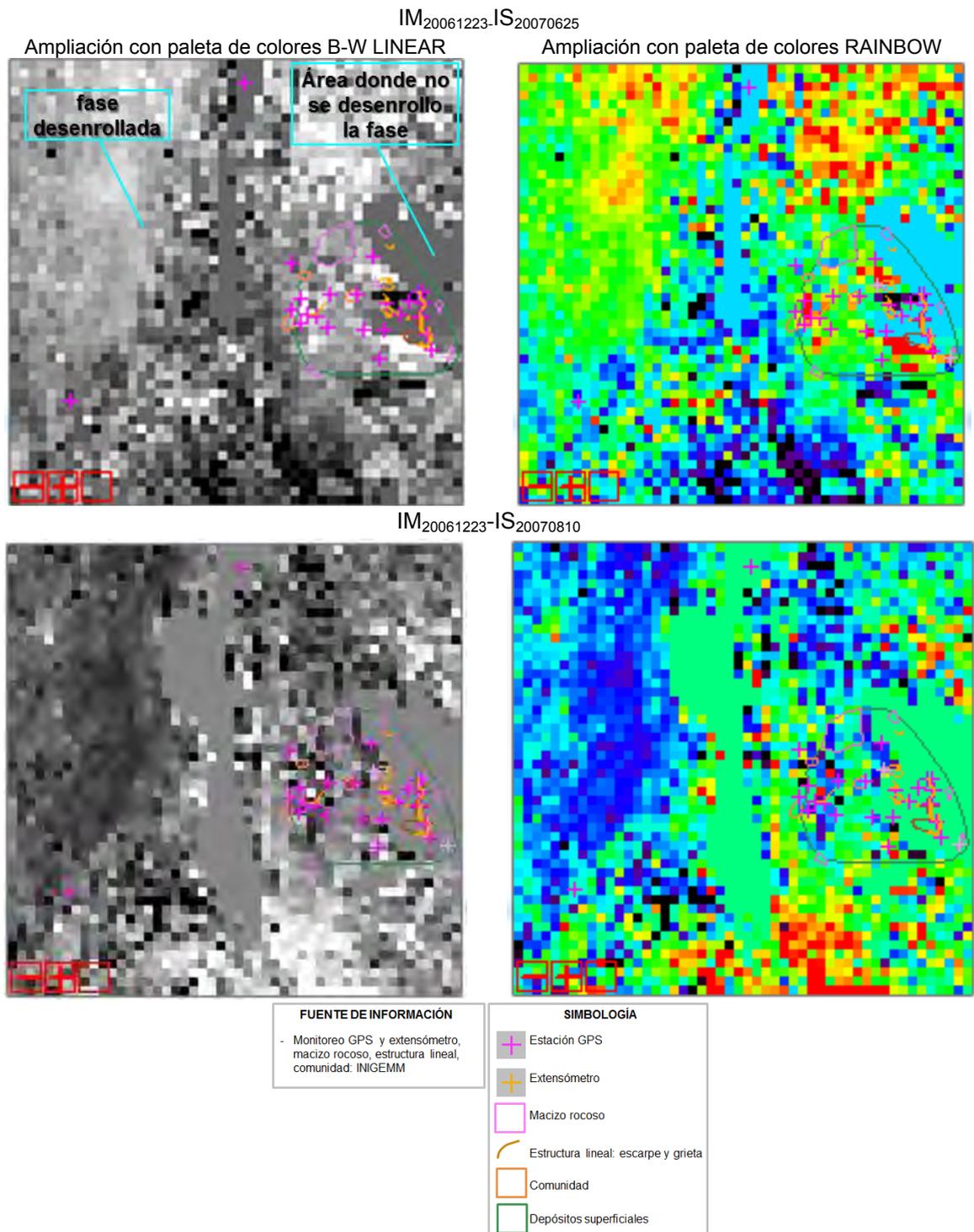


Figura 92: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

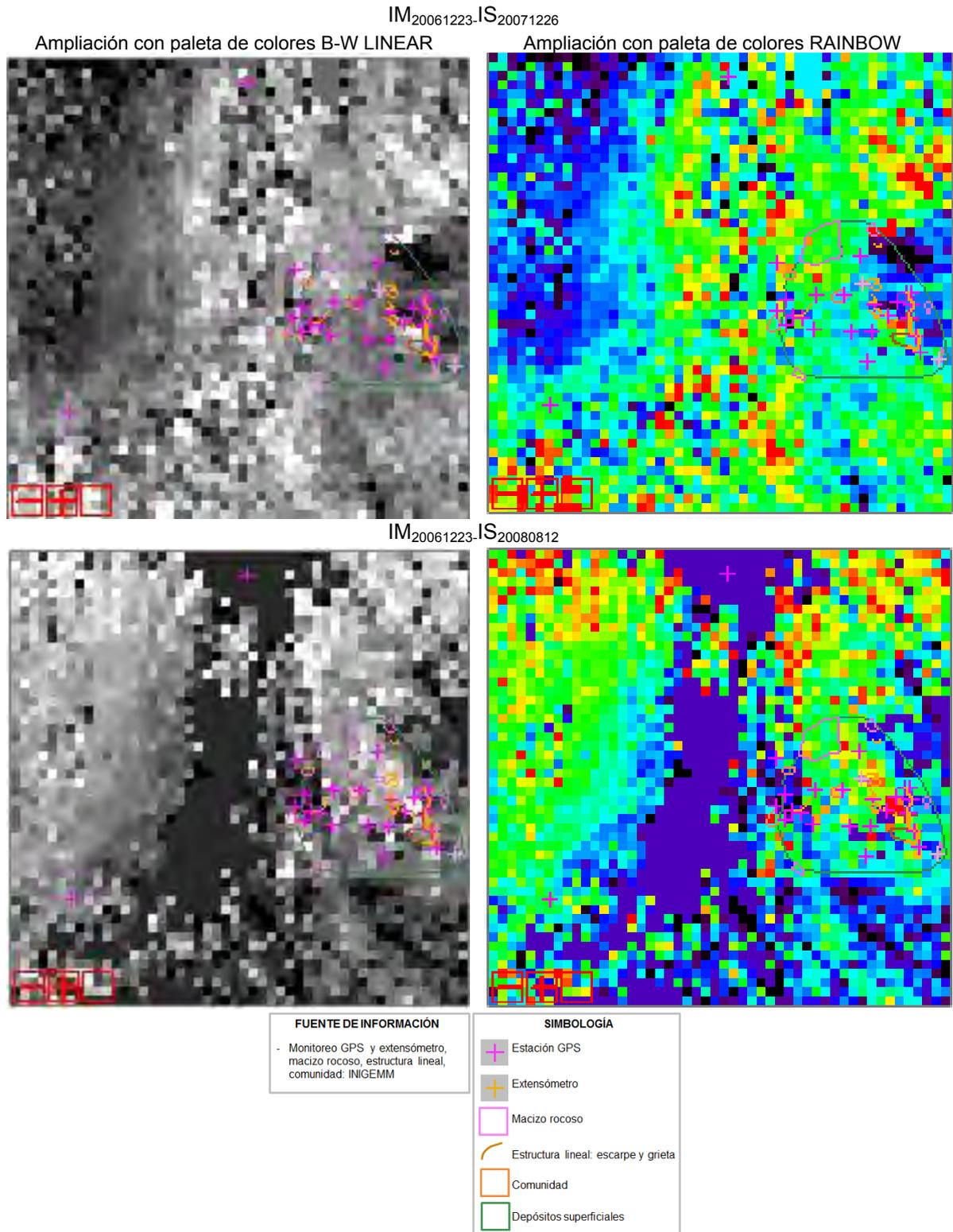


Figura 93: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

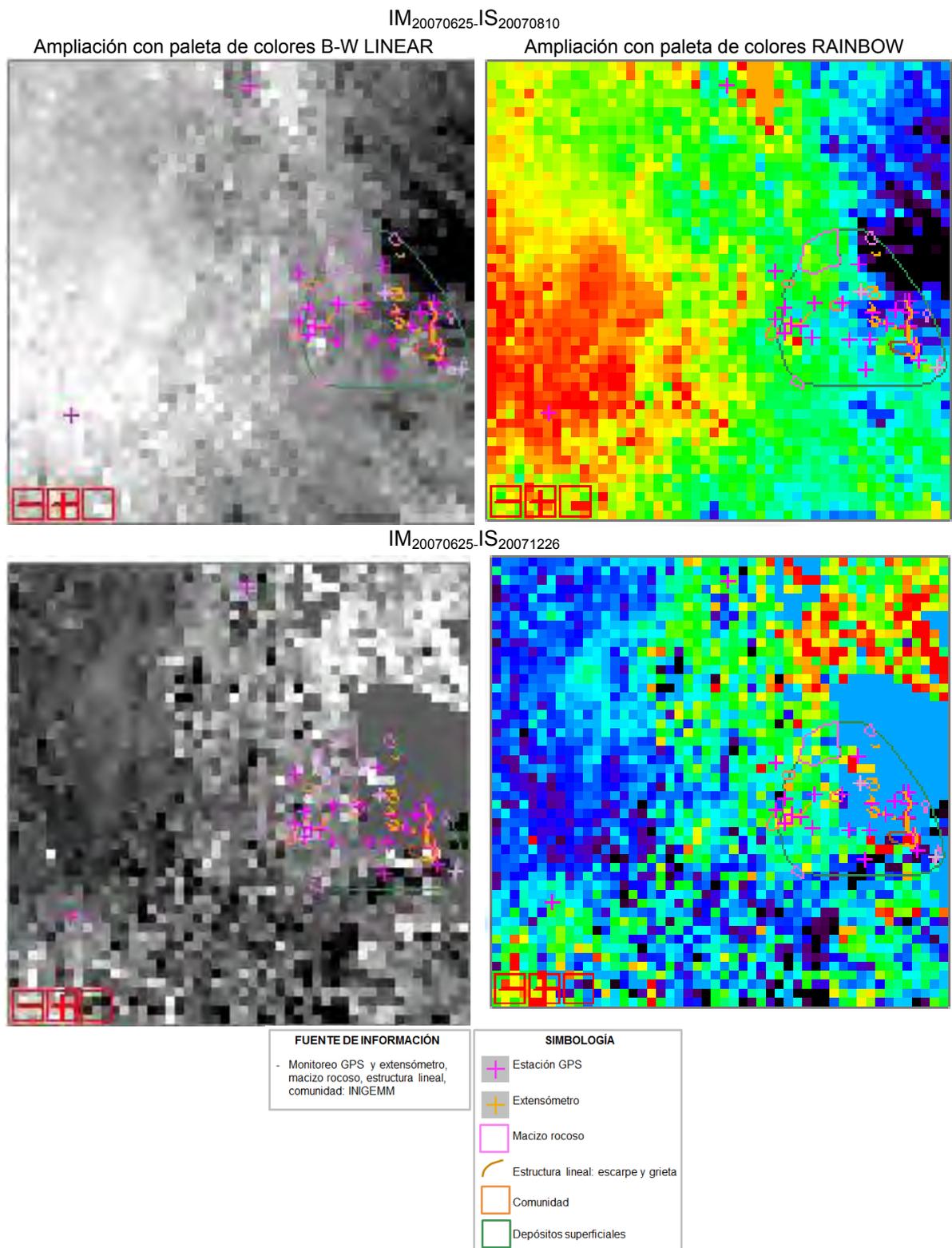


Figura 94: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

DETERMINAR LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR MOVIMIENTOS EN MASA USANDO INTERFEROMETRÍA SAR
(RADAR DE APERTURA SINTÉTICA)

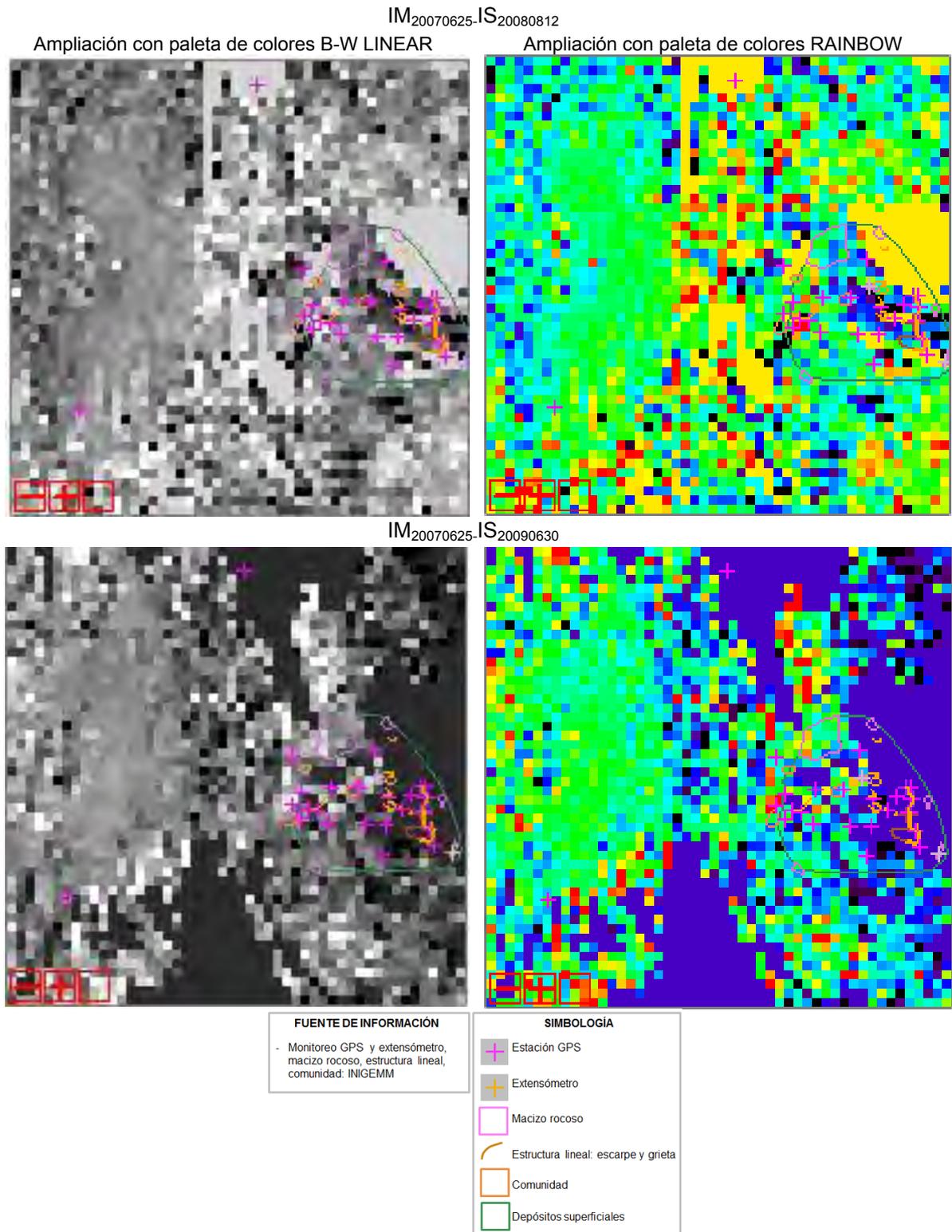


Figura 95: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

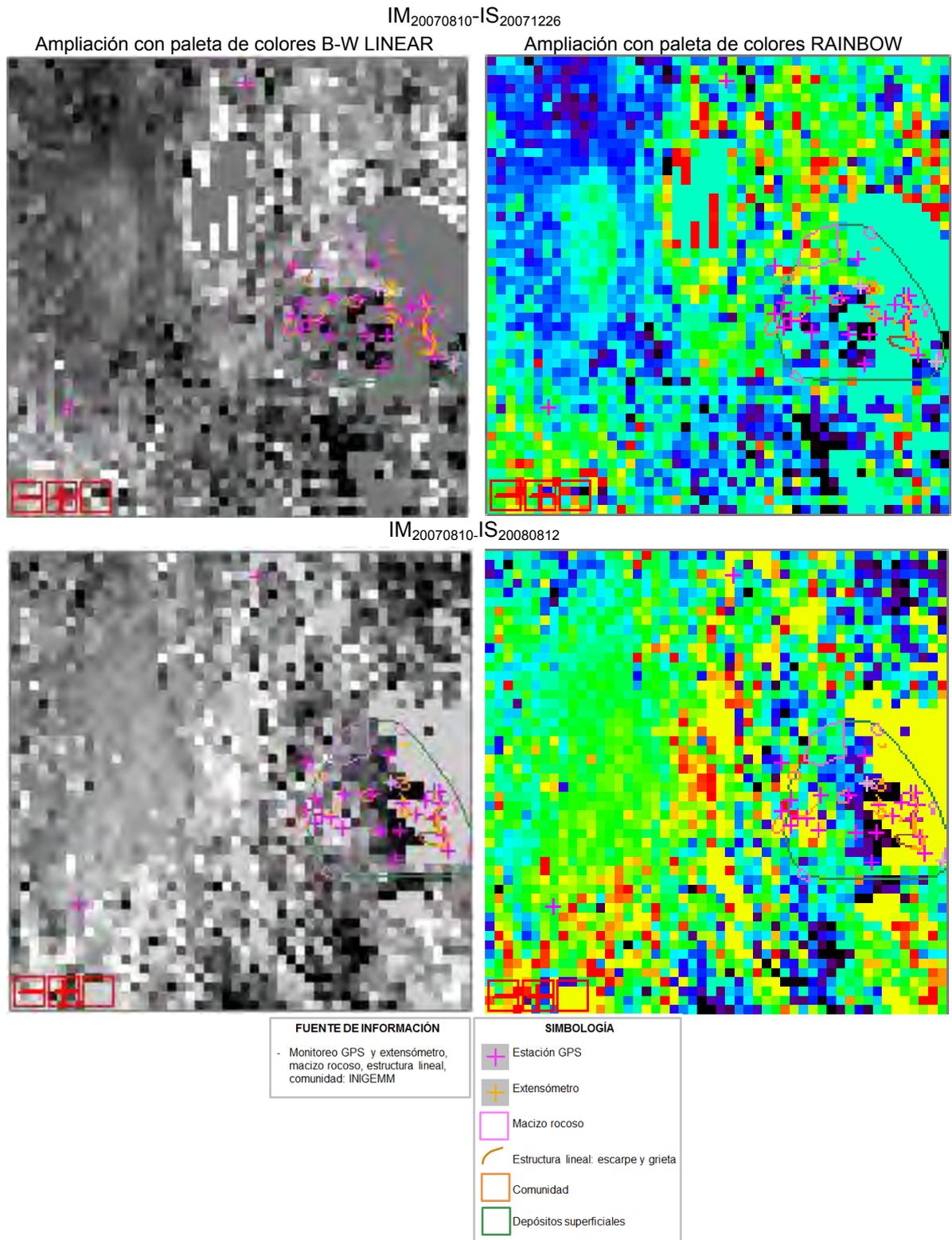


Figura 96: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

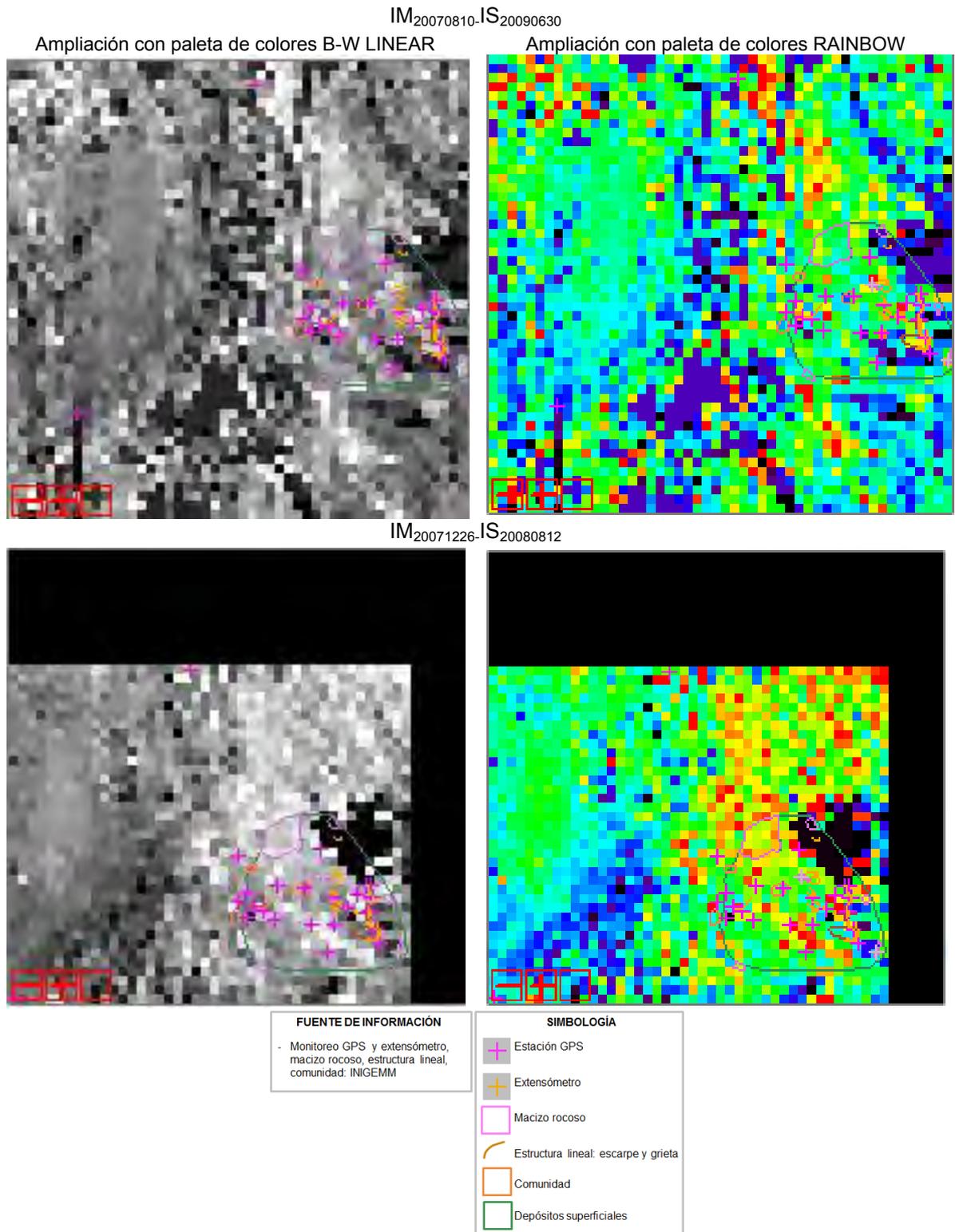


Figura 97: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado

IM₂₀₀₈₀₈₁₂-IS₂₀₀₉₀₆₃₀

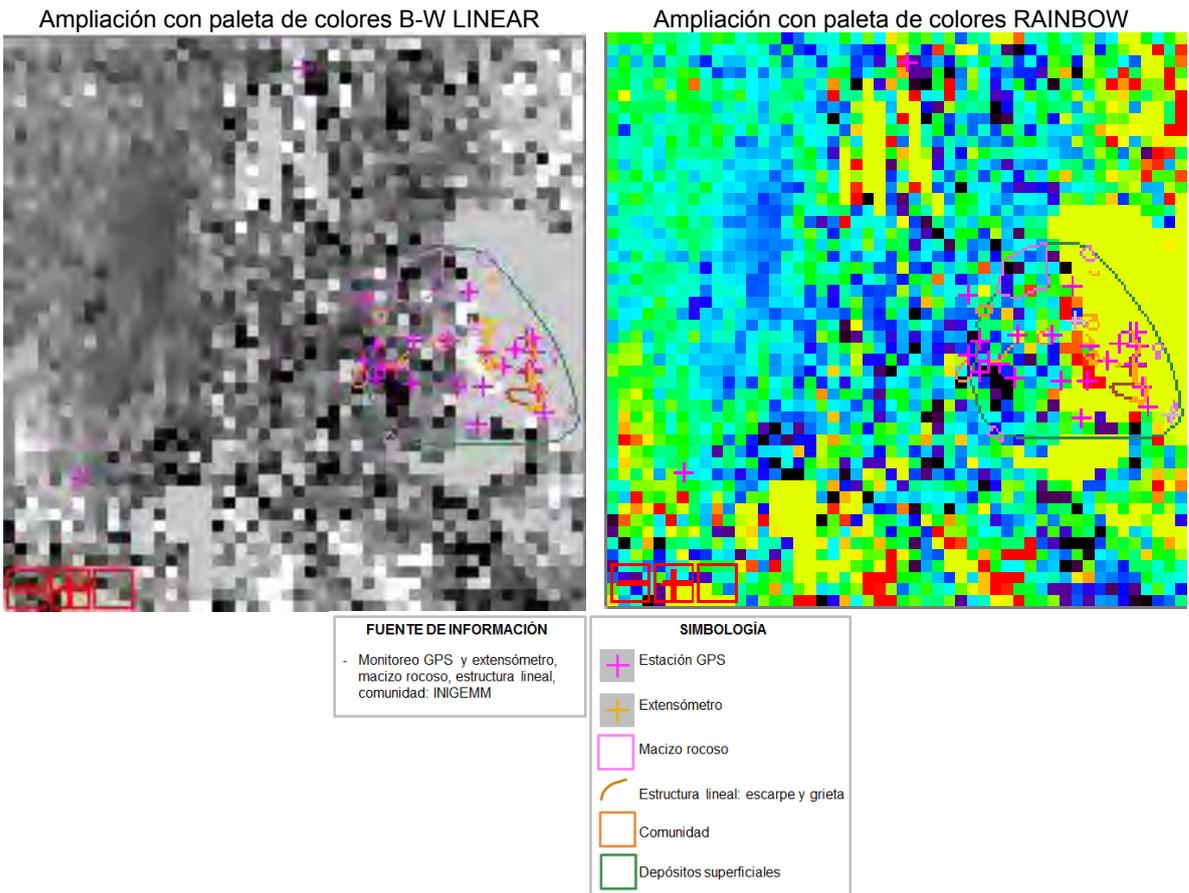


Figura 98: Ampliación del área de monitoreo en la fase absoluta en centímetros del interferograma diferencial geocodificado, filtrado y desenrollado